



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

# Diplomarbeit

## Wert der Instandhaltung

Neue Ansätze bei der Entwicklung von Instandhaltungsstrategien

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Master of Science unter der Leitung von

**Prof. Dr. Kurt Matyas**

Institut für Managementwissenschaften  
Bereich Betriebstechnik und Systemplanung

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

**Alexandra Sabine Hochreiner**

**Matr.Nr. 0503683 (066 482)**

**Penzingerstraße 129-131**

**1140 Wien**

Wien, im September 2011

---

Vorname, Nachname

## ***Kurzfassung***

### ***Wert der Instandhaltung***

#### **Neue Ansätze in der Entwicklung von Instandhaltungsstrategien**

Je nach Unternehmensart bestehen unterschiedliche Anforderungen an Instandhaltung, was unterschiedliche Strategien erfordert. Die Diplomarbeit beschäftigt sich mit diesen, von denen manche zu Instandhaltungsprogrammen ausgebaut wurden. Detailliert wird auf die risikoorientierte Instandhaltung eingegangen, bei der die Beiträge einzelner Komponenten zum Ausfall berechnet werden und somit Wahrscheinlichkeiten für Gesamtausfälle bestimmt werden können. Weiteres wird die Instandhaltung aufgrund der Erkennung von Komponenten- aber auch Produktzuständen erörtert. Bestimmte Parameter werden gemessen, um Rückschluss über Verschleiß, die Notwendigkeit eines Austausches oder z.B. unsachgemäße Komponentenbeanspruchung zu erhalten, die sich auf die Instandhaltungsnotwendigkeit auswirken. Diese Notwendigkeit besteht, um die Anlagenverfügbarkeit hoch zu erhalten. Abschließend wird ein Vorschlag für die Zusammensetzung des Werts der Instandhaltung gemacht. Dieser soll eine Aussage darüber treffen, welchen Wert eine Instandhaltungstätigkeit für ein Unternehmen bringt.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung / Aufgabenstellung	1
1.2	Zielsetzung	1
<b>2</b>	<b>Instandhaltungsstrategien</b>	<b>3</b>
2.1	Maßnahmen	3
2.2	Grundlegende Strategien	5
2.2.1	Reaktive Instandhaltung (auch ausfallsorientierte oder störungsbedingte Instandhaltung)	5
2.2.2	Zeitgesteuerte Instandhaltung (präventiv, periodisch vorbeugende Instandhaltung)	6
2.2.3	Zustandsorientierte (prädiktive resp. vorausschauende) Instandhaltung (engl. on condition monitoring)	7
2.2.4	Proaktive (entgegenwirkende) Instandhaltung	8
2.3	Erweiterungen der klassischen Instandhaltungs-strategien	10
2.3.1	Korrektive Instandhaltung (engl. Corrective Maintenance)	10
2.3.2	Quick Start Reliability QSR	10
2.3.3	Risikobasierte Instandhaltung RBM	10
2.3.4	Operator Driven Reliability ODR (dt.: Bedienergestützte Zuverlässigkeit)	11
2.3.5	Reliability Centered Maintenance RCM	11
2.3.6	Streamlined Reliability Centered Maintenance SRCM	14
2.3.7	Preventive Maintenance Optimisation PMO	14
2.3.8	Total Productive Maintenance TPM	14
2.4	Zuverlässigkeitstheoretische Ansätze	21
2.4.1	Kenngößen der Zuverlässigkeit	21
2.4.2	Einfache Systeme	24
2.4.3	Strukturierte Systeme	25
2.4.4	Lebensdauerverteilungen und deren Rolle in der Zuverlässigkeit	26
<b>3</b>	<b>Risikobasierte Strategieauswahl</b>	<b>34</b>
3.1	Fault Tree Analysis FTA (Fehlerbaumanalyse)	37
3.1.1	Die Boolsche Algebra als Hilfsmittel in der FTA	40
3.1.2	Importanzkenngößen	45
3.1.3	Brückenkonfiguration	50
3.2	Markoff Modelle	54
3.2.1	Markoff´sche Minimalschnitte	55
3.2.2	Beispiel zum Markoff Graph mit drei Komponenten	56
3.2.3	Erweiterung des Markoff Modells	58

3.3	Failure Mode & Effects Analysis FMEA ( Fehler - Möglichkeits- und Einfluss Analyse).....	60
3.4	Gefahrenanalyse (Preliminary Hazard Analysis PHA).....	62
3.5	Weitere Herangehensweisen zur Risikobeurteilung .....	65
3.5.1	Qualitative Risikobeurteilung mit anschließender Strategiewahl .....	65
<b>4</b>	<b>Anlagenzustandserkennung aus Maschinen und Produktdaten .....</b>	<b>68</b>
4.1	Messung physikalischer Größen.....	69
4.1.1	Elektronenstrahl-Oszillograph .....	69
4.1.2	Analog/Digital (A/D) Wandler .....	70
4.2	Vibrationen resp. Schwingungen .....	71
4.2.1	Grundlagen zu Schwingungen .....	71
4.2.2	Messaufbau .....	74
4.3	Thermographie .....	80
4.3.1	Grundlagen zu Thermographie .....	80
4.3.2	Einsatzgebiet der Thermographie in der Instandhaltung .....	82
4.4	Tribologie.....	85
4.4.1	Schmierölanalyse .....	85
4.4.2	Verschleißpartikelanalyse .....	86
4.4.3	Ferrographie .....	88
4.5	Ultraschallanalyse .....	89
4.6	Prozessdatenüberwachung .....	90
4.6.1	Pumpen .....	90
4.6.2	Gebälse .....	91
4.6.3	Fördergeräte.....	91
4.6.4	Kompressoren .....	91
4.6.5	Getriebe.....	92
4.7	Visuelle Inspektion.....	93
<b>5</b>	<b>Wert der Instandhaltung .....</b>	<b>94</b>
5.1	Instandhaltungskosten.....	96
5.1.1	Qualitative Kostenbestimmung.....	96
5.1.2	Quantitative Kostenbestimmung .....	96
5.2	Verbesserungswert einer Instandhaltungs-Intensivierung.....	100
5.2.1	Ausfallwahrscheinlichkeitsverbesserung $\Delta F(t)$ .....	100
5.3	Der Instandhaltungswert.....	102
5.3.1	Einschränkungen.....	104
5.3.2	Ausblick .....	104
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>106</b>
<b>7</b>	<b>Verzeichnisse .....</b>	<b>108</b>

7.1	Verwendete Literatur .....	108
7.2	Tabellen.....	111
7.3	Abbildungen .....	111

# 1 Einleitung

Produktionsbedingungen die sich häufig und oft ändern, sowie das Streben nach Wettbewerbsfähigkeit, haben den Blick auch auf Instandhaltungsstrategien gelenkt, da Instandhaltung die Kosten der Güterproduktion beeinflusst. Fallen Anlagen aus, führt dies wegen der heutzutage großen Produktionszahlen zu Verlusten, die unter Umständen ein großes Ausmaß annehmen. Instandhaltung von Anlagen hat darum zum Ziel, die Produktion aufrecht zu erhalten, in dem verschiedene Maßnahmen dazu beitragen, dass es erst gar nicht zum Stillstand wegen Gebrechen kommt. Überdies vermeidet Instandhaltung teure Folgeschäden, die der Bruch einer Komponente möglicherweise aufgrund einer Kettenreaktion hervorruft.

## 1.1 Problemstellung / Aufgabenstellung

Über die Zeit entwickelten sich für unterschiedliche Produktionsbedingungen verschiedene Strategien zur Instandhaltung. Aktuelle Themen in der Instandhaltung sind antizipative Methoden, um Zustände in der Zukunft sozusagen „voraussagen“ zu können. Die Aufarbeitung der einzelnen Strategien und eine detaillierte Erörterung von Methoden um Zustände voraussehen zu können, ist Aufgabe der Diplomarbeit. Dazu gehören in erster Linie die risikobasierte Strategie und die Zustandserkennung aus Produkt und Produktionskenngrößen sowie deren Kennwerten. Weiteres soll der Fragestellung nachgegangen werden, welchen Wert eine Instandhaltung für ein Unternehmen hat. In der Industrie herrscht noch die gängige Meinung vor, dass Instandhaltung in erster Linie ein Kostenverursacher ist. Der Wert einer Investition in diesen Unternehmensbereich lässt sich nicht quantifizieren, was aber im Interesse der Firmen wäre.

Die aktuell gängigen Instandhaltungsstrategien sollen erörtert werden. Dabei soll speziell auf die risikobasierte Instandhaltung eingegangen werden, bei der die Beiträge der einzelnen Anlagenkomponenten auf den Gesamtanlagenausfall ermittelt werden. Auch die Produktionsüberwachung mithilfe spezieller Zustandsmonitoringstrategien soll genauer betrachtet werden. Die derzeit gängigen Hilfsmittel und deren Möglichkeiten werden in dieser Arbeit zusammengefasst. Schließlich soll der Frage nach dem Wert einer bestimmten Instandhaltungsmaßnahme nachgegangen werden und untersucht werden, was diesen Wert beeinflusst.

## 1.2 Zielsetzung

Zum Einen ist eine Zusammenfassung der aktuell gängigen Strategien der Instandhaltung das Ziel dieser Diplomarbeit, zum Anderen sollen neue Ansätze in diesem Feld recherchiert und erläutert werden. Ein Schwerpunkt wird dabei auf die risikobasierte Strategieauswahl

gelegt, ein anderer, auf Anlagenüberwachung, welche auf Maschinen- oder Produktdaten basiert. Als Grundlage dient aktuelle Literatur. Letztendlich soll aufbauend auf alle genannten Punkte der Wert der Instandhaltung abgeleitet werden. Der grundsätzliche Ansatz ist, die Kosten in der Instandhaltung zu bestimmen, und welche Einflüsse es in dem Prozess außerdem gibt, die sich auf den Wert auswirken könnten. Des Weiteren ist es notwendig, zu betrachten, welche Kosten durch Instandhaltung eingespart werden könnten. Der Begriff von „Wert“ soll definiert werden und nach Möglichkeit soll eine Formel für den Wert der Instandhaltung das Ergebnis sein.

## 2 Instandhaltungsstrategien

Historisch haben sich in der Instandhaltung verschiedene Strategien entwickelt. Dies geschah vor allem, weil sich der Komplexitätsgrad der Produktionsanlagen erhöht hat und die Produktivität im letzten Jahrhundert um Vielfaches gestiegen ist. Während es um 1900 noch selbstverständlich war, eine Reparatur nach dem Ausfall der Anlage vorzunehmen (reaktive Instandhaltung), würde dies unter den heutigen Bedingungen zu starken (finanziellen) Einbrüchen führen. Hohe Durchsatzzeiten verursachen bei einem unvorhergesehenen Anlagenstillstand großen wirtschaftlichen Entgang. Eine potentielle Gefährdung von Sicherheit und Umwelt ist ein anderer Aspekt, der z.B. bei chemischen Produktionsanlagen berücksichtigt werden muss und nach vorausschauenden Instandhaltungsstrategien verlangt, da auf keinem Fall Versagen oder Gebrechen auftreten dürfen. Aus diesen und weiteren Gründen wird heute versucht, schon möglichst bald zu erkennen, wo Instandhaltung notwendig ist, um situationsabhängig in passender Weise zu reagieren. Da Kosten und Ressourceneinsatz eine große Rolle spielen, wird u.a. der gezielte Einsatz dieser beiden Einheiten verfolgt. In den folgenden Abschnitten werden verschiedenste Instandhaltungsstrategien sowie deren Charakteristika genauer erläutert.

### 2.1 Maßnahmen

Maßnahmen sind in der Instandhaltung strategieunabhängig. Sie werden als ein Schritt oder als Konsequenz der Strategien durchgeführt. Die Norm teilt diese Maßnahmen in Wartung, Inspektion, Verbesserung und Instandsetzung ein. Die letzten beiden Begriffe können als Unterkategorie der Überholung<sup>1</sup> gesehen werden.

**Wartung** hat das Ziel, den Sollzustand aufrecht zu erhalten (Reinigen, Justieren, Kalibrieren, auffüllen von Betriebs- wie Schmier- und Kühlmittel). Hauptziel ist das Erhalten des Abnutzungsvorrates.<sup>2</sup>

**Inspektion** beinhaltet das Überprüfen auf: Verschleiß, Korrosion, Leckage-Stellen, gelockerte Verbindungen, periodisches oder kontinuierliches Messen und Auswerten sowie alle anderen Tätigkeiten, die den aktuellen Zustand der Anlage feststellen und bewerten und die Folgeschritte zu bestimmen.

**Überholung** ist das Zugänglichmachen von Komponenten und Anlagenteilen, um diese, falls nötig, auszutauschen.

---

<sup>1</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 338f.

<sup>2</sup> Vgl. Ryll, 2010, S. 23

**Instandsetzung** verändert eine Komponente etc. dahingehend, dass sie den funktionsfähigen Zustand wieder herstellt, also „auf das gleiche Niveau wie vor einem Ausfall ohne Verbesserungen“<sup>3</sup> herstellt. Ausgenommen davon sind Verbesserungen.<sup>4</sup>

**Verbesserung** vereint technische Veränderungen mit administrativen Veränderungen an der Anlage oder Komponente mit dem Ziel einer gesicherten Funktion, ändert die Funktion aber nicht<sup>5</sup>.

---

<sup>3</sup> DIN 31051

<sup>4</sup> Vgl. DIN 31051

<sup>5</sup> Vgl. DIN 31051

## 2.2 Grundlegende Strategien

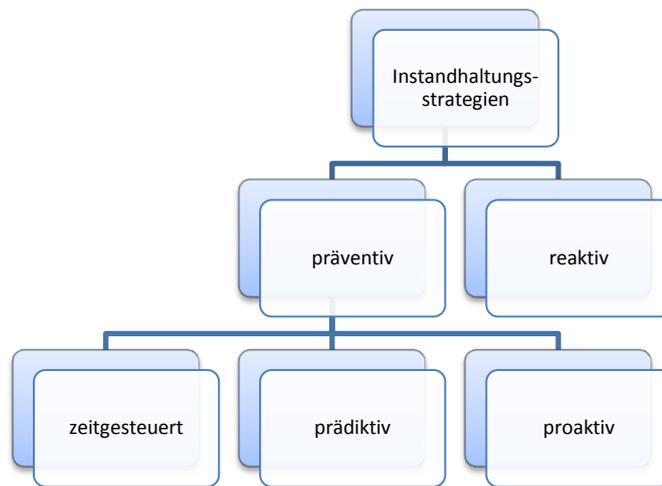


Abbildung 1: Zuordnung der Instandhaltungsstrategien

Die erläuterten Strategien stellen eine Basis an Möglichkeiten in der Instandhaltung dar, aus denen sich je nach Anforderung und Bedürfnis im Prozess der Produktion weitere Strategien entwickeln lassen. Die in Abschnitt 2.3 festgehaltenen Ableitungen bauen jeweils zumindest auf einer dieser Grundstrategien auf.

### 2.2.1 Reaktive Instandhaltung (auch ausfallsorientierte oder störungsbedingte Instandhaltung)

Es findet keine Überwachung, Wartung oder sonstiger Eingriff im Rahmen von Instandhaltung statt. Dies ergibt längst mögliche Wartungsintervalle, endet jedoch sehr oft in der Zerstörung einer Komponente oder Anlage, wobei der Zeitpunkt für den Betreiber kaum vorabsehbar ist. Stillstände treten in diesen Fällen plötzlich, zu für die Produktion unpassenden Zeitpunkten, auf. Da die Reaktion auf den Schadensfall länger dauert als bei geplanten Wartungsmaßnahmen, weil das Unternehmen erst reagieren muss, dann Ersatzteile besorgen muss usw., ist die Stillstandszeit bei der reaktiven Instandhaltung wesentlich länger anzusetzen als bei präventiven Instandhaltungsstrategien. Die zu unternehmenden Schritte im Falle eines solchen Ausfalles, sowie deren zeitliche Zusammenhänge sind in Abbildung 2 dargestellt. Die reaktive Instandhaltung eignet sich nur für Anlagen(bereiche), deren Ausfall die Produktion nicht unterbricht<sup>6</sup> bzw. keine Sicherheitsgefahrenpotential mit sich bringt.

<sup>6</sup> Vgl. Matyas, 2010, S. 116

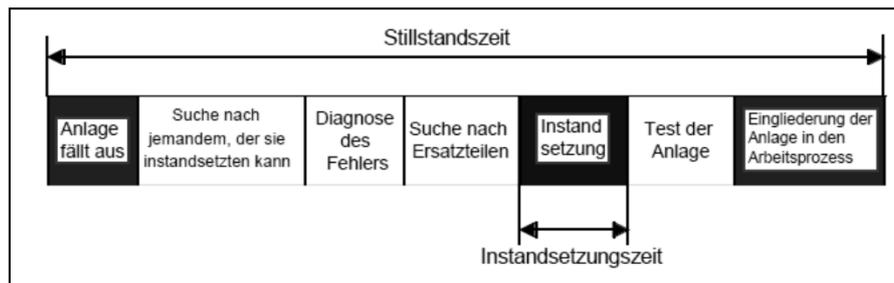


Abbildung 2: Anlagenstillstandszeit bei ungeplanten Maßnahmen<sup>7</sup>

## 2.2.2 Zeitgesteuerte Instandhaltung (präventiv, periodisch vorbeugende Instandhaltung<sup>8</sup>)

In der Literatur wird „zeitgesteuerte Instandhaltung“ synonym mit „planmäßige Instandhaltung“ (engl. preventive maintenance) verwendet. Hierbei werden Instandhaltungsmaßnahmen nach festgelegten Zeitintervallen durchgeführt z.B. nach einer bestimmten Anzahl von Betriebsstunden<sup>9</sup>. Der aktuelle Zustand der Anlage beeinflusst diese Form der Instandhaltung nicht, d.h. es muss nicht zwangsweise eine Störung oder ein Ausfall vorliegen. Um eine solche jedoch zu vermeiden, wird präventiv Verschleiß und Alterungserscheinungen gesteuert, indem der aktuelle Istzustand festgestellt und bewertet wird, um anschließend nötige Maßnahmen zu ergreifen. Typischerweise gehört zu dieser Art der Instandhaltung das Auffüllen von Verbrauchsflüssigkeiten, Schmiermitteln, Anziehen von Schrauben, Einrichten oder das Ersetzen von Verschleißteilen<sup>10</sup>.

Die größte Schwierigkeit bei der zeitgesteuerten Instandhaltung ist, dass die Notwendigkeit zur Überholung der verschiedenen Anlagenkomponenten zu unterschiedlichen Zeitpunkten auftritt. Der optimale Zeitpunkt um eine Komponente zu ersetzen, ist erst kurz vor dem Schadenseintritt. So sind die Bauteile längst möglich im Einsatz, es entsteht aber kein unplanmäßiger Schadenseintritt, dessen Behebung gewöhnlich länger und aufwändiger ist<sup>11</sup>, wie schon in 2.2.1 beschrieben. Um einen unerwarteten Ausfall völlig auszuschließen, muss sich die Instandhaltung nach der minimalen Nutzungsdauer richten, was aber ungenutztes Potential zur Folge hat, weil Komponenten unter Umständen noch länger funktionstüchtig sind. Die Dokumentation vergangener Schadensfälle hilft, durchschnittlich Nutzungsdauern und die Eignung dieser Strategie festzustellen<sup>12</sup>. Nur gut dokumentierte Komponenten, deren erwartete Lebensdauer auf eine zuverlässige Art bekannt<sup>13</sup> ist, sollten mit dieser Strategie

<sup>7</sup> Matyas, 2010, S. 116.

<sup>8</sup> Ryll, 2010, S. 24.

<sup>9</sup> VDI, 1986, Blatt 3.

<sup>10</sup> Vgl. Ahuja, 2009, S. 420.

<sup>11</sup> Vgl. Matyas, 2010, S.117.

<sup>12</sup> Vgl. Matyas, 2010, S. 118.

<sup>13</sup> Vgl. Ryll, 2010, S. 28.

gie instandgehalten werden. Sind die Austausch- bzw. Instandsetzungskosten gering im Verhältnis zu den Ausfallkosten, kann diese Strategie ohne weiteres herangezogen werden, z.B. trifft dies bei Luft- und Ölfiltern zu.<sup>14</sup> Da die Stillstände geplant und von den Instandhaltungspersonal festgelegt werden, können sie außerhalb der Produktionszeit stattfinden und eine Vorbereitung auf die Instandhaltungstätigkeiten wird ermöglicht: etwa das Besorgen der Ersatzteile, die Sicherstellung des Personals etc. All dies verkürzt die Anlagenstillstandzeit<sup>15</sup>.

### 2.2.3 Zustandsorientierte (prädiktive resp. vorausschauende) Instandhaltung (engl. on condition monitoring)

Der Austausch funktionsfähiger Anlagenkomponenten resp. Bauteile wird bei der zustandsorientierten Instandhaltung vermieden<sup>16</sup>. Eine Überwachung des Bauteilzustandes, kontinuierlich oder in periodischen Intervallen, gibt Auskunft über die Notwendigkeit von Instandhaltungsmaßnahmen. Dies erhöht die Verfügbarkeit, da unnötige planmäßige Inspektionszeiten, welche mitunter zu Anlagenstillstand führen, wegfallen<sup>17</sup> und fügt der Steuergröße „Zeit“ jene des „Zustands“<sup>18</sup> hinzu.

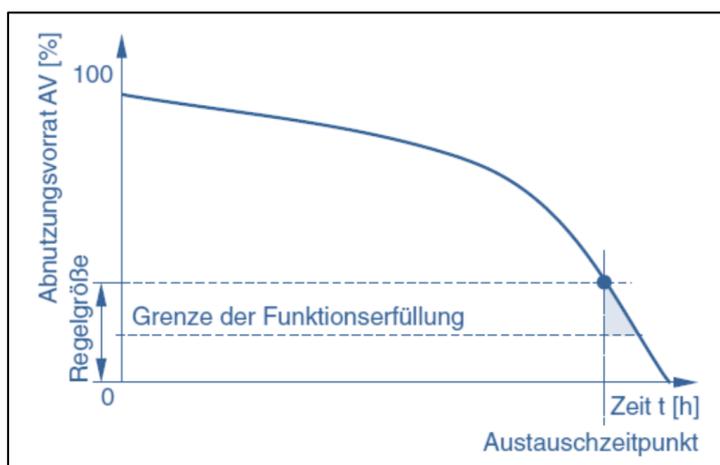


Abbildung 3: Regelgröße Abnutzungsvorrat bei der zustandsabhängigen Instandhaltung.<sup>19</sup>

Die Überwachung wird während des Betriebs des Geräts oder der Anlage durchgeführt und liefert aufgrund des aktuellen Zustands Prognosen für zukünftige Ausfallszeitpunkte. Neben Überwachung durch Personen, die Inspektionen durchführen und Zustände bewerten, eignen sich thermographische Systeme, zerstörungsfreie Werkstoffprüfung, Ölanalyse oder Vibrationsanalyse. Die erwähnten Geräte werden als Condition Monitoring Systeme CMS

<sup>14</sup> Ryll, 2010, S. 30.

<sup>15</sup> Vgl. Matyas, 2002, S. 14.

<sup>16</sup> VDI, 1986, Blatt 3.

<sup>17</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 339 f.

<sup>18</sup> Vgl. Ryll, 2010, S. 30.

<sup>19</sup> Ryll, 2010, S. 30.

bezeichnet. Um die Investitionskosten für ein solches System in einem vernünftigen Rahmen zu halten, sollte das Ziel sein, mit wenigen Sensoren, so viele Komponenten wie möglich zu monitoren<sup>20</sup>. Der Trend geht in Richtung günstiger Sensoren und Drahtlosen Netzwerkverbindungen, was eher das Problem aufwirft, dass zu viele Daten zur Verfügung stehen. Dieses „über“-monitoring machte ein gutes Datenmanagement unumgänglich. Cooper gliedert das Vorgehen des Datensammelns in fünf Schritte<sup>21</sup>:

1. Erfasste Daten verdichten und sinnvoll ordnen.
2. Daten in einem sinnvollen Kontext zusammenfügen, Verbindungen herstellen sowie eine passende Analyse unterstützen.
3. Eine klare Präsentation und Kommunikation der Daten (u.a. an das Management).
4. Systematisches Management der Daten um rechtzeitiges, richtiges, effektives und konsistentes Lösen der zugrundeliegenden Probleme zu ermöglichen.
5. Verwendung der Ergebnisse für den kontinuierlichen Verbesserungsprozess.

Vor allem die letzten beiden Punkte verdeutlichen die Notwendigkeit einer Dokumentation und Verwaltung der gesammelten Daten, was Cooper auch betont, in dem er den Begriff Condition Monitoring zum Begriff Condition Management überführt.<sup>22</sup>

Die Früherkennung von möglichen Abnutzungen oder Ausfällen ermöglicht eine qualitäts-, zeit- und kostenoptimale Planung sowie Durchführung der Maßnahmen zur Aufrechterhaltung der Betriebsfähigkeit<sup>23</sup>.

## 2.2.4 Proaktive (entgegenwirkende) Instandhaltung

Der Gedanke hinter der Proaktiven Instandhaltung ist das Aufdecken von Versagensgründen („Roots“) um die Lebensdauer mechanischer Maschinen zu verlängern und eine Weiterentwicklung resp. einen tatsächlichen Schadenseintritt zu verhindern.<sup>24</sup>

Dazu stehen einige proaktive Instandhaltungsstrategien zur Verfügung, wie etwa die failed part analysis, root cause failure analysis, Zuverlässigkeitsberechnungen, Alterungs Untersuchungen etc. Durch den Einsatz von Informationstechnologie und Computerized Maintenance Management System CMMS basierter Instandhaltungssysteme können relevante Benachrichtigungen von den Anlagen schnell kommuniziert werden, was rasches Eingreifen

---

<sup>20</sup> Vgl. Ryll, 2010, S. 30 f.

<sup>21</sup> Vgl. Cooper, k.A. S. 2.

<sup>22</sup> Vgl. Cooper, k.A. S.3.

<sup>23</sup> Vgl. VDI, 1999, VDI Richtlinie 2888.

<sup>24</sup> Ryll, 2010, S. 31.

ermöglicht<sup>25</sup>. Ahuja spricht in diesem Zusammenhang von sehr hohem Einsparungspotential, welches das Potential zum „world-class maintenance program“<sup>26</sup> hat.

---

<sup>25</sup> Vgl. Ahuja, 2009, S. 447.

<sup>26</sup> Ahuja, 2009, S. 447.

## 2.3 Erweiterungen der klassischen Instandhaltungsstrategien

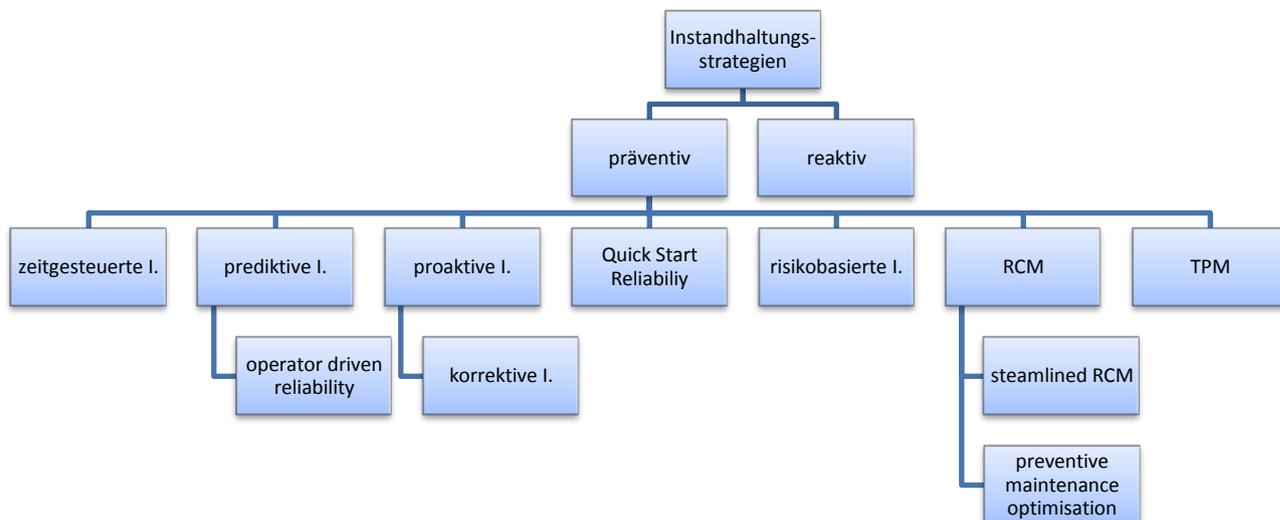


Abbildung 4: Zuordnung der erweiterten Instandhaltungsstrategien

### 2.3.1 Korrektive Instandhaltung (engl. Corrective Maintenance)

Der Grundgedanke ist, die Ausfälle der Anlagen nicht nur zu verhindern, sondern eine Bauweise zu entwickeln, die zu keinen Ausfällen führt, was sowohl die Zuverlässigkeit als auch die Instandhaltbarkeit erhöht. Dazu gehört z.B. auch, keine Bauteile einzusetzen, bei denen Verschleiß auftritt.<sup>27</sup>

### 2.3.2 Quick Start Reliability QSR

Diese Strategie ist ein Einführungsprogramm für Unternehmen oder Anlagen, in denen lediglich eine reaktive Problembehandlungsstruktur vorherrscht. In etwa 90 Tagen wird eine Messkultur bezüglich Performance eingeführt. So werden schnell „early wins“ unter den Anlagen identifiziert.<sup>28</sup>

### 2.3.3 Risikobasierte Instandhaltung RBM

Unter Berücksichtigung der Risiken eines Anlagenausfalls, der Versagensart sowie deren Konsequenzen werden Inspektions- und Instandhaltungsstrategien optimiert. Detaillierte Vorgehensweisen zur Risikobestimmung sind in Abschnitt 3 beschrieben.

<sup>27</sup> Vgl. Ahuja, 2009, S. 421.

<sup>28</sup> SKF, 2004, S. 15.

### 2.3.4 Operator Driven Reliability ODR (dt.: Bedienergestützte Zuverlässigkeit)

Die Anlagenführer sind in die Instandhaltung involviert, da sie, die "ihre" Anlage am besten kennen. Abweichungen fallen jenen Personen, die lange Zeiträume an den Maschinen verbringen, als erstes auf. Bei ODR sind die Anlagenführer mit Instandhaltung „above and below“ ihrer klassischen Führerverantwortung konfrontiert. Sie beurteilen zum Einen die Maschinenzustände (u.a. mit Hilfe von technischer Anlagenüberwachung, siehe Kapitel 4), zum Anderen fallen auch Reinigung, Schmierungen oder kleinere Reparaturen in ihren Kompetenzbereich. Diese Schritte leisten einen Beitrag, die Anlage am Laufen zu halten, was zu einer erhöhten Aufrechterhaltung der Produktivität führt.<sup>29</sup>

### 2.3.5 Reliability Centered Maintenance RCM

Dies ist ein Prozess, in dem bestimmt wird, was unternommen werden muss, um eine Anlage so am Operieren zu halten, wie es ihre Betreiber im gegenwärtigen Betriebszustand verlangen.<sup>30</sup>

Bei dieser Art der Instandhaltung werden nach Moubray sieben Fragen gestellt<sup>31</sup>:

- Was sind die Funktionen und die ihnen zugeordneten Performance-Standards der Anlagen in deren derzeitigen Betriebskontext?
- In welcher Art wird die zugeordnete Funktion nicht erfüllt?
- Woher kommt das Versagen der Funktion?
- Was passiert, wenn der jeweilige Fehler auftritt?
- Was kann getan werden, um jeden Fehler vorauszusagen oder zu verhindern?
- Was soll getan werden, wenn keine passende, proaktive Reaktion gefunden werden kann?

Aus diesen Fragen wird ein Prozess abgeleitet, der sich Reliability Centered Maintenance nennt. Unter Verwendung von situativ passenden und benötigten Instandhaltungsstrategien wird die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass ein System oder eine Systemkomponente zweckerfüllend über die Lebenserwartung eingesetzt wird. Ziel von RCM ist das zur Verfügung stellen der verlangten Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit bei einem gleichzeitigen Minimum der Kosten. Dies macht die Methode u.a. im Falle eingeschränkter Ressourcenverfügbarkeit (z.B. Finanzmittel) attraktiv. Da RCM Prioritäten vergibt, die auf kritischen Versagensauswirkungen basieren, lassen sich Mittel bündeln um an den richtigen Stellen

<sup>29</sup> Staples, 2006, S. 40.

<sup>30</sup> Vgl. Moubray, 1997, S. 7.

<sup>31</sup> Vgl. Moubray, 1997, S. 7.

Instandhaltung zu betreiben. Im Gegensatz zu anderen Instandhaltungsstrategien verfolgt RCM das Ziel, die Systemfunktionalität bis zu einem gewünschten Status beizubehalten.<sup>32</sup>

Der RCM Prozess kennzeichnet sich durch die folgenden vier Hauptmerkmale<sup>33</sup>:

- Aufrechterhaltung der Systemfunktionalität: wobei überhaupt festgestellt werden muss, was die gewünschte Funktionalität, resp. der Systemoutput ist. Erst nach dem dies bewusst ist, kann mit dessen Aufrechterhaltung begonnen werden.
- Identifikation der Versagensarten, welche zum funktionellen Versagen führen können.
- Prioritäten nach Hauptgründen für Versagen.
- Auswahl von anwendbaren und effektiven Instandhaltungsmaßnahmen für hoch priorisierte Bereiche.

Die Methodik zu RCM ist in sieben Schritte aufgeteilt, die eine klare Dokumentation garantieren und eine Nachverfolgung des Auswahlprozesses vollkommen transparent machen. Die genauere Erörterung der Schritte erfolgt im nachfolgenden Textabschnitt<sup>34</sup>:

Zu Beginn stehen die Auswahl des Systems und die Informationssammlung zu dem gewählten System. Eine Anlage besteht aus mehreren Subsystemen, die sich wiederum in Komponenten aufteilen lassen. Die kleinste Einheit stellen die Einzelteile dar. Als System die gesamte Produktionsanlage zu betrachten, ist nicht sinnvoll. Gleiches gilt für die Einzelteile. Nach Festlegung der Systeme, muss entschieden werden, welches als erstes analysiert wird, und in welcher Reihenfolge sich das Prozedere fortsetzt. Grundlage für Entscheidungen können hierbei Aufzeichnungen über Ausfälle oder Probleme aus der Vergangenheit sein. Eine Möglichkeit zur Reihung bietet folgendes Schema:

1. Systeme mit vielen korrektiven Instandhaltungsmaßnahmen in der Vergangenheit.
2. Systeme, die in der Vergangenheit viele präventive Instandhaltungsmaßnahmen oder hohe Kosten verursacht haben.
3. Systeme für die beide vorher genannten Punkte zutreffen.
4. Systeme mit hohen Kosten für korrektive Instandhaltung.
5. Systeme die in der Vergangenheit signifikant zum Stillstand der Produktion beigetragen haben (ganz oder partiell).

---

<sup>32</sup> Siddiqui, Ben-Daya, 2009, S. 398 ff.

<sup>33</sup> Siddiqui, Ben-Daya, 2009, S. 400

<sup>34</sup> Vgl. Siddiqui, Ben-Daya, 2009, S. 403 ff.

6. Systeme die in Bezug auf Sicherheit relevant sind.
7. Systeme die in Bezug auf die Umwelt relevant sind.

Nach der Systembestimmung wird dazugehörige Information und Material gesammelt, z.B. Schalt- und Blockdiagramme, Funktionsdiagramme, Flowcharts, Benutzerhandbücher, Versagsdaten, Instandhaltungsdaten etc.

Als Zweiter Schritt mit der Bezeichnung „Systemgrenzen Definition“ werden Grenzen um das System gelegt. Es gibt keine Regeln für die Abgrenzung, allerdings ist es empfehlenswert, nicht mehr als ein oder zwei Hauptfunktionen mit einigen Unterstützungssystemen zusammenzufassen. Unterteilungen können nach verschiedensten Aspekten vorgenommen werden, z.B. nach funktionalen Aspekten oder nach finanziellen Strukturen (etwa Kostenstellen). Wichtig ist aber ein klares Bewusstmachen was im System inkludiert und exkludiert ist, im Speziellen wenn zwei Systeme aneinander treffen. Es kann sonst sein, dass Komponenten an den (unklaren) Systemgrenzen vernachlässigt werden. Die Schnittstellen im System bzw. zwischen zwei Systemen und zwischen System und Umwelt müssen definiert werden.

Die „Systembeschreibung und eine Erstellung eines funktionalen Block Diagramms FBD“ bilden den Schritt vier in der RCM Methode. Die im vorherigen Schritt gesammelten Informationen werden noch einmal zusammengefasst und festgehalten (Systemname, ID, Standort, funktionelle Beschreibung, Hauptparameter, Ausstattung, Sicherheitsaspekte). Das FBD modelliert auf einer sehr oberflächlichen Ebene Systemfunktionalitäten, wobei Pfeile, welche die einzelnen Blöcke verbinden, Interaktionen darstellen. Weiters werden Schnittstellen nochmals analysiert, wobei System/Umwelt Schnittstellen mit OUT bezeichnet werden und System/System Schnittstellen mit IN. Der Übergang kann je nach Systemgrenzdefinition fließend sein. Die Dokumentation der Schnittstellen geschieht analog zu der Systemdokumentation.

Aufbauend auf das FBD wird eine System Work Breakdown Structure SWBS erstellt, die jede Systemfunktion in Komponenten unterteilt. Eine weitere Aufgabe in diesem Schritt ist das Erstellen einer Equipment-History, die Datum und Art des aufgetretenen Fehlers, sowie Ursache und Systemgebrecchen der Vergangenheit auflistet.

Im vierten Schritt „System Funktionen und Funktionsfehler“ werden jene Funktionen identifiziert, die vom System aufrechterhalten werden müssen, um an den Schnittstellen die OUT Leistung zu erbringen. Erfüllt ein System nicht die erwarteten Funktionen, wird von Funktionsfehler gesprochen.

Die „Fehler Möglichkeits- und Einflussanalyse FMEA“ identifiziert bekannte und potentielle Fehler, die anschließend nach Konsequenzen, Auftreten und der Möglichkeit des Entde-

ckens eingeteilt werden und anhand einer Risiko-Prioritätszahl gereiht werden. In einer Entscheidungsbaum Analyse (Logic Decision Tree Analysis LTA) wird weiter priorisiert.

Als letzter Schritt erfolgt eine „Auswahl der Tätigkeiten und Ressourcen“. Jede Maßnahme, die einem Fehler gegensteuert, muss anwendbar sein, d.h. vor Fehlern schützen und Fehler aufdecken. Außerdem ist ein Anspruch an die Maßnahme, dass sie kosteneffizient im Vergleich zu alternativen Instandhaltungsmaßnahmen ist.

### **2.3.6 Streamlined Reliability Centered Maintenance SRCM**

Die Vorgangsweise baut auf RCM auf, es wird jedoch gezielter auf Problemstellen eingegangen und geprüft ob bestimmte Maßnahmen gerechtfertigt sind. Es finden zwei Analysen statt, wobei jene Faktoren, welche in der ersten als kritisch eingestuft wurden, die zweite Analyse durchlaufen und nochmals bestimmten Fragen gegenüber gestellt werden<sup>35</sup>:

- Sind die Reparatur-/Ersatzkosten hoch, wenn die Komponente mit einer „run to failure“ Strategie behandelt wird?
- Wird eine zu exzessive Instandhaltung betrieben?
- Kann ein Versagen der Komponente zu einer Kettenreaktion führen?
- Gibt es eine größere Gefahr für Personal oder Umwelt/Umgebung, wenn die betreffende Komponente mit einer „run to failure“ Strategie behandelt wird?

### **2.3.7 Preventive Maintenance Optimisation PMO**

Die Betonung liegt hier auf der Optimierung. Dieses Vorgehen erfolgt in sechs Schritten: Daten über das Equipmentsausfallverhalten werden zunächst gesammelt und ausgewertet um anschließend eine Verbindung der Schadensbilder mit den Instandhaltungstätigkeiten herzustellen. Nach Gruppierung der Daten können Redundanzen erkannt werden, d.h. ob ein Schadensbild zu mehr als einem Abschnitt beiträgt. Danach werden Funktionen, die durch das Versagen auftreten, abgeklärt. Abschließend erfolgt eine Untersuchung, ob das Versagen ersichtlich oder verborgen auftritt mitsamt der Ableitung einer Analyse durch Reliability Centered Maintenance (2.3.5).<sup>36</sup>

### **2.3.8 Total Productive Maintenance TPM**

Die Ziele der Verbesserung von Anlagenverfügbarkeit, Durchführung, Qualität, Verlässlichkeit und Sicherheit erfolgt bei TPM u.a. durch die verstärkte Einbindung der direkt an der Produktionsanlage beschäftigten Mitarbeiter. Die Zusammenarbeit zwischen dem produzierenden Betrieb und den Personen an der Maschine sowie dem Anlagenhersteller und dessen Ingenieuren zielt auf das Vermeiden von Ausfällen, Stillstandszeiten, höherem Durch-

<sup>35</sup> Chambers, 2002, S. 2 f.

<sup>36</sup> Pansrisu, 2010, S. 2.

satz und einer besseren Produktqualität ab, um letztendlich den optimalen Anlagenzustand aufrecht, sowie die Effektivität der Anlagen optimal zu (er)halten. Zum Einen sinken dadurch die Kosten für den Betrieb der Anlagen, zum Anderen führen die Maßnahmen zu einer längeren Anlagenlebensdauer und eine Reduktion der Instandhaltungskosten.<sup>37</sup> Ahuja führt in Total Productive Maintenance eine Liste von Gründen an, die für die Einführung von TPM sprechen<sup>38</sup>.

Die Übergeordneten Ziele von TPM lassen sich unter den Begriffen zero defects, zero accidents und zero breakdowns zusammenfassen. Unternehmen können diese durch Benchmarking in der Gesamtanlageneffektivität (OEE-Overall Equipment Effectiveness) und den folgenden sechs Kategorien erreichen<sup>39</sup>:

- Produktivität (P)
- Qualität (Q)
- Kosten (C)
- Auslieferung (D – „delivery“)
- Sicherheit (S)
- Moral (M)

TPM setzt sich aus acht parallelen Herangehensweise an die Instandhaltung zusammen, die in der Literatur als die acht Säulen des TPM bezeichnet werden:<sup>40</sup>

- Autonome Instandhaltung
- Fokussierte Instandhaltung
- Geplante Instandhaltung
- Qualitätsinstandhaltung
- Ausbildung und Training
- Office TPM
- Sicherheit, Gesundheit, Umwelt
- Entwicklungsmanagement

---

<sup>37</sup> Vgl. Ahuja, 2009, S. 423 f.

<sup>38</sup> Ahuja, 2009, S. 423 f.

<sup>39</sup> Vgl. Ahuja, 2009, S. 424.

<sup>40</sup> Vgl. Nakajima, 1988.

---

Diese „Säulen“ werden in Darstellungen häufig auf das Fundament von 5 S gestellt, was verbildlicht, dass für eine sehr effektive Produktion saubere, ordentliche Arbeitsplätze und diszipliniertes Verhalten im Umgang mit den Anlagen essentiell ist. 5 S steht für Seiri – Selektieren, Aussortieren; Seiton – für Gegenstände geeignete Plätze finden und beibehalten, Seiso – Sauberkeit, Seiketsu – Standardisieren von Sauberkeit und Ordnung und Shitsuke – Disziplin und Beibehalten der 5S Regeln. Diese japanischen Leitgedanken helfen nicht nur, Suchzeiten durch das Eliminieren nicht benötigter Gegenstände zu verringern, sondern tragen auch zur Sicherheit am (Anlagen-)arbeitsplatz bei.

### **Beschreibung der Säulen:**

**Autonome Instandhaltung:** Anstatt alle Instandhaltungsmaßnahmen von der betrieblichen Instandhaltungsabteilung durchführen zu lassen, wird versucht, einfachere Instandhaltungstätigkeiten den Personen in der Produktion an der Anlage zu übertragen. Dies entlastet einerseits die Instandhaltungsabteilung und macht sie frei für komplexe Vorfälle, für die spezielles Wissen nötig ist, andererseits werden Mitarbeiter für „ihre“ jeweilige Anlage sensibilisiert. Ändert sich der Anlagenzustand auch nur geringfügig, kann dies leichter erkannt und somit gegengesteuert werden<sup>41</sup>. Hier finden sich Verbindungen zu ODM, Abschnitt 2.3.4.

---

<sup>41</sup> Vgl. Al-Radhi, 2002, S. 33 f.

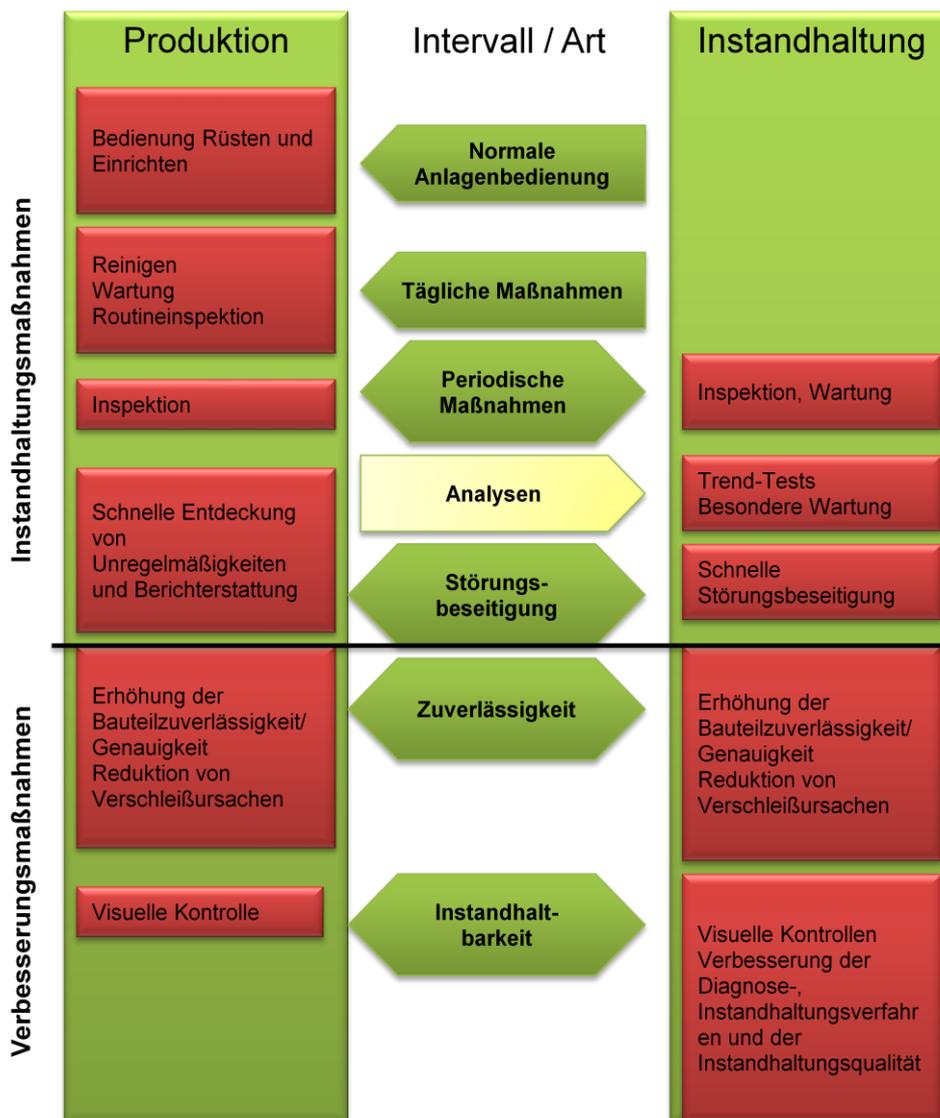


Abbildung 5: Verteilung der Instandhaltung<sup>42</sup>

**Fokussierte Instandhaltung:** Dieser Schritt verfolgt die Elimination von Verschwendung und Produktionsverlusten. Diese lassen sich folgendermaßen kategorisieren<sup>43</sup>:

- Sieben Verluste der Anlageneffizienz: Verluste durch Anlagenversagen, Setup- bzw. Anpassungsverluste, Verluste durch Geschwindigkeitsverringern, Verluste durch Anhalten bzw. erzwungene Pausen, Verluste durch Defekte, Anfahrverluste, Verlust beim Werkzeugwechsel.
- Verluste durch Beschickungstätigkeit (geplante Abschaltverluste).

<sup>42</sup> Vgl. Al-Rahdi, 2002, S. 35.

<sup>43</sup> Vgl. Ahuja, 2009, S. 445 f.

- Fünf große Verluste durch menschliche Tätigkeit: Verluste durch Distribution/Logistik, Verluste durch die Organisation der Produktionslinie, Verluste durch Messen bzw. Adjustieren, Management-Verluste, Bewegungs-Verluste.
- Drei große Verluste durch nicht effektive Verwendung von Produktionsressourcen: Ertragsverluste, Energieverluste, Einspann/Werkzeug Verluste.

**Geplante Instandhaltung:** Diese Säule steht für die Durchführung eines geeigneten Instandhaltungsprogramms durch qualifizierte Fachkräfte<sup>44</sup>. Bestehende Strategien sollen etwa durch tägliche oder periodische Inspektionen, in denen Einstellungen überprüft und gegebenenfalls mit Korrektur gegengesteuert wird, verbessert werden. Gleichzeitig findet eine Sammlung von Daten des Produktionsablaufs statt, um für zukünftige präventive Maßnahmen gerüstet zu sein.

**Qualitätsinstandhaltung:** Aufbauend auf der Sammlung von Ausfallsdaten werden sinnvolle Maßnahmen getroffen um das Ziel der „zero-defects“ und weiterreichend „zero-customer complaints“ zu erreichen. Zum Einsatz kommen dabei Qualitätsmanagement Werkzeuge wie Poka Yoke, Pareto Analyse, QA Matrix, Mechanismus-/ Funktions- Diagramm, defect cause analysis, etc.

**Ausbildung und Training:** Die Mitarbeiter werden geschult und erhalten Wissen um ihre Anlage, Qualitätsmanagement usw. Überdies werden die Unternehmensziele bewusst gemacht. Eine Evaluation der Fähigkeiten in regelmäßigen Zeitabständen gehört ebenso zu dieser Säule wie das Auffrischen selbiger.<sup>45</sup>

**Office TPM:** Auch im Verwaltungsbereich des Produktionsbetriebes darf es keinen „functional loss“ geben. Die Arbeitsplätze müssen möglichst effizient gestaltet sein, aber auch die Unterstützung der Produktionsabteilungen durch effektive Arbeitsplatzorganisation und standardisierte Abläufe gehört zu den Vorsätzen. Autonome Instandhaltung und kontinuierliche Verbesserung wird auch in administrativen und anderen indirekten Abteilungen durchgeführt. Aber auch das zur Verfügung stellen von angenehmen, saubereren und sicheren Arbeitsplätzen auf Produktionsebene gehört zu dieser Säule. Eine Anlaufstelle für Arbeiter und Kunden einzurichten, um gegebenenfalls Probleme jeglicher Art (Verzug, Bezahlung, Gehalt...) zu beseitigen, fällt in diese Kategorie, so wie logistische Abläufe, Materialbeschaffung, Lagerhaltung usw.<sup>46</sup>

**Sicherheit, Gesundheit, Umwelt**<sup>47</sup>: Die Ziele dieser Kategorie sind keine Unfälle, gesunde Mitarbeiter sowie eine saubere Umwelt und Umweltschutz. Diese TPM Säule bindet die Mit-

---

<sup>44</sup> Vgl. Al-Radhi, 2002, S. 53.

<sup>45</sup> Vgl. Ahuja, 2009, 439 f.

<sup>46</sup> Vgl. Ahuja, 2009, S. 448.

<sup>47</sup> Vgl. Ahuja, 2009, S. 449.

---

arbeiter auf Produktionsebene sehr stark in das TPM ein, weil sich die Maßnahmen direkt auf die Personen auswirken. Auch kleinere Gefahrenquellen wie Kanten mit Verletzungspotential oder unzureichende Beleuchtung werden ausfindig gemacht und beseitigt. Trainings, das Anwenden von Sicherheitsnormen und die Aufforderung, Verbesserungsvorschläge einzubringen, sind nur ein paar von vielen möglichen Teilschritten zur ständigen Verbesserung innerhalb dieser TPM Säule.

**Entwicklungsmanagement**<sup>48</sup>: Für die Entwicklung neuer Anlagen wird bereits in frühen Entwurfsphasen das Wissen und die Erfahrung aus der Instandhaltung der in Betrieb befindlichen Anlagen herangezogen. Relevante Daten sind etwa Anlagen Performance, Lebenszykluskosten, Zuverlässigkeit, Instandhaltungsziele, die Test Pläne der Anlagen oder die Aufzeichnungen während des Einsatzes. Dies führt im Idealfall dazu, dass die neuen Maschinen die Anforderungen der leichten Instandhaltbarkeit, einfacher Handhabung, Fehlerfreiheit und die Möglichkeit von Produktionsfehlern erfüllen können.

Methoden zur Lösung und Analyse von Problemen im Prozess:

- Pareto Analyse
- Statistische Prozess Kontrolle (SPC)
- Problemlösungstechniken (Brainstorming, Ursache-Nutzen Analyse, 5-M Ansatz)
- Team basierende Problemlösung
- Poka-Yoke
- Kontinuierliche Verbesserung
- 5S
- Setup Time Reduction (SMED)
- Vermeiden von Verschwendungen
- Benchmarking
- Bottleneck Analyse
- RMA Zuverlässigkeits-, Instandhaltbarkeits- u. Verfügbarkeitsanalyse
- System Simulation

---

<sup>48</sup> Vlg. Ahuja, 2009, S. 449.

## Overall Equipment Effectiveness OEE

Um den Erfolg von TPM in der Organisation zu messen, werden Performanceveränderungen anhand der OEE dargestellt. Sie berechnet sich aus dem Produkt von Gesamtnutzungsgrad NG, Leistungsgrad LG und Qualitätsgrad QG<sup>49</sup>:

$$OEE = NG * LG * QG$$

$$OEE = \frac{T_{\text{Lauf}}}{T_B} * \frac{t_{\text{geplant}} * n_{\text{gefertigt}}}{T_{\text{Lauf}}} * \frac{n_{\text{gefertigt}} - A - NA}{n_{\text{gefertigt}}}$$

$T_{\text{Lauf}}$  ... Maschinenlaufzeit

$t_{\text{geplant}}$ ...geplante Taktzeit

$T_B$  ... Planbelegungszeit

$n_{\text{gefertigt}}$ ... Anzahl gefertigter Teile

A ... Anzahl der Ausschussteile

NA...Anzahl der Teile zur Nacharbeit

Werden OEE und alle Verluste addiert, ergibt dies das vollständige Potential einer Anlage<sup>50</sup>. Als Benchmark und „worldclass“ gilt eine OEE von 85%, sowie 90% Verfügbarkeit, 95% Leistungseffektivität und weniger als 1% nicht der Qualität entsprechenden Produkte<sup>51</sup>.

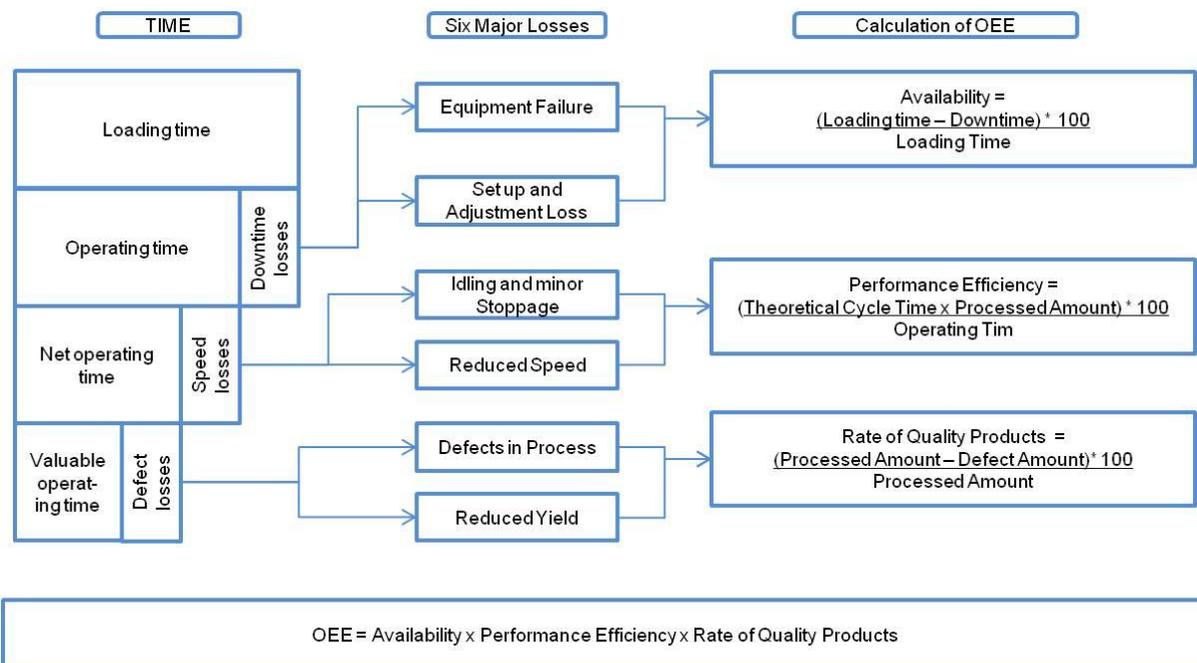


Abbildung 6: Berechnung der OEE, basierend auf den sechs großen Verlusten der Anlageneffizienz (ohne Anfahrverluste)<sup>52</sup>

<sup>49</sup> Al-Radhi, 2002, S. 8 f.

<sup>50</sup> Vgl. Al-Radhi, 2002, S. 11.

<sup>51</sup> Vgl. Ahuja, 2009, S. 428.

<sup>52</sup> Ahuja, 2009, S. 428.

## 2.4 Zuverlässigkeitstheoretische Ansätze

Die Zuverlässigkeitstheorie befasst sich mit Bewertung, Erhaltung und der Verbesserung der Zuverlässigkeit technischer Systeme. In der Instandhaltung werden mithilfe dieser Theorie Einflussfaktoren auf technische Systeme identifiziert und alle möglichen Auswirkungen aufgezeigt. Werkzeuge dazu liefern die Wahrscheinlichkeitstheorie, die diskrete Mathematik und die mathematische Optimierung. Bei einer hohen Systemkomplexität werden Rechner-systeme zur Analyse verwendet.

Zuverlässigkeit bezeichnet die Fähigkeit einer Anlage, für einen bestimmten Zeitraum, bestimmten Umgebungseinflüssen und zu bestimmten Betriebsbedingungen in ordnungsgemä-ßem Betrieb zu sein.<sup>53</sup>

### 2.4.1 Kenngrößen der Zuverlässigkeit

**Die Ausfallwahrscheinlichkeit** bezeichnet in diesem Zusammenhang die Verteilungsfunktion  $F(t)$  und bildet sich aus dem Integral über die gesamten Ausfälle beschreibende Dichtefunktion  $f(t)$ .

$$F(t) = \int f(t) dt$$

$F(t)$  gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der zum Zeitpunkt  $t$  Ausfälle insgesamt auftreten<sup>54</sup> oder anders gesagt, „die Summe der Ausfälle als Funktion der Zeit“<sup>55</sup>.

**Die Überlebenswahrscheinlichkeit**  $R(t)$  ergibt zusammen mit der Ausfallwahrscheinlichkeit 100%. Somit gibt die Überlebenswahrscheinlichkeit die Menge der funktionstüchtigen Komponenten an. Zum Zeitpunkt  $t=0$ , wenn der Betrieb gestartet wird, kann davon ausgegangen werden, dass  $R(t)=1$  ist und kontinuierlich über die Laufzeit abfällt.<sup>56</sup>

$$R(t) = 1 - F(t)$$

**Die Ausfallrate**  $\lambda(t)$  misst das Risiko zum Zeitpunkt  $t$ , mit dem eine bisher intakte Komponente ausfällt unter Berücksichtigung der Summe der noch intakten Einheiten. Oft werden mit  $\lambda(t)$  Ermüdungs-, Früh- sowie Zufallsausfälle beschrieben. In der Abbildung 7, welche idealisiert ist und als Badewannenkurve bezeichnet wird, sind diese Bereiche (I,II,III) dargestellt.<sup>57</sup>

<sup>53</sup> Vgl. Ryll, 2010, S. 43 f.

<sup>54</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 17.

<sup>55</sup> Bertsche, 2004, S. 19.

<sup>56</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 19.

<sup>57</sup> Bertsche, 2004, S. 22 f.

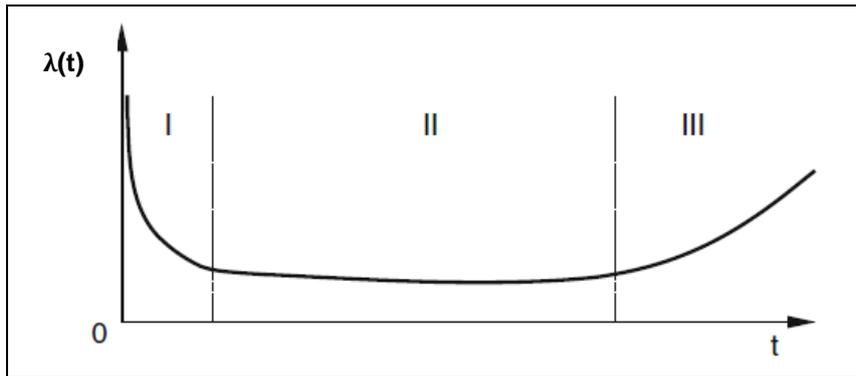


Abbildung 7: Verlauf der Ausfallsrate  $\lambda(t)$  (idealisiert).<sup>58</sup>

$$\lambda(t) = \frac{\text{Ausfälle (zum Zeitpunkt } t \text{ bzw. in Klasse } i)}{\text{Summe der noch intaktn Einheiten (zum Zeitpunkt } t \text{ bzw. in Klasse } i)}$$

Fielen etwa in der dritten Stunde einer acht Stunden Schicht zwei Leuchtdioden aus, und es gäbe noch 135 funktionierende Dioden, so wäre die Ausfallsrate

$$\lambda(\text{Stunde 3}) = \frac{2}{135} = 0,0148.$$

Beinhaltet die Annahme weiters, dass erst zu Schichtende wieder Dioden ersetzt würden, und in der vierten Schichtstunde weiter sechs Leuchtdioden versagen, errechnet sich die Ausfallsrate nun mit

$$\lambda(\text{Stunde 4}) = \frac{6}{129} = 0,0465$$

Da die Dichtefunktion  $f(t)$  die Anzahl der Ausfälle beschreibt, und die Überlebenswahrscheinlichkeit  $R(t)$  die Summe jener Einheiten, die noch in Ordnung sind, lässt sich  $\lambda(t)$  auch ermitteln, in dem der Quotient dieser beiden Funktionen gebildet wird<sup>59</sup>:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Zum Abschätzen der Ausfallsrate kann die Ausfallsquote  $q$  herangezogen werden<sup>60</sup>:

$$q = \frac{\text{Ausfälle im Zeitintervall}}{\text{Anfangsbestand} \cdot \text{Intervallgröße}}$$

Die hohe Ausfallwahrscheinlichkeit am Anfang der Einsatzzeit, also im Bereich I, entsteht durch Material-, Herstellungs- oder beispielsweise Konstruktionsfehler, welche nach der obi-

<sup>58</sup> Vgl. Ryll, 2004, S. 48.

<sup>59</sup> Vgl. Bertsche, S. 22.

<sup>60</sup> Bertsche, 2004, S. 32.

gen Unterteilung Frühausfälle genannt werden. Im Bereich II kommt es zu den Zufallsausfällen, bedingt durch Verschmutzungen, unsachgemäße Bedienung oder Wartung. Verschleiß- und Ermüdungsausfälle entstehen im Bereich III aufgrund von Alterung, Dauerbruch, Grübchenbildung, etc.<sup>61</sup>

Wird zur grafischen Veranschaulichung eine Kurve dargestellt, ist  $f(t)$  die Kurve der Funktion, die Fläche darunter stellt die Summe von  $F(t)$  und  $R(t)$  dar und ergibt 1, weil es sich um Wahrscheinlichkeiten handelt.  $\lambda(t)$  ist als Quotient von  $f(t)$  und  $R(t)$  eine steigende Gerade gegen unendlich, da bei einem Zeitpunkt  $t$  in weiter Zukunft keine intakte Einheit mehr vorhanden sein wird, und somit der Nenner für die erste vorgestellte Gleichung gleich 0 ist.

### Mittlere Lebensdauer<sup>62</sup>

- **Mean Time to Failure MTTF** ist die Zeitdauer, ohne dass ein Ausfall eintritt und gilt bei einer nicht reparierbaren Komponente.

$$\text{MTTF} = E(\tau) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

- **Mean Time to first failure MTTF** gibt für reparierbare Anlagenteile die durchschnittliche Zeitspanne bis zum ersten Ausfall an.
- **Mean Time between Failure MTBF** quantifiziert das durchschnittliche Zeitintervall bis zum nächsten Versagen.

Die Verfügbarkeit ist ebenfalls eine Wahrscheinlichkeitsgröße, die eine Aussage darüber trifft, ob eine betrachtete Komponente zum bestimmten Zeitpunkt  $t$  funktionsfähig ist, unter der Bedingung, dass Betrieb und Instandhaltung planmäßig durchgeführt wurden<sup>63</sup>. Mit der mittleren Stillstandszeit  $\bar{M}$  definiert sich die Dauerverfügbarkeit  $A_D$  wie folgt<sup>64</sup>:

$$A_D = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{\text{MTTF}}{\text{MTTF} + \bar{M}} = \frac{1}{1 + \frac{\bar{M}}{\text{MTTF}}}$$

Eine Kategorisierung der Komponenten, welche Zuverlässigkeitsanalysen unterzogen werden, ist sinnvoll, weil sich die Randbedingungen ändern.

<sup>61</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 23 f.

<sup>62</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 31.

<sup>63</sup> Vgl. Birolini, 2010, S. 9.

<sup>64</sup> Bertsche, 2004, S. 356.

Unterschieden wird zwischen<sup>65</sup>:

- Instandsetzbar und nicht instandsetzbar – für nicht instandsetzbare Systeme gilt<sup>66</sup>,  $A_D = R(t)$ .
- Funktionstüchtig vs. nicht funktionstüchtig
- Einfache Systeme vs. Strukturierte Systeme

Da die ersten beiden selbsterklärend sind, wird nur auf die dritte Unterteilung genauer eingegangen:

### 2.4.2 Einfache Systeme<sup>67</sup>

Ein solches ist nicht weiter unterteil- und instandsetzbar. Dem entspricht z.B. ein einfacher Bauteil. Der aktuelle Zustand lässt sich, vorausgesetzt, dass die beiden möglichen Zustände funktionstüchtig und nicht funktionstüchtig sind, durch 0 und 1 beschreiben.

Bei einem Ausfall zum Zeitpunkt  $X$  kommt es zu einer sprunghaftigen Zustandsänderung auf  $z(t)=0$  wobei  $z(t)$  den Bauteilzustand angibt.

$$z(t) = \begin{cases} 1 & \text{für } t < X \\ 0 & \text{für } t \geq X \end{cases}$$

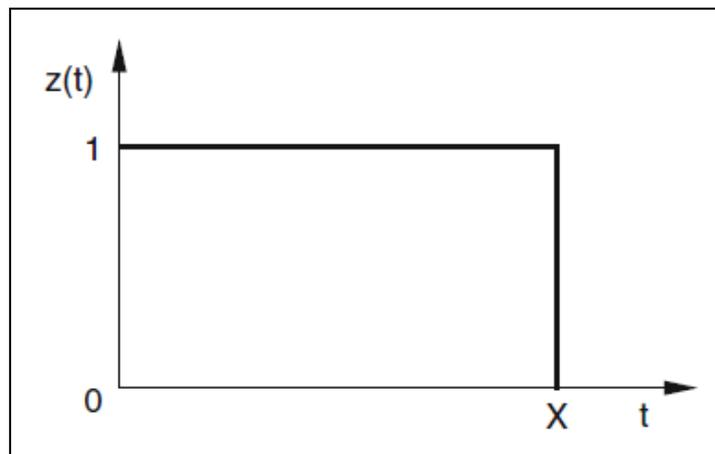


Abbildung 8: Zustandsänderung von einfachen Systemen ohne Instandsetzung.<sup>68</sup>

„Die Ausfallwahrscheinlichkeit  $F(t)$  ist demnach die Wahrscheinlichkeit  $P$  dafür, dass im Zeitintervall  $[0,t)$  ein Systemausfall auftritt, [...] Die Funktion  $F(t)$  ist eine nichtfallende Funktion von  $t$  wobei  $0 \leq F(t) \leq 1$  gilt.“ Es kann davon ausgegangen werden, dass im Zeitpunkt  $t=0$  auch  $F(0)=0$  ist und im Zeitpunkt  $t=(\infty)$  den Wert eins annimmt. Dies bedeutet, dass bei einer

<sup>65</sup> Vgl. Ryll, 2010, S. 44.

<sup>66</sup> Vgl. Ryll, 2010, S. 49.

<sup>67</sup> Vgl. Ryll, 2010, S. 45 ff.

<sup>68</sup> Ryll, 2010, S.45.

unendlich langen Betriebszeit mit Sicherheit ein Ausfall auftritt. Umgekehrte Werte beschreiben hingegen die Überlebenswahrscheinlichkeit  $R(t)$ , die anfangs eins, bei einer unendlichen Betriebsdauer aber null wird.

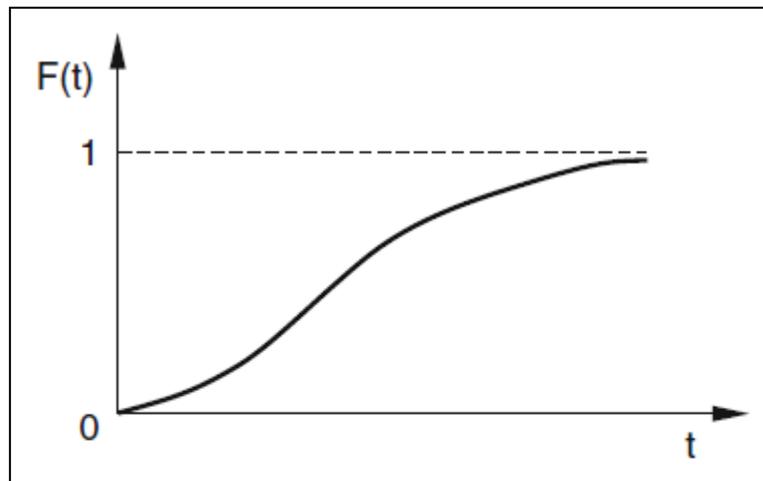


Abbildung 9: Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit  $F(t)$ .<sup>69</sup>

### 2.4.3 Strukturierte Systeme

Hierbei werden „Verknüpfungen einzelner Komponenten, Bauteile oder Teilsysteme zu komplexen Systemen“ berücksichtigt.<sup>70</sup> Die Lebensdauern  $X_i$  einzelner Elemente sind unabhängig voneinander und zufällig. Der Ausfall eines Elements bedeutet nicht zwangsweise den Ausfall eines verbundenen Elementes. Die Grundsysteme Serien- und Parallelschaltung werden im Folgenden genauer betrachtet und die zugehörigen Kenngrößen angegeben<sup>71</sup>:

#### Seriensysteme

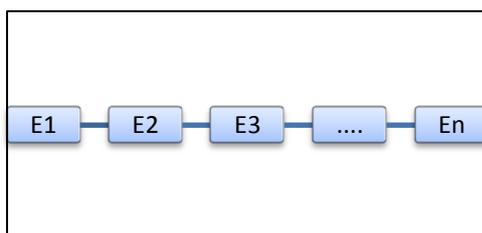


Abbildung 10: Komponenten in Serienschaltung

Mit  $R_S = R_1(t) * R_2(t) * R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$  berechnet sich die Zuverlässigkeit des Seriensystems. Die Ausfallsrate ergibt sich wie folgt:

<sup>69</sup> Ryll, 2010, S. 46.

<sup>70</sup> Ryll, 2010, S. 59.

<sup>71</sup> Vgl. Ryll, 2010, S. 60 f.

$$\lambda_s(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t)$$

## Parallelsysteme

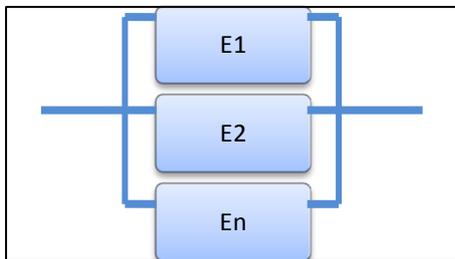


Abbildung 11: Komponenten in Parallelschaltung

Versagt eines der Parallelelemente, bedeutet dies nicht unbedingt den Ausfall des Elements, das dem Parallelsystem nachgeschaltet ist. In der Parallelschaltung gibt es Arbeits- und Reserveelemente. Erst wenn alle Reserveelemente ausgefallen sind, steht das System still. Die Reserveelemente lassen sich in kalte, warme und heiße Redundanzen einteilen. Kalte Redundanzen sind im normalen Betrieb des Arbeitselements nicht im Einsatz. Warme Redundanzen sind im Normalbetrieb weniger hoch beansprucht als das Arbeitselement, dadurch ist die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls auch geringer als beim hauptbeanspruchten Element. Die Gruppe der heißen Redundanzen unterscheidet sich weder in Belastungsstrke noch in Ausfallwahrscheinlichkeit von dem Arbeitselement.  $R_{\text{Parallel}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t))$  berechnet die Zuverlässigkeit.<sup>72</sup> „Für Parallelsysteme gilt, dass das bestimmende Element für einen Systemausfall das mit der längsten Lebensdauer ist“.<sup>73</sup>

Die mittlere Lebensdauer ist  $E(X_p) = \frac{1}{a} * (1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n})$  mit dem Parameter  $1/a$  als Lebensdauer eines einzelnen Elements, und unter der Bedingung einer Exponentialverteilung. Die Formel zeigt, dass, sofern genügend Parallelelemente geschaltet werden, eine „beliebig große mittlere Lebensdauer [...] erreicht werden kann.“<sup>74</sup>

### 2.4.4 LebensdauererVerteilungen und deren Rolle in der Zuverlässigkeit

Von Interesse für die Instandhaltung ist das Ausfallverhalten über die Zeit. Zu dessen mathematischen Beschreibung sowie zur Beschreibung der Funktion selber, wird die LebensdauererVerteilungen herangezogen. Im Folgenden wird auf die Weibull- und Exponentialverteilung

<sup>72</sup>Vgl, Ryll, 2010, S. 62.

<sup>73</sup> Ryll, 2010, S. 62.

<sup>74</sup> Ryll, 2010, S. 62.

lung genauer eingegangen. Die Normalverteilung<sup>75</sup> eignet sich nicht gut zur Beschreibung, da bei ihr die meisten Ausfälle in der Nähe des Mittelwerts auftreten und im weiteren Verlauf symmetrisch zum Mittelwert abnehmen müssten. Überdies beginnt sie beim Zeitpunkt minus Unendlich, was die Annahme einer Normalverteilung nur erlaubt, wenn Ausfälle im negativen Bereich vernachlässigt werden können. Aufgrund dieser Einschränkungen wird auf Normalverteilung nicht genauer eingegangen.

### Exponentialverteilung

Eingesetzt wird die Exponentialverteilung bei gleichbleibender Ausfallserwartung zur Beschreibung von Zufallsausfällen. Als einzige Lebensdauerverteilung besitzt sie eine konstante Ausfallsrate und ist zeitunabhängig.<sup>76</sup>

Überlebenswahrscheinlichkeit	$R(t) = e^{-a \cdot t}$
------------------------------	-------------------------

Ausfallwahrscheinlichkeit	$F(t) = 1 - e^{-a \cdot t}$
---------------------------	-----------------------------

Dichtefunktion	$f(t) = \lambda * e^{-a \cdot t}$
----------------	-----------------------------------

Ausfallrate	$\lambda(t) = \text{konst} = a$
-------------	---------------------------------

Erwartungswert	$E(X) = \frac{1}{a}$
----------------	----------------------

Varianz	$D^2(X) = \left(\frac{1}{a}\right)^2$
---------	---------------------------------------

Tabelle 1: Formeln zur Exponentialverteilung<sup>77</sup>

### Weibullverteilung

Der schwedischen Ingenieur Waloddi Weibull (1887-1979) beschrieb in den 1940er Jahren das Ausfallverhalten technischer Teile mit diesen Annahmen. Es gibt sowohl eine zwei-parametrische, als auch eine drei-parametrische Form:

Zwei Parameter<sup>78</sup>:

- T...charakteristische Lebensdauer: gibt den ungefähren Mittelwert der Verteilung an.
- b...Formparameter: beschreibt die Streuung der Ausfallszeiten und die Ausfallsdichte. Für  $b < 1$  sieht das Ausfallverhalten ähnlich wie bei der Exponentialverteilung aus, also zu Beginn hoch, dann abnehmend. Dies kennzeichnet Frühausfälle.  $b = 1$  ist die

<sup>75</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 37.

<sup>76</sup> Vgl. Ryll, 2010, S. 50 f.

<sup>77</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 41 und vgl. Ryll, 2010, S. 50.

<sup>78</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 41 f.

Exponentialverteilung, welche Zufallsausfälle sehr gut beschreibt, und für  $b > 1$  fängt  $f(t)$  bei null an, steigt mit der Lebensdauer, fällt aber nach dem Maximum flach ab. So lassen sich Verschleiß- und Ermüdungsausfälle darstellen. Für  $b=3,5$  lässt sich die Normalverteilung annähern. Grafisch dargestellt sind die Dichtefunktionen für verschiedene Parameter  $b$  in Abbildung 12.

Drei Parameter:

- $T$  und  $b$
- Zusätzlich:  $t_0$  als ausfallfreie Zeit.

	Zweiparametrische Form	Dreiparametrische Form
Überlebenswahrscheinlichkeit bzw. Zuverlässigkeit	$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$	$R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b}$
Ausfallwahrscheinlichkeit	$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$	$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b}$
Dichtefunktion $f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$	$f(t) = \frac{b}{T} * \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} * e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$	$f(t) = \frac{b}{T-t_0} * \left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^{b-1} * e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b}$
Ausfallrate $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$	$\lambda(t) = \frac{b}{T} * \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1}$	$\lambda(t) = \frac{b}{T-t_0} * \left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^{b-1}$

Tabelle 2: Formeln und Bezeichnungen der Weibullverteilung<sup>79</sup>

<sup>79</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 43.

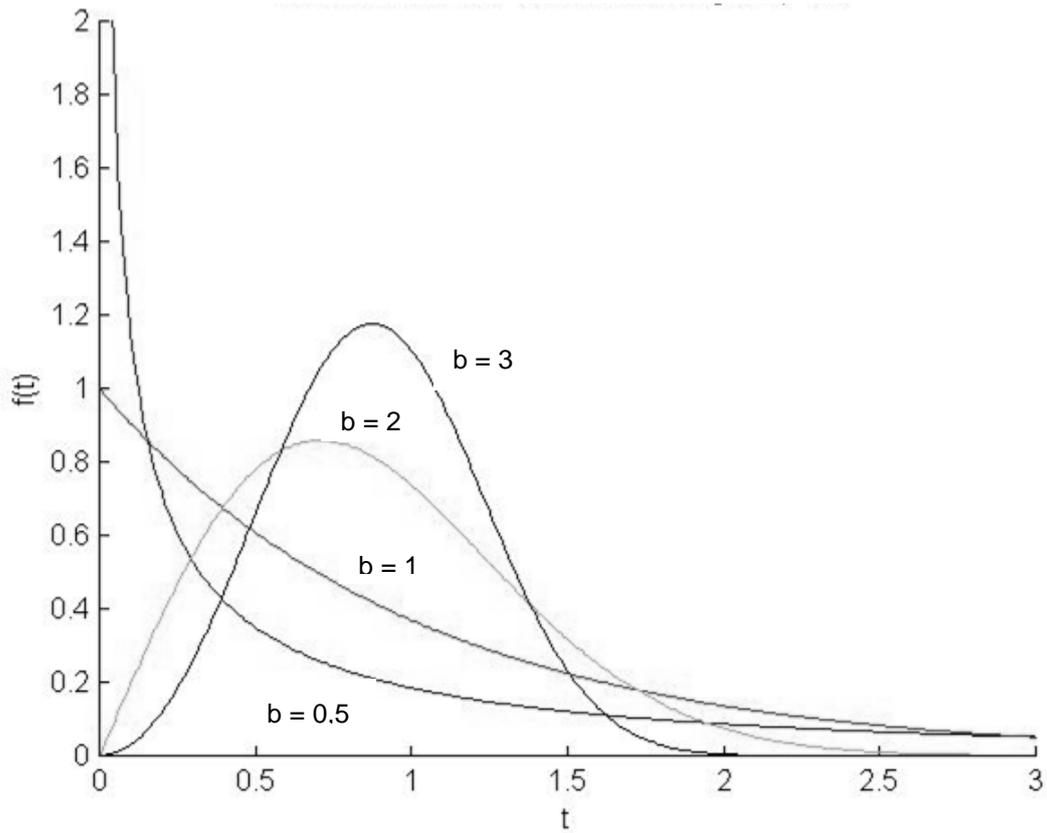


Abbildung 12: Dichtefunktion der Weibullverteilung, 2-parametrig<sup>80</sup>

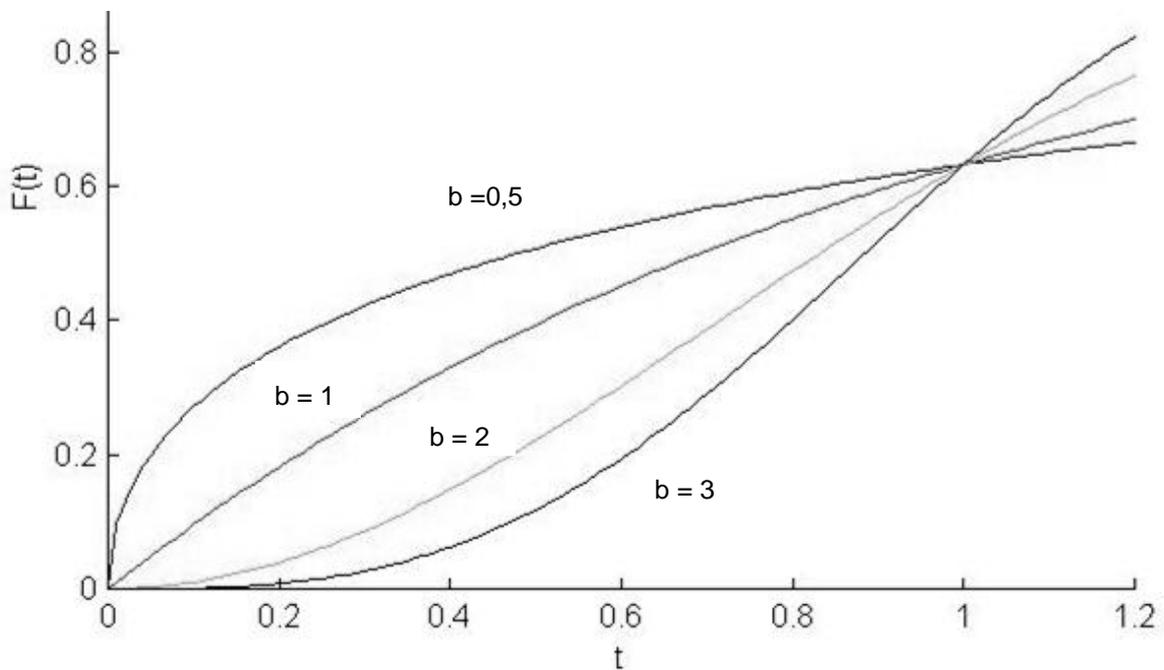


Abbildung 13: Verteilungsfunktion der Weibullverteilung, 2-parametrig<sup>81</sup>

<sup>80</sup> Nach: [www.eit.uni-kl.de/litz/lehre/wt/Verteilungen/Weibullverteilung.htm](http://www.eit.uni-kl.de/litz/lehre/wt/Verteilungen/Weibullverteilung.htm), Stand 06.2011

<sup>81</sup> Nach: [www.eit.uni-kl.de/litz/lehre/wt/Verteilungen/Weibullverteilung.htm](http://www.eit.uni-kl.de/litz/lehre/wt/Verteilungen/Weibullverteilung.htm), Stand 06.2011

### Vorgehensweise zur Ermittlung der Verteilungsfunktion

Aufbauend auf einer Stichprobe wird mit statistischen Testverfahren, z.B. Chi Anpassungstest und Komolgorov-Test, oder graphischen Verfahren, wozu Funktionspapiere wie das Weibullwahrscheinlichkeitspapier gehören, die Verteilungsfunktion bestimmt. Bei den Testverfahren ist die Aufstellung einer Hypothese erforderlich. Unterstützend zur Formulierung dieser kann mit Histogrammen gearbeitet werden:<sup>82</sup>

Zunächst erfolgt eine Klasseneinteilung der Stichproben, indem zuerst die Spannweite  $S$  ermittelt mit  $S = \mathbf{TBF}_{\max} - \mathbf{TBF}_{\min}$  wird, wobei TBF für Time Between Failure steht. Die Anzahl der Klassen ergibt sich aus  $k \leq 5 \cdot \log(n)$  mit der Klassenbreite  $d = S/k$ .

$$\text{Klassenuntergrenze } \mathbf{UKG}_i = \mathbf{TBF}_{\min} + (i - 1) * d$$

$$\text{Klassenobergrenze } \mathbf{OKG}_i = \mathbf{UKG}_i + d$$

Danach wird die primäre Häufigkeitstabelle erstellt, in der die Klassen durchnummeriert werden. Diese Tabelle gibt auch die Anzahl der Vorfälle pro Klasse, bezeichnet als absolute Häufigkeit  $h_i$ , an. Die relative Häufigkeit  $H_i$  bezieht die absolute Häufigkeit auf die Stichprobenanzahl  $n$ . Ein Beispiel für Grafiken, die aus dieser Kategorisierung abgeleitet sind, ist in Abbildung 14 dargestellt.

---

<sup>82</sup> Vgl. Ryll, 2010, S. 54 ff.

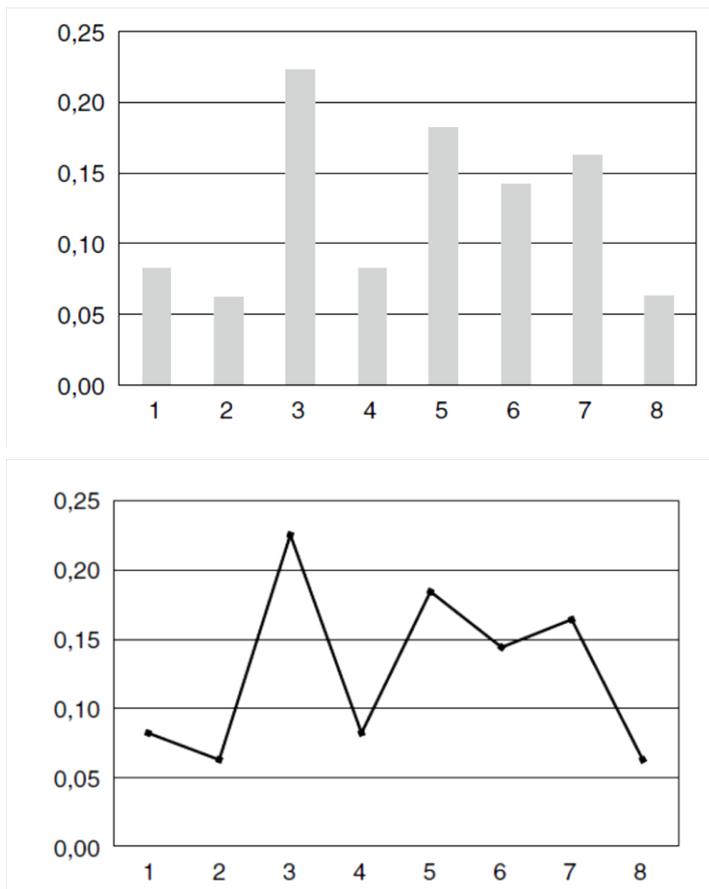


Abbildung 14: Histogramm-Darstellung der relativen Häufigkeitsverteilung und Dichtefunktion der Ausfallsverteilung  $f(t)$ <sup>83</sup>

Darauf aufbauend lässt sich eine Näherung für die Verteilungsfunktion  $F(t)$  herstellen:

$$F_i = \frac{\sum_1^i H_i}{n}$$

Nachfolgend wird auf zwei Möglichkeiten eingegangen, mit denen sich die Art der Verteilung testen lässt. Ist das Ergebnis eines solchen Tests, dass die Stichproben einer bestimmten Verteilung folgen, so kann davon ausgegangen werden, dass sich die getesteten Werte (Ausfälle) auch in Zukunft so verhalten, was Abschätzungen zu deren Auftreten erlaubt und vereinfacht.

**Komolgorov Test**<sup>84,85</sup>: Wie bei jedem Testverfahren ist der erste Schritt die Formulierung von zwei Hypothesen:

<sup>83</sup> Ryll, 2010, S. 57.

<sup>84</sup> Ryll, 2010, S. 53

<sup>85</sup> Storm, 2007, S 211 f.

- Null-Hypothese:  $H_0: F_1(x) = F_0(x)$ , d.h. die Verteilung verhält sich wie die Vergleichsverteilung. Letztere trägt auch den Namen Teststatistik.
- Alternativhypothese:  $H_1: F_1(x) \neq F_0(x)$ , d.h. die Verteilung verhält sich nicht wie die Teststatistik.

Über die Bildung der Summenhäufigkeit wird festgestellt, ob die Nullhypothese verworfen wird. Dies ist der Fall, wenn der Wert der Teststatistik größer ist, als der jeweilige Vergleichswert in einer Komolgorov Tabelle.

$$d_n = \|F_n - F_0\| = \sup(F_n - F_0)$$

### Chi Anpassungstest:

Die Beobachtungen  $n(x_1 \dots x_n)$  erfahren eine Unterteilung in Kategorien  $j$ , wobei  $(j=1 \dots m)$ . Die Häufigkeit je Kategorie  $n_j$  gibt die Anzahl der Beobachtungen je Kategorie an. Des Weiteren lässt sich die Anzahl der mittleren Beobachtungen je Kategorie aus

$$n_{j0} = p_{0j} * n$$

berechnen, wobei  $p_{0j}$  für die Wahrscheinlichkeit steht, dass die Ausprägung in die jeweilige Kategorie fällt. Für den Chi Test lautet die Prüfgröße:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^n \frac{(n_j - n_{j0})^2}{n_{j0}}$$

$H_0$  wird abgelehnt, wenn gilt:

$$\chi^2 > \chi^2(1 - \alpha; m - 1),$$

wobei  $\alpha$  das Signifikanzniveau darstellt und  $m-1$  die Anzahl der Freiheitsgrade bildet.

### Wahrscheinlichkeitspapier:

Der S-förmige Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit  $F(t)$ , wie jener der Weibullverteilung in Abbildung 13 zu sehen ist, erscheint im Weibull-Wahrscheinlichkeitspapier als Gerade durch eine Darstellung der Ordinate in doppellogarithmische Teilung sowie logarithmischer Teilung auf der Abszisse<sup>86</sup>. Dies ist v.a. für Versuche praktisch, da durch die eingetragenen Versuchswerte unkompliziert eine Gerade gelegt werden kann.<sup>87</sup> Jede zwei-parametrische Weibullverteilung kann in diesem Netz veranschaulicht werden. Dabei schlägt sich der Parameter  $b$  als Steigung in der Grafik nieder. Zur Konstruktion dieser Steigung wird der Polpunkt auf der Abszisse mit dem  $b$ -Wert auf der rechten Ordinate verbunden. Die Variablen  $T$  und  $b$

<sup>86</sup> Vgl. Timischl, 2002, S. 298.

<sup>87</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 47.

sind meist gegeben. Zur Konstruktion im Wahrscheinlichkeitspapier wird  $T=t$  gesetzt, wodurch

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} = 1 - e^{-(1)^b} \text{ wird.}$$

Somit kann der Wert  $F(t)$  genau für diesen Punkt berechnet werden. Zum Schnittpunkt von  $F(t)$  und  $t=T$  wird die Gerade der Steigung parallelverschoben. Hiermit ist die Funktion der Weibullverteilung konstruiert.

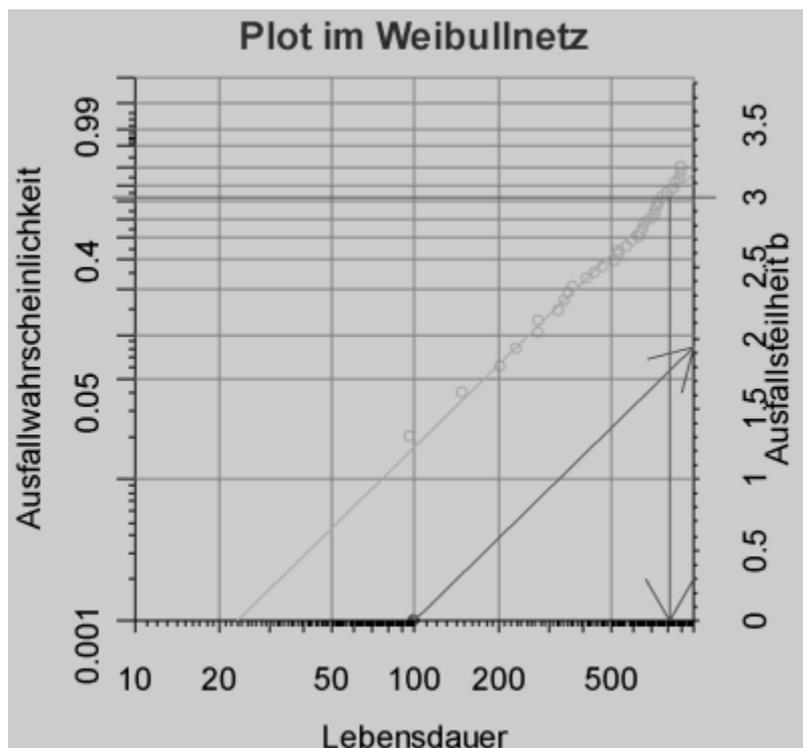


Abbildung 15: Beispiel eines Weibullnetzes<sup>88</sup>

Auch dreiparametrische Verteilungen lassen sich im Weibullnetz darstellen, allerdings handelt es sich dann nicht mehr um eine Gerade. Die Funktion nimmt einen kurvigen Verlauf an.<sup>89</sup>

<sup>88</sup>[http://web.neuestatistik.de/inhalte\\_web/content/MOD\\_38071/html/comp\\_38075.html](http://web.neuestatistik.de/inhalte_web/content/MOD_38071/html/comp_38075.html), entnommen am 23.4.2011

<sup>89</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S.51.

### 3 Risikobasierte Strategiewahl

In der Risikobasierten Strategiewahl wird aufgrund der möglichen Auswirkungen und der Häufigkeit, mit der diese Auswirkung auftritt, das Risiko berechnet. Je nach Risikohöhe bzw. Risikogefahr wird priorisiert um danach gezielt Maßnahmen zu setzen, die der potentiellen Gefahr resp. dem Ausfall entgegenwirken. In

Abbildung 16 ist das Vorgehen einer Risikoanalyse dargestellt. Abbildung 17 betrachtet den Prozess nochmals, aber etwas differenzierter und unter Aufteilung des Vorganges in zwei Prozessstränge. Der Zweck, welchen die Risikoanalyse verfolgt, ist im Wesentlichen die Reduktion von Inspektions- und Instandhaltungskosten, wobei es kurzfristig zu einem Anstieg der Kosten in diesem Bereich kommen kann. Dies kommt daher, dass ein Fokus auf risikoreiche Bereiche gelegt wird<sup>90</sup>, welche mitunter erhöhten Ressourceneinsatz erfordern. Im Gegensatz dazu erlaubt die Einschätzung des Risikos für risikolose Anlagen eine Verringerung der Instandhaltungsfrequenz resp. -intensität.<sup>91</sup>

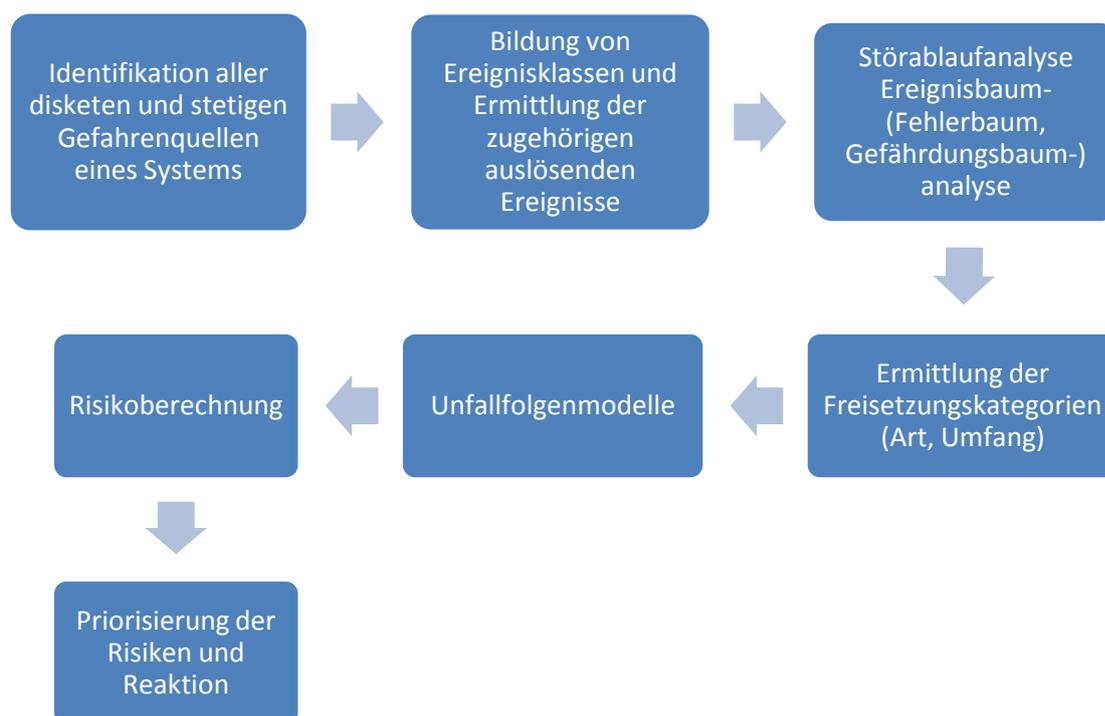


Abbildung 16: Ablauf einer Risikoanalyse<sup>92</sup>, nach Meyna erweitert

<sup>90</sup> Vgl. Schubert, 2008, S. 69.

<sup>91</sup> Vgl. Schubert, 2008, S. 67.

<sup>92</sup> Meyna, 1994, S. 28.

Die Basis für die Bedeutung des Risikos liefern drei grundlegende Fragen: Was kann in Bezug auf ein Szenario oder Ereignis schief gehen? Wie oft könnte es passieren? Was sind die Konsequenzen?<sup>93</sup> Die Definition des Risikos lautet:

$$\text{Risiko} = \text{Eintrittswahrscheinlichkeit} \times \text{Auswirkung}^{94}$$

bzw.

$$\text{Risiko} = \text{Häufigkeit} \times \text{Ausfallfolgen}^{95}$$

Dabei kann die Auswirkung in verschiedenen Formen ausgedrückt werden, z.B. als Sachschaden, Produktionsverzögerung, Rückstand, Verluste oder in Form einer monetären Bewertung der zuvor Genannten.<sup>96</sup> Die erforderliche Wahrscheinlichkeit für die Risikoberechnung festzustellen, kann schwierig sein. Stehen Aufzeichnungen aus der Vergangenheit zur Verfügung, lassen diese bei genügend großem Umfang und ausreichender Genauigkeit auf eine Wahrscheinlichkeit schließen. Auch das Abschätzen durch Experten ist eine Möglichkeit, um Werte zu erhalten. Gibt es mehrere Faktoren, die zusammenspielen, ist es hilfreich, die Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Faktoren abzuschätzen und dann das Produkt daraus zu bilden<sup>97</sup>. Kann das Risiko im Prozess nicht zufriedenstellend quantifiziert werden, muss die Untersuchung fortgesetzt werden. Dies geht so lange, bis das Risiko verstanden und eingeschätzt ist. Ist dies nicht der Fall, muss der betroffene Teil der Anlage aus dem Produktionsprozess genommen werden.<sup>98</sup>

---

<sup>93</sup> Vgl. Merrick, 1999, S. 49.

<sup>94</sup> Vgl. Merrick, 1999, S. 49.

<sup>95</sup> Vgl. Meyna, 1994, S. 25.

<sup>96</sup> Vgl. Merrick, 1999, S. 49.

<sup>97</sup> Vgl. Nordgård, 2005.

<sup>98</sup> Vgl. Merrick, 1999, S. 49.

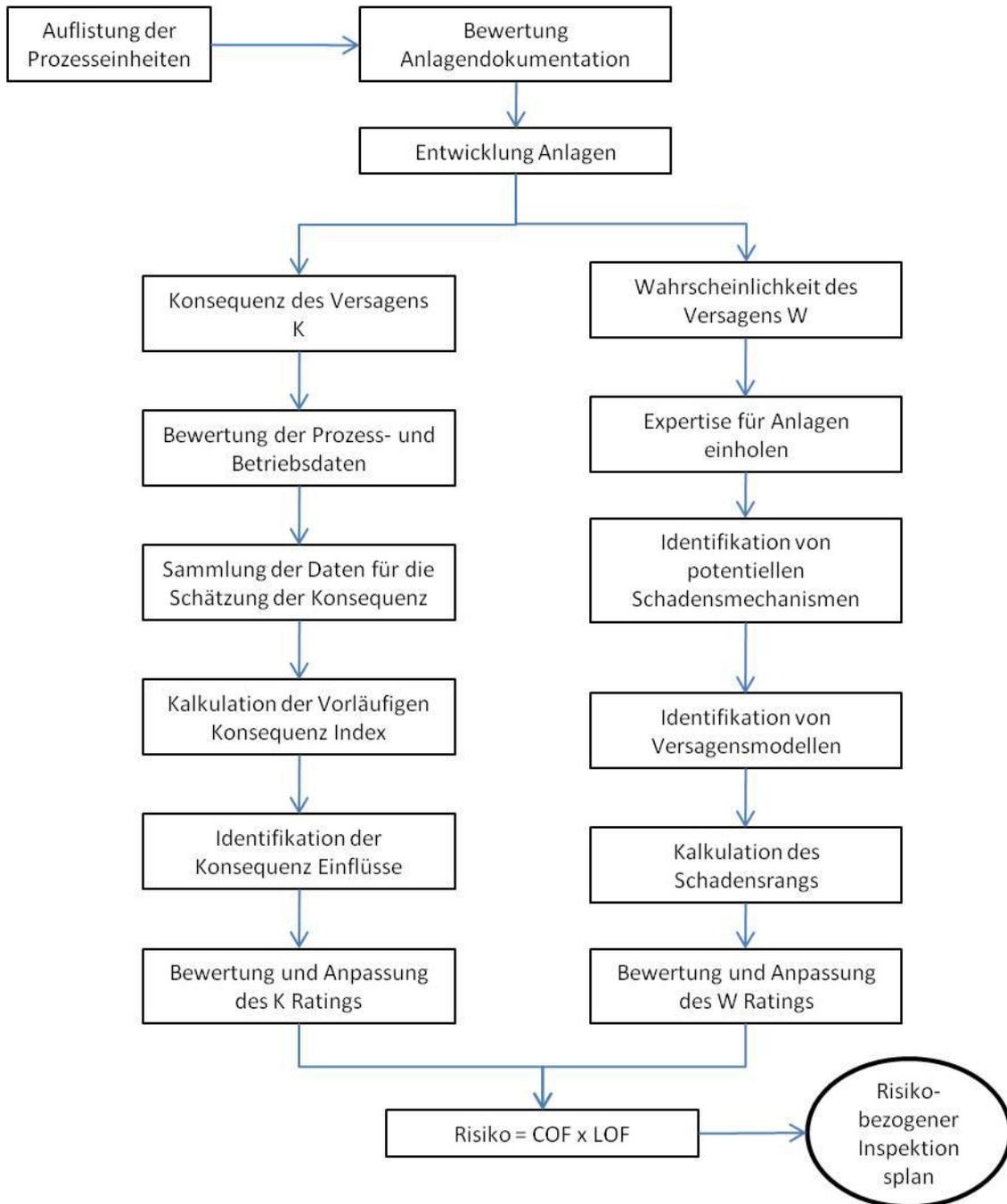


Abbildung 17: Risikoreihungsprozess<sup>99</sup>, (COF=consequence of failure, LOF= likelihood of failure)

Das folgende Kapitel stellt Methoden zur Risikoermittlung vor. Überdies wird auf die Kategorisierung der im Prozess offengelegten Risiken eingegangen.

<sup>99</sup> Vgl. Merrick, 1999, S. 49.

### 3.1 Fault Tree Analysis FTA (Fehlerbaumanalyse)

Die Fehlerbaumanalyse hilft, unerwünschte Systemzustände, d.h. Versagen, Ausfälle, Gebrechen, etc., ausfindig zu machen sowie deren Ursachen und Verknüpfungen im System aufzuzeigen. Eine grafische Aufbereitung veranschaulicht die Erkenntnisse. Es werden alle Kombinationen, die auftreten können, berücksichtigt<sup>100</sup>. Eine Verknüpfung erfolgt mit Symbolen, die an die Boolesche Algebra angelehnt sind.<sup>101</sup> Es gibt die drei Möglichkeiten UND (&), ODER ( $\geq 1$ ) bzw. NICHT ( $^{\circ}$ ).

Das Ziel der FTA ist die Identifikation der möglichen Ausfälle mitsamt den zugrundeliegenden Ursachen, wobei systematisch vorgegangen wird. Im Ablauf werden die schwerwiegenden Szenarien dargestellt und die Kriterien zur Beurteilung für die jeweilige Situation festgelegt. Auch die Dokumentation der Ausfallsmechanismen sowie jene der funktionalen Zusammenhänge ist ein wesentlicher Bestandteil der FTA.<sup>102</sup>

Um die Analyse zu vereinfachen und ein gutes Verständnis des betrachteten Systems zu erhalten, wird auch bei der FTA eine Zerlegung in Subsysteme und Komponenten vorgenommen.

Bei den Ausfällen werden drei Kategorien unterschieden<sup>103</sup>:

- Primärausfall – Ein Ausfall tritt bei normalen Betriebsbedingungen auf.
- Sekundärausfall – Die Betriebsbedingungen sind nicht normal und es kommt deswegen zu einem Ausfall, z.B. durch nicht sachgemäßes Handling.
- Kommandierter Ausfall – Die Einzelkomponenten sind in Ordnung und eigentlich funktionstüchtig, aber die antreibenden resp. vorgeschalteten Komponenten sind ausgefallen.

Zunächst wird das unerwünschte Ereignis bzw. der Ausfall identifiziert. Dann wird eine Systemebene tiefer gestiegen und dort nach dem Grund gesucht. In dieser Weise setzt sich das TOP-DOWN Vorgehen bis zur Komponentenebene fort. Anschließend erfolgt die grafische Aufbereitung des Systems nach FTA Symbolik wobei die Verknüpfungen zwischen den Systemebenen herausgearbeitet werden.<sup>104</sup> ODER Verknüpfungen kommen häufig vor, da meist der Ausfall des Untersystems 1 ODER des Untersystems 2 ODER usw. zum Versagen des Übergeordneten Systems führt.

---

<sup>100</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 163.

<sup>101</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 163.

<sup>102</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 164.

<sup>103</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 162.

<sup>104</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 164 f.

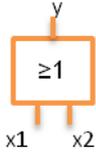
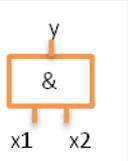
Bezeichnung	Symbol	Operator	Boolsche Gleichung	Funktions-tabelle x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> y	Mathematische Beschreibung
<b>NICHT, Negation</b>		$\bar{x}$	$y = \bar{x}$	0 - 1 1 - 0	
<b>ODER, Disjunktion, Parallelschaltung</b>		$\vee$	$y = x_1 \vee x_2$	0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1	$R_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t))$
<b>UND, Konjunktion, Serienschaltung</b>		$\wedge$	$y = x_1 \wedge x_2$	0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 1 1	$R_S(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$

Tabelle 3: Boolesche Operatoren und deren mathematische Zusammenhänge<sup>105</sup>

Die Tabelle 3 zeigt neben den Symbolen auch die Funktionstabelle und die entsprechende mathematische Beschreibung der Bool'schen Operatoren. Die Möglichkeit, den Funktionen 0 und 1 zuzuordnen, also „funktioniert“ und „funktioniert nicht“, erlaubt eine mathematische Beschreibung und somit eine Berechnung der Zuverlässigkeit für das betrachtete System. Die Funktionstabelle zeigt, welchen Wert der Ausgang  $y$  annimmt, wenn die Eingänge  $x_1$  und  $x_2$  die jeweiligen in der Tabelle angegebenen Werte haben. Mit dem Zusammenhang

$$F_S(t) = 1 - R_S(t)$$

kann die Systemausfallwahrscheinlichkeit berechnet werden.<sup>106</sup> Wird in der Positivlogik modelliert, die auch in der Tabelle dargestellt ist, entspricht die Disjunktion einer Serienschaltung und die Konjunktion einer Parallelschaltung. Die Negativlogik negiert die Eingänge und Ausgänge, sprich für die Disjunktion: „wenn  $\bar{x}_1$  und  $\bar{x}_2$  „nicht“, dann ist Ausgang auch  $\bar{y}$ “. Die Operatoren für Serien- und Parallelschaltung werden in der Negativlogik umgekehrt zu den

<sup>105</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 169, 173.

<sup>106</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 172 f.

Operatoren in der Positivlogik verwendet. Beachtet muss aber werden, dass eben die Variablen negiert sind. Dies ergibt für die SystemAusfallwahrscheinlichkeit<sup>107</sup>  $F_{S,Reihe}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i(t))$  und  $F_{S,Serie}(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t)$  Bei Verwendung der Negativlogik ist weiteres essentiell, dass 1 den Systemausfall und 0 das funktionierende System darstellt.

Zur Veranschaulichung einer FTA Grafik wurde diese für einen Fahrradständer aus Aluminiumguss erstellt (Abbildung 18). Die Dreiecke am Ende der Pfade bedeuten, dass der Pfad noch weiter zerlegt und ergründet werden kann. Die Kreise hingegen sind ein Zeichen dafür, dass das logische Ende eines Pfades erreicht wurde und eine weitere Aufschlüsselung nicht mehr sinnvoll ist. Dabei steht es im Ermessen der FTA-Ersteller, wo diese Grenze gezogen wird, um die Aufschlüsselung sinnvoll zu gestalten.

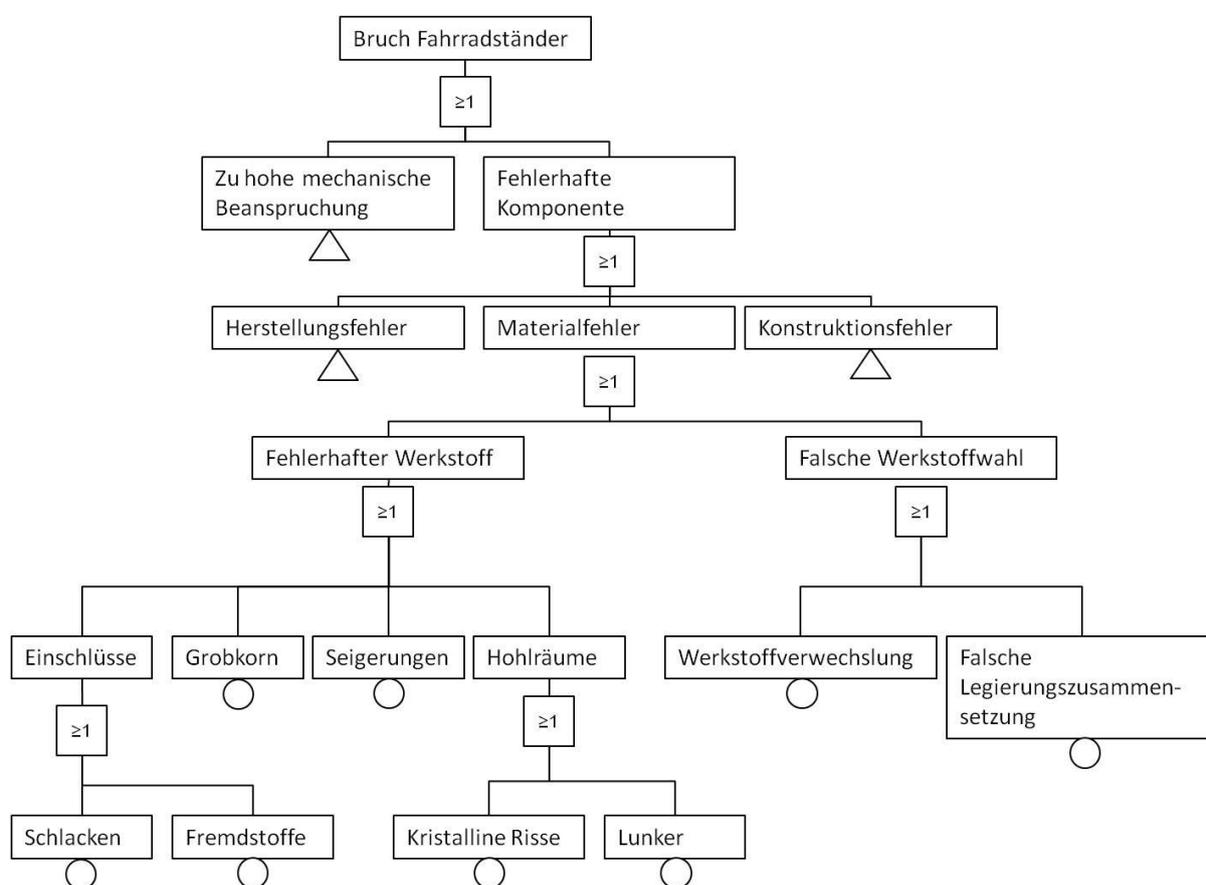


Abbildung 18: FTA für den Bruch eines Fahrradständers

Zusammenfassend eignet sich die FTA sowohl für die Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit von Systemen, als auch für die Ermittlung der Folgen. Die klare Strukturierung, welche beim Aufgliedern in die Systeme entsteht, veranschaulicht Folgeausfälle, die das Bewerten, z.B. in monetären Größen, erleichtern.

<sup>107</sup> Bertsche, 2004, S. 174.

### 3.1.1 Die Boolesche Algebra als Hilfsmittel in der FTA

Die Bool'sche Modellbildung ist erwähnenswert, weil sie als Grundlage für rechnergestützte Verfahren dient. Systeme, die sich durch Größe und Komplexität auszeichnen, können damit berechnet, aber auch übersichtlich dargestellt werden.<sup>108</sup> Da in der FTA Bool'sche Modellbildung angewandt wird und das Wissen darum zum raschen Lösen kleinerer Systeme notwendig ist, werden nachfolgend die wichtigsten Grundlagen zusammengefasst.

#### Rechenregeln in der Bool'schen Algebra<sup>109</sup>

- Kommutativgesetz  $x_1 \vee x_2 = x_2 \vee x_1$  und  $x_1 \wedge x_2 = x_2 \wedge x_1$
- Assoziativgesetz  $(x_1 \vee x_2) \vee x_3 = x_1 \vee (x_2 \vee x_3)$  und  $(x_1 \wedge x_2) \wedge x_3 = x_1 \wedge (x_2 \wedge x_3)$
- Distributivgesetz  $(x_1 \vee x_2) \wedge x_3 = (x_1 \wedge x_3) \vee (x_2 \wedge x_3)$  und  $(x_1 \wedge x_2) \vee x_3 = (x_1 \vee x_3) \wedge (x_2 \vee x_3)$
- Postulat  $x \vee 0 = x$  und  $x \wedge 1 = x$ . Des weiteren ist  $x \wedge \bar{x} = 0$  und  $x \vee \bar{x} = 1$ .
- Das Gesetz von De Morgan beschreibt eine Rechenregel für Verbindungen, die als ganze negiert sind. Konkret bedeutet dies:  $\overline{x_1 \vee x_2} = \bar{x}_1 \wedge \bar{x}_2$  und  $\overline{x_1 \wedge x_2} = \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2$ .

Sind n binäre Variablen durch eine Disjunktion aneinandergereiht, wird von einem Maxterm gesprochen. Für Konjunktionen die in gleicher Weise verknüpft sind, gilt die Bezeichnung Minterm.

Die Verknüpfungen NAND und NOR invertieren Konjunktion und Disjunktion. In der Symbolik wird für diesen Fall den Schaltsymbolen der „Und“ und „Oder“ Verknüpfung, gleich wie bei der „Nicht“ Verknüpfung, ein kleiner Ring am Ausgang hinzugefügt.

Um aus einer Bool'schen Funktion den Erwartungswert abzuleiten, wird die folgende Beschreibung herangezogen<sup>110</sup>:

$$E\{x_i\} = 1 * Pr\{x_i = 1\} + 0 * Pr\{x_i = 0\}$$

$$E\{x_i\} = Pr\{x_i = 1\} = p_i$$

Dies bedeutet, es ist zu erwarten, dass das System mit der Wahrscheinlichkeit funktionsfähig ist, mit der eine Einzelkomponente funktionsfähig ist.  $p_i$  ist dabei die Überlebenswahr-

<sup>108</sup> Vgl. Meyna, 2004, S. 9.

<sup>109</sup> Vgl. Meyna, 2004, S. 33 ff.

<sup>110</sup> Vgl. Mayna, 1994, S. 59.

scheinlichkeit einer einzelnen Komponente. Es gilt  $\bar{x}_i = 1 - p_i(t)$ . Da  $\Pr\{x_i = 0\} = q_i$  ist, wird  $q_i$  als Ausfallwahrscheinlichkeit bezeichnet.<sup>111</sup>

In der FTA hat sich die Negativlogik durchgesetzt. Somit heißt das für die Ausfallfunktion  $\bar{\Phi}(\bar{x})$ :<sup>112</sup>

$$\bar{\Phi}(\bar{x}) = \begin{cases} \mathbf{1} & \text{das System ist ausgefallen} \\ \mathbf{0} & \text{das System ist funktionfähig} \end{cases}$$

Für die Variablen  $\bar{x} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_n)$ , welche die Komponenten darstellen, gilt:

$$\bar{x}_j = \begin{cases} \mathbf{1} & \bar{x}_j \text{ ist ausgefallen} \\ \mathbf{0} & \bar{x}_j \text{ ist funktionfähig} \end{cases}$$

Zur Verdeutlichung wird das in Abbildung 18 als Fehlerbaum dargestellte Beispiel mit Hilfe der Bool'schen Algebra berechnet.

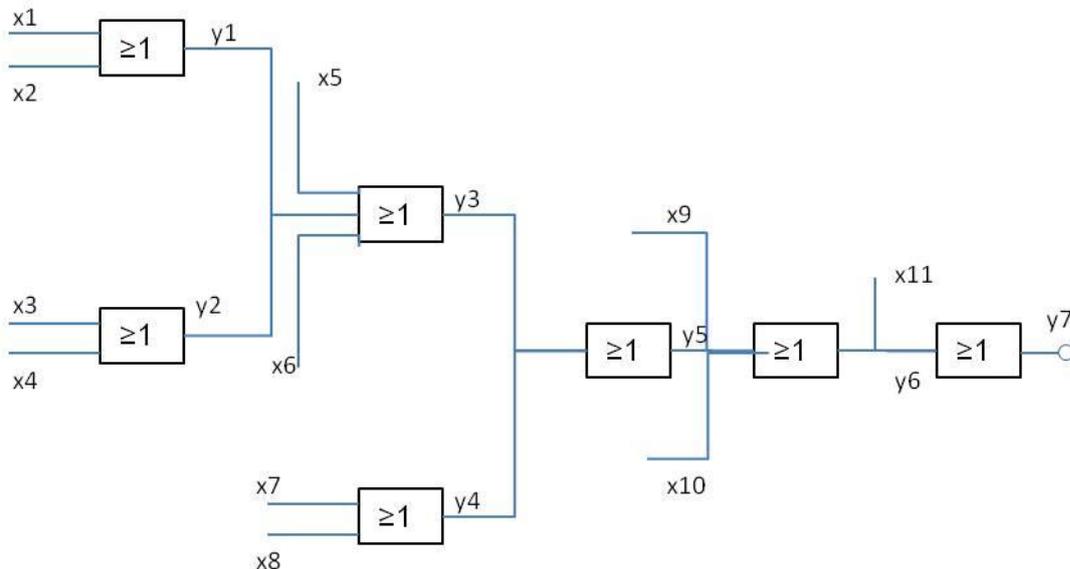


Abbildung 19: Beispiel - Bruch eines Fahrradständers in Bool'scher Symbolik

Dabei stehen die Eingangs- und Ausgangsvariablen für folgende Zustände:

$x_1$	Schlacken	$x_7$	Werkstoffverwechslung	$y_2$	Hohlräume
$x_2$	Fremdstoffe	$x_8$	Falsche Legierungszusammensetzung	$y_3$	Fehlerhafter Werkstoff
$x_3$	Kristalline Risse	$x_9$	Herstellungsfehler	$y_4$	Falsche Werkstoffwahl

<sup>111</sup> Vgl. Mayna, 1994, S. 59 f.

<sup>112</sup> Vgl. Mayna, 1994, S. 67.

$x_4$	Lunker	$x_{10}$	Konstruktionsfehler	$y_5$	Materialfehler
$x_5$	Grobkorn	$x_{11}$	Zu hohe mech. Beanspruchung	$y_6$	Fehlerhafte Komponente
$x_6$	Seigerungen	$y_1$	Einschlüsse	$y_7$	Bruch des Fahrradständers

Tabelle 4: Beispiel - Bruch eines Fahrradständers - Zuordnung der Variablen

$$(x_1 \vee x_2) \vee x_5 \vee x_6 \vee (x_3 \vee x_4) = y_3$$

$$x_7 \vee x_8 = y_4$$

$$x_3 \vee x_4 = y_5$$

$$x_9 \vee x_{10} \vee y_5 = x_9 \vee x_{10} \vee (x_3 \vee x_4) = y_6$$

$$x_{11} \vee (x_9 \vee x_{10} \vee (x_3 \vee x_4)) = y_7$$

Wird nun angenommen, dass Lunker im Material auftreten, so wird  $x_4 = 1$ , also ausgefallen, gesetzt. Die anderen Variablen bleiben funktionstüchtig, werden also gleich 0 gesetzt. Dies heißt für die Gleichungen:

$$(x_1 \vee x_2) \vee x_5 \vee x_6 \vee (x_3 \vee x_4) = (0 \vee 0) \vee 0 \vee 0 \vee (0 \vee 1) = y_3 = 1$$

$$x_7 \vee x_8 = 0 \vee 0 = y_4 = 0$$

$$x_3 \vee x_4 = 1 \vee 0 = y_5 = 1$$

$$x_9 \vee x_{10} \vee y_5 = x_9 \vee x_{10} \vee (x_3 \vee x_4) = 0 \vee 0 \vee 1 = y_6 = 1$$

$$x_{11} \vee y_6 = 0 \vee 1 = y_7 = 1$$

Das heißt, dass sich Lunker im Gussmaterial auf einen Bruch der Komponente auswirken (können, aber nicht müssen, jedenfalls gibt es einen Einfluss).

Als Hilfsmittel zur Analyse eines FTA Systems steht die Methode der Minimalpfade resp. die Methode der Minimalschnitte zur Verfügung<sup>113</sup>:

### Minimalpfade

Definition:  $M = \{K_1 \dots K_2\}$  stellt die Menge der Komponenten dar. Dabei ist die Teilmenge Pf aus M jene, welche die funktionsfähigen Komponenten beinhaltet und wird mit „Pfad des

<sup>113</sup> Vgl. VDI 4008, Blatt 7

Systems“ bezeichnet. Der Pfad ist minimal, wenn er keine untergeordneten Pfade beinhaltet. Die Ausfallfunktion für den Pfad lautet

$$H_j(\bar{x}_1) = \bigvee_{K_i \in Pf_j} \bar{x}_i = 1 - \prod_{K_i \in Pf_j} (1 - \bar{x}_i)$$

$$\bar{\Phi}(\bar{x}) = \prod_j H_j(\bar{x})$$

Ist zumindest ein  $H_j(\bar{x}_1) = 0$ , ist natürlich auch  $\bar{\Phi}(\bar{x}) = 0$  was bedeutet, dass das System funktioniert.

Um die Systematik der Minimalpfade einer anschaulichen Erklärung zu unterziehen, wird ein Beispiel aus der Literatur wiedergegeben:<sup>114</sup>

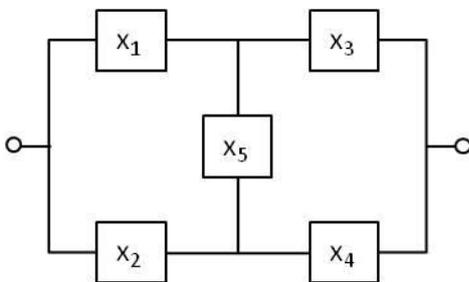


Abbildung 20: Blockschaltbild einer Brückenschaltung

Die Menge der Komponenten ist  $M = \{x_1, \dots, x_4\}$ . Ein Pfad des Systems ist jener Weg durch die Schaltung, der die Funktion des Systems gewährleistet. Dabei gibt es keinen anderen Pfad als echte Teilmenge, und somit sind die Pfade minimal.

$$Pf_1 = \{x_1, x_3\}, Pf_2 = \{x_2, x_4\}, Pf_3 = \{x_1, x_4, x_5\}, Pf_4 = \{x_2, x_3, x_5\}$$

Unter Einbeziehung der oben angegebenen Formel ergeben sich für diese Schaltung die Ausfallfunktionen für die Minimalpfade

$$H_1(\bar{x}) = \bar{x}_1 \vee \bar{x}_3 = 1 - (1 - \bar{x}_1)(1 - \bar{x}_3)$$

$$H_2(\bar{x}) = \bar{x}_2 \vee \bar{x}_4 = 1 - (1 - \bar{x}_2)(1 - \bar{x}_4)$$

$$H_3(\bar{x}) = \bar{x}_1 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_5 = 1 - (1 - \bar{x}_1)(1 - \bar{x}_4)(1 - \bar{x}_5)$$

$$H_4(\bar{x}) = \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \vee \bar{x}_5 = 1 - (1 - \bar{x}_2)(1 - \bar{x}_3)(1 - \bar{x}_5)$$

Die Ausfallfunktionen der Minimalpfade werden nun multipliziert, um die Ausfallfunktion der Brückenschaltung zu erhalten

<sup>114</sup> Meyna, 1994, S. 68 f.

$$\bar{\Phi}(\bar{x}) = \prod_j H_j(\bar{x}) = (1 - (1 - \bar{x}_1)(1 - \bar{x}_3)) * (1 - (1 - \bar{x}_2)(1 - \bar{x}_4)) * (1 - (1 - \bar{x}_1)(1 - \bar{x}_4)(1 - \bar{x}_5)) * (1 - (1 - \bar{x}_2)(1 - \bar{x}_3)(1 - \bar{x}_5))$$

### Minimalschnitte

In der Teilmenge C aus M befinden sich jene Komponenten, die ausgefallen sind und werden als „Schnitt des Systems“ bezeichnet. Analog zum Pfad gilt für den Schnitt das Kriterium, dass er minimal ist, wenn er keinen weiteren von seiner Art als Teilmenge beinhaltet. Die mathematische Beschreibung der Ausfallfunktion für Schnitte hat folgende Form:

$$\delta_j(\bar{x}_j) = \bigwedge_{K_i \in C_j} \bar{x}_i = \prod_{K_i \in C_j} \bar{x}_i$$

$$\bar{\Phi}(\bar{x}) = 1 - \prod_j (1 - \delta_j(\bar{x}))$$

Ist zumindest ein Minimalschnitt ausgefallen, bedeutet dies auch für das ganze System, dass es nicht funktionsfähig ist<sup>115</sup>.

Die Brückenschaltung aus Abbildung 20 wird zur Erklärung der Minimalschnitte herangezogen. Die Berechnung orientiert sich an Meyna<sup>116</sup>:

Hier ist der Schnitt die Menge der ausgefallenen Komponenten, die dazu führt, dass das System nicht funktionstüchtig ist, also Komponenten die den „Fluss“ durch die Pfade blockieren. Enthalten die Schnitte keine andere Teilmenge, gelten sie als minimal. Für die Brückenschaltung Abbildung 20 sind das  $C_1 = \{x_1, x_2\}$ ,  $C_2 = \{x_3, x_4\}$ ,  $C_3 = \{x_1, x_4, x_5\}$ ,  $C_4 = \{x_2, x_3, x_5\}$

Diese Minimalschnitte haben jeweils die Ausfallfunktionen

$$\delta_1(\bar{x}) = \bar{x}_1 \wedge \bar{x}_2 = \bar{x}_1 \bar{x}_2$$

$$\delta_2(\bar{x}) = \bar{x}_3 \wedge \bar{x}_4 = \bar{x}_3 \bar{x}_4$$

$$\delta_3(\bar{x}) = \bar{x}_1 \wedge \bar{x}_4 \wedge \bar{x}_5 = \bar{x}_1 \bar{x}_4 \bar{x}_5$$

$$\delta_4(\bar{x}) = \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_3 \wedge \bar{x}_5 = \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_5$$

Beim Ausfall von zumindest einem Minimalschnitt ist das System nicht mehr funktionstüchtig. Die Gesamtausfallfunktion ist

$$\bar{\Phi}(\bar{x}) = 1 - (1 - \bar{x}_1 \bar{x}_2) * (1 - \bar{x}_3 \bar{x}_4) * (1 - \bar{x}_1 \bar{x}_4 \bar{x}_5) * (1 - \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_5)$$

<sup>115</sup> Vgl. Meyna, 1994, S. 71.

<sup>116</sup> Meyna, 1994, S. 70 f.

### 3.1.2 Importanzkenngrößen

Um die Relevanz von Teilsystemausfällen auf das Gesamtzusammenwirken zu beurteilen, stehen Importanzkenngrößen zu Verfügung. Je nach Art der Importanz lassen sich verschiedene Rückschlüsse ziehen, aber auch Wahrscheinlichkeiten berechnen.

#### Strukturelle Importanz<sup>117</sup>

Eine Aussage über die Bedeutung einer Komponente  $i$  wird mit der strukturellen Importanz, deren Bezeichnung  $I_{\bar{\Phi}}(\mathbf{i})$  ist, gemacht. Dabei gibt dieses Maß Aufschluss darüber, ob in einem System der Ausfall der Komponente zum Gesamtausfall führt. Die Summe aller  $I_{\bar{\Phi}}(\mathbf{i})$  ist dabei größer oder gleich eins.

$$I_{\bar{\Phi}}(\mathbf{i}) = \frac{1}{2^{n-1}} \sum_{(\cdot, \bar{\mathbf{x}})} (\bar{\Phi}(\mathbf{0}_i, \bar{\mathbf{x}}) - \bar{\Phi}(\mathbf{1}_i, \bar{\mathbf{x}}))$$

Die Division des Terms durch  $2^{n-1}$  deutet auf die  $2^n$  Zustandsvektoren  $\bar{\mathbf{x}}$  hin, die das System hat, weil bei  $n$  Komponenten in der Booleschen Systemberechnung  $2^n$  Zustände möglich sind.  $n$  steht dabei für die Anzahl der vorkommenden Komponenten. Eine Komponente wird allerdings festgehalten, was  $2^{n-1}$  Zustände ergibt.<sup>118</sup>

$\bar{\Phi}(\mathbf{1}_i, \bar{\mathbf{x}}) = 1$  ist gleichbedeutend mit  $\bar{\Phi}(\mathbf{0}_i, \bar{\mathbf{x}}) = 0$  und heißt, dass der Zustand der Komponente direkt auf den Systemzustand wirkt, bei einem Ausfall also beide ausfallen.

Der Berechnungsvorgang erfolgt in folgender Weise: Die Schnittmengen werden identifiziert und  $\bar{\Phi}(\bar{\mathbf{x}})$  wird aufgestellt. Danach wird die erste Komponente  $x_1$  betrachtet. Dazu wird einmal  $x_1=1$  gesetzt, beim zweiten Mal wird  $x_1=0$  gesetzt. Die beiden Gleichungen werden subtrahiert und mit eins gleich gesetzt. Die Anzahl der sich daraus ergebenden Lösungsvektoren, das sind jene Kombinationen von Lösungswerten, die die Gleichung erfüllen, wird durch  $2^{(n-1)}$  dividiert, woraus sich die strukturelle Importanz ergibt. Gleichermaßen wird mit den anderen Komponenten vorgegangen. Jene Komponente, die den höchsten Wert bei der strukturellen Importanz erreicht, hat den größten Einfluss auf die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems.

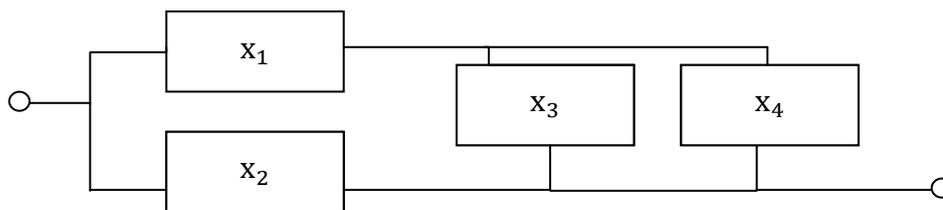
Um ein besseres Verständnis für diese Methode zu schaffen, wird im Folgenden ein Beispiel aus Meynas „Zuverlässigkeitsbewertung zukunftsorientierter Technologien“ angeführt.<sup>119</sup>

Die Netzstruktur des technischen Systems sei folgende:

<sup>117</sup> Vgl. Meyna, 1994, S. 83 f.

<sup>118</sup> Vgl. Avenhaus, 2003, S. 26

<sup>119</sup> Meyna, 1994, S. 85 ff.



Die Schnittmenge ist  $\{\bar{x}_1, \bar{x}_2\}, \{\bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4\}$  und die Ausfallfunktion

$$\bar{\Phi}(\bar{x}) = \bar{x}_1 \bar{x}_2 + \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4 - \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4$$

Die strukturelle Importance wird für alle Komponenten bestimmt:

Komponente  $x_1$ :

$\bar{\Phi}(1_1, \bar{x}) = \bar{x}_2 + \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4 - \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4 = \bar{x}_2$  d.h. die Komponente  $x_1$  wird zunächst gleich eins gesetzt, anschließend wird sie gleich null gesetzt;

$\bar{\Phi}(0_1, \bar{x}) = \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4$  anschließend werden die beiden Gleichungen subtrahiert und das Ergebnis gleich eins gesetzt:

$$\bar{\Phi}(1_1, \bar{x}) - \bar{\Phi}(0_1, \bar{x}) = \bar{x}_2 + \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4 - \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4 - \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4 = \bar{x}_2 * (1 + \bar{x}_3 \bar{x}_4) = 1$$

Diese Gleichung ist richtig, wenn die kritischen Vektoren folgendermaßen aussehen:

$$(\bar{x}_2 = 1, \bar{x}_3 = 0, \bar{x}_4 = 0),$$

$$(\bar{x}_2 = 1, \bar{x}_3 = 1, \bar{x}_4 = 0),$$

$$(\bar{x}_2 = 1, \bar{x}_3 = 0, \bar{x}_4 = 1)$$

$$I_{\bar{\Phi}}(1) = \frac{1}{2^{4-1}} 3 = 3/8$$

Ebenso wird für die Komponente  $x_2$  vorgegangen:

$$\bar{\Phi}(1_2, \bar{x}) - \bar{\Phi}(0_2, \bar{x}) = (\bar{x}_1 + \bar{x}_3 \bar{x}_4 - \bar{x}_1 \bar{x}_3 \bar{x}_4) - 0 = \bar{x}_1 + \bar{x}_3 \bar{x}_4 * (1 - \bar{x}_1) = 1$$

Daraus folgen die kritischen Vektoren

$$(\bar{x}_1 = 1, \bar{x}_3 = 0, \bar{x}_4 = 0),$$

$$(\bar{x}_1 = 1, \bar{x}_3 = 1, \bar{x}_4 = 0),$$

$$(\bar{x}_1 = 1, \bar{x}_3 = 0, \bar{x}_4 = 1),$$

$$(\bar{x}_1 = 0, \bar{x}_3 = 1, \bar{x}_4 = 1),$$

$$(\bar{x}_1 = 1, \bar{x}_3 = 1, \bar{x}_4 = 1)$$

was zu der Importanzgleichung  $I_{\bar{\Phi}}(\mathbf{2}) = \frac{1}{2^{4-1}} \mathbf{5} = \mathbf{5/8}$  führt

Komponente  $x_3$ :

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}(\mathbf{1}_3, \bar{\mathbf{x}}) - \bar{\Phi}(\mathbf{0}_3, \bar{\mathbf{x}}) &= (\bar{x}_1 \bar{x}_2 + \bar{x}_2 \bar{x}_4 - \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_4) - (\bar{x}_1 \bar{x}_2) = \bar{x}_2 \bar{x}_4 - \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_4 \\ &= \bar{x}_2 \bar{x}_4 * (\mathbf{1} - \bar{x}_1) = \mathbf{1} \end{aligned}$$

Kritischer Vektor:  $(\bar{x}_1 = \mathbf{0}, \bar{x}_2 = \mathbf{1}, \bar{x}_4 = \mathbf{1})$ <sup>120</sup>

$$\text{Importanz: } I_{\bar{\Phi}}(\mathbf{3}) = \frac{1}{2^{4-1}} \mathbf{1} = \mathbf{1/8}$$

Komponente  $x_4$ :

$$\bar{\Phi}(\mathbf{1}_4, \bar{\mathbf{x}}) - \bar{\Phi}(\mathbf{0}_4, \bar{\mathbf{x}}) = \bar{x}_1 \bar{x}_2 + \bar{x}_2 \bar{x}_3 - \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 - \bar{x}_1 \bar{x}_2 = \bar{x}_2 \bar{x}_3 * (\mathbf{1} - \bar{x}_1) = \mathbf{1}$$

Kritischer Vektor:  $(\bar{x}_1 = \mathbf{0}, \bar{x}_2 = \mathbf{1}, \bar{x}_3 = \mathbf{1})$

$$\text{Importanz: } I_{\bar{\Phi}}(\mathbf{4}) = \frac{1}{2^{4-1}} \mathbf{1} = \mathbf{1/8}$$

Das Ergebnis für dieses Beispiel ist, dass  $I_{\bar{\Phi}}(\mathbf{2}) > I_{\bar{\Phi}}(\mathbf{1}) > I_{\bar{\Phi}}(\mathbf{3}) = I_{\bar{\Phi}}(\mathbf{4})$ . Das führt bei dieser Importanzmethode zu der Schlussfolgerung, dass  $x_2$  die wichtigste Komponente in dieser Schaltung ist, gefolgt von  $x_1$ .  $x_3$  und  $x_4$  sind gleich wichtig, nehmen aber im Gesamtsystem die unbedeutendste Position ein.

### Marginale Importanz<sup>121</sup>

Im Gegensatz zur strukturellen Importanz ist die marginale Importanz  $I_m(i)$  eine Wahrscheinlichkeitsgröße. Deswegen bewegt sich ihr Wert zwischen null und eins. Sie ergibt sich durch das Ableiten der Ausfallwahrscheinlichkeit nach der Zustandswahrscheinlichkeit  $q_i$  der Komponente  $i$ .

$$I_m(i) = \frac{\partial F(\underline{\mathbf{q}})}{\partial q_i}$$

Für das System als Gesamtes wird die folgende Gleichung herangezogen, deren Form sich aus der Kettenregel für Differenziale ergibt:

$$dF_S(\underline{\mathbf{q}}(t)) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial F(\underline{\mathbf{q}}(t))}{\partial q_i(t)} * d q_i(t) = \sum_{i=1}^n I_m(i) * d q_i(t)$$

<sup>120</sup> In der Literaturangaben ist hier ein Fehler, der für das Beispiel der Diplomarbeit ausgebessert wurde

<sup>121</sup> Vgl. Meyna, 1994, S. 87 f.

Dies führt zu der Näherung

$$\Delta F_S(\mathbf{q}(t)) \approx \sum_{i=1}^n I_m(i) * \Delta q_i(t)$$

Wird für  $q_i=0,5$  angenommen, also eine Wahrscheinlichkeit von 50% des Ausfalls für eine Komponente, kann die marginale Importanz mit der strukturellen Importanz gleichgesetzt werden.<sup>122</sup>

Soll also die marginale Importanz berechnet werden, ist das Wissen um die einzelnen Ausfallwahrscheinlichkeiten essentiell. Wird von einer 50/50 Chance des Ausfalls ausgegangen, kann sie, wie oben erwähnt, mit 0,5 angesetzt werden. Die Ausfallfunktion sieht genauso aus wie  $\bar{\Phi}(\bar{x})$ , die Vektoren werden jedoch gegen die Komponentenausfallwahrscheinlichkeiten ausgetauscht. Das Ableiten nach einer jeden führt sofort zum Ergebnis.

Jenes Beispiel, das zur Erläuterung der strukturellen Importanz herangezogen wurde, wird nun auch für die marginale Importanz durchgegangen<sup>123</sup>:

Die Ausfallfunktion der Schaltung ergibt sich, in dem die Zustandsvektoren durch die Komponentenwahrscheinlichkeit ersetzt werden. Damit ist die Wahrscheinlichkeit für den Ausfall des kompletten Systems  $F(\mathbf{q}) = q_1 q_2 + q_2 q_3 q_4 - q_1 q_2 q_3 q_4$ .

Im Anschluss wird die marginale Importanz durch die Ableitung der Ausfallwahrscheinlichkeit nach jeweils den einzelnen Komponentenausfallwahrscheinlichkeiten berechnet:

$$I_m(1) = \frac{dF(\mathbf{q})}{dq_1} = q_2 - q_2 q_3 q_4 = q_2 * (1 - q_3 q_4)$$

$$I_m(2) = \frac{dF(\mathbf{q})}{dq_2} = q_1 + q_3 q_4 - q_1 q_3 q_4 = q_1 + q_3 q_4 * (1 - q_1)$$

$$I_m(3) = \frac{dF(\mathbf{q})}{dq_3} = q_2 q_4 - q_1 q_2 q_4 = q_2 q_4 * (1 - q_1)$$

$$I_m(4) = \frac{dF(\mathbf{q})}{dq_4} = q_2 q_3 - q_1 q_2 q_3 = q_2 q_3 * (1 - q_1)$$

Für dieses Beispiel soll nun angenommen werden, dass jedes  $q_i = 0,5$ , also 50% ist. Für die marginalen Importanzen bedeutet dies konkret:

$$I_m(1) = 0,5 * (1 - 0,5 * 0,5) = \frac{3}{8}$$

<sup>122</sup> Vgl. Meyna, 1994, S. 89.

<sup>123</sup> Meyna, 1994, S. 89 f.

$$I_m(2) = 0,5 + 0,5 * 0,5 * (1 - 0,5) = \frac{5}{8}$$

$$I_m(3) = 0,5 * 0,5 * (1 - 0,5) = \frac{1}{8}$$

$$I_m(4) = 0,5 * 0,5 * (1 - 0,5) = \frac{1}{8}$$

Da mit Wahrscheinlichkeiten gerechnet wird, ist auch das jeweilige Ergebnis eine Wahrscheinlichkeit, nämlich die des Einflusses auf die Unverfügbarkeit des Systems.

### Fraktionale Importanz

Für die fraktionale Importanz  $I_f(i)$  wird die marginale Importanz mit der Ausfallwahrscheinlichkeit der Komponente multipliziert, d.h.  $I_f(i) = I_m(i) * q_i$ .

### Barlow-Proschan-Importanz

Diese Kenngröße dient zur Beurteilung der Wichtigkeit einer Komponente im System. Diese Beurteilung erfolgt über die Wahrscheinlichkeit, mit der diese Komponente im Zeitraum  $(0, t)$  einen Ausfall verursacht.<sup>124</sup> Die Barlow Importanz  $I_{BP}(i)$  nimmt für jede Komponente einen Wert zwischen null und eins an. Dabei ist die Summe aller Barlow Importanzen eines Systems ebenfalls eins. Mathematisch ausgedrückt, sieht sie folgendermaßen aus:<sup>125</sup>

$$I_{BP}(i) = \frac{\int_0^t I_m(i) * f_i(\tau) d\tau}{\sum_{i=1}^n \int_0^t I_m(i) * f_i(\tau) d\tau}$$

$f_i(\tau)$  ist die Dichte der Lebensdauer der Verteilungsfunktion für die Komponente  $i$  und wird mit der Ableitung der Verteilungsfunktion  $F_i(t)$  nach der Zeit gebildet. Der Zähler steht für die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Komponente im Intervall  $(0, t)$  einen Gesamtsystemausfall bewirkt. Das Ganze wird durch die Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems dividiert.

Für das bekannte Beispiel soll nun auch die Barlow-Proschan-Importanz bestimmt werden:<sup>126</sup>

Die Lebensdauern sind für alle Komponenten exponentialverteilt. Es wird nur  $x_1$  betrachtet, da die anderen Komponenten analog berechnet werden können:

<sup>124</sup> Vgl. Avenhaus, 2003, S. 65.

<sup>125</sup> Meyna, 1994, S. 92.

<sup>126</sup> Vgl. Meyna, 1994, S. 93 f.

$$I_{\text{BPSt}}(1) = \int_0^{\infty} I_m(1) * f_1(t) dt$$

Die bereits kalkulierte Importanz wird herangezogen und für  $f_1 = \exp(-\lambda_1 t)$  gesetzt

$$I_{\text{BPSt}}(1) = \int_0^{\infty} (\exp(-\lambda_3 t) + \exp(-\lambda_4 t) - \exp(-(\lambda_2 + \lambda_3)t) - \exp(-(\lambda_2 + \lambda_4)t) - \exp(-(\lambda_3 + \lambda_4)t) + \exp(-(\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)t)) * \lambda_1 * \exp(-\lambda_1 t) dt$$

$$I_{\text{BPSt}}(1) = \lambda_1 \left( \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_3} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_4} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4} \right)$$

### 3.1.3 Brückenkonfiguration

Es gibt Komponentenzusammenhänge, wo die Vorgehensweisen für Parallel- und Serienschaltungen nicht mehr ausreichend sind. Bei Brücken gibt es die Möglichkeit, die Zuverlässigkeit und die Ausfallwahrscheinlichkeit unter Zuhilfenahme anderer Methoden festzustellen. Diese sind die Methode der minimalen Ausfallschnitte, jene der minimalen Erfolgspfade und das Lösen der Brückenkonfiguration durch Separation.<sup>127</sup>

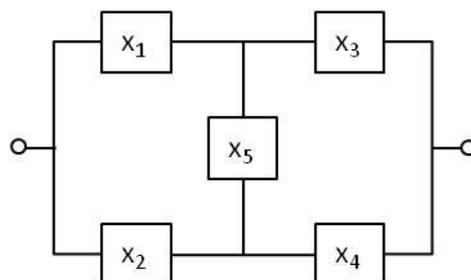


Abbildung 21: Brückenkonfiguration

#### Minimalschnitte

Es werden Minimalschnitte („Cut Sets“) durch das System gelegt. Sie gehen durch Komponenten, die für die Systemfunktion essentiell sind (Beschreibung der dazugehörigen Ausfallfunktion in 3.1.1). Die Komponenten werden für die Systemfunktion negiert angesetzt und

<sup>127</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 174ff.

es gilt für die Verbindung innerhalb eines „Cut Sets“ das Verwenden von Und-Verknüpfungen. Oder Verknüpfungen verbinden die einzelnen „Cut Sets“. Somit fällt das System aus, wenn eine Komponente innerhalb eines „Cut Sets“ ausfällt.

Minimale Ausfallschnitte:  $CS1=\{\bar{x}_1, \bar{x}_2\}$ ;  $CS2=\{\bar{x}_3, \bar{x}_4\}$ ;  $CS3=\{\bar{x}_1, \bar{x}_4, \bar{x}_5\}$ ;  $CS4=\{\bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_5\}$ ;

$$\bar{y} = (\bar{x}_1 \wedge \bar{x}_2) \vee (\bar{x}_3 \wedge \bar{x}_4) \vee (\bar{x}_1 \wedge \bar{x}_4 \wedge \bar{x}_5) \vee (\bar{x}_2 \wedge \bar{x}_3 \wedge \bar{x}_5)$$

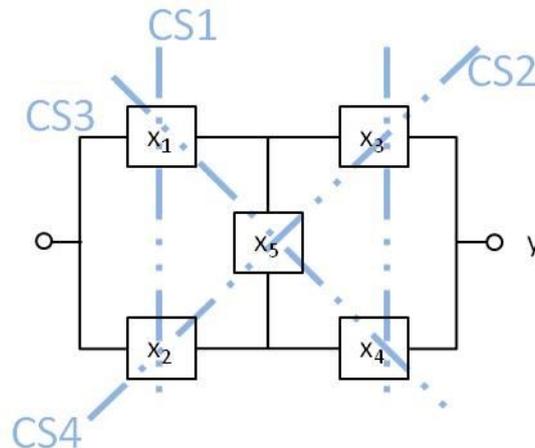


Abbildung 22: Brückenkonfiguration - Lösung mittels Cut Sets<sup>128</sup>

### Minimalpfade

Umgekehrt zur vorherigen Methode findet zum Lösen der Brückenkonfiguration eine Betrachtung der Minimalpfaden (auch „Paths Sets“), über Wege der Funktionstüchtigkeit statt (siehe auch 3.1.1). D.h. es werden Wege durch die Konfiguration gesucht, die das Funktionieren dieser gewährleisten. Verbindungen werden wie bei der vorherigen Methode angesetzt, die Variablen aber nicht negiert, weshalb sich eine (positive) Funktionsaussage ergibt, wenn ein Pfad funktioniert.

Minimale Erfolgspfade:  $PS1=\{x_1, x_3\}$ ;  $PS2=\{x_2, x_4\}$ ;  $PS3=\{x_1, x_4, x_5\}$ ;  $PS4=\{x_2, x_3, x_5\}$ ;

$$y = (x_1 \wedge x_2) \vee (x_2 \wedge x_4) \vee (x_1 \wedge x_4 \wedge x_5) \vee (x_2 \wedge x_3 \wedge x_5)$$

<sup>128</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 175.

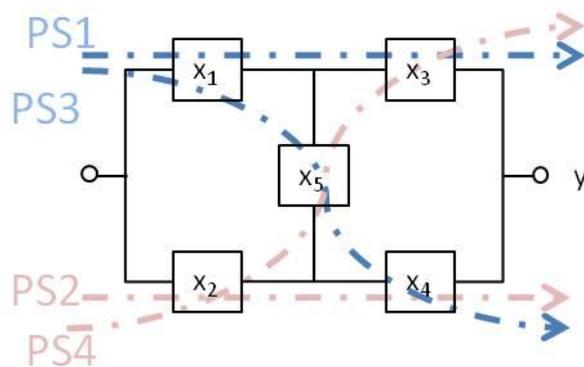


Abbildung 23: Brückenkonfiguration - Lösung mittels Path Sets<sup>129</sup>

### Relevante Systemkomponente

Die Komponente  $x_5$  hat durch ihre Positionierung eine besondere Stellung in der Schaltung. In der Methode „der relevanten Systemkomponente“, die auch als „Separation“ bezeichnet wird, erfolgt die Betrachtung für beide Zustände von  $x_5$ , nämlich immer ausgefallen und immer in Funktion. In Abbildung 24 ist die Brücke in die zwei betrachteten Teilschnitte aufgeteilt. Der obere Teil der Grafik stellt das Brückenschaltbild mit funktionsfähiger Komponente  $x_5$  dar, während sie bei der unteren Darstellung ausgefallen ist. Die beiden Systemfunktionen  $y_1$  und  $y_2$ , die jeweils entstehen, werden addiert.

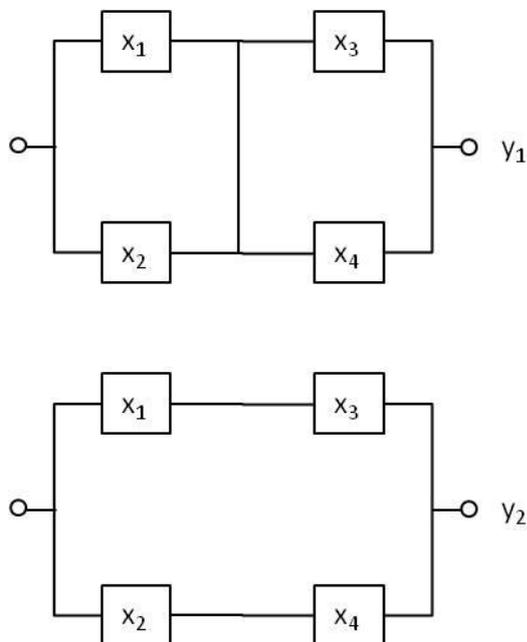


Abbildung 24: Brückenkonfiguration - Lösung mittels Separation

Von den Systemfunktionen ist eine direkter Übergang zur Überlebenswahrscheinlichkeit erlaubt, in dem  $x_i = R_i$  gesetzt wird und für  $\bar{x}_i = 1 - R_i$  gilt.

<sup>129</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 176.

$$\begin{aligned}y_1 &= x_5 \wedge [(x_1 \wedge x_3) \vee (x_1 \wedge x_4) \vee (x_2 \wedge x_3) \vee (x_2 \wedge x_4)] \\y_2 &= \bar{x}_5 \wedge [(x_1 \wedge x_3) \vee (x_2 \wedge x_4)]\end{aligned}$$

## 3.2 Markoff Modelle

Markoff (in der Literatur auch „Markov“) Modelle sind auch eine Möglichkeit zur Analyse von Systemen bezüglich ihrer Zustände. Sie eignen sich für reparierbare Einzelkomponenten aber auch für große Systemgruppen.<sup>130</sup> Bis zu einer maximalen Größenordnung von 300 Komponenten kommen sie v.a. bei speziellen Untersuchungen<sup>131</sup>, wie etwa elektronischer Kraftwerkleittechnik (bspw. Siemens TXP, T2000<sup>132</sup>) zum Einsatz. Betont soll werden, dass die Reparaturfähigkeit berücksichtigt wird und Markoff Modelle Aufschluss darüber geben, ob die untersuchte Komponente für den bestimmten Zeitpunkt verfügbar ist. Es wird von konstanten Reparatur- und Ausfallzeiten ausgegangen, die exponentialverteilt sind.<sup>133</sup> Es ist nicht möglich, die Zustandswahrscheinlichkeit abhängig von der Laufzeit zu ermitteln.<sup>134</sup>

Zur Vereinfachung der Modelle werden ein paar Annahmen getroffen. Es wird davon ausgegangen, dass Einsatz- und Schadensbehebungszustände abwechseln und eine neu ausgetauschte Komponente wieder den Status der Neuwertigkeit besitzt. Überdies sind die Zeiten des Komponenteneinsatzes sowie der Reparatur stetig und stochastisch unabhängig.<sup>135</sup>

Die klassische Markoff Methode kann nicht berücksichtigen, ob etwa Ausfälle aus dem gleichen Grund passieren. Auch die Selbstdiagnose moderner Baugruppen lässt sich nicht berücksichtigen.<sup>136</sup> Ständige Weiterentwicklungen der Methode berücksichtigen solche Zustände zunehmend.

Konkret ist der Markoff Prozess, welcher den Modellen zu Grunde liegt, ein stochastischer Prozess. Die Zustände, deren Anzahl kleiner unendlich ist, sind in der Zukunft immer vom aktuellen Zustand abhängig. Gleichzeitig schränkt diese Annahme auf Modelle ein, deren Ausfall- resp. Reparaturraten gleichbleibend sind.<sup>137</sup>

Wie in der Bool'schen Zustandsbetrachtung kann bei Markoff der Zustand ebenfalls nur funktionstüchtig (Bezeichnung  $Z_0$  mit der Zustandswahrscheinlichkeit  $P_0(t)$ ) oder ausgefallen (Bezeichnung  $Z_1$  mit der Zustandswahrscheinlichkeit  $P_1(t)$ ) sein. Dabei gilt, dass  $P_0(t) = A(t)$ <sup>138</sup> ist, also die Verfügbarkeit zum Zeitpunkt  $t$ .

<sup>130</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 396.

<sup>131</sup> Meyna, 1994, S. 9.

<sup>132</sup> Konnov, 2007, S. 143.

<sup>133</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 396.

<sup>134</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 375.

<sup>135</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 365 f.

<sup>136</sup> Vgl. Konnov, 2007, S. IV.

<sup>137</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 366.

<sup>138</sup> Bertsche, 2004, S. 368.

In dem sogenannten Zustandsgraph werden die Zustände und die „Wege“ in einen anderen Zustand anhand von Pfeilen dargestellt. Dabei wird die Ausfalls- bzw. Reparaturrate dem Pfeil zugeordnet. Für ein Einzelement ist ein Zustandsgraph in Abbildung 25 dargestellt.

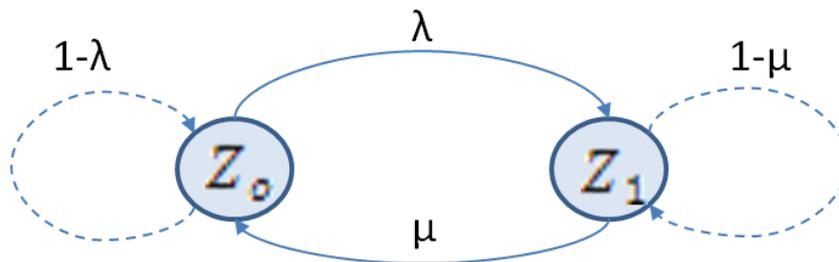


Abbildung 25: Markov-Graph für ein Einzelement<sup>139</sup>

Im nächsten Schritt wird die Zustandsdifferentialgleichung aufgestellt, in dem die Übergangswahrscheinlichkeit mit der Übergangsrate (Ausfall- oder Reparaturrate) multipliziert wird. Dabei ist zu beachten, dass Pfeile weg von den Zuständen sich durch eine Multiplikation des jeweiligen Übergangstermes mit (-1) auswirken und umgekehrt. Für das Beispiel aus Abbildung 25 ergibt dies die folgenden zwei Differentialgleichungen<sup>140</sup>:

$$\frac{d P_0(t)}{dt} = -\lambda * P_0(t) + \mu * P_1(t)$$

$$\frac{d P_1(t)}{dt} = -\mu * P_1(t) + \lambda * P_0(t)$$

Die Anfangsbedingungen für dieses Modell sind zum einen, dass die Summe der Zustandswahrscheinlichkeiten zum Zeitpunkt  $t$  gleich eins ist, zum anderen kann davon ausgegangen werden, dass am Beginn, also  $t=0$ , noch  $Z_0$  gilt, also die Komponente funktionstüchtig ist. Dies führt zu den Randbedingungen  $P_0(t = 0) = 1$  und  $P_1(t = 0) = 0$

### 3.2.1 Markoff'sche Minimalschnitte

In der Praxis hat sich für die Berechnung von technischen Systemen die Methode der Markoff'schen Minimalschnitte durchgesetzt, weil sie folgende Anforderungen genügt<sup>141</sup>:

- Eine Berechnung kann sowohl mit Berücksichtigung von Reparaturen als auch ohne erfolgen.
- Es können stochastische Abhängigkeiten berücksichtigt werden. Dies ist besonders bei komplexen Systemen ein großer Vorteil, weil diese i.d.R. nur von mathemati-

<sup>139</sup> Bertsche, 2004, S. 367.

<sup>140</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 367.

<sup>141</sup> Vgl. Konnov, 2007, S. 91 f.

schen Modellen berechnet werden können und über die Markoff Modelle an PC Rechnersysteme übergeben werden.

- Verschiedene Ausfallarten können in Betracht gezogen werden.

Der Methode geht die Voraussetzung voran, dass die Zuverlässigkeit eines Systems von den Minimalschnitten der niedrigsten Ordnung abhängt. Während die stochastische Abhängigkeit innerhalb der Minimalschnitte Berücksichtigung findet, werden äußere Abhängigkeiten vernachlässigt, weil gilt<sup>142</sup>

$$P_{(\text{Gesamtsystem})} \approx \sum_k P(\text{Minimalschnitte}_k)$$

Um die Minimalschnitte zu bestimmen, wird wie auf Seite 44 im Abschnitt „Minimalschnitte“ vorgegangen. Auch die Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems wird, wie dort beschrieben, ermittelt. Dann werden die Minimalschnitte berechnet, in dem das Markoffverfahren zum Einsatz kommt. Laut Konnov ergibt sich für die Berechnung:<sup>143</sup>

Markoff'scher Zustand:  $MZ_l = \bigwedge_{i \in l} \delta_i$

Minimalschnitt:  $MS_k = \bigvee_{l \in k} MZ_l$

Wahrscheinlichkeit des Systems:  $P(MS_k) = P(\bigvee_{l \in k} MZ_l)$

### 3.2.2 Beispiel zum Markoff Graph mit drei Komponenten

Abbildung 26 zeigt einen Markoff Graph für drei Komponenten. Da für die Anzahl der Zustände  $2^{(\text{Anzahl der Komponenten})}$  gilt, verkompliziert sich der Graph für jede zusätzliche Komponente. Die Ausfallsrate wurde zum Zweck der Übersichtlichkeit andersfarbig dargestellt. In der Tabelle finden sich die Komponentenzustände K1, K2 und K3 und die Zuordnung zu den jeweiligen Zuständen sowie die Wahrscheinlichkeiten  $P_n(t)$ .

<sup>142</sup> Kochs, 1984 aus Sekundärquelle: Konnov, 2007, S. 88.

<sup>143</sup> Konnov, 2007, S. 89.

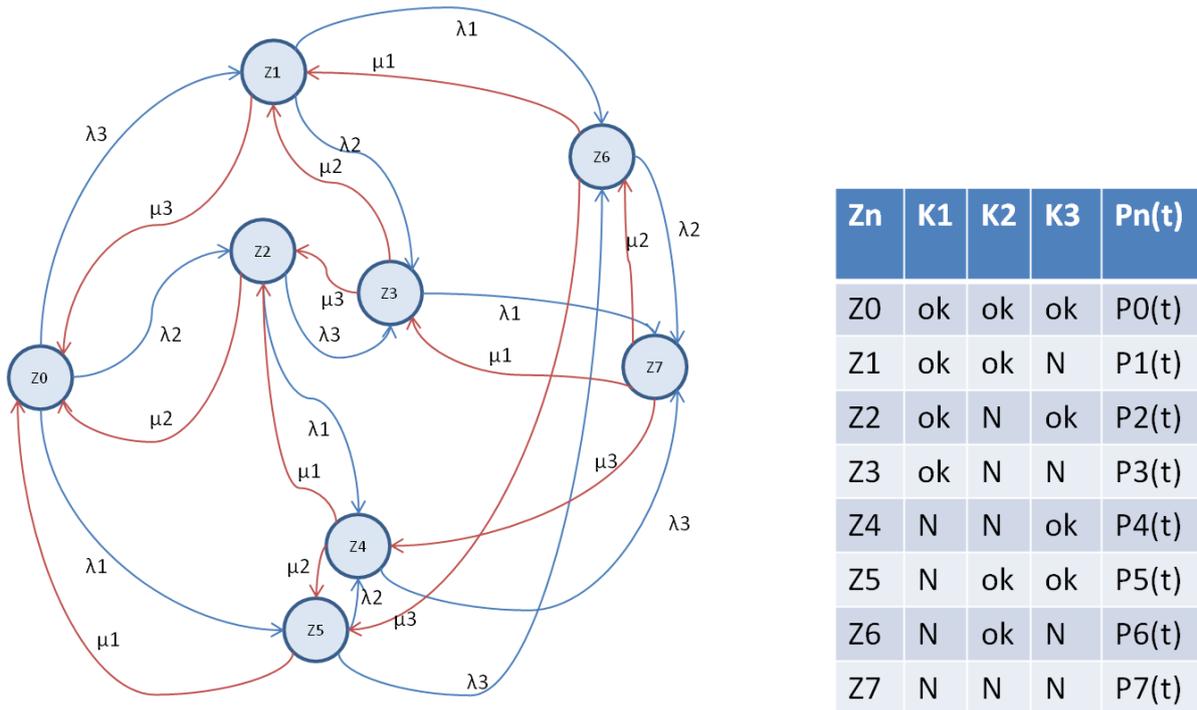


Abbildung 26: Markoff Graph für 2 Komponenten

Die Differentialgleichungen, welche sich daraus ableiten lassen, haben folgende Form:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = (-\lambda_3 - \lambda_2 - \lambda_1) * P_0 + \mu_1 * P_5 + \mu_2 * P_2 + \mu_3 * P_1$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = (-\mu_3 - \lambda_2 - \lambda_1) * P_1 + \lambda_3 * P_0 + \mu_2 * P_3 + \mu_1 * P_6$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = (-\lambda_3 - \mu_2 - \lambda_1) * P_2 + \mu_1 * P_4 + \mu_2 * P_0 + \mu_3 * P_3$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = (-\mu_3 - \mu_2 - \lambda_1) * P_3 + \mu_1 * P_7 + \lambda_2 * P_1 + \lambda_3 * P_2$$

$$\frac{dP_4(t)}{dt} = (-\lambda_3 - \mu_1 - \mu_2) * P_4 + \lambda_1 * P_2 + \mu_3 * P_7 + \lambda_2 * P_5$$

$$\frac{dP_5(t)}{dt} = (-\lambda_2 - \mu_1 - \lambda_3) * P_5 + \lambda_1 * P_0 + \mu_2 * P_4 + \mu_3 * P_6$$

$$\frac{dP_6(t)}{dt} = (-\lambda_3 - \mu_1 - \mu_3) * P_6 + \lambda_1 * P_1 + \mu_2 * P_7 + \lambda_3 * P_5$$

$$\frac{dP_7(t)}{dt} = (-\mu_3 - \mu_2 - \mu_1) * P_7 + \lambda_3 * P_4 + \lambda_1 * P_3 + \lambda_2 * P_6$$

Die Randbedingungen zur Lösung der Differentialgleichungen sind, so wie weiter oben vorgestellt:

$$P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) + P_7(t) = 1$$

$$P_0(t = 0) = 1$$

$$P_1 \text{ bis } 7(t = 0) = 0$$

### 3.2.3 Erweiterung des Markoff Modells

Es ist möglich, Einzelemente als Markoff Modelle zu erstellen und diese untereinander mit Booleschen Verknüpfungen zusammen zu schließen. Somit lassen sich auch reparierbare System darstellen, jedoch wiederum nur in Bezug auf die Dauer Verfügbarkeit, also stationär. Die Dauer Verfügbarkeit  $A_{Di}$  berechnet sich mit

$$A_{Di} = \lim_{t \rightarrow \infty} A_i(t) = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} = \frac{MTTF_i}{MTTF_i + MTTR_i}$$

Für das ganze System lässt sich eine Dauer Verfügbarkeit unter Einschluss der Bool'schen Modellbildung errechnen. Dabei sind die Vorgänge für Serienschaltung und Parallelschaltung die folgenden:

1. Serienschaltung:  $A_{DS} = \prod_{i=1}^n A_{Di} = \prod_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} = \prod_{i=1}^n \frac{MTTF_i}{MTTF_i + MTTR_i}$

2. Parallelschaltung:  $A_{DP} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_{Di}) = 1 - \prod_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} = 1 - \prod_{i=1}^n \frac{MTTR_i}{MTTF_i + MTTR_i}$

Ergänzend soll ein Beispiel gebracht werden, das bei Bertsche zu finden ist. Drei in Reihe geschaltete Weibullverteilungen, bei denen das Reparaturverhalten der Komponenten exponentialverteilt ist, werden betrachtet.

Nr.	Ausfallverhalten				Reparaturverhalten	Dauer Verfügbarkeit
	b	T[h]	t <sub>0</sub> [h]	MTTF[h]	MTTR[h]	A <sub>Di</sub>
K <sub>1</sub>	2,0	3.000	0	2.658	100	0,9637
K <sub>2</sub>	1,8	3.200	500	2.901	100	0,9667
K <sub>3</sub>	1,5	2.500	1.000	2.354	100	0,9593

$$\text{Systemdauerbarkeit: } A_{DS} = \prod_{i=1}^n \frac{MTF_i}{MTF_i + MTTR_i} = \prod_{i=1}^n A_{Di} = 0,8937$$

Tabelle 5: Parameter der Systemkomponenten - Berechnung der Systemdauerbarkeit<sup>144</sup>

---

<sup>144</sup> Bertsche, 2004, S. 375.

### 3.3 Failure Mode & Effects Analysis FMEA ( Fehler - Möglichkeits- und Einfluss Analyse)<sup>145</sup>

Die FMEA teilt ein System in dessen Komponenten auf, um potentielle Ausfälle ausfindig zu machen, die Ursachen dafür zu finden und diese zu bewerten. Maßnahmen gegen die Ausfälle können aufgrund dessen gesetzt werden, wobei die Reihung des Risikos eine Entscheidungsgrundlage liefert.

Die Vorgehensweise gliedert sich in vier Bereiche. Dabei erleichtert ein Formblatt das strukturierte Vorgehen. Zunächst werden Bauelemente und Funktionen aufgelistet. Im nächsten Schritt erfolgt eine Analyse dieser Elemente in Hinblick auf Risiken. Deren Bewertung bildet Schritt drei. Abschließend erfolgt eine Optimierung des Konzepts.

Es wird zwischen Konstruktions- und Prozess-FMEA unterschieden. Für erstere wird eine Anlage oder ein System in die einzelnen Bauteile zerlegt. Bei der Prozess FMEA sind es die Prozessschritte, die aufgelistet werden. Die jeweiligen Funktionen der Bauteile resp. Prozessschritte werden ebenso festgehalten. Für die einzelnen Elemente wird anschließend nach möglichen Ausfällen gesucht. Die Ausfallfolgen schließen an dieser Stelle an, gefolgt von den Ausfallursachen und der jeweiligen Verhütungs- und Prüfungsmaßnahme.

Eine Bewertung des Risikos erfolgt durch die Vergabe von Rangzahlen zwischen eins und zehn, wobei zehn ein hohes Risiko darstellt. Für die FMEA existieren drei Gruppen zur Einzelbewertung:

- A – Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Ausfalls
- B – Bedeutung der Ausfallfolgen
- E – Entdeckbarkeit der Ausfallfolge

Die Bewertungen in den Kategorien werden für jedes potentielle Risiko zur Risikoprioritätszahl multipliziert. Eine Reihung zeigt Risiken, die mittels geeigneter Strategien in Angriff genommen werden müssen. Ausfälle unter einer RPZ von 125 erfordern keine Handlungen mehr, ebenso könne aber die letzten 20-30% in der Reihung vernachlässigt werden. Eine Betrachtung von außergewöhnlich hohen Einzelbewertungen, das sind jene über 8, ist notwendig.

Ein Bewertungsschema für die Einzelbewertung ist nachfolgend angeführt und an die Kriterien für Bewertungszahlen des VDA angelehnt:

---

<sup>145</sup> Vgl. Bertsche, 2004, S. 106 ff.

Bewertungszahl	Auftretenswahrscheinlichkeit	Bedeutung	Entdeckenswahrscheinlichkeit
	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr gering
10...9	sehr häufiges Auftreten der Fehlerursache, unbrauchbares und ungeeignetes Konstruktionsprinzip	Sicherheitsrisiko, Nichterfüllung gesetzlicher Vorschriften, Liegenbleiber	Entdeckung der aufgetretenen Fehlerursachen ist unwahrscheinlich, Zuverlässigkeit der Konstruktionsauslegung wurde nicht oder kann nicht nachgewiesen werden, Nachweisverfahren sind unsicher
	<b>Hoch</b>	<b>Hoch</b>	<b>Gering</b>
8...7	Fehlerursache tritt wiederholt auf, problematische und unausgereifte Konstruktion	Funktionsfähigkeit der Anlage stark eingeschränkt, sofortige Instandhaltung zwingend erforderlich, Funktionseinschränkung wichtiger Teilsysteme	Entdeckung der aufgetretenen Fehlerursachen ist weniger wahrscheinlich, wahrscheinlich nicht zu entdeckende Fehlerursachen, unsichere Prüfung
	<b>Mäßig</b>	<b>Mäßig</b>	<b>Mäßig</b>
6...4	gelegentlich auftretende Fehlerursache, geeignet, im Reifegrad fortgeschrittene Konstruktion	Funktionsfähigkeit der Anlage stark eingeschränkt, sofortige Instandhaltung nicht zwingend erforderlich, Funktionseinschränkung wichtiger Teilsysteme	Entdeckung der Fehlerursache ist wahrscheinlich, Prüfungen sind relativ sicher.
	<b>Gering</b>	<b>Gering</b>	<b>Hoch</b>
3...2	gelegentlich auftretende Fehlerursache, geeignet, im Reifegrad fortgeschrittene Konstruktion	Geringe Funktionsbeeinträchtigung des Anlage, Beseitigung bei der nächsten planmäßigen Instandhaltungsmaßnahme, Funktionseinschränkung von Bediensystemen.	Entdeckung der aufgetretenen Fehlerursachen ist sehr wahrscheinlich, Prüfungen sind sicher, z.B. mehrere voneinander unabhängige Prüfungen.
	<b>Sehr gering</b>	<b>Sehr gering</b>	<b>Sehr hoch</b>
1	Auftreten der Fehlerursache ist unwahrscheinlich	Sehr geringe Funktionsbeeinträchtigung, nur vom Fachpersonal erkennbar.	Aufgetretene Fehlerursache wird sicher entdeckt

Tabelle 6: Bewertungschema für die FMEA<sup>146</sup><sup>146</sup> Angelehnt an: VDA, 4.2., 1996.

### 3.4 Gefahrenanalyse (Preliminary Hazard Analysis PHA)

Zunächst erfordert auch die Gefahrenanalyse das Ziehen von Systemgrenzen und die Festlegung von Input sowie Output. Systemteile, sogenannte Units, werden zum besseren Verständnis festgelegt. Auch die Vorgänge im System müssen klar sein, was auch das Wissen um Aktivitäten innerhalb der selbigen und deren zu wertenden Risiken inkludiert.<sup>147</sup>

Der Aufbau ist ähnlich wie bei der FMEA. Es werden auch für diese Analyse vorbereitete Formblätter angeboten. Sie beinhalten gewöhnlich:

- die Bezeichnung des Risikos
- das Unfallereignis (was, wo, wann)
- die wahrscheinlichen Auswirkungen
- präventive Maßnahmen
- Wahrscheinlichkeiten
- eine Einschätzung der Ernsthaftigkeit sowie Raum für Kommentare.

Vollständigkeit spielt auch bei dieser Analyse eine große Rolle. Es ist wichtig, dass alle Gefahren dokumentiert werden, auch jene, die zunächst vernachlässigbar erscheinen. Bei der Analyse der Gefahrenquellen gilt es, mögliche Quellen zu beachten, welche u.a. mechanische, bewegte Teile, elektromagnetische Strahlen, Radar, Laser-, Ultraviolett-, Infrarotstrahlen, entweichbare Gase, korrosive Flüssigkeiten, Vibrationen, biologische Gefahren (z.B. Bakterienwachstum), menschliches Versagen oder Software Versagen sein können.

Bei der Identifikation der Gefahrenquellen kann es hilfreich sein, ähnliche Systeme zu betrachten oder Checklisten aus der Norm heranzuziehen. Auch das Betrachten des Energieflusses durch das System und das Betrachten von Systemschnittstellen u.a. Mensch/Maschine Schnittstellen sind Möglichkeiten des Herangehens. Nicht unerwähnt sollen in diesem Zusammenhang Kreativitätstechniken sein, die in der Teamarbeit zu Ergebnissen führen.

---

<sup>147</sup> Vgl. Rausand, 2005, S. 12ff.

Als Anhaltspunkt zur Klassifizierung der identifizierten Risiken stellt Rausand folgende Liste zur Verfügung:

Rang	Klassifizierung	Beschreibung
4	katastrophal	Resultiert in großen Verletzungen oder Tod des Personals
3	kritisch	Resultiert in kleineren Verletzungen, Personal wird gefährlichen chemischen Stoffen oder Strahlung ausgesetzt, Feuer, gefährliche Stoffe werden in die Umwelt freigesetzt
2	bedeutend	Kleinere Gefahren für die Mitarbeiter, Alarmsystem wird aktiviert
1	unbedeutend	Kleinere Systemschäden, keine Verletzungen, für Umwelt und Mitarbeiter keine Gefahr

Tabelle 7: Risikoklassifizierung<sup>148</sup>

Diese Tabelle wird von ihrem Autor mit einer Empfehlung für die Frequenzeinschätzung ergänzt:

1	sehr unwahrscheinlich	Einmal in 1000 Jahren oder seltener
2	gering	Einmal in 100 Jahren
3	gelegentlich	Einmal in 10 Jahren
4	wahrscheinlich	Einmal pro Jahr
5	häufig	Einmal pro Monat oder öfter

Tabelle 8: Wahrscheinlichkeitsklassifizierung<sup>149</sup>

<sup>148</sup> Vgl. Rausand, 2005, S.20.

<sup>149</sup> Vgl. Rausand, 2005, S. 20.

Ein Ranking der Einzelrisiken erfolgt aufbauend auf dieser Bewertung mittels Risikomatrix:

Häufigkeit/Klassifizierung	1 sehr unwahrscheinlich	2 gering	3 gelegentlich	4 wahrscheinlich	5 häufig
katastrophal					
kritisch					
bedeutend					
unbedeutend					

Tabelle 9: Risikomatrix<sup>150</sup>

Der grün markierte Bereich beinhaltet Risiken, die akzeptabel sind, der gelbe Bereich fordert nach einer weiteren Betrachtung und der rote Bereich ist nicht tragbar und verlangt sofort nach Risikoreduktion.

Es gibt einige Abwandlungen von FMEA und Gefahrenanalysen, die alle sehr ähnlich aufgebaut sind, wobei die Schwerpunkte auf jeweils anderen Merkmalen liegen. Solche Analysen sind beispielsweise:

- Ausfallgefahrenanalyse (Fault Hazard Analysis, FHA)
- Bedienungsgefahrenanalyse (Operating Hazard Analysis OHA)
- Menschliche Fehlerart- und Fehlereffektanalyse (Human Error Mode and Effect Analysis)
- Informationsfehler- und Effektanalyse (information Error Mode – and Effect Analysis, IEMEA)

<sup>150</sup> Vgl. Rausand, 2005, S. 24.

## 3.5 Weitere Herangehensweisen zur Risikobeurteilung

### 3.5.1 Qualitative Risikobeurteilung mit anschließender Strategiewahl

Eine den vorgestellten Risikomatrizen ähnliche, aber detailliertere Matrix, wurde von Clark et. al. im Zuge einer Lean Maintenance Implementierung bei einer Biotech Firma erstellt (Tabelle 10). Sie fasst sehr anschaulich Kriterien zur Risikobewertung zusammen.

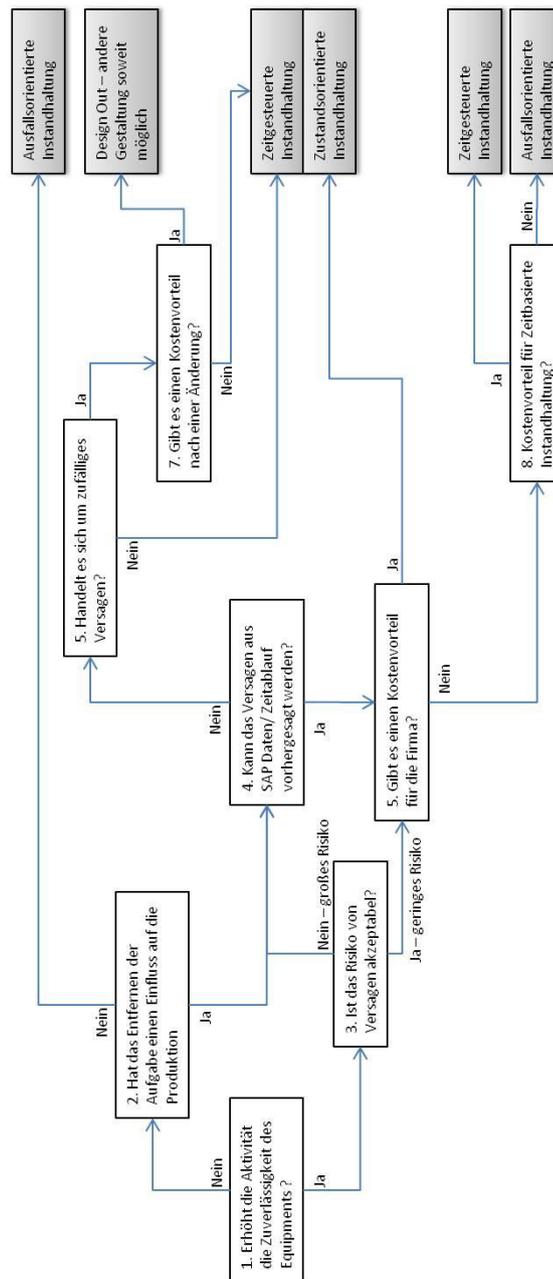
	Gewichtung	5	4	3	2	1	
<b>Faktor</b>	Kriterium	Katastrophe/ große Auswirkung	Kritisch/ Einfluss	Marginal/ ev. Einfluss/ mittlere Kosten	Niedriger Einfluss/ geringe Kosten	Kein Einfluss/ keine Kosten	Gewichtung
<b>Qualität</b>	Verunreinigung, Losgrößenverluste, Produktionseinfluss	Mehrere Losgrößen Verluste, Produktionsstopp für mehrere Wochen	einzelne Losgrößenverluste, aber Produktion fährt fort, sobald das Problem gelöst ist	Könnte ein Los beeinflussen wenn Versagen bei bestimmten Produktionsschritt auftritt	Wird einen Einfluss haben, wenn zweites System ausfällt	Keine Auswirkung auf Produkt und Produktionsfortgang	X50
<b>Sicherheit</b>	Grad der Verletzung einer Person bzw. Einfluss auf die Umwelt	Todesfolgen, Schließung für mehrere Wochen	Schwerwiegende Verletzungen	Verletzung von Menschen oder abbaubare Einflüsse auf die Umwelt	Zweites System müsste Versagen, bevor Menschen oder Umwelt gefährdet sind	Versagen verursacht keine Verletzungen oder Einfluss auf die Umwelt	X70
<b>Instandhaltbarkeit</b>	Inspektion/Reparatur/Instandhaltungstillstand	Stillstand hoch, ohne Standby	Stillstand niedrig, kein Standby	Stillstandzeit hoch, mit Standby	Stillstand selten, mit Standby	Nie Stillstand, niedrige Reparaturkosten, kein Einfluss auf die Produktion	X30

<b>Einfluss auf den Ablauf</b>	Beeinflussung des Produktionsablaufs	Verlust mehrerer Lose	Verlust eines Loses	Mittlerer Einfluss auf den Ablauf (ein Tag, möglicherweise aufholbar)	geringer Einfluss auf den Ablauf (Stunden, aufholbar)	Kein Einfluss auf den Produktionsablauf	X40
<b>Kosten (bei der Pro-Stillstands-</b>	Kosten der Wiederherstellung und der verlorenen Produktionszeit	> 10 Mio.	> 2 Mio.	100K bis 500K	10 K bis 100K	Keine Wiederherstellungskosten	X20
<b>Stillstands-</b>	Turnaround Zeit	Stillstand bis ein Tag	Stillstand ein bis zwei Tage	Stillstand zwei bis drei Tage	Stillstand drei bis vier Tage	Stillstand mehr als vier Tage	X35

Tabelle 10: Kritische Bewertungsmatrix<sup>151</sup>

Aufbauend auf dieser Risikobewertung wurden Instandhaltungsstrategien ausgewählt. Der dafür herangezogene Entscheidungsbaum ist in Abbildung 27 dargestellt. Er lässt sich durchaus für andere Einsatzgebiete adaptieren. Zur Auswahl stehen in dieser Fallstudie die vier Instandhaltungsstrategien ausfallorientiert, zeitgesteuert, zustandsorientiert und die hier mit „Design Out“ bezeichnete Strategie. Letztere ist eine Form der proaktiven Instandhaltung. Der Grundgedanke dahinter ist eine Konstruktions- resp. Gestaltungsänderung.

<sup>151</sup> Vgl. Clarke, 2010, S. 3.

Abbildung 27: Entscheidungsbaum Instandhaltungsstrategie<sup>152</sup><sup>152</sup> Vgl. Clarke, 2010, S. 4.

## 4 Anlagenzustandserkennung aus Maschinen und Produktdaten

Die Feststellung des aktuellen Anlagenzustands spielt v.a., aber nicht nur, in der vorausschauenden Instandhaltung eine große Rolle. Unter Beachtung von Vibrationen, thermischen Messungen und Tribologie sind Veränderungen im Maschinenzustand bereits ersichtlich, wenn es noch zu keinem offensichtlichen Anzeichen eines Schadens gekommen ist. So kann früh reagiert werden, ohne dass ein Schaden eintritt, der hohe Kosten und Produktionsstillstände zur Folge hätte, oder eine Verschlechterung der Produktqualität impliziert.

Zum Zwecke dieser Anwendung eignen sich lediglich zerstörungsfreie Inspektionstechniken da Anlagen oder gegebenenfalls Produkte nicht beschädigt werden sollen.

Nichtzerstörende Methoden<sup>153</sup> zur Feststellung von Parametern sind die menschlichen Sinneswahrnehmungen für Gerüche, Geräusche, etc. Um Temperaturen zu messen, werden Thermistor, Thermometer, Aufkleber, Infrarot, Thermosäulen oder Wärmeströme herangezogen. Für Vibrationsverschleiß bilden Accelerometer, Stethoskope, Stroboskope, Ultraschallabhörung und der Einsatz von Lasern gängige Prüfmethode. Für die Überprüfung von Materialdefekten werden Magnete, eindringende Farbaufträge, Wirbelströme, Radiographie, Ultraschall, die Rockwell-Härte, Schallresonanz oder bspw. Korona Empfänger eingesetzt. Mittels Ultraschall, Radiographie, Potentialunterschiede und Gewichtsmessung lassen sich Korrosionen, Erosionen und Ablagerungen ausmachen. Durchströme werden mittels Neon-Freon-Detektor, Rauchbomben, Gassensoren, Schnellkupplungsanzeige oder Manometer bestimmt. Bei elektrischen Prüfmethode gibt es neben Kabelfehlersuchgeräten, Abflussprüfer, HiPot, VOM und Oszilloskopen noch statische Zähler, Frequenzrekorder, Phasenverschiebungsmesser, Tester für Leistungsschalter und Einschwingspannung. Abschließend sollen auch chemisch-physikalische Methoden erwähnt werden, welche die spektographische Öl-Analyse, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, pH-Wert Messung, Viskosität und Metallgehaltmessung beinhalten.

Im Wesentlichen stehen die drei anfangs angeführten Kategorien (Vibrationen, thermische Messungen, Tribologie) zur Verfügung, um Maschinenzustände zu messen. Dieses Kapitel wird detailliert auf sie eingehen indem die Grundlagen erörtert, die Einsatzgebiete vorgestellt und Interpretationen zu Messungen angegeben werden. Ergänzend wird der Einsatz von Ultraschalltechnik in der Instandhaltung diskutiert und die Kontrolle von Maschinenparametern zum Informationsgewinn in der Anlagenüberwachung erörtert.

---

<sup>153</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 259 f.

Da in der Zustandserkennung der Anlage nicht nur Messinstrumente eine große Rolle spielen, sondern auch der Mensch mit seiner Sinneswahrnehmung, wird das Kapitel mit der Thematik der visuellen Anlagenkontrolle abgeschlossen.

## 4.1 Messung physikalischer Größen

Da Messtechnik in der Zustandserkennung eine große Rolle spielt, soll zunächst ein Überblick über den generellen Aufbau einer Messung gegeben werden. Dazu wird die Messkette (Abbildung 28) erläutert.

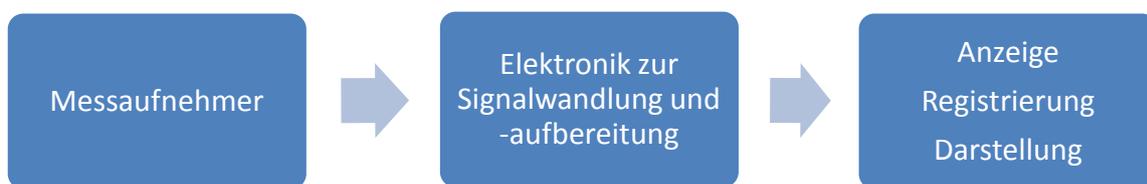


Abbildung 28: Messkette<sup>154</sup>

Messfühler und Wandler bilden meist gemeinsam konstruktiv den Aufnehmer. Der Fühler reagiert i.d.R. auf eine mechanische Kraft mit einer mechanischen Größe z.B. relative Bewegungsgröße und führt sie dem Wandler zu, der ein elektrisches Signal ausgibt das die Form von Spannung, Stromstärke, Induktivität, Frequenz, Kapazität etc. hat. Das Signal soll robust und leistungsstark sein, damit es durch das Anzeigegerät nicht verfälscht wird. Um das gemessene Signal sichtbar zu machen, wird es für den Beobachter leicht erfassbar aufbereitet. Für einfache Signale, die nur einen Wert ausgeben, ist eine analoge Anzeige mit einem Zeiger und einer Skala oder einer Digitalanzeige ausreichend. Für kompliziertere Signale, zur Darstellung von Zusammenhängen und v.a. zur Darstellung über den zeitlichen Verlauf, eignet sich die Ausgabe über ein Elektronenstrahlen-Oszilloskop oder einen PC. Beim Einsatz von letzterem ist ein Analog/Digital Wandler vorgeschaltet. Der Einsatz eines PCs bringt den Vorteil der Speicherfähigkeit mit sich.<sup>155</sup>

### 4.1.1 Elektronenstrahl-Oszillograph

Periodische Signale, wie sie bei Schwingungen oder Drehbewegungen auftreten, werden auf dem Oszilloskop adäquat dargestellt. Dabei werden in der sogenannten Braunschen Röhre, in der eine Elektronenkanone, eine Ablenkeinheit und ein Leuchtschirm untergebracht sind, Elektronen gebündelt und beschleunigt. Der dadurch gebildete Elektronenstrahl passiert zwei um 90° verdrehte Plattenpaare. Dadurch wird eine X und Y Ablenkung des Strahles bewirkt, welche der Signalspannung äquivalent ist. Letztendlich treffen die Elektro-

<sup>154</sup> Vgl. Weichert, 2000, S. 25.

<sup>155</sup> Vgl. Weichert, 2000, S. 25 f.

nen auf die innenliegende Seite der Anzeigefläche, wo sie mittels Leuchtstoff zum Leuchten gebracht werden und einen Leuchtpunkt am Schirm bilden. Die Spannung am Plattenpaar, welches für die horizontale Ablenkung verantwortlich ist, führt dazu, dass sich die Leuchtelektronen horizontal über den Anzeigebildschirm bewegen. Weitere Komponenten des Oszilloskops sind Verstärker mit Verstärkungsfaktoren, die justierbar sind, sowohl für die X- als auch für die Y-Ablenkung, des weiteren ein einstellbarer Generator, der für die Zeitablenkung sorgt. Außerdem ist eine Triggereinrichtung integriert, die den genannten Generator mit der Y-Signal-Frequenz synchronisiert.<sup>156</sup>

### 4.1.2 Analog/Digital (A/D) Wandler

Das Messsignal muss in einen Binärwert umgewandelt werden, um von einem Rechner verarbeitet werden zu können. Diese Aufgabe übernimmt der AD Wandler. Das Analogsignal (der Spannungswert) wird als Wortlänge des sich ergebenden Digitalwertes abgebildet, die auch gleichzeitig die Rasterstufen festlegen, in die der Eingangsspannungsbereich zerlegt wird. Diese Wortlänge muss eine Länge haben, die die Messgenauigkeit nicht beeinträchtigt, weil die diskreten Spannungssignale schlimmstenfalls im aus der Wortlänge resultierenden Raster zu wenig Platz hätten. Ist die Wortlänge bspw. 18 Bit, stehen zur Abbildung  $2^{18}$  Digitalwerte (Stufen im Raster) zur Verfügung<sup>157</sup>. Aufgrund der daraus resultierenden Datenmengen, ist eine kontinuierliche Aufzeichnung über den Zeitverlauf nicht möglich, da jede Rechnerkapazität mit der Speicherung überfordert wäre. Das „Abtasten“ ist sozusagen dazu da, Stichproben der Signalwerte zu nehmen.<sup>158</sup> Kombiniert werden Abtast- und Halteglied. Letzteres hält das Signal konstant<sup>159</sup>. Ein Antialiasingfilter filtert zu hohe Signalfrequenzen, die das Messergebnis verfälschen würden. Durch Multiplexing ist es möglich, mehrere Messkanäle mittels Schalter nacheinander mit dem A/D Wandler zu verbinden. Dabei gilt aber die Restriktion, dass diese Technik für Signale mit hoher Anforderung an synchrones Erfassen der Messung nicht funktioniert.<sup>160</sup>

---

<sup>156</sup> Vgl. Weichert, 2000, S. 29 f.

<sup>157</sup> Vgl. Weichert, 2000, S. 151 f.

<sup>158</sup> Vgl. Weichert, 2000, S. 153.

<sup>159</sup> Vgl. Weichert, 2000, S. 152 f.

<sup>160</sup> Vgl. Weichert, 2000, S. 141.

## 4.2 Vibrationen resp. Schwingungen

Die Vibrationsmessung in der vorausschauenden Instandhaltung ist die bekannteste aller zur Verfügung stehenden Methoden. Jede mechanische Maschine in Bewegung, ob rotierend oder in linearer Bewegung, generiert Schwingungen, welche die Betriebsbedingungen reflektieren. Auch für die Qualitätskontrolle von Produkten eignet sich die Vibrationsmessung, z.B. bei Betrachtung der Produktoberfläche. Des Weiteren führt die Messung von Vibrationen an einzelnen Komponenten, beispielsweise bei Papiermaschinen, zu einer Schlussfolgerung über die Qualität des Erzeugnisses.<sup>161</sup> Möglich wird dies, indem bestimmte Vibrationsprofile, welche jeder Störung zugrunde liegen, im Vibrationsmuster isoliert und identifiziert werden. Dabei stellt jeder Peak in einer Frequenzbereichsdarstellung einen Schwingungsverursacher dar. Über die Zeit betrachtet, wiederholen sich die Schwingungsmuster und lassen Abweichung in Form einer Veränderung des Musters evident werden.<sup>162</sup>

### 4.2.1 Grundlagen zu Schwingungen

Als Schwingungen werden mehr oder weniger regelmäßig erfolgende Schwankungen von Zustandsgrößen (z.B. Geschwindigkeit, Druck, Temperatur, elektrische Spannung,...) bezeichnet. Eine Schwingung wiederholt sich periodisch innerhalb eines bestimmten Zeitraumes.<sup>163</sup> Dieses Wiederholungsintervall wird als Periode  $T$  [s] bezeichnet deren Kehrwert die Frequenz  $f=1/T$ , mit der Einheit Hertz [Hz], ist. Die Kreisfrequenz  $\omega$  sagt aus, wie viele Schwingungen in  $2 * \pi$  Sekunden auftreten und wird mit  $\omega = 2 * \pi * f$  berechnet. Die maximale Auslenkung heißt Amplitude  $X_0$ , wobei die Einheit je nach Art der mechanischen Bewegung angegeben werden kann, z.B. Abweichung [mm], Geschwindigkeit [mm/s], Beschleunigung [m/s] usw.<sup>164</sup> Die einfachste Form der Schwingung ist die harmonische Schwingung, welche über die Auslenkung  $X$ <sup>165</sup> beschrieben wird:

$$X = X_0 * \sin(\omega t)$$

---

<sup>161</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 114 ff.

<sup>162</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 121.

<sup>163</sup> Vgl. Knappstein, 2004, S. 125.

<sup>164</sup> Mobely, 2002, S. 130.

<sup>165</sup> Mobely, 2002, S. 127.

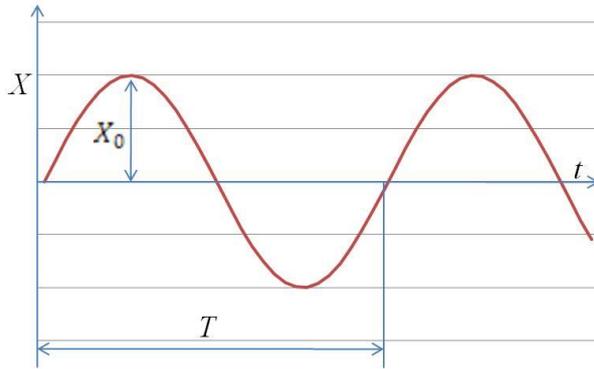


Abbildung 29: harmonische Schwingung und ihre Kenngrößen<sup>166</sup>

Durch die erste Ableitung nach der Zeit ergibt sich die Geschwindigkeit. Die zweite Ableitung führt zur Beschleunigung:

$$v = \frac{dX}{dt} = \dot{X} = \omega * X_0 * \cos(\omega t)$$

$$a = \dot{v} = \frac{d^2X}{dt^2} = \ddot{X} = \omega^2 * X_0 * \sin(\omega t)$$

Sind zwei Schwingungen gegeben,  $X_1 = a * \sin(\omega t)$  und  $X_2 = b * \sin(\omega t + \phi)$ , so ist  $\phi$  die Phasenverschiebung, welche die Schwingungen mit einer Versetzung von  $\frac{\phi}{\omega}$  Sekunden auftreten lässt.

Die wenigsten Schwingungen sind harmonisch. Weitaus häufiger treten nicht harmonische Schwingungen auf. Da sie auch periodisch sind, werden sie durch die Addition der einzelnen Auslenkungen gebildet, welche jedoch normalerweise unterschiedliche Frequenzen aufweisen. In den meisten Fällen von Vibrationsabbildungen ist  $\omega$  die Betriebsgeschwindigkeit des Antriebs, wobei  $2\omega$ ,  $3\omega$  usw. die sogenannten „Harmonischen“ der Primärfrequenz darstellen.<sup>167</sup>

Den Schwingungen zugrunde liegen Veränderungen der Maschinendynamik, welche von Masse, Steifigkeit bzw. Festigkeit, Dämpfung und Freiheitsgraden beeinflusst sind. Im Folgenden werden diese Parameter erörtert<sup>168</sup>.

**Steifigkeit:** Zum einen muss der Steifigkeit der Achsen Bedeutung beigemessen werden, denn die meisten Anlagen haben Achsen, bei denen die tragenden Punkte einen gewissen längeren Abstand aufweisen. Biegung spielt also eine Rolle, je nach Achsendurchmesser, Materialeigenschaften und Lagerabstand. Zum anderen gibt es vertikale und horizontale

<sup>166</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 118.

<sup>167</sup> Vgl. Mobely 2002, S. 129.

<sup>168</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 132 ff.

Steifigkeit. Bei Lagern ist meist die Steifigkeit in der horizontalen Ebene größer. Eine geringere Steifigkeit führt zu mehr Vibrationspotential, welches vor allem bei Unwucht und Betriebsbedingungen außerhalb des vorgesehenen Bereiches vorkommt.

**Dämpfung:** Beim Einwirken von Bewegungswiderständen auf die Schwingung wird die Schwingung abgeschwächt. Es wird von Dämpfung gesprochen. So wie Federn die Federkonstante  $c$  besitzen, werden Dämpfern die Dämpfungskonstante  $b$  zugeordnet. Wird für eine schwingende Masse  $m$  an einer Feder und einem Dämpfer das Kräftegleichgewicht aufgestellt, ergibt sich<sup>169</sup>

$$\ddot{x}m + \dot{x}b + (x + x_{\text{stat}})c - mg = 0$$

Dabei ist der erste Term die D'Alambertsche Kraft der Beschleunigung, der Zweite die Dämpferkraft aus dem Produkt der Dämpferkonstante und der Geschwindigkeit und der dritte Term die Federkraft, wobei  $x$  die Auslenkung der Feder darstellt, welche mit der statischen Auslenkung addiert ist. Dem entgegen wirkt die Kraft, die die Masse ausübt. Mit der Randbedingung, dass zum Anfangszeitpunkt die Auslenkung gleich der statischen Auslenkung ist, kann für die Gleichung geschrieben werden:

$$\ddot{x}m + \dot{x}\frac{b}{m} + x\frac{c}{m} = 0$$

Nun können die Abklingkonstante  $\delta$  und die Eigenkreisfrequenz  $\omega_0$  der ungedämpften Schwingung mit in die Gleichung genommen werden. Sie definieren sich durch

$$\frac{b}{m} = 2\delta, \text{ sowie } \frac{c}{m} = \omega_0^2$$

Für die homogene Differentialgleichung bedeutet dies (im Weiteren wird für  $\frac{\delta}{\omega_0} = D$  ersetzt, wobei  $D$  den Dämpfungsgrad darstellt):

$$\ddot{x} + \frac{b}{m}\dot{x} + \frac{c}{m}x = 0$$

$$\ddot{x} + 2D\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = 0$$

Zur Lösung der Differentialgleichung wird für den Dämpfungsgrad unterschieden, welchen Wert um Eins er annimmt:

- $D < 1$  schwache Dämpfung
- $D = 1$  aperiodischer Grenzfall

<sup>169</sup> Vgl. Knappstein, 2004, S. 129.

- $D > 1$  starke Dämpfung, keine Schwingung

Die Dämpfung für ein Schwingungssystem muss so ausgelegt sein, dass die Eigenschwingungen eines Systems optimal gedämpft werden.<sup>170</sup>

Wird ein Feder-Masse System angeregt, wird eine harmonische, abklingende Schwingung ausgeführt, deren Frequenz nahe  $\omega_0$ , der Frequenz des ungedämpften Systems, ist. Erfolgt die Anregung von außen durch eine Schwingungsbeschleunigung, ist die Amplitude  $A$  folgende, mit der Erregerfrequenz  $\omega$ :<sup>171</sup>

$$A = \frac{B}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{b}{m}\right)^2 \omega^2}}$$

Wird für  $\omega \ll \omega_0$ , ist  $\frac{A}{B} \rightarrow \frac{1}{\omega_0^2} = m/k$ . Somit ist die Bewegungsamplitude proportional zur Beschleunigungsamplitude. Um nun die Erregerfrequenz viel kleiner der Frequenz des ungedämpften Systems zu halten, muss das System „hoch abgestimmt“ sein. Dies bedeutet für die Feder eine hohe Steifigkeit und für die Masse, dass sie möglichst gering ist.<sup>172</sup>

**Freiheitsgrade:** In mechanischen Systemen geben die Freiheitsgrade den Grad der festen geometrischen Position im Raum an. Im Raum gibt es sechs Freiheitsgrade. Das sind drei für die Verschiebbarkeit entlang der Achsen eines kartesischen Koordinatensystems sowie drei weitere für die Drehbarkeit eines Körpers um diese Achsen. Hat ein System keinen Freiheitsgrad, ist es statisch bestimmt, bei mehr als einem Freiheitsgrad ist es folglich beweglich und bei einer Fixierung an mehr Punkten, als für die statische Bestimmtheit erforderlich, ist es statisch überbestimmt.

## 4.2.2 Messaufbau

Zur Schwingungserfassung werden Beschleunigungsaufnehmer verwendet, die z.B. mittels eines piezoelektrischen Sensors dynamische Druckschwankungen der Bewegungen in elektrische Signale umwandeln, welche wiederum von tragbaren Auswertegeräten erfasst werden.<sup>173</sup>

Werden Messungen über den Weg oder die Geschwindigkeit durchgeführt, würde ein Bezugspunkt benötigt. Da dies oft nicht einfach ist und zusätzlichen Aufwand verursacht, haben sich diese Methoden nicht bewährt<sup>174</sup>. In der Fachterminologie werden absolute und relative Aufnehmer unterschieden. Die absolute Variante ist jene, welche die Messung der

<sup>170</sup> Vgl. Weichert, 2000, S. 114.

<sup>171</sup> Vgl. Weichert, 2000, S. 113.

<sup>172</sup> Vgl. Weichert, 2000, S. 113 f.

<sup>173</sup> Vgl. Weichert, 2000, S. 113 ff.

<sup>174</sup> Vgl. Weichert, 2000, S. 113.

Schwingbewegung auf einen festen Punkt bezieht, während die zweite Art für den Bezugspunkt ein in einem Gehäuse befestigtes, federndes Objekt verwendet.<sup>175</sup>

Bei den Größen, die erfasst werden, handelt es sich um Schwinggeschwindigkeit, -weg oder -beschleunigung. Durch ihren mathematischen Zusammenhang stellt die Transformation zu einer jeweilig anderen kein Problem dar.

Neben einem Schwingungsaufnehmer, einem Messverstärker, elektronischer Bandbegrenzung und Ausgängen zum Verbinden mit Auswerte- und Speichergeräten besteht der Messaufbau außerdem aus einem Effektivwertbildner inklusive Normierung und Anzeigeeinheit.<sup>176</sup> Die Datenerfassung über mehrere Kanäle ermöglicht einen guten Überblick über die Zusammenhänge zwischen der Maschinendynamik und den Schwingungsprofilen. Dazu werden Messdaten von verschiedenen Messpunkten zusammengeführt. Ein solcher Messaufbau ist in Abbildung 30 zu sehen. Die Singlechannelmessung, also der Einsatz eines einzigen Kanals hingegen erfasst Messergebnisse nacheinander. Dies lässt nur eine schlechte Interpretation zu und sollte deswegen lediglich bei einfachen Maschinen und bei der Routineüberwachung eingesetzt werden.<sup>177</sup>

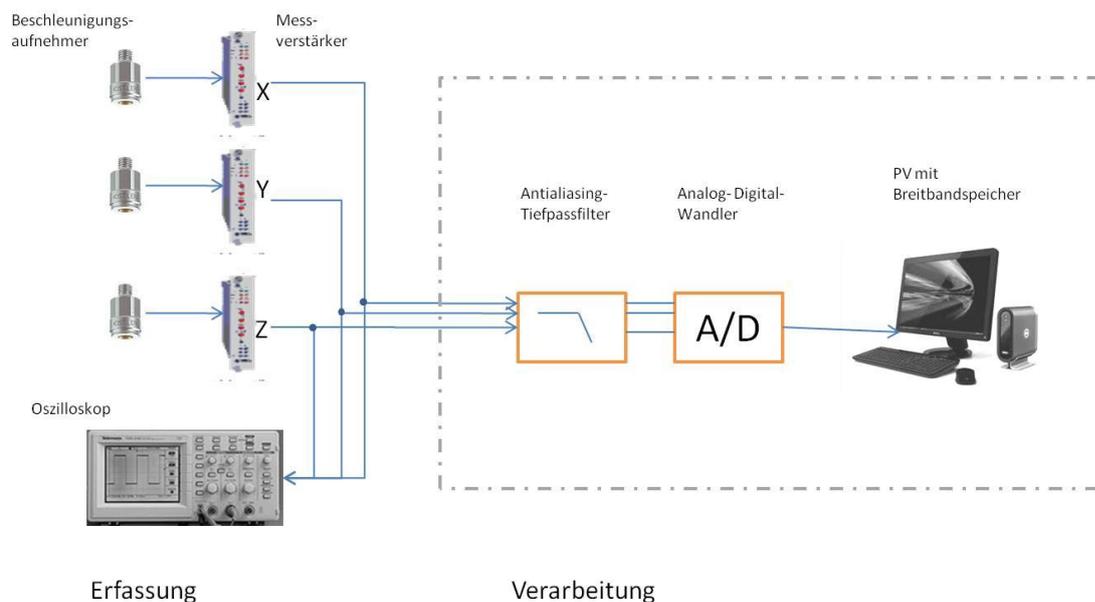


Abbildung 30: Blockschaltbild eines mehrkanaligen Messaufbaus zur Schwingungsmessung und Analyse unter Verwendung eines Computersystems PC<sup>178</sup>

<sup>175</sup> Vgl. Hartung, 1994, S. 170f.

<sup>176</sup> Vgl. Hartung, 1994, S. 193f.

<sup>177</sup> Vgl. Mobely, 2002, S. 151f.

<sup>178</sup> Vgl. Hartung, 1994, S. 197.

## Messwandler

Bei Beschleunigungsaufnehmern wird aus dem Zusammenhang  $F = m \cdot a$  bei den Messgeräten die Beschleunigung abgeleitet. Da die seismische Masse in den Beschleunigungsaufnehmern unverändert bleibt, „besteht bei linearer Kennlinie der Feder eine direkte Linearität zwischen der gemessenen Schwingkraft  $F$  und der gesuchten Beschleunigung  $a$ .“<sup>179</sup> Die am häufigsten verwendeten Wandler sind

- Aufnehmer aufbauend auf Induktionsprinzip sind in einem Frequenzbereich von 10 bis 1000 Hz einsetzbar. Außerhalb dieses Bereichs werden sie unzuverlässig und ungeeignet um Maschinenzustände zu bewerten.

Der Aufbau dieser Messaufnehmer besteht aus einer Masse in Form eines stabförmigen Permanentmagneten, die den Anker bildet und an einer Feder im Gehäuse hängt. Um die Masse ist eine Spule platziert. Bei Bewegung des Aufnehmers, verursacht durch eine Schwingung, wird durch die Bewegung des Permanentmagneten zwischen der Spule Induktion erzeugt, die proportional der Schwingkraft ist.<sup>180</sup>

- elektrischer Widerstand mittels Dehnmessstreifen DMS oder Halbleiter eignen sich für 0 bis 500 Hz. Eine Blattfeder, auf der ein DMS sitzt, ist an der seismische Masse befestigt. Durch Biegung verändert sich der elektrische Widerstand des DMS resp. des Halbleiters. Piezoelektrische Aufnehmer werden wegen der ladungserzeugenden Kristalle als aktive Aufnehmer bezeichnet.<sup>181</sup> Ein solcher Piezoelektrischer Aufnehmer ist in Abbildung 31 schematisch dargestellt. Seine Bestandteile sind:

- |                      |                 |                      |                     |
|----------------------|-----------------|----------------------|---------------------|
| 1...seismische Masse | 2...Spannhülse  | 3...Sensorelemente   | 4... Zwischenplatte |
| 5...Mittelelektrode  | 6...Grundplatte | 7...Aufnehmergehäuse | 8...Montagegewinde  |

<sup>179</sup> Hartung, 1994, S. 173.

<sup>180</sup> Vgl. Hartung, 1994, S. 174.

<sup>181</sup> Vgl. Hartung, 1994, S. 174f.

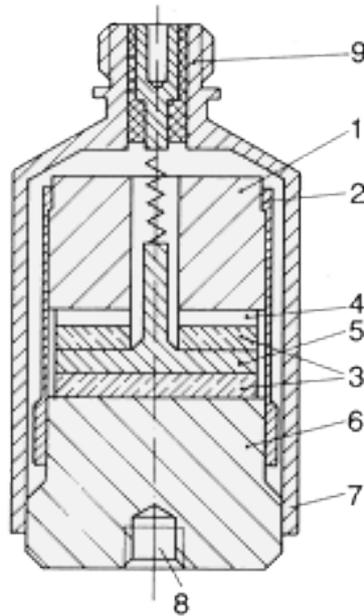


Abbildung 31: Piezoelektrischer Aufnehmer<sup>182</sup>

- elektrische Ladung, erzeugt anhand von Kristall und Keramikelementen. Diese Form ist nicht geeignet für Niederfrequenz- oder statische Messungen, weil die geringe mechanische Energie für solche Schwingungen nur in keine bis sehr geringe elektrische Energie umgewandelt werden kann.<sup>183</sup>
- Bewegungssensoren messen die tatsächliche Bewegung in Millimeter. Permanent angebrachte Sensoren liefern die genauesten Daten. Für Turbinen oder große Kompressoren empfiehlt sich eine permanente Anbringung, jedoch ist dies auch ein hoher Kostenfaktor, da Bewegungssensoren durch die permanente Stromversorgung mitsamt den dafür erforderlichen Vorrichtungen, sprich Kabel, Leitungen etc. teuer sind. Darum sollten Schlüsselstellen in der Anlage Vorrang haben.<sup>184</sup>

### Messauswertung

Da bei Schwingungsmessungen an Maschinen viele verschiedene Schwingungen zusammenkommen, sind die sich ergebenden Schwingungsbilder, äußerst komplex. Jeder Schwingungsverursacher hat ein eigenes Schwingungsbild, aber alle Bilder überlagern sich. Dies trifft v.a. zu, wenn die Amplitude über die Zeitachse aufgetragen wird. Schwingungen können auch über die Frequenz aufgetragen werden. Es wird von Zeitbereich oder vom Frequenzbereich gesprochen. Die erste genannte Art der Darstellung wird für lineare und

<sup>182</sup> Schiessle, 1992, übernommen von: [http://mechatronik.tu-ilmenau.de/lernmodul\\_mechatronik/komponenten/sensoren/sensoren\\_zu\\_funktionsprinzip.html](http://mechatronik.tu-ilmenau.de/lernmodul_mechatronik/komponenten/sensoren/sensoren_zu_funktionsprinzip.html), Stand 19.Mai 2011

<sup>183</sup> Vgl. Hartung, 1994, S. 173ff.

<sup>184</sup> Vgl. Mobley 2002, S. 254.

wechselseitige Bewegungen herangezogen und eignet sich gut für Gesamtanalysen von Antrieben, v.a. um Veränderungen im Betrieb festzustellen.<sup>185</sup> Es ist jedoch schwierig, einzelne Komponenten zu isolieren und zu betrachten. Bei der Auswertung muss dazu die Zeitskala manuell verändert werden um in weiterer Folge auf Daten von diskreten Frequenzkurven zu kommen. Durch diesen Aufwand gilt eine Auswertung dieser Art nicht als kosteneffektiv, wird aber in der prädiktiven Gesamtanlagen Instandhaltung und in der Zuverlässigkeitsverbesserung eingesetzt. Für Maschinenantriebe welche durch bestimmte zeitliche Events charakterisiert sind, wie etwa pneumatische Zylinder, wird die Zeitskala ebenfalls verwendet.<sup>186</sup>

Um Zeitdaten im Frequenzbereich darzustellen, werden sie mittels Fast Fourier Transformation umgewandelt. In der Darstellung ist auf der X-Achse die Frequenz zu sehen und auf der Y-Achse der Ausschlag, die Geschwindigkeit oder die Beschleunigung. Das ganze Spektrum der Schwingungen aus dem Antrieb lässt sich bei der Darstellung im Frequenzbereich in die diskreten Komponenten aufteilen, was eine Analyse vereinfacht. Diese diskreten Komponenten, von denen jede eine Sinusfunktion ist, zeigt die nachfolgende Fourierserie exemplarisch.<sup>187</sup>

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \phi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \phi_2) + A_3 \sin(3\omega t + \phi_3) + \dots$$

Als Ausgabeformat kommt entweder Steady State oder Dynamisch in Frage<sup>188</sup>:

- Die Steady State Auswertungserfassung eignet sich für Anlagen, die mit konstanter Geschwindigkeit laufen, dabei wird keine Rücksicht auf Schwingungsänderungen durch veränderte Betriebsbedingungen z.B. Produktionsgeschwindigkeit genommen. Die Parameter werden wie ein Schnappschuss aufgenommen, bieten aber so keinen Überblick über die dynamischen Vorgänge in der Anlage.
- Die dynamische Auswertung erfolgt laufend in Echtzeit.

Bei der Datenerfassung ist es beinahe unmöglich, alle Spektren hoch aufgelöst zu sammeln und zu speichern, weil dazu riesige Prozessoren erforderlich wären. Die kompletten Daten sollten nur gesammelt werden, wenn ein hartnäckiges Problem an der Anlage identifiziert wurde und es gilt, dieses zu beheben.<sup>189</sup> Die Bandbreite bei der Datenübertragung beeinflusst die Auswertung und die Datengröße. Die Bandbreite ist der Bereich zwischen den Eckfrequenzen, das sind die obere und untere Grenzfrequenz.<sup>190</sup>

<sup>185</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 118.

<sup>186</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 146ff.

<sup>187</sup> Vgl. Mobely, 2002, S.149f.

<sup>188</sup> Vgl. Mobely, 2002, S. 150f.

<sup>189</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 164f.

<sup>190</sup> Vgl. Weichert, 2000, S. 149.

Breitband- und Gesamtdatenmessung haben begrenzten Nutzen, der die Programmsinnhaftigkeit behindern kann. Bei Betriebsgeschwindigkeiten fehlt es an der nötigen Auflösung für die Früherkennung.<sup>191</sup> Die Schwingstärke bei der Breitbanddatenerfassung bewegt sich zwischen 10 und 10000 Hz, wobei eben der Effektivzustand der gesamten Maschine erfasst wird. Für manche Anwendungen gibt es Messgeräte, welche die gemessenen Werte in Kategorie nach ISO 2372 unterteilen und so helfen, gegebenenfalls Übertretungen der Schadensgrenzwerte festzustellen.

---

<sup>191</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 165.

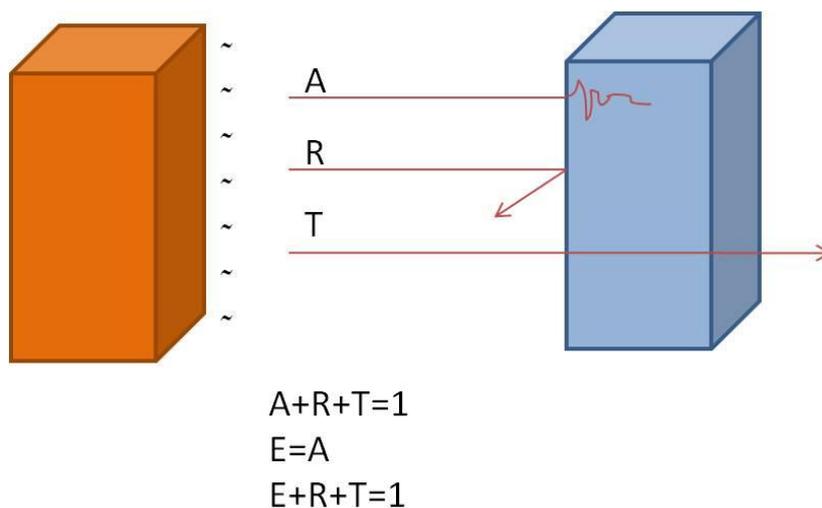
## 4.3 Thermographie

Emissionen von Infrarotstrahlung resp. Temperaturstrahlung werden gemessen, um auf Betriebsbedingungen zu schließen. Thermische Unterschiede in den Anlagenkomponenten lassen Rückschlüsse auf existierende oder beginnende Anlagenprobleme zu.<sup>192</sup> Der große Vorteil für die Vorausschauende Instandhaltung liegt dabei darin, dass für die meisten Anwendungen keine Unterbrechung der Produktion notwendig ist. Thermographiekameras werden auf die zu untersuchende Stelle gerichtet.

### 4.3.1 Grundlagen zu Thermographie

Thermographie baut auf der Tatsache auf, dass alle Gegenstände, welche eine Eigentemperatur über dem absoluten Nullpunkt haben, Energie oder Strahlung abgeben, wozu auch Infrarotstrahlung gehört. Ihre kurze für das menschliche Auge unsichtbare Wellenlänge, kann mit geeigneten Hilfsmitteln anhand der Oberflächentemperatur gemessen werden. Obwohl es drei verschiedene Möglichkeiten für Energie an Objekten gibt (Abbildung 32), ist für die Instandhaltung nur die emittierte Wärme interessant. Neben ihr sind für die Energiemessung noch reflektierte Energie und transmittierte Energie relevant. Diese genannten Energien können in der Thermographie gemessen werden.

Nicht reflektierende Oberflächen absorbieren Energie vollständig. Sie werden als schwarze Körper oder Plank'sche Strahler bezeichnet. Oberflächen, die hingegen infrarote Strahlung reflektieren, werden auch als Graukörper bezeichnet. Dabei können Veränderungen der Oberflächenzuständen, Lacke oder bspw. die Umgebungsluft Einfluss haben.



193

Abbildung 32: Energie Emissionen. A = absorbierte Energie, R = reflektierte Energie, T = übertragene (transmitted) Energie, E=emittierte Energie<sup>194</sup>

<sup>192</sup> Vgl. Mobely, 2002, S. 172.

<sup>193</sup> Vgl. Mobely, 2002, S. 173f.

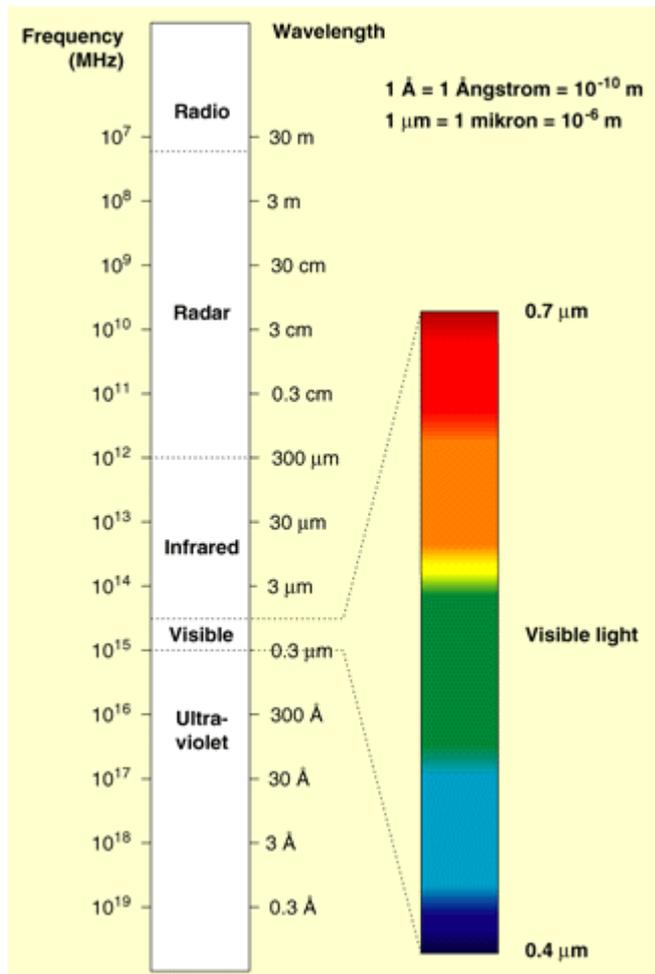


Abbildung 33: Das elektromagnetische Spektrum<sup>195</sup>

Jedes Objekt emittiert bei Erwärmung elektromagnetische Energie. Desto höher die Temperatur ist, umso höher die elektromagnetische Energie. Das elektromagnetische Spektrum ist in Abbildung 33 dargestellt. Der sichtbare Bereich des Lichtes ist nur ein kleiner Teil. Bei geringerer Wellenlänge wird von dem ultravioletten Bereich gesprochen, bei einer höheren Wellenlänge als beim sichtbaren Lichtbereich tritt Infrarotstrahlung, Radar- und schließlich Radiostrahlung auf. Der Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Energie ist jener, dass bei immer geringerer Wellenlänge dementsprechend mehr Energie in der Strahlung enthalten ist. Ein gutes Beispiel dafür ist erwärmter Stahl. Glüht dieser, weil er stark erhitzt ist, ist seine Temperatur natürlich viel höher, als wenn dieser abgekühlt ist und keine Verfärbung durch Erhitzen mehr aufweist.<sup>196</sup>

Wärmeübertragung findet auf drei verschiedene Arten statt, wobei generell gilt, dass Wärme eher vom wärmeren Bereich zum kälteren übergeht. Einerseits kommt es durch Leitung zum

<sup>194</sup> Mobley, 2002, S. 173.

<sup>195</sup> Entnommen von <http://www.eduspace.esa.int/eduspace/subtopic/default.asp?document=295>, gelesen am 25.5.2011

<sup>196</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 176.

Wärmeaustausch zwischen festen Körpern, eine andere Möglichkeit ist Konvektion durch oder zwischen Fluiden oder Gasen. Die dritte Art der Übertragung ist die Strahlung, bei welcher Wärme über die Wellenlänge übertragen wird<sup>197</sup> (z.B. Sonnenstrahlung).

**Emissionsfaktor:** Dieser wird in Prozent gemessen und gibt an, wieviel Energie von einem Objekt emittiert wird. Trifft Infrarotstrahlung auf einen Gegenstand, kann diese entweder absorbiert, reflektiert oder übertragen werden. Abbildung 34 zeigt einen Schwarzkörper grafisch. Er absorbiert vollständig die ganze emittierte Energie und reflektiert nichts. Der Graukörper, welcher in Abbildung 35 dargestellt ist, absorbiert 80 % und reflektiert die restliche thermische Energie.

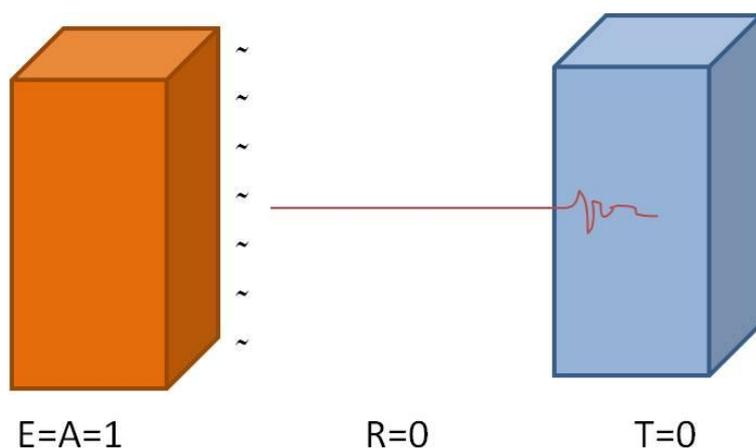


Abbildung 34: Schwarzkörper Emissionen<sup>198</sup>

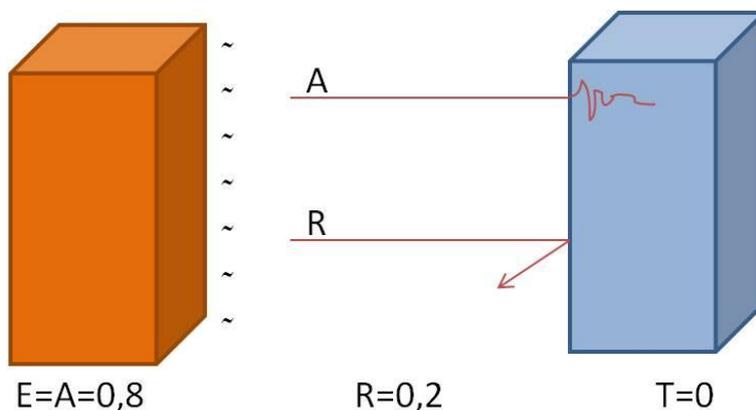


Abbildung 35: Graukörper Emissionen<sup>199</sup>

### 4.3.2 Einsatzgebiet der Thermographie in der Instandhaltung

Die Thermographie eignet sich gut, um in den folgenden Kategorien Aussagen über die Anlagenzustände zu machen<sup>200</sup>:

<sup>197</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 177f.

<sup>198</sup> Mobley, 2002, S. 173f.

<sup>199</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 174.

- Lockerung von mechanischen Verbindungen – lockere Sitze werden sich als thermische Belastungsermüdung äußern. Bei Sicherungsklemmen bspw. führt ständiges Aufwärmen und Abkühlen irgendwann zu einem schlechten Sitz des Elements.
- Lastprobleme, z.B. bei überlasteten Zuleitungen<sup>201</sup> oder Pumpen<sup>202</sup>.
- Störungen in der Energieversorgung<sup>203</sup> – etwa überhitzte Kabel im Verborgenen oder versteckte Übergangswiderstände.<sup>204</sup>
- Fehlerhafte Montagen
- Füllstandkontrollen



Abbildung 36: Thermographische Aufnahme<sup>205</sup>

Es werden Anwendungsbeispiele angeführt, bei denen der Einsatz von thermischen Betrachtungen hilfreich ist<sup>206</sup>:

Motoren: Empfohlen wird, nur Motoren mit mehr als 25 PS thermographisch zu scannen, es sei denn, sie sind kritische Faktoren in der Produktion. Gescannt sollen die sogenannten „T-Boxen“ werden, sowie sichtbare elektrische Leiter, Verbindungselemente und Rotoren. Probleme bei den Lagern können erkannt werden, indem die Werte mit ähnlichen Motoren verglichen werden.

Sicherungen: Hauptprobleme sind lockere mechanische Klemmen, die Wärmepole verursachen. Dies geschieht aufgrund korrodierter oder oxidierter Kontaktflächen nach außen oder schwacher, gelöteter interner Verbindungen.

<sup>200</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 180.

<sup>201</sup> Vgl. Schüttig, [www.tds-thermografie.de](http://www.tds-thermografie.de), gelesen 26. Mai. 2011

<sup>202</sup> Neuweg, 2009, S.11.

<sup>203</sup> Vgl. Neuweg, 2009, S. 11.

<sup>204</sup> Vgl. Schüttig [www.tds-thermografie.de](http://www.tds-thermografie.de), gelesen 26. Mai. 2011

<sup>205</sup> Goratec, 2011.

<sup>206</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 180 ff.

Konduktoren: Schmelzpunkte und stromführenden Kapazitäten definieren sich durch die Größe und das Material der Konduktoren. Bei Untersuchungen soll auf Unterschiede zwischen den Phasen, den Konduktoren und den Verbindungen geachtet werden.

Lasttrennschalter: Auch hierbei äußern sich mangelhafte Kontakte durch thermische Strahlung.

Hochspannungsschaltanlagen: Betrachtet werden sollen Blitzableiter, Isolatoren, Kabel, Kabelverbindungen Sicherungsautomaten und Trennschalter.

Kapazitäten: Die beiden leitenden Oberflächen sollten bei gleicher Größe auch die gleiche Temperatur aufweisen. Allerdings kann es selbst im Normalbetrieb sein, dass eine Oberfläche wärmer ist. Sind die Kapazitäten kalt, weist dies auf eine gefallene Sicherung oder eine schlechte Akkumulatorzelle hin. Einzelne besonders temperaturdifferente Stellen auf der Oberfläche der Kapazität können diese als schlecht indizieren.

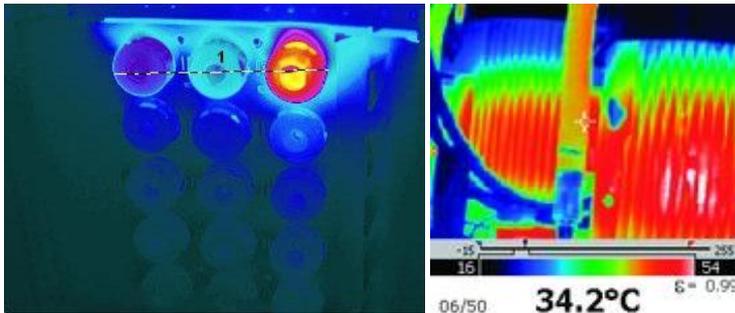


Abbildung 37: Thermographische Aufnahme<sup>207</sup>

Transformatoren:

- Buchsen: Die Buchsen sollten miteinander verglichen werden, um gelockerte Verbindungen oder Probleme aufzufinden. Der Scan zeigt dabei auch, ob die Verbindung intern oder extern locker sitzt.
- Ölgefüllte Transformatoren: Der thermischen Betrachtung werden Sicherungen, Verbindungen, Bürsten und Aufhängergestell sowie Ölstand unterzogen. Für Transformatoren ohne Ölkühlung gelten für thermografische Observationen die gleichen Stellen, klarerweise mit Ausnahme des Ölstandes.

<sup>207</sup> Goratec, 2011.

## 4.4 Tribologie

Die Tribologie betrachtet Reibungszuständen bei relativen Bewegungen, wobei die Einflüsse von Schmierung beachtet werden und auch die Verschleißsituation berücksichtigt wird. Relevanz gewinnt die Tribologie dabei sowohl bei Verschleiß ausgesetzten Werkzeugen, als auch bei Komponenten, die Bewegungen gegeneinander ausführen. Die vier Tribologietechniken, die für die prädiktive Instandhaltung relevant sind, sind die Schmieröl-, Spektral- und Verschleißpartikelanalyse sowie die Ferrographie.<sup>208</sup>

Die erste der genannten prüft Öl, das zur Schmierung in Anlagen eingesetzt ist. In der voraussehenden Instandhaltung können so zum einen unsachgemäße Betriebszustände identifiziert werden, zum anderen lassen sich die Intervalle für den Ölwechsel abhängig von dem aktuellen Zustand feststellen. Es sei darauf hingewiesen, dass regelmäßige Inspektionen eine Voraussetzung für zuverlässige Informationen sind.<sup>209</sup> Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass die Anlagenüberwachung mittels tribologischen Instrumenten sehr kostenintensiv ist, weshalb in diesem Bereich häufig Dienstleistungen zugekauft werden.<sup>210</sup> Richtwerte zu den Kosten werden mit den drei Analysearten in Abschnitt 4.4.1 bis 4.4.3 angegeben.<sup>211</sup>

Im Zuge des Probens soll genau beachtet werden, ob die Stelle der Entnahme sinnvoll und optimal ist. Proben am Grund eines Tanks werden mehr Feststoffe resp. Ablagerungen enthalten, als dies bei strömenden Flüssigkeiten der Fall ist. Grundsätzlich sollte die Probe jenen Zustand aufweisen, den auch die Flüssigkeit hat, welche die jeweiligen Maschinenkomponenten passiert.<sup>212</sup> Um zu gewährleisten, dass eine Sammlung von Daten entsteht, die als aussagekräftiges Werkzeug in der Anlageninstandhaltung dient, ist es überdies essentiell, feste Rundgangswege und v.a. Entnahmestellen einzurichten. Als Referenz zur Auswertung werden Öl-Proben der nicht verschlissenen Anlage und des noch nicht eingesetzten Öles herangezogen. Sinnvoll ist überdies eine Verknüpfung mit anderen Methoden der vorausschauenden Instandhaltung.

### 4.4.1 Schmierölanalyse

Bei diesem Test werden Proben aus dem Schmieröl einer Maschine oder Anlage genommen und danach einem Labortest unterzogen. Getestet wird dabei die Viskosität, die Verunreinigung, eine etwaige Vermischung mit Kraftstoff, Festkörper oder Ruß im Öl und Oxidation sowie Nitration. Überdies werden Verunreinigungen durch Säuren und Basen bestimmt. Eine einfache Probe kostet ca. \$20 bis \$50.

---

<sup>208</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 202.

<sup>209</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 203.

<sup>210</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 207.

<sup>211</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 203 ff.

<sup>212</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 207.

Viele Punkte, welche in der Schmierölanalyse getestet werden, lassen sich auch mittels Spektralanalyse schnell und relativ genau ermitteln, wobei die mikorprozessorbasierte Ausstattung dafür im Moment ab erst zwischen \$30.000 und \$60.000 erhältlich ist. Die dabei untersuchbare Partikelgröße liegt unter 10 Mikrometer. Darüber sind keine Untersuchungen möglich.<sup>213</sup>

#### 4.4.2 Verschleißpartikelanalyse

Hierbei werden Aussagen über die Abnutzung des Maschinenstranges gemacht, indem Partikel dieser Abnutzung im Schmieröl identifiziert werden. Sehr detailliert werden diese auf deren Form, Zusammensetzung, Größe und Menge untersucht. Bei einer intakten Anlage sind nur sehr wenige Verschleißpartikel vorhanden, die sehr klein sind. Deren Größe liegt bei weniger als 10 Mikrometer. Sowohl Anzahl als auch Größe nehmen mit größer werdendem Maschinenverschleiß zu.

##### Die Verschleißarten bei Maschinen sind grundsätzlich:

- Abrasiver Verschleiß – die Oberfläche wird durch äußere Einflüsse abgetragen. In der Tribologie wird v.a. Verschleiß dieser Art identifiziert. Abrasiver Verschleiß wirkt sich z.B. in Freiflächen- oder Kolkverschleiß aus (Abbildung 38).
- Adhäsiver Verschleiß – es kommt zu einer Verschweißung des Schneidwerkzeugmaterials und des Werkstückmaterials unter hohem Druck und während der Relativbewegung. Dies beeinflusst die Oberflächenqualität beider Teile und kann zum Werkzeugbruch führen<sup>214</sup> (Aufbauschneide).
- Oberflächenzerrüttung – unter der betroffenen Oberfläche bilden sich Risse und breiten sich aus, was zu einer Zerstörung der Oberfläche führt. Auslöser für die Beschädigung sind wechselnde mechanische Beanspruchungen.<sup>215</sup>
- Tribooxidation – eine chemische Zwischenschicht bildet sich zwischen Bewegungsflächen.

---

<sup>213</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 205 ff.

<sup>214</sup> Vgl. Schal, 2000, S. 135.

<sup>215</sup>

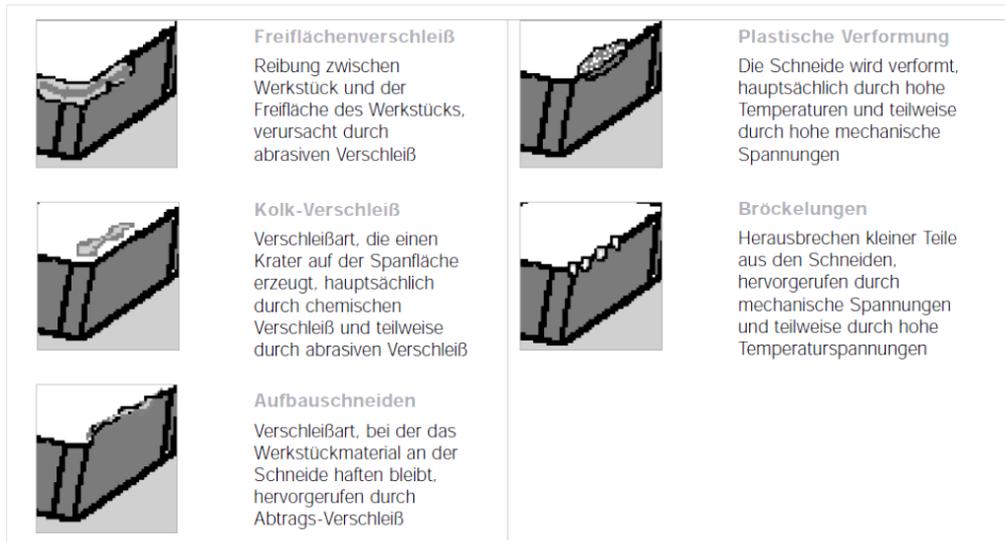


Abbildung 38: Verschleißarten<sup>216</sup>

Bei Schneidewerkzeugen führt Verschleiß überdies zu einer Erhöhung der Schneidekraft bis zu 50%. Die Abstreifkräfte, also jene Kräfte für das Rückziehen des Werkzeuges gemessen in % der Schneidekraft, verringern sich und der Einzug (unsaubere Kante, abgerundet) am Schnittteil wird größer. Dies hat Auswirkungen auf das Produkt. Ein zunehmender Grat am Werkstück deutet auf Verschleiß am Schneidewerkzeug hin.<sup>217</sup>

Für die Klassifizierung der Partikel sind fünf unterschiedliche Verschleißarten relevant<sup>218</sup>:

- Wälzverschleiß durch Ermüdung (rolling fatigue) – im frühen Stadium sind die Partikel, die in erster Linie bei Wälzlagern vorkommen, kleiner als 15 Mikrometer. Es wird zwischen drei Partikelarten unterschieden. Zum einen kommen Alterssplitter vor, die aus abgetragenem Material sind und den erste Indikator von Anomalitäten darstellen. Kugelförmige Partikel treten nicht notwendigerweise auf und können auch von anderen Komponenten als dem Wälzlager kommen, müssen aber erkannt werden, bevor sie zum sogenannten „Spalling“ führen. Die dritte Art der Partikel im Wälzlager ist flächenförmig. Sie entsteht zwar über den ganzen Lebenszyklus, aber beim Entstehen von Alterssplittern kommt es zu einem häufigeren Auftreten dieser Partikel.
- Aufbauverschleiß oder Aufbauschnede (cutting wear) – das Material einer Oberfläche verschleißt mit dem der anderen, weil durch Fehlausrichtung oder einer beschädigten Oberfläche das härtere Material einen Grat in die weichere Oberfläche drängt (siehe auch Abbildung 38).

<sup>216</sup> HSS Forum, 2005, S. 13

<sup>217</sup> Schal, 2000, S. 104 f.

<sup>218</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 205 f.

- Reibverschleiß (rubbing wear) – entstehend aus Gleitverschleiß durch immer stärkeres Abtragen der Oberfläche. Dies schreitet umso schneller voran, umso größer die Verunreinigungen im Gleitadditiv sind.
- Schwerwiegender Gleitverschleiß, auch Bröckelung (severe sliding wear) – Auslöser sind hohe Temperaturen und Belastungen, die in dem Ausbrechen großer Partikel resultieren.
- Kombination von Wälz- und Gleitverschleiß – die Wurzeln liegen bei gegeneinander beweglichen Teilen in Getrieben und an Oberflächen. Die Partikel sind vergleichsweise größer als bei den anderen Verschleißarten. Sie entstehen bei Zugbeanspruchungen am Zahnrad, wo sie die Müdigkeitsrisse zur schnelleren Ausbreitung anregen und schließlich zum Pitting führen. Fressen entsteht dabei wegen hoher Belastung und Geschwindigkeit. Die hohe Temperatur, die dabei entsteht, zerstört den Schmierfilm und führt zu Adhäsion des Zahnradzahnes.

#### 4.4.3 Ferrographie

Durch ein magnetisches Feld werden Partikel aus der Probe getrennt, was eine Einschränkung auf ferritische und magnetische Fremdstoffe impliziert. Die Größe der Partikel liegt bei 100 Mikrometer. Da größere Fremdstoffe als bei der Spektralanalyse separiert werden können, wird die Analyse der Probe repräsentativer. Ansonsten lassen sich bei der Ferrographie durchaus parallelen zur Spektralanalyse ziehen<sup>219</sup>

---

<sup>219</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 207.

## 4.5 Ultraschallanalyse

Die günstig durchführbare Ultraschallanalyse wird für drei verschiedene Arten von Untersuchungen in der Instandhaltung eingesetzt. Dazu gehört zum einen die Geräuschanalyse, Leck Detektion und das Testen von Material.<sup>220</sup> Letzteres spielt auch in der Produktdatenüberwachung zum Zwecke der präventiven Instandhaltung eine Rolle. Das System sendet dabei ein Signal und vergleicht es mit dem Empfangenen, vom Material reflektierten Signal. Die Messgröße ist dabei entweder die Zeit oder die Amplitude.<sup>221</sup>

Konkrete Anwendungen sind die Überwachung von Druckluft/ Vakuum Leackage. Die hochfrequenten Geräuschkuster, die beim Entweichen von Gasen aus Behältern entstehen, können mit Ultraschallsystemen geortet und „sichtbar“ gemacht werden. Gut lässt sich das Verfahren bei Ventilen, die damit auf Funktionsfähigkeit und Dichtung überprüft werden, einsetzen. Ebenso gilt dies für Kondensabscheider, Leitungen usw.<sup>222</sup>

In elektrische Komponenten finden Detektionen statt, in dem Korona- und Lichtbögen ein Schallsignal erzeugen.<sup>223</sup> So können Schaltanlagen, Transformatoren, Hauptschalter und Isolatoren im Mittel- und Hochspannungsbereich beobachtet werden<sup>224</sup>.

Sowohl strukturelle als auch luftübertragene Ultraschallmessung liefern in der Instandhaltung schnelle, genaue Aussagen über Lecke oder von der Norm abweichende Bedingungen im Betrieb. Die Geräte sind handlich und tragbar, aber meist können Daten nicht gespeichert werden. Nicht empfohlen wird die Analyse für Lagerbeobachtungen, obwohl dies von Herstellern häufig als Anwendungsgebiet angeführt wird. Das Problem dabei ist, dass die Bandweite der Lagerfrequenz nicht von der Bandweite von z.B. Zahnrädern oder anderen Komponenten unterscheidbar ist.<sup>225</sup>

---

<sup>220</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 256.

<sup>221</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 257.

<sup>222</sup> Mobley, 2002, S. 257.

<sup>223</sup> Vgl. Pergam-Suisse AG, /www.sparen-mit-ultraschall.ch/, gelesen am 4. Juni 2011

<sup>224</sup> Pergam-Suisse AG, www.sparen-mit-ultraschall.ch/, glesen am 4. Juni 2011

<sup>225</sup> Vlg. Mobley, 2002, S. 258.

## 4.6 Prozessdatenüberwachung

Lediglich mit Sensoren und Messtechnik Vibrationsprofile zu beobachten, ist in der präventiven Instandhaltung unter Umständen nicht ausreichend. Werden die Prozessparameter der im Einsatz befindlichen Anlagenkomponenten überwacht, erhält die Instandhaltung weitere Daten, die wertvolle Informationen liefern. Entsprechen beispielsweise die Betriebsbedingungen nicht der Vorgabe in der Spezifikation, wird die Pumpe eine wesentlich geringere Lebensdauer erreichen, als wenn sie korrekt betrieben wird. Dazu muss beobachtet werden, ob die Randbedingungen, unter denen operiert werden, optimal sind. Ist dies nicht der Fall, muss eingegriffen resp. die richtigen Bedingungen geschaffen werden. Sofern dies nicht möglich ist, muss die Instandhaltung sich dessen bewusst sein und bestimmte, gefährdete Komponenten früher austauschen, bevor diese unerwartet versagen. Nachfolgend werden einige Anlagenkomponenten mit deren kritischen Komponenten und Bedingungen erläutert.

Zur Ergänzung wird auf Mobley, *An Introduction to Preventive Maintenance*, 2002, verwiesen. Dort findet sich eine große Auswahl an Tabellen und Sammlungen zu Maschinenelementeversagen und deren Zusammenhänge sowie Ursachen.

### 4.6.1 Pumpen

Zentrifugalpumpen reagieren empfindlich auf Veränderungen im Zustand der beförderten Flüssigkeit, wie etwa veränderte Viskosität, Temperatur und Dichte. Veränderungen beim Ansaugen z.B. unterschiedlicher Druck sowie variierende Volumenströme beeinflussen die Lebensdauer ebenso negativ wie Leistungsunterschiede. Dabei führen Hohlräumbildungen oder hydraulische Instabilität zu mechanischem Gebrechen durch Verschleiß. Erstere entsteht durch Phasenänderung des transportierten Fluides, turbulente Strömung oder Luft-/Gaseinschlüsse. Auch Nachlässigkeiten von Seiten der Instandhaltung, u.a. falsche Schmierung, Fehlansrichtungen, Unwucht und leckere Dichtungen begünstigen dies.<sup>226</sup>

Diese Symptome äußern sich zunächst durch lautere Betriebsgeräusche, ein Ausschlagen der Druckanzeige, veränderte Durchflussraten und/oder Motorströme, da Motoren lastabhängig operieren. Es werden sich dadurch aber auch die Vibrationsmuster in der Schwingungsanalyse verändern.<sup>227</sup>

Der vom Hersteller angegebene NPSH (Net Positive Suction Head) soll im Einsatz nicht unterschritten werden um Kavitation zu vermeiden.<sup>228</sup>

Verdränger- oder Hydropumpen sind weniger empfindlich als die zuvor genannten Zentrifugalpumpen. Um gut und ordnungsgemäß zu funktionieren, verlangen aber auch sie nach

---

<sup>226</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 218 f.

<sup>227</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 220.

<sup>228</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 221.

sauberer Flüssigkeit in konstanter Menge. Auslassventile, die bei den Kolbenpumpen den Pumpablauf kontrollieren, sind die größten Schwachstellen und verdienen eine besondere Beachtung im Rahmen der Instandhaltung. Bei den Kolben hingegen kann verunreinigte Flüssigkeit ebenfalls zu Gebrechen führen, weil die Toleranzen an Zylinderwänden gering sind und Feststoffe an diesen Stellen für Verschleiß sorgen.<sup>229</sup>

### 4.6.2 Gebläse

In Bezug auf Ansaugen oder Ablassen sind Radialgebläse besonders sensibel, aber auch die Temperatur und Luftfeuchtigkeit wirkt sich bei ihnen auf die Betriebsfähigkeit aus. In einem Bereich von +/-15% um den optimalen Betriebspunkt (von Hersteller angegeben) arbeiten Radialgebläse zuverlässig. Wird dieser Bereich verlassen, führt dies zu Instabilität. In diesem Fall würde die Vibrationsenergie des Gebläses ansteigen und die Lager sowie andere bewegte Komponenten würden eine zunehmende Abnutzung erfahren. Die rotierenden Elemente sind natürlich schmutzempfindlich. Acht muss auch auf die kritische Geschwindigkeit des Anlagenelements gegeben werden.<sup>230</sup>

Rotationsgebläse reagieren äußerst empfindlich auf Veränderungen im Operationsprozess. Geschwindigkeits- und Mengenvariationen wirken sich im Bandlaufdruck und der Last (Druck und Volumenstrom) direkt proportional auf die Schäden dieses Gerätes aus. Mit häufigem an- und abschalten verhält es sich ebenso. Maschinenelemente des Rotationsgebläses, die von den genannten Einflüssen am stärksten betroffen sind, sind Axiallager, Ventilsteuerung resp. Motorsteuerung und Rotorkomponenten. Schlechte Instandhaltungsmaßnahmen erhöhen die Ausfallrate auch bei diesem Gebläsetyp signifikant.<sup>231</sup>

### 4.6.3 Fördergeräte

Anfällige Elemente bei Druckluftförderern sind die Rohrleitungen, welche verstopfen können und Antriebsaggregate (etwa Gebläse).<sup>232</sup>

### 4.6.4 Kompressoren

Die Vibrationsprofile von Kompressoren sind ident mit denen von Pumpen oder Gebläsen, jedoch treten bei Kompressoren Lastschwankungen und Variablen wie Temperatur, Eingangsdruck oder Ausströmdruck stärker hervor. Unzureichender und stark variierender Lufteingangstrom ist ein häufiger Versagensgrund. Auch Feststoffteilchen und Flüssigkeiten beeinflussen die Lebensdauer negativ, weshalb Filter eingesetzt und regelmäßig ersetzt werden sollen.<sup>233</sup>

---

<sup>229</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 222 ff.

<sup>230</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 225 ff.

<sup>231</sup> Vgl. Mobely, 2002, S. 228 f.

<sup>232</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 229.

<sup>233</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 230 f.

Bei rotierenden Verdrängungskompressoren gibt es zwei Bauarten: Drehkolben- und Schraubenverdichter. Empfindliche Komponenten der ersten Gattung sind Gleitringdichtungen, welche routinemäßig alle 10.000-15.000 Betriebsstunden gewechselt werden sollten. Für Schieber gilt dies bei 16.000 Stunden, es sei denn, es wird unter Niedrigdruck gefahren. Dann muss erst bei der doppelten Betriebszeit ein Austausch erfolgen. Auf jeden Fall darf es nicht zum Gebrechen der Schieber kommen, weil so der gesamte Kompressor beschädigt werden würde. Bewegungen in axialer Richtung von Seiten der Rotorschraube sollten vorrangig überwacht werden, da die geringen Toleranzen bei diesem Bauteil keine zu starken Achsschübe erlauben. Erhöht sich das Vibrationsmuster an dieser Stelle, ist mit dem Versagen des Kompressors zu rechnen. Zusätzlich lohnt sich eine Vibrationsüberwachung der Lager, um diese im Bedarfsfall rechtzeitig zu ersetzen. Vergrößern sich Vibrationen im Zahnradeingriff, führt dies zu axialem Druck.<sup>234</sup>

#### **4.6.5 Getriebe**

Die Zahnräder in den Getrieben sind dazu bestimmt unidirektional zu funktionieren. Die meisten Gründe für Versagen sind jedoch der Betrieb in beide Richtungen oder die falsche Montage der Räder. Wenn nicht ausdrücklich für den bidirektionalen Betrieb vorgesehen, sind die Rückseiten der Zahnflanken nicht gleich gefertigt, wie die für den Einsatz vorgesehene Seite. Die Oberfläche ist deswegen rauer und verfügt nicht über die nötigen Toleranzen. Ein anderer Grund für Bruch der Komponenten ist Überlastung, aber auch Ausrichtungsfehler der Zahnräder und Achsen.<sup>235</sup>

---

<sup>234</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 231 ff.

<sup>235</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 242 ff.

## 4.7 Visuelle Inspektion

Einen nicht zu vernachlässigenden Platz in der Instandhaltung nimmt die Inspektion durch Mitarbeiter ein. Auch wenn nicht alle Vorfälle alleine durch menschliche Sinneswahrnehmungen erfassbar sind, so sind doch kleine, unaufwändige und kostengünstige Vorrichtungen an der Anlage, an denen der verantwortliche Mitarbeiter den Zustand ablesen kann, oftmals sehr hilfreich und aussagekräftig. Zu solchen Hilfsmitteln gehören z.B. einfach lesbare Druckanzeigen, sowie Sensoren und Alarmvorrichtungen, die akustische oder optische Signale geben, welche der Mitarbeiter interpretiert.

Da Beobachtung durch Menschen immer subjektiv ist, müssen vom Betreiber Vergleichswerte für die Messstellen der Anlage zur Verfügung gestellt werden. Dies können quantitative Spezifikationen, Fotos, Aufnahmen oder Vergleichsproben sein. Die kritischen Parameter müssen definiert sein und es muss klar sein, welches Referenzmaterial als positiv resp. negativ gilt.<sup>236</sup> Es soll auch darauf geachtet werden, dass Grenzen für das Einschreiten der Instandhaltung so gesetzt werden, dass sie früh genug sind. Wenn der Abstand zwischen der Grenze und dem Versagen zu kurz ist, und auch noch mit einbezogen werden muss, dass es u.U. eine unbestimmte Zeit dauern kann, bis das Überschreiten der Grenze überhaupt festgestellt wird, kann es in Bezug auf ein Gebrechen gegebenenfalls schon zu spät sein.

Scheinbar simple visuelle Feststellungen, wie etwa die eines Lecks im Tank können eine große Wirkung haben. Es soll jedoch festgehalten sein, dass Personen dazu tendieren, kleine Veränderungen, die möglicherweise sukzessive voranschreiten, nicht zu erkennen, dies dafür bei großen Veränderungen jedoch sehr wohl der Fall ist.<sup>237</sup> Deswegen gehört der Einsatz von geeigneten Messgeräten durch den verantwortlichen Mitarbeiter unterstützend zur visuellen Instandhaltung. Es ist wichtig, dass die jeweilige Person das Messgerät beherrscht und über den fachlichen Inspektionsvorgang genau Bescheid weiß. Dem voran gehen selbstverständlich Schulungen.

---

<sup>236</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 261.

<sup>237</sup> Vgl. Mobley, 2002, S. 261.

## 5 Wert der Instandhaltung

Stellt sich die Frage nach dem Wert einer geplanten oder getätigten Investition in der Instandhaltung, ist dies nicht einfach zu beantworten, wird doch die Instandhaltungstätigkeit als eine Notwendigkeit gesehen, die vor allem Geld kostet. Hinzu kommt, dass zwar eine Summe der Instandhaltungskosten für eine Abteilung oder ein Unternehmen bekannt ist, die Zuordnung zu einer konkreten Maschine bzw. Komponente jedoch meist eine große Schwierigkeit darstellt. Darum wird häufig mit Gemeinkostensätzen gearbeitet, was im Denken des Unternehmens wiederum den Fokus auf die Kosten legt.

Erkennen Unternehmen hingegen, dass Instandhaltung keinen Kostenfaktor darstellt, sondern einen Wert, der generiert wird, lassen sich aus der Instandhaltung Vorteile gegenüber den anderen Marktteilnehmern gewinnen. Eingesetzte Geldmittel können optimiert werden, indem durch gut geplante Maßnahmen und optimale Komponentenausnutzung unerwartete Stillstandzeiten mit einhergehenden Produktionsausfällen vermieden werden. Dies gilt auch für Ressourcenverschwendung durch zu frühes Austauschen der Anlagenteile, wobei die Produktqualität von tadellosen Produktionsanlagen profitiert, was zu reduzierten Ausschusszahlen führt.

Ein Schritt in diese Richtung ist der Ansatz, der Instandhaltung auf strategischer Sicht zu begegnen. Das bedeutet, bereits auf oberster Managementebene eine Strategie, passend zur Unternehmens Mission für den Bereich der Instandhaltung festzulegen (Abbildung 39). So wird der Stellenwert dieses Feldes verdeutlicht, welches auf alle Unternehmensbereiche (Produktion, Personal, Marketing, Qualität, Konstruktion, Lager...) Einfluss hat, umgekehrt aber auch von allen Bereichen beeinflusst wird<sup>238</sup>.

---

<sup>238</sup> Vgl. Al-Turki, 2011, S. 151.

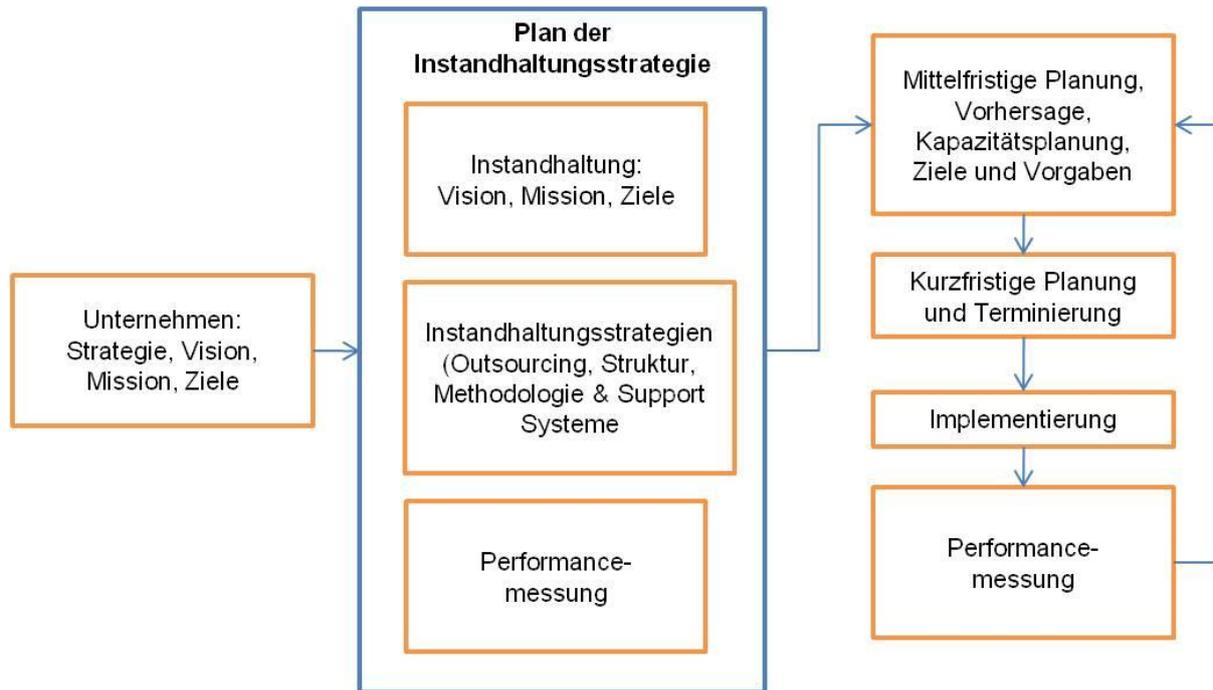


Abbildung 39: Planung der Instandhaltung als Teil der Planung im Unternehmen<sup>239</sup>

Um die Argumentation zu unterstreichen, dass Instandhaltung einen Wert erzeugt, soll selbiger ermittelt werden. Im Grunde ist dies schwierig, weil bei Anlagen, deren Performance über lange Zeitstrecken aufgezeichnet wird, eine Erhöhung der Investitionen nicht unmittelbar Auswirkungen zeigt. Des Weiteren ist es kein leichtes Unterfangen, Verbesserungen in der Anlagenperformance mit vorher getätigten Maßnahmen in einen direkten Zusammenhang zu stellen.

Grundsätzlich definiert sich der Wert eines Produktes oder einer Dienstleistung als die Summe der erzielten Qualitäten in Relation zu dem dafür eingesetzten Preis<sup>240</sup>. Dabei ist die Qualität etwas sehr subjektives, denn jede Person, oder auch jedes Unternehmen, stellt andere Anforderungen, deren Erfüllung sich in der empfundenen Qualität ausdrückt. Während die größte Schwierigkeit darin besteht, alle Komponenten der „erlangten Qualität“ zu identifizieren, ist die Frage nach dem dafür getätigten Preis einfacher zu beantworten. Aus diesem Grund wird zunächst auf die Instandhaltungskosten und die darauf wirkenden Einflüsse eingegangen. Abschließend soll der Frage nach der Verbesserungsleistung und deren Messmöglichkeit nachgegangen werden.

<sup>239</sup> Al-Turki, 2011, S. 155, von der Autorin aus dem Englischen übersetzt.

<sup>240</sup> Crespo, 2010.

## 5.1 Instandhaltungskosten

### 5.1.1 Qualitative Kostenbestimmung

In der Literatur findet sich ein interessantes Beispiel der Kosteneinteilung nach unterschiedlichen Gesichtspunkten, wobei nicht die zahlenmäßigen Kostenwerte maßgeblich sind, sondern die Art der Kosten. Salonen unterteilt Kosten in „cost of conformance“ und „costs of non-conformance“ für jeweils korrektive und präventive Instandhaltung<sup>241</sup>. Die Kostenverursacher, welche aufgrund der Einteilung nicht konform sind, werden nach Möglichkeit eliminiert, weil das eingesetzte Geld dafür verschwendet wird. Nicht konforme Tätigkeiten sind jene, die z.B. unnötige präventive Instandhaltung betreiben oder diese schlecht ausführen.

	Corrective maintenance	Preventive maintenance
Cost of Conformance	<b>Indispensable corrective maintenance:</b>  Corrective Maintenance due to: - Failures with random distribution and no measurable deterioration - Failures which are not financially justified to prevent	<b>Valid preventive maintenance:</b>  Preventive Maintenance, necessary to uphold necessary dependability Improvements intended to increase the reliability of equipment
Cost of Non-conformance	<b>Non-accepted corrective maintenance:</b>  Corrective Maintenance due to: - Lack of preventive maintenance - Poorly performed preventive maintenance - Poor equipment reliability	<b>Poor preventive maintenance:</b>  Unnecessary Preventive Maintenance Poorly performed Preventive Maintenance

Abbildung 40: Einteilung der konformen und nicht konformen Kosten für präventive und korrektive Instandhaltung<sup>242</sup>

### 5.1.2 Quantitative Kostenbestimmung

Für die Bestimmung der Instandhaltungskosten pro Jahr wurde Silvas<sup>243</sup> Konzept, welches jedoch mit durchschnittlichen Kosten kalkuliert und nicht auf die Einzelkomponenten aufteilt, dermaßen abgewandelt und zusammengesetzt wie im Anschluss vorgestellt. Die Kosten wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit auf die einzelnen Komponenten herunter gebrochen, da in Abschnitt 5.3 der Wert für die Instandhaltung einer jeden Komponente einzeln abgeleitet werden soll, was als Basis die Bewertung mit Einzelkosten erfordert.

<sup>241</sup> Vgl. Salonen, 2011, S. 67 f.

<sup>242</sup> Salonen, 2011, S. 68.

<sup>243</sup> Vgl. Silva, 2008, S. 347 ff.

Kosten einer korrektiven Instandhaltungsstrategie  $C_{cor}$  setzen sich folgendermaßen zusammen

$$C_{Cor,i} = [C_{R,i} + (C_{LCor,i} + C_{PBCor,i}) * DT_{Cor,i}] * \lambda_{Cor,i} T$$

$$C_{cor} = \sum C_{corr,i}$$

Die einzelnen Variablen stehen für:

$C_{Cor,i}$	Kosten, entstanden durch korrektive Instandhaltung einer (Anlagen)Komponente
$C_{R,i}$	Reparaturkosten der Komponente (z.B. Ersatzteil, Material, Hilfsmittel...)
$C_{LCor,i}$	Arbeitskosten (in-House oder in Subkontrakten) pro Stunde
$C_{PBCor,i}$	Kosten welche durch Produktionsverluste infolge der Instandhaltung entstehen
$DT_{Cor,i}$	Anlagenstillstandzeit aufgrund Instandhaltung (down time) wegen Ausfall einer Komponente
$\lambda_{Cor,i}$	Ausfallrate einer bestimmten Komponente
T	Maschinenlaufzeit, jährlich

Für die Kosten der zeitgesteuerten (systematisch) präventiven Instandhaltung  $C_{PS}$  wird die folgende Formel herangezogen:

$$C_{PS,i} = [C_{M,i} + (C_{LPS,i} + C_{PBPS,i}) * DT_{PS}] * m_i$$

$$C_{PS} = \sum C_{PS,i}$$

$C_{PS,i}$	Instandhaltungskosten, präventiv, einer Komponente
$C_{M,i}$	Kosten des Einsatzes von präventiven Instandhaltungsmaßnahmen für die Komponente (z.B. eingesetztes Material, Ersatzteil,...)
$C_{LPS,i}$	Personalkosten (in-house oder in Subkontrakten) pro Stunde für eine bestimmte Komponente bei präventiver Instandhaltung, z.B. Kosten der Installation des Sensors oder Personalkosten bei der Thermographie-Durchführung
$C_{PBPS,i}$	Kosten pro Stunde für Produktionsverluste, bedingt durch Stillstand aufgrund

	von systematisch präventiver Instandhaltung
$DT_{PS}$	Anlagenstillstandzeit durch die präventive Instandhaltungsmaßnahme (down time) einer Komponente
$m$	Anzahl der jährlichen präventiven Instandhaltungsdurchgänge für eine Komponente

Für die Kosten der Zustandsorientierten Instandhaltung  $C_{PC}$  kann angenommen werden, dass sie folgendermaßen konstruiert sind:

$$C_{PC,i} = A_i + DT_{Insp,i} * D_{insp,i} * C_{LPC,i}$$

$C_{PC,i}$	Instandhaltungskosten einer Komponente, zustandsorientiert
$A_i$	Jährliche Abschreibung des Equipment $i$ für Inspektion und Diagnose <sup>244</sup>
$DT_{Insp,i}$	Anlagenstillstandzeit durch die zustandsorientierte Instandhaltungsmaßnahme einer Komponente
$D_{insp,i}$	Anzahl der Inspektionen und Monitoring Vorgänge pro Jahr, die für diese Komponente durchgeführt werden
$C_{LPC,i}$	Personalkosten (in-house oder in Subkontrakten) pro Stunde für eine bestimmte Komponente und zustandsabhängige Instandhaltung

Dabei gilt die Annahme, dass Ausfälle zuverlässig vorhergesagt werden, und es somit zu keinen überraschenden Gebrechen kommt. Jedoch schränkt die Aufstellung für die zustandsorientierten Instandhaltungskosten einer Komponente  $C_{PC,i}$  auf Maßnahmen ein, bei denen keine dauerhafte Überwachung erfolgt, etwa Ölanalysen oder thermische Messungen. Diese werden tatsächlich an einer bestimmten Anzahl von Tagen pro Jahr durchgeführt, und die dafür nötige Ausstattung an Messgeräten usw. kann nach der Anschaffung abgeschrieben werden. Bei einer permanenten Überwachung muss sich die Formel insofern ändern, als die Kosten für die dauernde Überwachung eingerechnet gehören. Außerdem ist es üblich, mehrere Komponenten gleichzeitig zu beobachten, was ebenfalls zu berücksichtigen ist. Hinzu kommen Kosten für die einmalige Installation der Maßnahme. Somit ergibt sich folgende Formel:

$$C_{PC,i,permanent} = A_i + C_{LPC,i,inst} * DT_{inst,i} + C_{LPC,i,permanent} * \frac{D_{insp,i}}{\#_{PC,i}}$$

<sup>244</sup> Silva, 2008, S. 349.

$C_{PC,i,permanent}$	Instandhaltungskosten einer Komponente, zustandsorientiert, welche permanent überwacht wird
$A_i$	Jährliche Amortisation des Equipment i für Inspektion und Diagnose <sup>245</sup>
$C_{LPi,inst}$	Personalkosten (in-house oder in Subkontrakten) pro Stunde für die Installation von Equipment um eine bestimmte Komponente zu überwachen
$DT_{inst,i}$	Anlagenstillstandzeit durch die Installation von Equipment an der Anlage
$C_{LPC,i,permanent}$	Personalkosten (in-house oder in Subkontrakten) pro Stunde für die permanente Überwachung einer Komponente mittels Zustandsüberwachung
$D_{insp,i}$	Anzahl der Tage pro Jahr, an denen Inspektionen und Monitoring für diese Komponente durchgeführt werden
$\#_{PC,i}$	Anzahl der parallel resp. gleichzeitig überwachten Komponenten

$$C_{PC} = \sum C_{PC,i} + \sum PC, i, permanent$$

Die Gesamtinstandhaltungskosten  $C_{sum}$  einer Produktionsanlage, bei der verschiedene Strategien verfolgt werden, setzt sich aus den Einzelkosten für alle Komponenten unter Berücksichtigung der jeweiligen Instandhaltungsstrategie zusammen.

<sup>245</sup> Silva, 2008, S. 349.

## 5.2 Verbesserungswert einer Instandhaltungs-

### Intensivierung

Es ist naheliegend, die Verbesserung durch die Instandhaltung anhand der Anlagenperformance jener Anlage zu messen, die von einer hohen Investition betroffen ist in Relation zu anderen Anlagen. Als Messwerte bieten sich die folgenden Kennzahlen an:

- die Verbesserung der Ausfallwahrscheinlichkeit  $F(t)$ .
- Verlängerung der Mittleren Zeit bis zum Ausfall MTTF
- Anlagenverfügbarkeit  $A_D$

Berücksichtigt muss werden, dass die Kennzahl mit einem monetären Wert multipliziert werden muss, damit in der Gleichung für den Wert eine Division durch Kosten möglich ist. Der Wahrscheinlichkeitswert der Ausfallwahrscheinlichkeit muss daher z.B. mit den Risikokosten des Ausfalls multipliziert werden.

Die aktuellen Kenngrößen, sprich IST-Werte, sollten i.d.R. aus Aufzeichnungen bekannt sein. Sie dienen als Bezugswerte. Im Anschluss werden die Ideen und die Anforderungen genauer betrachtet.

#### 5.2.1 Ausfallwahrscheinlichkeitsverbesserung $\Delta F(t)$

Für einige Bauteile werden Ausfallwahrscheinlichkeiten, resp. Lebensdauer garantien vom Hersteller für bestimmte Betriebsbedingungen angegeben. Dazu gehören etwa Lager. Im Konstruktionsprozess von Anlagenteilen erfolgt ebenfalls eine Vorauslegungen sowie Lebensdauerberechnungen. D.h. es kann von gewissen Lebenserwartungen ausgegangen werden, die natürlich streuen. Durch die Installation eines Sensors beispielsweise ließen sich Anomalien im laufenden Betrieb erkennen und die entsprechenden Teile können unmittelbar vor dem Versagen gewechselt werden. Kann vorausgesetzt werden, dass diese Hilfsmittel, z.B. Sensoren, mit Sicherheit einen Ausfall vorhersagen, und dies zeitlich so geschieht, dass es zu keiner Produktionsunterbrechung kommt, sinkt die Ausfallwahrscheinlichkeit auf (nahezu) 0%. Trotzdem ist noch nicht gesichert, dass sich dieses Vorgehen lohnt, da das Verhältnis zwischen dem Nutzen dieser Maßnahme und den entstehenden Kosten nicht bekannt ist.

Als ersten Schritt gilt es in Bezug auf Maschinen oder gar Anlagen zunächst herauszufinden, welche Komponenten überhaupt einen Beitrag zum Ausfall liefern. Durch die Boolesche Modellbildung und die Anwendung der Impendanzgrößen (Abschnitt 3.1.2) soll dies als erster Schritt erfolgen. Sind die bedeutendsten Teile identifiziert, ist die nächste Frage, wie sich eine Instandhaltungsänderung, in erster Linie durch größere Intensität oder Hilfsmittel der

präventiven Instandhaltung, auf die Ausfallwahrscheinlichkeit auswirkt. Um nun eine Bewertungsgrundlage zu erlangen, die beurteilt, wie sich eine Erhöhung des zur Verfügung stehenden Budgets auf die Verfügbarkeit auswirkt, wird eine Versuchsanordnung vorgeschlagen.

### **Versuchsanordnung:**

Eine Werkzeugmaschine oder einfache Produktionsanlage  $i$  wird als Referenzobjekt herangezogen. Die Daten der vergangenen Ausfälle sind bekannt, und eine Funktion der Ausfallwahrscheinlichkeit  $F_{k=0,i}(t = v)$  liegt vor. Ebenso ist bekannt, welche Instandhaltungsmaßnahmen (Anlagenzustand  $k=0$ ) bereits durchgeführt werden.

Nun werden zusätzliche Instandhaltungsmaßnahmen (Anlagenzustand  $k=1$ ), wie sie in 2.1 erläutert sind, über gewisse Zeiträume  $v$  implementiert. Für hochbeanspruchte Anlagen wird ein Versuchszeitraum von mind. sechs Monaten vorgeschlagen (also  $v=6$  Monate), für weniger beanspruchte Anlagen dementsprechend mehr. Auf jeden Fall muss ein vernünftiges Verhältnis zwischen den Ausfällen in dieser Zeiteinheit und der Gesamtversuchsdauer bestehen. Am Ende dieser Zeit wird wieder  $F_{k=1,i}(t = v)$  ermittelt. Gleichzeitig werden die Mehrkosten dieser Instandhaltungsstrategie berechnet  $\Delta C$ .

Im nächsten Schritt wird der Ausgangszustand der Anordnung wieder hergestellt und eine andere Maßnahme zur Verfügbarkeitsverbesserung, sprich Instandhaltungsmaßnahme, vorgenommen. Der Zustand  $k=2$  ist somit implementiert und wird über den gleichen Zeitraum  $v$ , der auch in der Durchführung der ersten Maßnahme eingesetzt wurde, beibehalten. Am Ende ergibt sich wieder eine Ausfallwahrscheinlichkeit  $F_{k=2,i}(t = v)$ . In dieser Weise kann iterativ vorgegangen werden.

Nach einer Reihe von Versuchen liegen Werte vor, die verglichen werden können und eine Aussage über die Auswirkung jeder Maßnahme und ihr Kosteneinsparungs- oder Verfügbarkeitsverbesserungspotential machen. Zusammenhänge können prozentuell dargestellt und tabellarisch publiziert werden. Jedoch ist anzumerken, dass dieser Versuch sehr idealisiert ist. Außerhalb von Laborsituationen kann eine Vielzahl von Einflüssen die Auswirkung einer Instandhaltungsmaßnahme beeinträchtigen.

Eine andere Vorgehensweise ist umgekehrt, in dem das zur Verfügung gestellte Budget in mögliche Instandhaltungsleistungen aufgeteilt wird, und am Ende einer Anwendungsperiode eine Wertsteigerung gemessen wird. Dann ist ebenfalls  $F_{k=1,i}(t = v)$  zu berechnen.

Über die Zusammenhänge der Kennzahlen, welche in Kapitel 2.4.1 erörtert sind, können die Verbesserungen auch über eine Veränderung der Mittleren Zeit bis zum Versagen  $\Delta MTTF$ , die Überlebenswahrscheinlichkeit  $R(t)$  oder die gesteigerte Verfügbarkeit  $\Delta A_D$  gemessen werden.

### 5.3 Der Instandhaltungswert

Einen Ansatz liefert Dwight auf der Suche nach einer Instandhaltungsperformance Messung, in dem er vom Wert auf die Performance schließt.<sup>246</sup> Dwight bildet den Quotienten aus Differenz von  $V_r$ , dem realisierten Wert und  $V_l$  für den zukünftig verlorenen Wert mit dem bestmöglichen erreichbaren Instandhaltungswert  $V_r^*$ . Die Formel lautet:

$$\text{Performance } P = \frac{V_r - V_l}{V_r^*}$$

Der Einfluss des operierenden technischen Systems auf den Unternehmenserfolg  $C_{rel}SA_k$  wird priorisiert. Dabei wird stets die Performance der einzelnen Instandhaltungsmaßnahme mit dem festgesetzten Idealstandard  $SPSA_k$  verglichen.  $PSA_k$  steht für die Performance einer jeweiligen Instandhaltungstätigkeit<sup>247</sup> D.h. die Performance wird im Verhältnis zum dazugehörigen antizipierten Ideal gesetzt und anschließend auf den Gesamtbetriebserfolg aufgerechnet. Letztlich werden alle so errechneten Terme zur Instandhaltungsperformance addiert. Die oben angeführte Formel wird von Dwight zur folgenden weiterentwickelt:

$$\text{Performance} = \sum_{k=1}^P \frac{PSA_k}{SPSA_k} * \left\{ \frac{C_{rel}SA_k}{\sum_{k=1}^P C_{rel}SA_k} \right\}$$

Zu kritisieren ist bei dieser Methode, dass zukünftige, beste Methodenperformance, höchst schwierig zu bestimmen sind und ex post bestimmt werden. Dabei werden die bestmöglichen Reaktionen auf die Rahmenbedingungen angenommen, so wie sie aber im Vorhinein bekannt sind. Das Wissen darum bezieht sich also auf Erfahrung im Umgang mit der Situation aus der Vergangenheit, berechnet aber für die Zukunft wobei dabei einige zufällige Einflüsse eine Rolle spielen können. Die Ergebnisse scheinen sehr wagen zu sein, denn jede Performance müsste geschätzt werden. Zwar können Wunschwerte angestrebt werden, es ist aber nicht einfach zu sagen, ob diese durchführbar sind. Gültigkeit hat die Methodik von Dwight bei ausgefeilten Prozessen wie etwa in der Energiegewinnung oder Stahlwerken. Für mittelgroße, produzierende Unternehmen scheint sie der Autorin ungeeignet, nicht zuletzt, weil nicht immer der Gesamtbeitrag der Instandhaltung zum Unternehmenserfolg die Frage ist, sondern der Wert einer gezielten Investition interessant ist. Außerdem wird von Anlagen im Produktionsbereich als beste Performance nicht unbedingt ein Null-Ausfall Lauf antizipiert, es kann im Gegenteil, je nach Position, die Erwartungshaltung oder auch Notwendigkeit niedriger liegen. Dwight selbst schlussfolgert über sein Konzept „the absolute definition

<sup>246</sup> Vgl. Dwight, 1999, S. 259 ff.

<sup>247</sup> Dwight, 1999, S. 262.

of maintenance performance, in terms of changes in value, present some difficult practical problems.<sup>248</sup>

Die von der Autorin entwickelte, nachstehende Formel berücksichtigt den Anspruch, den Wert für eine bestimmte Investition zu bestimmen.

Der Grundgedanke dafür ist, dass der Wert am besten als monetäre Größe ausgedrückt wird, da dies im Gegensatz zum ideellen Wert eine objektive Vergleichsgrundlage liefert. Der ideelle Wert einer Instandhaltungsmaßnahme könnte für ein Unternehmen eine Ausfallverminderung um einen gewissen Prozentbereich sein, oder auch eine Null-Ausfall Produktion. Da sich der Wert durch den Nutzen für einen Kunden dividiert durch den Preis, den der Kunde zu bezahlen bereit ist, definiert, wurde im nächsten Schritt ergründet, was der Nutzen ist, und was im Nenner stehen muss. Der „Kunde“ ist in diesem Fall das Unternehmen, in dem die Instandhaltung stattfindet. Die im vorangehenden Abschnitt erläuterte Kostendefinition wird dazu zur Hilfe genommen. Aus ihr werden die Kosten für die korrektive Instandhaltung  $C_{Cor,i}$  berechnet. Der Nutzen ist die Verbesserung der Ausfälle. Wird die Instandhaltung gesteigert eingesetzt, führt dies zu weniger Ausfällen. Die Ausfallwahrscheinlichkeit, die wie der Name schon impliziert, ist eine Wahrscheinlichkeit. Die Instandhaltungssteigerung bewirkt nun eine Veränderung der Wahrscheinlichkeit, dass es zum Ausfall kommt. Dieser Ausfall würde Kosten verursachen. Für eine bestimmte Komponente sind dies korrektive Ausfallkosten, die mit der Veränderung der Ausfallwahrscheinlichkeit multipliziert werden. Dadurch ergibt sich der erlangte Nutzen für den Kunden, nämlich eingesparte Kosten, die so hoch sind, wie die Verringerung der Ausfallwahrscheinlichkeit, sprich, die Ausfälle werden um einen bestimmten Prozentsatz gesenkt und mit den Kosten für die Ausfälle multipliziert. Den Nenner stellt der Preis dar, der bezahlt wird. Dies sind die Instandhaltungskosten gesamt für die betrachtete Einheit oder Komponente.

$$V_{\text{maint},i} = \frac{(F_{k=0,i}(t=v) - F_{k=1,i}(t=v)) * C_{Cor,i}}{C_{\text{Sum},i}}$$

$F_{k=1,i}(t=v)$ ... Ausfallwahrscheinlichkeit der Anlage i, zum Zeitpunkt  $k=1$ , in dem die Verbesserung schon in Kraft getreten ist und einen Zeitraum der Dauer  $v$  in Nutzung war

$F_{k=0,i}(t=v)$ ... Ausfallwahrscheinlichkeit der Anlage i, zum Zeitpunkt  $k=0$ , in dem die Verbesserung noch nicht in Kraft getreten ist und einen Zeitraum der Dauer  $v$  in Nutzung war

$C_{\text{Sum},i}$ ... Kosten der Instandhaltungsverbesserung für die betrachtete Einheit resp. Komponente: Installation, Material usw.

Der finanzielle Wert einer Instandhaltungsmaßnahme dagegen lässt sich durch den Ausdruck im Zähler bestimmen. Dieser Term beinhaltet die Verbesserung der Ausfallwahr-

---

<sup>248</sup> Dwight, 1999, S. 275.

scheinlichkeit über die Zeit, multipliziert mit den Kosten, die mit dem Ausfall der Komponente verbunden sind. Anders gesagt ist dies die finanzielle Ersparnis durch die Verhinderung der Ausfälle, weil ja durch die Investition dem Komponentenversagen entgegengewirkt wurde. Eine prozentuelle Auswirkung ist in Bezug auf die Ausgangssituation selbstverständlich berechenbar.

Der optimale Punkt der Investitionen ist dort, wo der Quotient aus Erfolg zu eingesetzten Finanzen am größten ist. Könnte durch Forschungsreihen ein Zusammenhang zwischen dem Einsatz vorausschauender Instandhaltungsmaßnahmen und deren zuverlässigen Aussage darüber gemacht werden, inwieweit eine bestimmte Maßnahme die Ausfallwahrscheinlichkeit senkt, so könnte gezielt der Ressourceneinsatz variiert werden, um den optimalen Punkt, resp. den höchsten Wert für eine Komponente oder Anlage festzustellen.

In jedem Fall unterstützt die Formel eine Entscheidung, wenn es darum geht, mehreren Maßnahmen und ihre Kosten zu vergleichen.

### **5.3.1 Einschränkungen**

Wird jedoch eine perfekte Instandhaltung gänzlich ohne unerwartete Ausfälle angestrebt, kann diese Formel zwar zur Information der Wertsteigerung herangezogen werden, aber es kann u.U. über das Optimum investiert werden, sofern dies als wichtig erachtet wird. Dies ist bspw. der Fall, wenn das Optimum bei minimalen Kosten ist, wo es noch Ausfälle gibt und es ungleich viel mehr kosten würde, die verbleibenden Ausfälle zu vermeiden. Genau das kann aber wichtig sein z.B. Energieproduktion, Gefahren für die Mitarbeiter oder Umwelt usw.

Andererseits muss trotz erhöhter Investitionen und gesteigerter Verfügbarkeit das Verhältnis des Ertrags zum Aufwand, also der Nutzen im Auge behalten werden.

### **5.3.2 Ausblick**

Es ist erstrebenswert, aufgrund statistischer Erhebungen an Versuchsanlagen auf eine prozentuelle Auswirkung einer Instandhaltungsmaßnahme auf die Verfügbarkeit zu schließen. Dies kann Aufschluss darüber geben, um wie viel die Installation eines Sensors oder bspw. eine tribologische Analyse langfristig Verbesserungen im Vergleich zur Ausgangssituation bringt. Messergebnisse könnten sein:

- prozentuelle Instandhaltungseinsparungen über die Zeit: Ersparnis der korrektiven Instandhaltungskosten um XY % gesenkt im Zeitraum von n Nutzungsperioden durch Instandhaltungsmaßname IM.
- Energieeinsparung über die Nutzungsperioden, welche sich wiederum in finanziellen Messgrößen ausdrücken ließe.

- Steigerungen der Komponentennutzungsdauern in Abhängigkeit von konkreten Instandhaltungsmaßnahmen. z.B. Komponenten A und B sind in Serie geschaltet, dabei gilt: vorrausschauende Überwachung der Komponente A impliziert Verlängerung der Nutzungsdauer bei Komponente B um 15%.

Als Versuchsanordnung könnte in einfacher Form ein Getriebe oder eine kleinere Produktionsanlage verwendet werden. Zunächst werden die Verfügbarkeitsdaten bei herkömmlicher Instandhaltung evaluiert. Danach sollten Daten Schritt für Schritt über den Zeitraum vernünftige Lastwechselanzahlen ermittelt werden, wobei jede Maßnahme für sich alleine getestet und danach kombiniert werden sollte:

- Höhere Frequenzen bei den Wartungsintervallen mit Auswirkung auf die Dauerverfügbarkeit
- Inspektionstätigkeiten erhöhen oder durch Permanentüberwachung mit Messtechnik realisieren
- Zeittechnische Variation von Komponentenaustausch, z.B. als ausfallfördernd klassifizierte Komponenten öfter tauschen als bisher

## 6 Zusammenfassung

Diese wissenschaftliche Arbeit erörtert die gängigen Strategien in der Instandhaltung von Produktionsanlagen. Die grundlegenden Strategien, welche sich in reaktiv, zustandsorientiert, zeitgesteuert und proaktiv unterteilen lassen, bilden die Basis für erweiterte Konzepte. Je nach Schwerpunkt der Strategie werden z.B. Risikoberechnungen, Mitarbeiter, eine Null-Fehler Philosophie oder eine rasche Einführung in das Unternehmen in den Mittelpunkt der Instandhaltung gerückt. Es wird in der Arbeit vertiefend auf die zugehörige Zuverlässigkeitstheorie eingegangen, zu der die Berechnung von Ausfalls- und Überlebenswahrscheinlichkeit ebenso wie die Bestimmung der Dauerverfügbarkeit und Verteilungsfunktionen einfacher und komplexer Systeme gehören.

Die risikobasierte Strategieauswahl, auf die in der Arbeit ein Schwerpunkt gelegt wird, dient dazu, aufgrund der Häufigkeit des Eintretens und der potentiellen Folgen ein Risiko für Versagen zu bestimmen. So können gezielt jene Bereiche einer Anlage mit erhöhtem Aufwand instandgehalten werden, die ein hohes Risiko aufweisen. Vorgestelltes Hilfsmittel zur Identifikation dieser Bereiche ist etwa die Fehlerbaumanalyse mitsamt der Boolschen Algebra zur Modellierung der Systeme, wobei sich Aussagen über den Beitrag von Systemkomponenten mit den Importanzkenngrößen machen lassen. Für komplizierte Modelle von Anlagen resp. Systemgruppen haben sich in diesem Zusammenhang Markoff Modelle bewährt. Die einzelnen Komponentenzustände wechseln zwischen einsatzfähig und nicht einsatzfähig, wobei die Reparaturfähigkeit einzelner Komponenten berücksichtigt werden kann. Andere Möglichkeiten zur Risikobeurteilung sind die Gefahrenanalyse und die Failure Mode and Effect Analysis (FMEA).

Ausführlich wird auch auf die zustandsorientierte Instandhaltung, häufig auch „condition monitoring“, eingegangen. Hierbei werden aus Produktionsdaten Rückschlüsse auf den Zustand der Anlage resp. einzelne Komponenten gezogen. Um die Produktionsdaten zu erhalten, kann im Wesentlichen auf die Messung von Schwingungen, thermische Messungen und Tribologie zurückgegriffen werden. Ergänzend kommen Ultraschalltechnik und die Inspektion durch Mitarbeiter hinzu. Die vorliegende Arbeit erörtert, wo diese Messungen sinnvoll eingesetzt werden können und wie dabei vorgegangen wird.

Diese aufgearbeitete wissenschaftliche Theorie, welche aus Literaturrecherchen stammt, dient in der Diplomarbeit als Voraussetzung, um sich mit der Frage zu beschäftigen, ob eine Instandhaltungsinvestition einen Wert generiert. Von Unternehmensseite wird die Instandhaltung häufig als Notwendigkeit zur Aufrechterhaltung der Produktionsbedingungen gesehen. Kann für eine Instandhaltungsinvestition mit dem Wert dieser argumentiert werden, lässt sich hingegen die Wichtigkeit dieser Tätigkeit hervorheben. Auch als Entscheidungshilfe zwischen potentiellen Instandhaltungsstrategien kann diese Wertdefinition dienen.

Bereits vorhandene Überlegungen zu diesem Thema werden in dieser Diplomarbeit hinterfragt um schließlich eine neue Beschreibung für den Wert zu finden. Bewertet werden dafür die Verbesserungen der Ausfallswahrscheinlichkeit mit den Kosten, die durch einen potentiellen Ausfall entstehen. Danach wird dieser Term in Relation zu jenen Kosten gesetzt, welche die gesetzte Maßnahme verursacht.

## 7 Verzeichnisse

### 7.1 Verwendete Literatur

Ahuja, P.S.; Khamba J.S.: An Evaluation of TPM Implementation Initiatives in an Indian Manufacturing Enterprise, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 13 No.4, 2007, S. 338 bis 352.

Ahuja, P.S.: Total Productive Maintenance, in: Ben-Daya M. et. al. (Hrsg): *Handbook of Maintenance Management and Engineering*, London, Springer, 2009, S. 417 bis 459

Al-Radhi, Mehdi: *Total Productive Management, Erfolgreich produzieren mit TPM*, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2002

Al-Turki, Umar: A framework for strategic planning in maintenance, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 17 No. 2, 2011, S. 150 bis 162

Avenhaus, Rudolf, *Zuverlässigkeitstheorie, Vorlesungsskript*, Universität der Bundeswehr München, 2003

Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert: *Zuverlässigkeit im Fahrzeug und Maschinenbau, Ermittlung von Bauteil und System-Zuverlässigkeit*, Berlin-Heidelberg-New York, Springer, 2004

Birolini, Alessandro: *Reliability Engineering, Theory and Practice*, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2010

Chambers, R.: *Streamlined Reliability Centered Maintenance at Reliant Energy – Technical Report*, EPRI, California, 2002

Clarke, Gerard; Mulryan, Gerry; Liggan, Pdraig: *Lean Maintenance – A Risk Based Approach*, in: *PHARMACEUTICAL ENGINEERING – the Official Magazine of ISPE*, Vol. 30 No.5, September/ October 2010

Cooper, Neil: *Go beyond Condition Monitoring, Beyond Condition Monitoring – prevent failures through condition management*, in: *Plant Service, Special Report*, k.A. zu Ausgabe und Jahr

Crespo Márquez, Adolfo (2010): *Vortrag zu: Top European Management Program*, Sevilla September 2010

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): *DIN 31051:2003-06. Grundlagen der Instandhaltung*, 2003

---

Dwight, Richard: Searching for real maintenance performance measures, Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 5 No. 3, 1999, S. 258 bis 275.

Goratec, Thermografie in der Instandhaltung, Werbefolder, 2011

Hartung, E., Dupuis H., Christ E.; Schwingungsmessung in: Institut für angewandte Arbeitswissenschaften e.V. (Hrsg.):Lärm und Vibration am Arbeitsplatz – Meßtechnisches Taschenbuch für den Betriebspraktiker, Wirtschaftsverlag Bachem, Köln, 1994

HSS Forum: Smart Solutions for Metal Cutting, First International HSS Forum Conference, 2005, Aachen

Kochs, Hans-Dieter: Zuverlässigkeit elektronischer Anlagen, Springer, Berlin – Heidelberg, 1984

Konnov, Alexei: Zuverlässigkeitsberechnung und vorbeugende Wartung von komplexen technischen Systemen mittels modifizierter Markov-Methode, Dissertation, Universität Karlsruhe, 2007

Matyas, Kurt: Ganzheitliche Optimierung durch Individuelle Instandhaltungsstrategien, in: Industrie Management, Ausgabe 18, 2002

Matyas, Kurt: Instandhaltungslogistik, Qualität und Produktivität steigern, 4. Überarbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag, München-Wien, 2010

Mayna, Arno: Zuverlässigkeitsbewertung zukunftsorientierter Technologien, Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1994

Merrick, Edwin A.; Leonard Ron C; Eckhardt, Phil; Baughman, Harry: Risk-based methods optimize maintenance work scope, in: Oil & Gas Journal, Apr. 1999, S. 47 bis 52

Mobley, R. Keith; AN INTRODUCTION TO PREDICTIVE MAINTENANCE, Second Edition, Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2002

Moubray, John: Reliability-centered Maintenance; 2<sup>nd</sup> Edition, Industrial Press Inc., New York, 1997

Nakajima, Seiichi: Introduction to TPM, Productivity Press Inc., Cambridge, MA, 1988

Nordgård, Erik; Solvang, Eivind; Solum Geir: DEVELOPING AND IMPLEMENTING A RISK BASED MAINTENANCE STRATEGY FOR DISTRIBUTION COMPANIES, 18<sup>th</sup> International Conference on Electrical Distribution, CIRED, Turin, 2005

Pansrisu, S., Premrudeepreechacharn, S.: Preventive Maintenance Optimization for Excitation System of Bhumibol Hydro Power Plant, PEA-AIT International Conference on Energy and Sustainable Development: Issues and Strategies, ESD 2010

---

Rausand, Marvin: Preliminary Hazard Analysis, Vorlesungsunterlagen, Norwegian University of Science and Technology, 2005

Ryll, Frank; Freud, Curt: Grundlagen der Instandhaltung, in: Schenk, Michael (Hrsg.): Instandhaltung technischer Systeme, Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2010, S. 23 bis 98

Salonen, Antti; Deleryd, Mats: A concept for maintenance performance improvement, Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 17 No1, 2011, Seite 63 - 73

Schiessle, E.: Sensortechnik und Meßwertaufnahme, Vogel Buchverlag, Würzburg, 1992.

Schubert, Paul F.; Gannon, Glen: Effektive risk evaluations prevent refinery shutdowns, Oil & Gas Journal; Oct. 2008; S.66 - 69

Siddiqui, A.W., Ben-Daya M.: Reliability Centered Maintenance, in: Ben-Daya M. et. al. (Hrsg): Handbook of Maintenance Management and Engineering, London, Springer, 2009, S. 397 bis 415

Silva, Carlos M.I.; Cabrita, Carlos M.P.; Oliveira Matias, Joao C.: Proactive reliability maintenance: a case study concerning maintenance service costs, Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 14 No. 4, 2008, S. 343 bis 355

SKF Reliability Systems: The Guide to Asset Efficiency Optimization for Improved Profitability, Dänemark, 2004

Staples, Dave T.: Making a Case for Operation Driven Reliability, Foundry Management & Technology, Ausgabe 11, United States, Nov. 2006 S. 39 bis 40

Storm, Regina: Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik und statistische Qualitätskontrolle, Carl Hanser Verlag, München, 2007

Timischl, Wolfgang: Qualitätssicherung – Statistische Methoden, 3. Überarbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2002

Verband der Automobilindustrie: VDA 4.2 Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz System FMEA, Frankfurt, VDA, 1996

VDI-Fachbereich Zuverlässigkeit, Strukturfunktion und ihre Anwendung, VDI-Richtlinie: VDI 4008 Blatt 7, 1986

Verein deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 4004, Kenngrößen der Instandhaltbarkeit, 1986

Verein deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 2888, Zustandsorientierte Instandhaltung, 1999

## 7.2 Tabellen

Tabelle 1: Formeln zur Exponentialverteilung .....	27
Tabelle 2: Formeln und Bezeichnungen der Weibullverteilung .....	28
Tabelle 3: Boolesche Operatoren und deren mathematische Zusammenhänge .....	38
Tabelle 4: Beispiel - Bruch eines Fahrradständers - Zuordnung der Variablen .....	42
Tabelle 5: Parameter der Systemkomponenten - Berechnung der Systemdauer-verfügbarkeit .....	59
Tabelle 6: Bewertungschema für die FMEA .....	61
Tabelle 7: Risikoklassifizierung .....	63
Tabelle 8: Wahrscheinlichkeitsklassifizierung .....	63
Tabelle 9: Risikomatrix .....	64
Tabelle 10: Kritische Bewertungsmatrix .....	66

## 7.3 Abbildungen

Abbildung 1: Zuordnung der Instandhaltungsstrategien .....	5
Abbildung 2: Anlagenstillstandzeit bei ungeplanten Maßnahmen .....	6
Abbildung 3: Regelgröße Abnutzungsvorrat bei der zustandsabhängigen Instandhaltung. ...	7
Abbildung 4: Zuordnung der erweiterten Instandhaltungsstrategien .....	10
Abbildung 5: Verteilung der Instandhaltung .....	17
Abbildung 6: Berechnung der OEE, basierend auf den sechs großen Verlusten der Anlageneffizienz (ohne Anfahrverluste) .....	20
Abbildung 7: Verlauf der Ausfallsrate $\lambda(t)$ (idealisiert) .....	22
Abbildung 8: Zustandsänderung von einfachen Systemen ohne Instandsetzung. ....	24
Abbildung 9: Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ . ....	25
Abbildung 10: Komponenten in Serienschaltung .....	25
Abbildung 11: Komponenten in Parallelschaltung .....	26
Abbildung 12: Dichtefunktion der Weibullverteilung, 2-parametrig .....	29
Abbildung 13: Verteilungsfunktion der Weibullverteilung, 2-parametrig .....	29
Abbildung 14: Histogramm-Darstellung der relativen Häufigkeitsverteilung und Dichtefunktion der Ausfallsverteilung $f(t)$ .....	31
Abbildung 15: Beispiel eines Weibullnetzes .....	33
Abbildung 16: Ablauf einer Risikoanalyse, nach Meyna erweitert .....	34
Abbildung 17: Risikoreihungsprozess, (COF=consequence of failure, LOF= likelihood of failure) .....	36
Abbildung 18: FTA für den Bruch eines Fahrradständers .....	39
Abbildung 19: Beispiel - Bruch eines Fahrradständers in Bool'scher Symbolik .....	41
Abbildung 20: Blockschalbild einer Brückenschaltung .....	43

---

Abbildung 21: Brückenkonfiguration.....	50
Abbildung 22: Brückenkonfiguration - Lösung mittels Cut Sets .....	51
Abbildung 23: Brückenkonfiguration - Lösung mittels Path Sets.....	52
Abbildung 24: Brückenkonfiguration - Lösung mittels Separation .....	52
Abbildung 25: Markov-Graph für ein Einzelement .....	55
Abbildung 26: Markoff Graph für 2 Komponenten .....	57
Abbildung 27: Entscheidungsbaum Instandhaltungsstrategie.....	67
Abbildung 28: Messkette.....	69
Abbildung 29: harmonische Schwingung und ihre Kenngrößen .....	72
Abbildung 30: Blockschaltbild eines mehrkanaligen Messaufbaus zur Schwingungsmessung und Analyse unter Verwendung eines Computersystems PC.....	75
Abbildung 31: Piezoelektrischer Aufnehmer.....	77
Abbildung 32: Energie Emissionen. A = absorbierte Energie, R = reflektierte Energie, T = übertragene (transmitted) Energie, E=emittierte Energie.....	80
Abbildung 33: Das elektromagnetische Spektrum .....	81
Abbildung 34: Schwarzkörper Emissionen .....	82
Abbildung 35: Graukörper Emissionen.....	82
Abbildung 36: Thermographische Aufnahme .....	83
Abbildung 37: Thermographische Aufnahme .....	84
Abbildung 38: Verschleißarten .....	87
Abbildung 39: Planung der Instandhaltung als Teil der Planung im Unternehmen.....	95
Abbildung 40: Einteilung der konformen und nicht konformen Kosten für präventive und korrektive Instandhaltung .....	96

