UNI STUTTGART

Berichte aus dem
Institut für Maschinenelemente
Antriebstechnik • CAD • Dichtungen • Zuverlässigkeit

Jochen Gäng

Berücksichtigung von Wechselwirkungen bei Zuverlässigkeitsanalysen

Bericht Nr. 136

D 93
ISBN 978-3-936100-37-2

Institut für Maschinenelemente
Antriebstechnik • CAD • Dichtungen • Zuverlässigkeit

Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
Tel. (0711) 685 – 66170

Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche, Ordinarius und Direktor

Berücksichtigung von Wechselwirkungen bei Zuverlässigkeitsanalysen

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Jochen Gäng

geboren in Heilbronn

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Peter Göhner

Tag der Einreichung:	20.07.2011
Tag der mündlichen Prüfung:	30.11.2011

Institut für Maschinenelemente

2012

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche, Leiter des Instituts für Maschinenelemente, für die Ermöglichung und die ständige Unterstützung der Arbeit sowie für das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Peter Göhner, Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik (IAS), danke ich für die Übernahme des Mitberichts, die kritische Durchsicht und die konstruktiven Hinweise.

Mein herzlicher Dank gilt allen Mitarbeitern des Instituts für die Hilfsbereitschaft und das tolle Arbeitsklima. Insbesondere danke ich den Mitarbeitern des „Zuv-Teams“, die stets ein offenes Ohr hatten und einen immer unterstützt haben. Herauszuheben sind hier vor allem Daniel Hofmann und Michael Kopp, mit denen ich zudem auch eine tolle Zeit in unserem gemeinsamen Büro 2.139 verbracht habe.

Zuletzt bedanke ich mich auch bei den Mitarbeitern der DFG Forschergruppe 460 für die fachbereichsübergreifende Projektarbeit, die den Anstoß dieser Arbeit gegeben hat.

Karlsruhe, im Januar 2012 Jochen Gäng

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1
1.1 Problemstellung 2
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit 2

2 Stand der Technik 5
2.1 Definitionen 5
2.2 Überblick über bestehende Entwicklungsmethoden 9
2.2.1 VDI 2221 10
2.2.2 VDI 2206 12
2.3 Zuverlässigkeitsanalysen 14
2.3.1 FMEA - Failure Mode and Effects Analysis 15
2.3.2 Boole´sche Theorie 20
2.3.3 Fault Tree Analysis - FTA 21
2.3.4 Quantitative Zuverlässigkeitsanalysen 23
2.4 Zuverlässigkeitsbewertung in frühen Entwicklungsphasen 25

3 Wechselwirkungen und deren Zuverlässigkeit 28
3.1 Grundüberlegungen zu Wechselwirkungen 28
3.2 Einflüsse auf die Komponenten 29
3.2.1 Umgebung 30
3.2.2 Umgebungseinflüsse 30
3.2.3 Störgrößen 31
3.2.4 Einbauort 32
3.3 Recherche nach verschiedenen Einflüssen 32
3.4 Anforderungen an die zu erstellende Methode 37

4 Analyse der Notationsmöglichkeiten von Wechselwirkungen komplexer Systeme 39
4.1 Schichtenmodell 39
4.2 Darstellung von Wechselwirkungen durch eine Matrix 42
4.2.1 Konsistenzanalyse 43
4.2.2 Einflussanalyse 44
4.2.3 Design Structure Matrix (DSM) 47
4.2.4 Cross Impact Analyse (CIA) 50
4.2.5 Papiercomputer nach Vester 52
4.3 Unified Modeling Language (UML) 52
4.3.1 Klassendiagramm 54

4.3.2 Zustandsdiagramm 55
4.3.3 Komponentendiagramm 56
4.3.4 Systems Modeling Language (SysML) 57
4.4 Semantische Netze 57
4.4.1 Bayes´sches Netz 58
4.4.2 Petri Netze 59
4.5 Netzplantechnik 61
4.6 Mathematische Betrachtung 62
4.7 Zusammenfassung und Fazit 63

5 Berücksichtigung von Wechselwirkungen in bestehenden Zuverlässigkeitsanalysen 65
5.1 Qualitätsmanagement bei Ford 65
5.2 Quality Function Deployment (QFD) 69
5.3 Herausforderung Toleranzkettendesign für robuste mechatronische Fahrzeugfunktionen 70
5.4 Qualitative Bewertung von Umgebungseinflüssen und Komponentenwechselwirkungen 71
5.5 Zusammenfassung und Fazit 72

6 Methode zur Zuverlässigkeitsbewertung von Wechselwirkungen 73
6.1 Konzeption einer Methode 73
6.2 Darstellung und Ermittlung von kritischen Komponenten bzw. Komponentenpaarungen 84
6.3 Ablauf der Zuverlässigkeitsmethode zur frühzeitigen Bewertung von Wechselwirkungen 86

7 Software-Tool 87
7.1 Anforderungen an das SW-Tool 87
7.2 Programmiersprachen und Softwareplattform 88
7.3 Aufbau und Funktionsweise des SW-Tools 91
7.4 Bedienung und Vorgehensweise 92

8 Anwendungsbeispiel 95
8.1 Elektrischer Garagentoröffner 95
8.2 Bestimmung und Bewertung der Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen eines elektrischen Garagentoröffners 96

9 Zusammenfassung 105

10 Literatur 106

Abstract

Today's products are getting more and more complex. The reason for this assumption is obvious: on the one hand, the customers expect from new developments many innovative functions. On the other hand, they expect high class and reliable products. These facts lead to a conflict of interests, if one wants to devise a new product. Simple products, which cannot meet the functional requirements of the customers, can be checked and tested quite easily, the interactions between the components of the system are controllable and often insignificant. Thus the reliability can be determined almost exactly and a high reliability can be achieved. Looking at a complex system, the situation changes. By means of a huge amount of components in a system, the interactions increase extremely. The identification of all those interactions is not easy, especially if one handles with mechatronic systems. To reach the high reliability, which is a customer demand, it is necessary to identify and comprehend all the interactions.

The aim of this thesis is the development of a method which is able to detect the interactions of a system and which allows a reliability estimation of the determined interactions in early phases of development. Additionally, the developer of the new product should get information about critical interactions. In a first step, possibilities to notate interactions and existing reliability analysis for interactions are considered in terms of the practicability as well as the advantages and disadvantages. It is getting obvious that either a direct link between the reliability and the interactions does not exist or the reliability determination and estimation in early phases of development is not possible. Thus a new method to estimate the reliability of interactions is developed in the present thesis. This method allows to calculate a so-called interaction factor if the unacceptable situation and failure modes of the interactions are known. Additionally, the developer receives information about different priorities of component pairings. A further aspect of the thesis is the integration of the method into existing development methods. To simplify the application of the method a software tool is used, which supports every step of the method. Last a case study is introduced which shows that the method to determine and estimate the reliability of interactions is on the one hand applicable. On the other hand it shows that the developer of the new system gets a lot of information which helps to optimize the system in reliability.

1 Einleitung

Die Entwicklung moderner Produkte ist heute unter anderem mit steigenden Funktionsanforderungen und mit verringerten Produkt- und Entwicklungskosten konfrontiert [6]. Diese und weitere wichtige Randbedingungen auf die Produktzuverlässigkeit zeigt Bild 1.1.

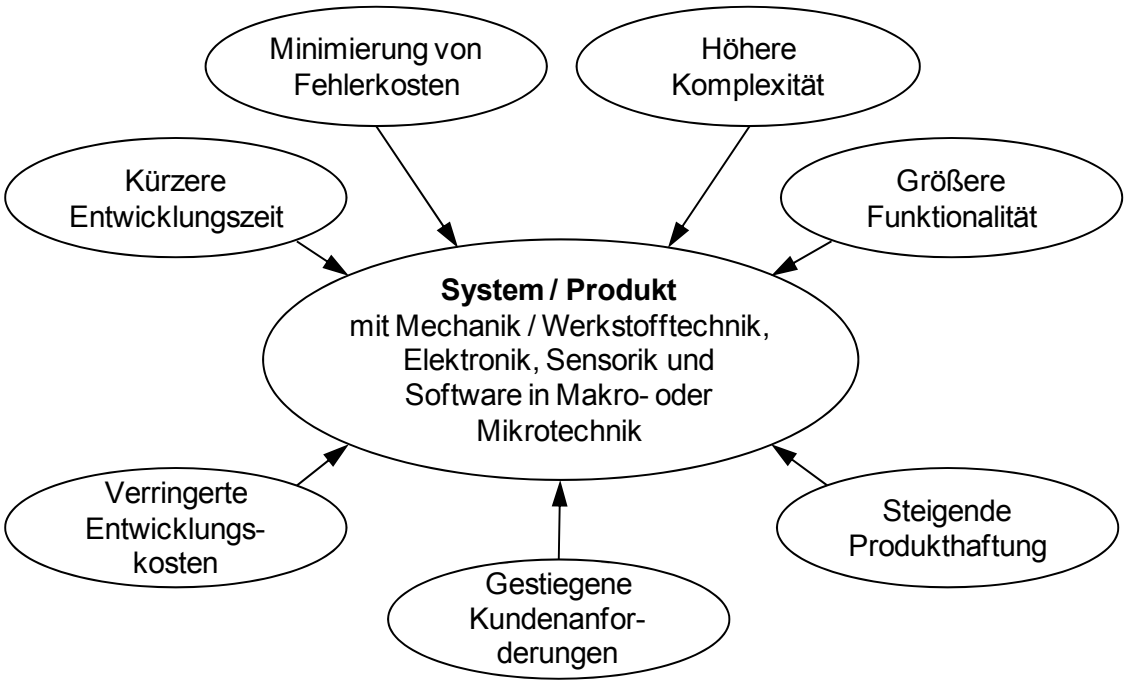


Bild 1.1: Allgemeine Einflüsse auf die Zuverlässigkeit [6]

All diese Randbedingungen erschweren es aber, einen der wichtigsten Aspekte für den Kunden – die Zuverlässigkeit – zu erhalten oder im besten Falle zu steigern [6]. Gerade beim Neukauf eines Automobils steht laut [52] die Zuverlässigkeit in der Kriterien-Liste des Kunden zumeist an erster Stelle. Demgegenüber stehen aber, wenn wieder die Automobilbranche herangezogen wird, immer mehr Rückrufaktionen. Um die Gunst des Käufers weiterhin zu sichern, sollten die Unternehmen dem Bereich Zuverlässigkeit verstärkt nachgehen. Vor allem bieten sich hier die frühen Entwicklungsphasen an, da hier der größte Einfluss auf die Kosten und die Zuverlässigkeit besteht. Dies repräsentiert die sogenannte „Rule of ten“ [108].

Wird den Ursachen der sinkenden Zuverlässigkeit bei den heutigen komplexen Systemen nachgegangen, wird häufig die Vernetzung der verschiedenen Teilbereiche genannt [27]. Sie birgt eine der größten Herausforderungen in Bezug auf die Zuverlässigkeit. Immer häufiger sind es nicht die Einzelkomponenten, welche unzuverlässiger werden, sondern durch die Vielzahl von Schnittstellen treten Wechselwirkungen zwischen den Komponenten sowie (Teil-)Systemen auf, die in der Entwicklung nicht berücksichtigt wurden.

1.1 Problemstellung

Laut [27] stieg die Schnittstellenanzahl bei Systemen in den letzten Jahren durch die Zunahme technischer Errungenschaften um ein Vielfaches. Eine Zunahme der Schnittstellen bedingt eine Vermehrung möglicher Fehlerquellen und die Gefahr des Auftretens von bisher noch nicht bekannten Fehlermöglichkeiten [27], was im Endeffekt zu einer Reduktion der Zuverlässigkeit führt. Falls die Schnittstelleninformationen nicht rechtzeitig in der Entwicklung berücksichtigt werden, kann dies spätestens im Feld zu unangenehmen Überraschungen führen [27].

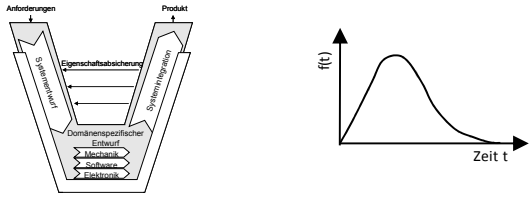
Betrachtet man die Systemzuverlässigkeit, so wird festgestellt, dass die Zuverlässigkeit auf Bauteilebene gut analysiert werden kann. Während der Entwicklung kann die Zuverlässigkeit dann entweder qualitativ oder bestenfalls quantitativ ausgewertet werden [97]. Dies liegt daran, dass zumindest bei mechanischen Bauteilen die Zuverlässigkeit häufig durch Verschleiß oder andere bekannte Randbedingungen beeinflusst wird. Diese sind in der Praxis weitergehend bekannt und können hinreichend genau mathematisch beschrieben werden, so dass die Zuverlässigkeit der einzelnen Komponenten gut abgeschätzt werden kann. Werden die einzelnen Komponenten zu einem Gesamtsystem zusammengebaut, ist es schwierig eine Zuverlässigkeit des Gesamtsystems unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen vorherzusagen, vor allem, wenn eine frühzeitige Prognose gewünscht ist. Ein Grund hierfür ist, dass die Wechselwirkungen in frühen Entwicklungsphasen häufig nicht bekannt sind. Die zunehmende Komplexitätssteigerung heutiger moderner Produkte vereinfacht diese Situation nicht. Aus Sicht jeden Entwicklers sollte es jedoch unerlässlich sein, dass die Wechselwirkungen und deren Zuverlässigkeiten untersucht werden. Nur dadurch wird sichergestellt, dass das zu entwickelnde Produkt eine hohe Zuverlässigkeit vorweisen wird. Eine Herausforderung hierbei kann die Datenlage sein, da zum einen die Wechselwirkungen teilweise gar nicht bekannt sind. Zum anderen müssen die Informationen welche über die Wechselwirkungen vorhanden sind, gebündelt und für eine Zuverlässigkeitsanalyse verwendbar gemacht werden. Eine weitere Herausforderung sind auch die fehlenden Methoden zur allumfassenden Bestimmung und Bewertung der Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

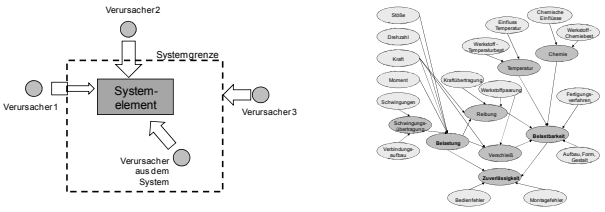
Das Ziel der Arbeit ist es, eine Methode zu entwickeln, welche die Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen komplexer Systeme bewerten kann. Somit sollen die Zuverlässigkeitsaussagen von Systemen nicht nur auf einzelne Komponenten reduziert sein, sondern es soll ein erster Ansatz gezeigt werden, wie die Zuverlässigkeit durch die Einbeziehung von Wechselwirkungen ganzheitlich bewertet werden kann. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei in der frühen Phase der Entwicklung. Unter anderem soll in dieser Methode dem Entwickler ein Hilfsmittel zur Verfügung gestellt werden, welches ihm erlaubt sowohl einfach und schnell die Zuverlässigkeit der Wechselwirkungen zu erfassen als auch die Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems zu erhalten, um so mögliche Fehler in der Konstruktion frühzeitig zu verhindern.

Bild 1.2 repräsentiert den Aufbau der Arbeit. Sie gliedert sich wie folgt:

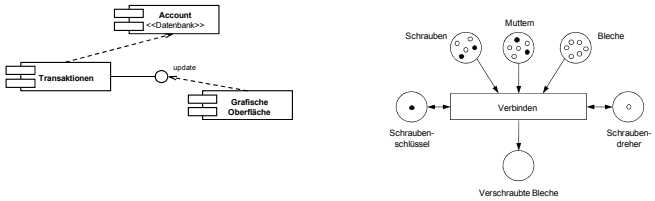
Kapitel 2
Stand der Technik



Kapitel 3
Wechselwirkungen und deren Zuverlässigkeit



Kapitel 4
Analyse der Notationsmöglichkeiten von Wechselwirkungen komplexer Systeme



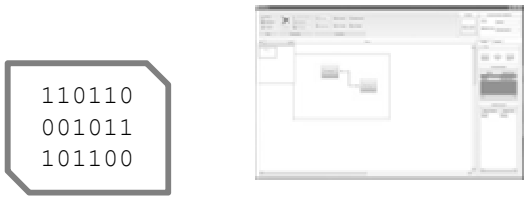
Kapitel 5
Berücksichtigung von Wechselwirkungen in bestehenden Zuverlässigkeitsanalysen

Navigation mit PDA im Fahrzeug	Komponenten-Nummer	(1) GPS-Antenne	(2) PDA-Gehäuse	(3) Zeigestift	(4) Bildschirm	(5) Lautsprecher	(6) Speicherkarte	(7) PKW-Fahrer(in)	(8) Autohalterung	(9) Saugnapf	(10) Windschutzscheibe	Zugehörige Wechselwirkungen	Zugehörige Komponenten-Nummern
(1) GPS-Antenne	0											15	7
(2) PDA-Gehäuse	1	2 2	2 0										
(3) Zeigestift	3	0 0	0 0	0 2									
(4) Bildschirm	5	0 0	0 0	0 2	2 0								
(5) Lautsprecher	10	0 0	0 0	2 0	0 0	0 0							
(6) Speicherkarte	15	0 0	0 0	2 2	0 0	0 0	-2 0						
(7) PKW-Fahrer(in)	21	-2 2	0 0	2 2	-2 -1	2 2	2 0	2 0				13	11
(8) Autohalterung	28	-1 0	2 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	2 0			17	5
(9) Saugnapf	36	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	2 0	2 2			
(10) Windschutzscheibe	45	-2 2	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	45	23

Kapitel 6
Methode zur Zuverlässigkeits-bewertung von Wechselwirkungen

Allgemein					Zuverlässigkeit							Konstruktion/ Fertigung/ Montage						
Beteiligte Komponente (1. Startpunkt)	Beteiligte Komponente (2. Endpunkt)	Art der Wechselwirkung: Info-fluss	Stoff-fluss	Ener-giefluss	Einfluss auf die Zuver-lässigkeit	Unzulässiger Zustand von Kompo-nente 1	Fehlerfolgen für Komponente 2	Bedeutung für die Systemzu-verlässigkeit	Auftretens-wahr-scheinlichkeit Fehlfunktion 1 Komponente 1	Auftretens-wahr-scheinlichkeit Fehlerfolge Komponente 2	Vorbedin-gungen	Wechsel-wir-kungs-faktor	Unterschiedliche Temperatur-koeffizienten wichtig?	Klemm Korrosion auftreten?	Passungen wichtig?	Toleranzen wichtig?	Oberflächen-rauhigkeiten wichtig?	Können Vibrationen auftreten?	Klemm Korrosion auftreten?
Welle	Aktor			X	negativ	• Bruch • Blockieren • Vibration	• Verzug • Keine direkte Auslenkung • Bruch	hoch (5) hoch (5) gering (3)	gering (2) sehr gering (2) mäßig (4)	sehr gering (2) unwahrschein-lich (1) gering (3)	Auslegung	30 10 36	Mittel	Mittel	Ja	Ja	Mittel	Ja	Mittel
Aktor	Welle			X	negativ	• Blockieren • Verschleiß	• Bruch • Falsche Funktionalität	hoch (5) gering (3)	sehr gering (2) gering (3)	sehr gering (2) sehr gering (2)	Werkstoff-paarung	20 18	Mittel	Mittel	Nein	Mittel	Mittel	Nein	Mittel
Umwelt	Welle			X	negativ	• Temperatur • Elektro-magnetische Strahlung	• Knacken • Keine direkte Auslenkung	sehr gering (2) unwahrschein-lich (1)	gering (3) unwahrschein-lich (1)	sehr gering (2) unwahrschein-lich (1)		12 1	Mittel	Nein	Ja	Ja	Nein	Mittel	Nein
...	...																	

Kapitel 7
Software-Tool



Kapitel 8
Anwendungsbeispiel

Bild 1.2: Aufbau der Arbeit

Im Kapitel **Stand der Technik** werden zu Beginn grundlegende Begriffe und Definitionen vorgestellt. Anschließend wird über bestehende Zuverlässigkeitsanalysen, welche derzeit im Einsatz sind sowie über aktuelle Entwicklungsmethoden für verschiedene Ingenieurbereiche diskutiert.

Im Kapitel **Wechselwirkungen und deren Zuverlässigkeit** werden zuerst Grundüberlegungen bezüglich Wechselwirkungen in der vorliegenden Arbeit erörtert. Anschließend werden Einflüsse auf die Zuverlässigkeit sowie die Anforderungen an die zu erstellende Methode zur Zuverlässigkeitsbewertung von Wechselwirkungen vorgestellt.

Das Kapitel **Analyse der Notationsmöglichkeiten von Wechselwirkungen komplexer Systeme** befasst sich mit den verschiedenen Möglichkeiten zur Beschreibung und Notation von Wechselwirkungen. Dabei werden qualitative Beschreibungen von Wechselwirkungen aus der Szenario-Technik, Notationen, welche in der Softwaretechnik eingesetzt werden als auch rein mathematische Definitionen erläutert.

Im Kapitel **Berücksichtigung von Wechselwirkungen in bestehenden Zuverlässigkeitsanalysen** werden bereits bestehende Ansätze zur Analyse der Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen aufgezeigt, welche sich in ihren Ideen zur Bestimmung und Bewertung der Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen grundlegend unterscheiden.

Das Kapitel **Methode zur Zuverlässigkeitsbewertung von Wechselwirkungen** befasst sich mit den Nachteilen und Schwachstellen der bisher vorgestellten Ansätze. Schwerpunkt bildet die Vorstellung einer Methode zur Zuverlässigkeitsbewertung von Wechselwirkungen.

Das Kapitel **Software-Tool** befasst sich mit den Vorteilen einer Rechnerunterstützung. Es wird ein Software-Tool vorgestellt, mit dessen Hilfe es möglich ist, die aufgestellte Methode zur Zuverlässigkeitsbewertung von Wechselwirkungen einfach und schnell anzuwenden.

Im letzten Kapitel **Anwendungsbeispiel** wird anhand eines elektrischen Garagentoröffners die zuvor beschriebene Methode zur Zuverlässigkeitsbewertung von Wechselwirkung anschaulich erläutert.

2 Stand der Technik

Viele der bisher verwendeten Begriffe sind zwar im allgemeinen Sprachgebrauch geläufig, jedoch kann es durch unterschiedliche Deutungen zu Missverständnissen kommen. Deshalb wird zu Beginn auf verschiedene Definitionen eingegangen. Ein Hauptaugenmerk im Gebiet der Zuverlässigkeit liegt heutzutage – neben den klassischen Themen wie Fehleranalysen oder Zuverlässigkeitsauswertungen – in der Anwendbarkeit von Zuverlässigkeitsanalysen in frühen Phasen der Entwicklung. Durch diese frühzeitige Betrachtung werden konstruktive Iterationsschleifen vermieden und dadurch Kosten gespart. Sinnvoll ist es ebenso, eine Zuverlässigkeitsanalyse an eine bereits bestehende Entwicklungsmethode anzudocken oder bestenfalls in diese zu integrieren. Aus diesem Grund werden gegenwärtige Entwicklungsmethoden vorgestellt. Anschließend wird ein Überblick über derzeitige Zuverlässigkeitsanalyse gegeben. Hier werden vor allem Methoden vorgestellt, welche in der Industrie eingesetzt werden. Da diese selten entwicklungsbegleitend verwendet werden, wird zusätzlich eine Methode zur Zuverlässigkeitsbewertung von mechatronischen Systemen in frühen Entwicklungsphasen näher erläutert.

2.1 Definitionen

Im Folgenden werden die wichtigen Begriffe Wechselwirkung und Schnittstelle festgelegt und zur besseren Abgrenzung auf die Definitionen von Komponente, Element, Bauteil, System, Zuverlässigkeit sowie Mechatronik eingegangen.

Wechselwirkung

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird der Begriff „Wechselwirkung“ vor allem mit der Medizin bzw. der Pharmazie in Verbindung gebracht. Durch die Kombination von mehreren Arzneimitteln können Wechselwirkungen entstehen und gegebenenfalls den Gesundheitszustand der Person stark beeinflussen. Die Hinweise zu den Wechselwirkungen sind in den Beipackzetteln der Medikamente zu finden. Da aber in dieser Arbeit unter Wechselwirkungen nicht die gegenseitige Beeinflussung von Arzneimitteln gemeint ist, werden im Folgenden weitere in der Literatur auffindbare Definitionen von Wechselwirkungen aufgelistet.

- In der statistischen Versuchsplanung bedeutet das Vorliegen einer Wechselwirkung (engl. interaction), dass die Wirkung eines Faktors im Versuch davon abhängt, auf welcher Stufe einer der anderen Faktoren steht [91].
- Interaktion setzt sich aus „Inter“ (drückt etwas aus das sich „verbindet“) und „Aktion“ (Synonym für Handlung, Tat, Ereignis) zusammen. Es ist also eine gegenseitige Beeinflussung von Handlungen zwischen verschiedenen Handelnden [59].
- Intramolekulare oder intermolekulare Anziehung oder Abstoßung von verschiedenen oder gleichartigen Teilchen [53].
- In den Naturwissenschaften sind Wechselwirkungen auch als die Grundkräfte der Physik bekannt. Darunter verbergen sich die starke, schwache und elektromagnetische Wechselwirkung sowie die Gravitation [113].

Da sich diese Definitionen voneinander unterscheiden und für die Arbeit nicht geeignet sind, wird für den Begriff „Wechselwirkung“ die folgende Definition eingeführt:

„Unter einer Wechselwirkung wird eine gegenseitige Beeinflussung von zwei oder mehreren Komponenten verstanden. Diese Beeinflussung kann entweder positiv, neutral oder negativ sein.“

Schnittstelle

Neben den Wechselwirkungen muss auch noch der Begriff „Schnittstelle“ geklärt werden. Je nachdem welche Fachrichtung betrachtet wird, existieren auch hier wieder unterschiedliche Definitionen. Um einen ersten Eindruck einer „Schnittstelle“ zu erlangen, wird auf eine abstrakte Betrachtungsweise in der Architektur hingewiesen. Hier wird zwischen makro- und mikroskopischen Schnittstellen unterschieden [124].

Eine makroskopische Betrachtungsweise einer Schnittstelle täuscht dem Betrachter vor, dass zwischen den beiden Einheiten ein nahtloser Übergang existiert. Scheinbar handelt es sich um eine einzige Einheit (Bild 2.1).

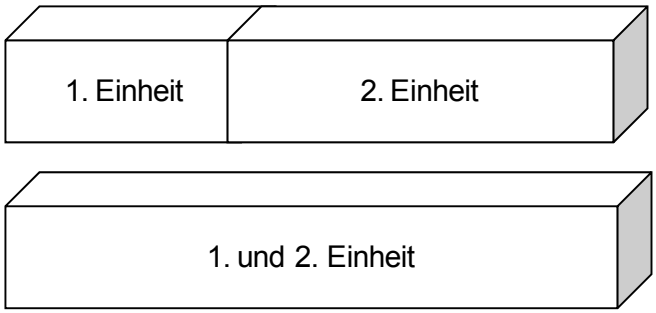


Bild 2.1: Makroskopische Betrachtung einer Schnittstelle [124]

Dahingegen wird bei einer mikroskopischen Betrachtung schnell deutlich, dass es bei dem vorher genannten Übergang an den Grenzen der Einheiten zu einer Unterbrechung kommen kann. Das heißt, dass bei dieser Betrachtungsweise nicht mehr nur eine „gemeinsame“ Einheit vorhanden ist, sondern es existieren zwei Einheiten (Bild 2.2).

Des Weiteren kann bei Schnittstellen zwischen internen und externen unterschieden werden. Interne Schnittstellen sind beispielsweise Berührungspunkte zwischen den Teilaufgaben eines Projekts oder innerhalb eines technischen Systems. Externe Schnittstellen hingegen betreffen die Berührungspunkte zum Projektumfeld oder, bei Betrachtung eines technischen Systems, die Berührungspunkte eines Systems mit seiner Umgebung [124].

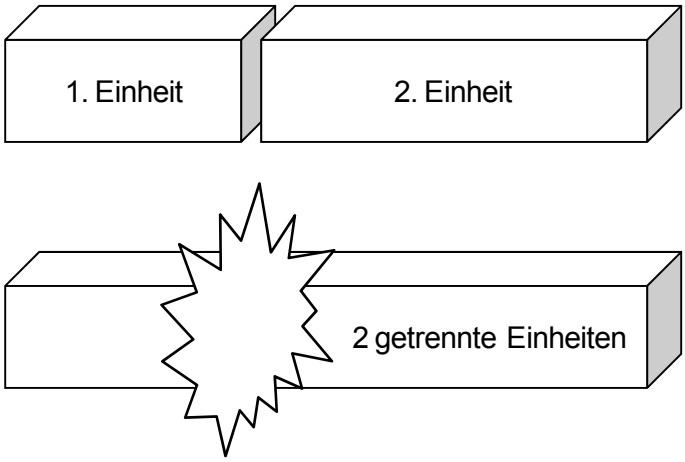


Bild 2.2: Mikroskopische Betrachtung einer Schnittstelle [124]

Generell kann die Schnittstelle wie folgt definiert werden:

- In der objektorientierten Programmierung (OOP) vereinbaren Schnittstellen (engl. Interface) gemeinsame Signaturen von Methoden, welche in unterschiedlichen Klassen implementiert werden. Die Schnittstelle gibt dabei an, welche Methoden vorhanden sind oder vorhanden sein müssen [44].
- Die Schnittstelle oder das Interface ist der Teil eines Systems, der der Kommunikation dient [46].
- Bei der Schnittstelle handelt es sich um eine definierte Übergabestelle innerhalb eines Systems. Bei den Busleitungen in der Elektrotechnik sind folgende Schnittstellen definiert [55]:
  - Datenschnittstelle: zwischen Bus und externen Geräten
  - Anwendungsschnittstelle: zwischen Busankoppler und Anwendungsmodul
- Eine Schnittstelle ist ein Gerät, Anschluss oder Programm, das/der zwischen verschiedenen Funktionsgruppen vermittelt oder verbindet [51].
- Eine Schnittstelle ist ein elektrischer Übergabepunkt zur Anpassung von Audio-, Video-, oder Steuerdaten zwischen zwei Geräten [63].
- Allgemein wird unter einer Schnittstelle die Verbindungsstelle zwischen zwei miteinander in Beziehung stehenden Systemen verstanden [47].
- Eine Schnittstelle ist eine gemeinsame Grenze zwischen zwei Einheiten (Prozesse, Funktionen), die einen Austausch zwischen diesen ermöglicht [132].

Zwar sind die obigen Definitionen des Begriffs Schnittstelle recht ähnlich, jedoch ist eine geeignete Definition für die vorliegende Arbeit nicht zu finden. Deshalb wird die folgende Definition für Schnittstellen festgelegt:

„Eine Schnittstelle symbolisiert eine gemeinsame Grenze zwischen zwei oder mehreren Einheiten. Sie stellt eine Trennstelle mit einer definierten Übergabestelle dar.“

Komponente

Der Begriff Komponente stammt vom lateinischen „compendum“, was „das Zusammensetzende“ bedeutet. Je nachdem welcher Fachbereich betrachtet wird, ist eine

Komponente teilweise unterschiedlich definiert. Beispielsweise ist in der Softwarearchitektur eine Komponente ein Teil der Software, in der HiFi-Technik wird ein Receiver, Lautsprecher oder ein CD-Spieler als Komponente bezeichnet. In [89] wird Komponente wie folgt definiert: Eine Komponente ist ein Bestandteil eines Ganzen, die oft von gleicher Art wie dieses Ganze ist, aus denen es sich zusammensetzt oder in die es zerlegbar ist.

Element

Element leitet sich aus dem lateinischen Begriff „elementum“ ab. Übersetzt wird es als Grundstoff. In der Chemie wird ein Element als ein Stoff bezeichnet, welcher nicht weiter zerlegt werden kann. Ein Element in der Mathematik ist ein Teil einer Menge, beispielsweise die Zahl 35 als Element der Menge der natürlichen Zahlen.

Bauteil

Ein Bauteil bezeichnet im technischen Sinn ein Einzelteil. Dadurch ist es mit einem (Bau-)Element gleichbedeutend, so dass die Definition eines Elements verwendet werden kann.

System

Der Begriff System stammt vom griechischem „sistima“ ab, was „Gebilde“, „Zusammengestellte“ oder „Verbunde“ heißt. Eine andere Definition eines Systems ist die folgende: Ein System ist eine Gesamtheit von Elementen, die so aufeinander bezogen sind und in einer Weise wechselwirken, dass sie als eine aufgaben-, sinn- oder zweckgebundene Einheit angesehen werden können und sich in dieser Hinsicht gegenüber der sie umgebenden Umwelt abgrenzen. So ist z. B. das einzelne Individuum ein System, die Familie, unsere Kultur oder die Menschheit. Systeme organisieren und erhalten sich durch Strukturen [58]. Auf eine ähnliche Weise charakterisiert [12] den Begriff System: Ein System symbolisiert ein konkretes oder ideelles Ganzes, dessen Teile strukturell oder funktional miteinander in Beziehung stehen.

Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Produkt während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt [6]. Somit hängt die Zuverlässigkeit direkt vom Ausfallverhalten des betrachteten technischen Systems ab.

Mechatronik

Der Begriff Mechatronik wurde bereits im Jahr 1969 durch einen japanischen Ingenieur geprägt [70]. Dabei stellt der Begriff Mechatronik ein Kunstwort aus Mechanik und Elektronik dar. Dies spiegelt den zu Beginn vorliegenden Stand wider: die mechanischen Komponenten wurden seit Anfang des 20. Jahrhundert – zuerst durch elektrische Antriebe, dann durch Regelungen und abschließend durch eine Automatisierung – ergänzt. Dementsprechend basierten bei der Einführung des Begriffes Mechatronik die Systeme vor allem auf der Mechanik.

Auf der Suche nach einer Definition für den Begriff Mechatronik wird schnell sichtbar, dass keine allgemein akzeptierte Definition vorhanden ist. Auffällig ist, dass zum einen die Begriffe Elektronik, Elektrotechnik und zum anderen die Begriffe Software, Informatik und Softwaretechnik gleichbedeutend verwendet werden. Eine mögliche Definition ist im Brockhaus [12] zu finden:

„Die Mechatronik ist ein interdisziplinäres Gebiet der Ingenieurwissenschaften, das auf Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik aufbaut. Im Vordergrund steht die Ergänzung und Erweiterung mechanischer Systeme durch Sensoren und Mikrorechner zur Realisierung teilintelligenter Produkte und Systeme.“

Werden die Aufgaben von mechatronischen Systemen angesprochen, ist vor allem folgende Umschreibung nach [64] sinnvoll. Hier haben mechatronische Systeme die Aufgabe, mit Sensorik, Prozessorik, Aktorik und Elementen der Mechanik, Elektronik und Informatik (sowie anderen funktionell erforderlichen Technologien) Energie, Stoff und/oder Information umzuwandeln, zu transportieren und/oder zu speichern.

Durch die in den letzten Jahren immer schneller fortschreitende Entwicklung der Informationstechnologie und der damit zunehmenden Erweiterungsmöglichkeiten steht die Mechatronik mittlerweile an der Stelle, dass die Mechatronik nicht nur als eine Erweiterung der Mechanik zu sehen ist, sondern als Dreiklang zwischen der Mechanik, der Elektronik und der Software. Diese genannten Begriffe für die Domänen der Mechatronik werden repräsentativ für die vorliegende Arbeit verwendet. In Bild 2.3 ist dies symbolisch dargestellt.

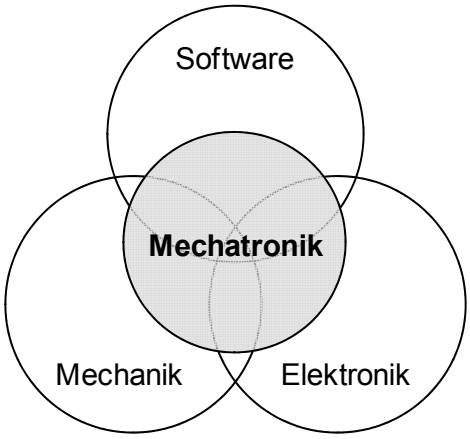


Bild 2.3: Zusammenspiel der verschiedenen Domänen der Mechatronik [5]

2.2 Überblick über bestehende Entwicklungsmethoden

Heutige zu entwickelnde Produkte sind häufig vom Aufbau und von der Konzeption sehr komplex. Um diese Komplexität besser beherrschbar zu machen, ist es bei der Entwicklung wichtig, dass die Ideen nicht zufällig entstehen, sondern nach einem vorgegebenen Muster gefunden werden. Hierzu bieten sich Entwicklungsmethoden

an, welche die Konzeption systematisch von der Analyse über erste Ideen bis hin zur fertigen Lösung angehen.

Entwicklungsmethoden speziell in der Mechanik haben nach [95] ihren Ursprung Anfang des 20. Jahrhunderts. Erkens hatte die ersten Gedanken über das schrittweise Vorgehen bei der Entwicklung eines neuen Produkts [95]. Nach und nach entstanden neue Vorgehensweisen, bei denen das Vorgehen immer systematischer wurde. Eine wichtige und bekannte Vorgehensweise ist die VDI 2221 [119]. Sie beschreibt eine Methode zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Zwar können durch den Begriff „technisches Produkt“ viele Domänen angesprochen werden, der Schwerpunkt liegt aber vor allem im Maschinenbau und der Feinwerktechnik. Wird eine Vorgehensweise gesucht, welche ein mechatronisches System beschreiben kann, ist die VDI 2206 [118] geeignet. Neben diesen beiden gibt es noch viele andere Vorgehensweisen. Nachstehend sind für die einzelnen Domänen Mechanik, Software und Elektronik Entwicklungsmethoden aufgelistet:

Mechanik:

- Münchner Vorgehensmodell [84]
- VDI 2222 [120]
- VDI 2223 [117]

Software:

- Wasserfallmodell [5]
- Spiralmodell [106]
- V-Modell XT

Elektronik:

- Plattformbasierter Entwurf [5]
- Core-basierte Entwurf
- Hierarchischer Entwurf

In den nächsten Abschnitten wird etwas näher auf die VDI 2221 und die VDI 2206 eingegangen.

2.2.1 VDI 2221

Die VDI 2221 [119] stammt vom deutschen Verband der Deutschen Ingenieure aus dem Jahre 1993. Dieses Dokument stimmt zum größten Teil mit den Vorschlägen von Pahl und Beitz [95] überein. Inhaltlich beschreibt es eine umfassende und systematische Methode zur Entwicklung technischer Produkte. Die Methode umfasst beim Produktkreislauf die Phasen Produktplanung sowie Entwicklung/Konstruktion. Insgesamt werden mehrere Schritte durchlaufen, bis ein Produkt entsteht (Bild 2.4).

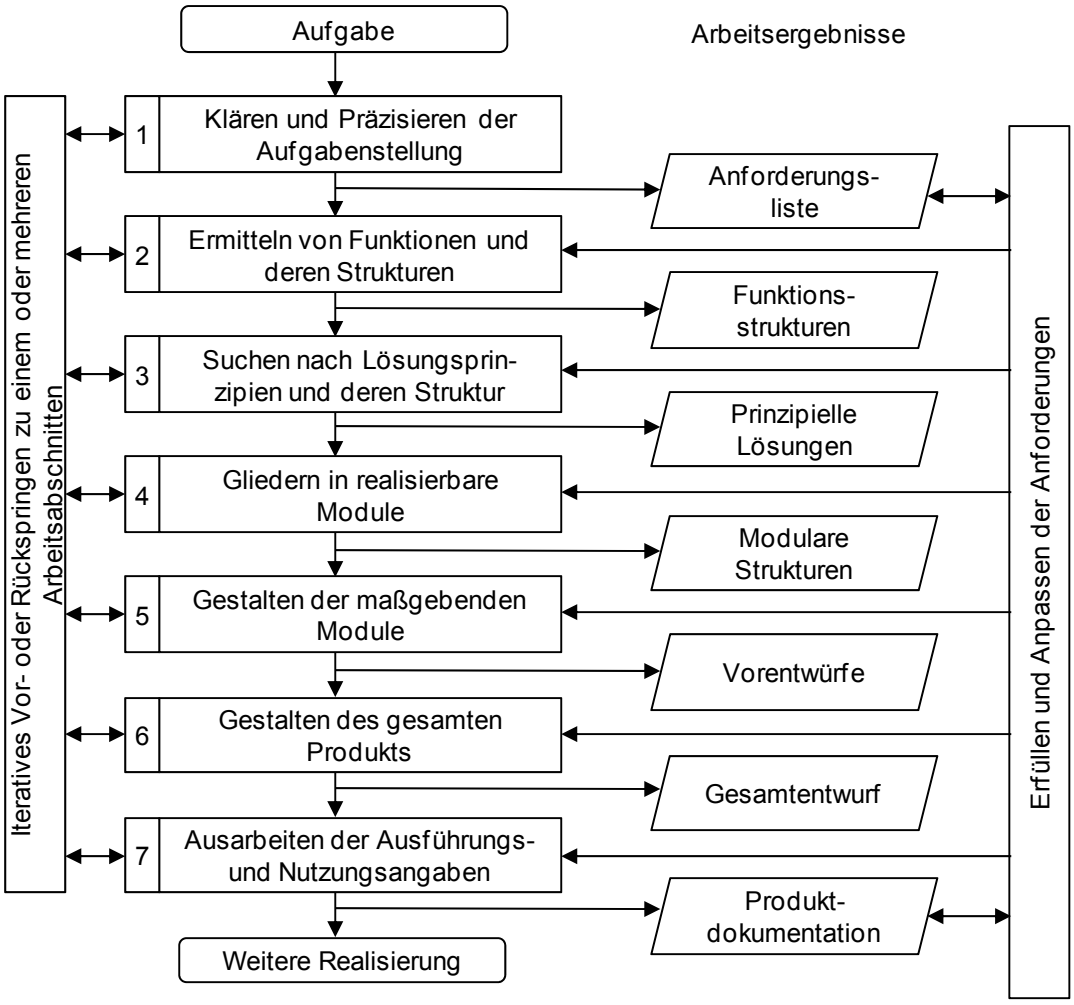


Bild 2.4: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren [119]

Tabelle 2.1 stellt das Vorgehen und das Ergebnis der einzelnen Schritte nochmals kompakt zusammengefasst dar.

Tabelle 2.1: Einzelne Schritte der VDI 2221 mitsamt Vorgehen und Ergebnis

	Vorgehen	Ergebnis
Schritt 1	Klären von und Präzisieren der Aufgabe, Zusammentragen aller verfügbaren Informationen	Anforderungsliste, die aber über die folgenden Phasen auch noch mit angepasst wird
Schritt 2	Ermittlung von Funktionen bzw. Teilfunktionen	Funktionsstrukturen
Schritt 3	Suchen nach Lösungsprinzipien für die wesentlichen Funktionen und Teilfunktionen	Auswahl einer oder mehrerer prinzipiellen Lösungen, Prinzipskizze o. ä.

	Vorgehen	Ergebnis
Schritt 4	Gliederung der prinzipiellen Lösung in realisierbare Module	Modulare Struktur, Verknüpfungen, verschiedene Darstellungsformen (z. B. Anordnungsskizzen, Graphen)
Schritt 5	Grobgestaltung maßgebender Module	Vorentwürfe für die maßgebenden Module, maßstäbliche Zeichnungen
Schritt 6	Spezifizierung der gestalteten Module	Gesamtentwurf, welcher alle wesentlichen gestalterischen Festlegungen zur Produktrealisierung enthält
Schritt 7	Ausarbeitung von Ausführungs- und Nutzungsangaben	Produktdokumentation mit Nutzungsangaben

2.2.2 VDI 2206

Ziel der VDI 2206 [118] ist die methodische Unterstützung bei der Entwicklung mechatronischer Systeme. Die Schwerpunkte liegen hierbei auf Vorgehensweisen, Methoden und Werkzeugen. Die Richtlinie soll nach [118] die Grundzüge des Entwickelns mechatronischer Systeme vermitteln und zu einer ganzheitlichen Sichtweise über die einzelne Domänen hinaus anregen.

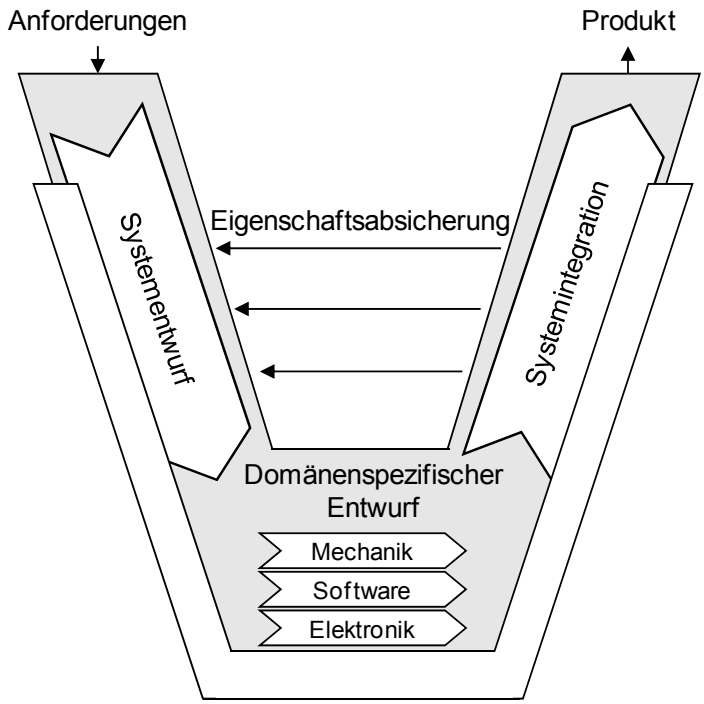


Bild 2.5: V-Modell [118]

Das grundsätzliche Vorgehen der Entwicklung mechatronischer Systeme wird durch das aus der Softwareentwicklung übernommene und an die Anforderungen der Me-

chatronik angepasste V-Modell abgebildet. Das V-Modell beschreibt die logische Abfolge wesentlicher Teilschritte bei der Entwicklung mechatronischer Systeme [13, 34]. Wie in Bild 2.5 zu sehen ist, wird das V-Modell in drei Bereiche unterteilt: den Systementwurf, den domänenspezifischen Entwurf und die Systemintegration. Im Folgenden wird auf die einzelnen Bereiche näher eingegangen.

Systementwurf

Das Hauptziel beim Systementwurf ist nach Abb. 2.6 die Festlegung eines domänenübergreifenden Lösungskonzepts. Dieses soll in der Lage sein die wesentlichen Wirkungsweisen des künftigen mechatronischen Produktes zu beschreiben.

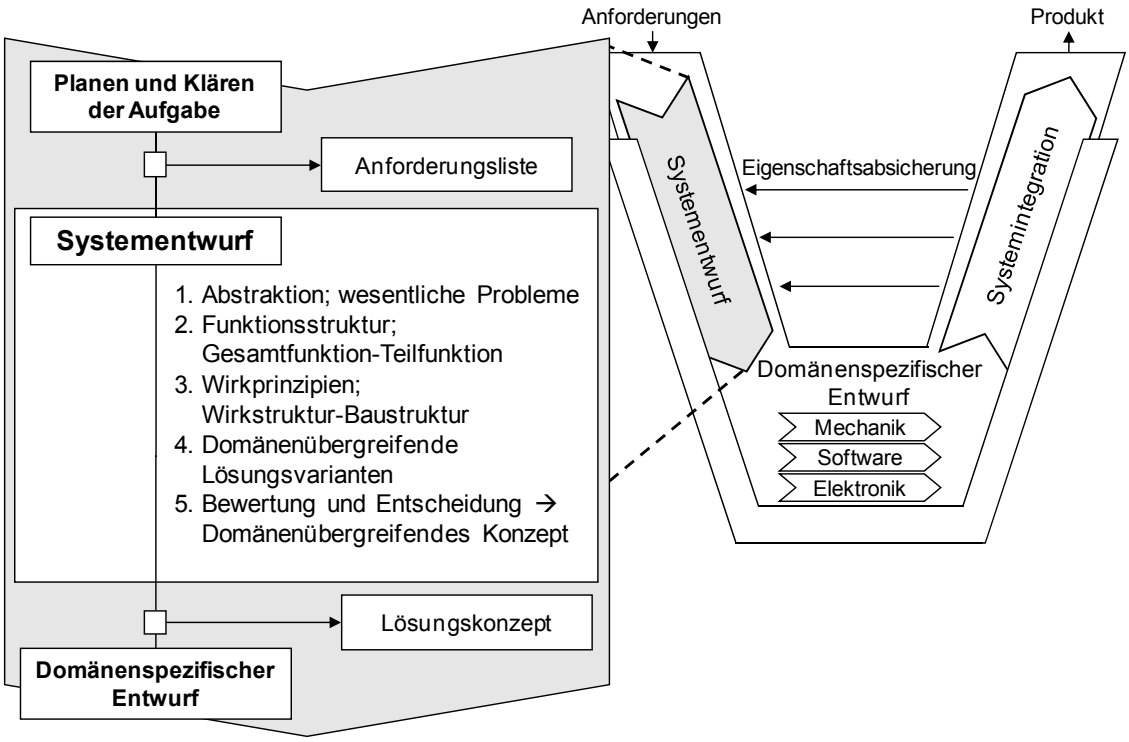


Bild 2.6: Systementwurf innerhalb des V-Modells [118]

Dafür werden zuerst die in der Anforderungsliste beschriebenen Forderungen und Wünsche abstrahiert. Hierdurch soll das Wesentliche und das Allgemeine aus der Anforderungsliste herausgearbeitet werden. Anschließend wird die Gesamtfunktion aufgestellt. Mit Hilfe einer Blockdarstellung und unter Verwendung der allgemeinen Größen Stoff-, Energie- und Informationsfluss kann der Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen spezifiziert werden. In der Mechatronik sind die zu lösenden Aufgaben meist komplex. Deshalb bietet es sich an, die Gesamtfunktion in Teilfunktionen zu unterteilen. Für die einzelnen Teilfunktionen bzw. für die Gesamtfunktion wird anschließend nach geeigneten Wirkprinzipien und Lösungselementen gesucht. Durch die Verknüpfung mehrerer Wirkprinzipien/Lösungselemente, welche die Wirkstruktur darstellen, sowie durch die Baustruktur werden prinzipielle Lösungsvarianten konkretisiert. Diese werden im letzten Schritt des Systementwurfs be-

wertet, so dass ein domänenübergreifendes Lösungskonzept ausgewählt und festgelegt werden kann.

Domänenspezifischer Entwurf

In der nächsten Phase – dem domänenspezifischen Entwurf – wird das festgelegte domänenübergreifende Lösungskonzept aufgegriffen. Häufig erfolgt bei der Zuordnung von Wirkprinzipien und Lösungselementen zu Teilfunktionen eine Partitionierung, also eine Aufteilung der Funktionserfüllung unter den Domänen. Die Entwicklung in den einzelnen Domänen selbst erfolgt nach spezifizierten Vorgehensweisen der jeweiligen Domäne. Bei der Mechanik wird beispielsweise die in Abschnitt 2.2.1 angesprochene VDI 2221 [119] verwendet. Häufig genutzte Methode bei der Elektronik ist der plattformbasierte Entwurf, die Software nutzt zumeist das Wasserfallmodell [2].

Systemintegration

Der letzte Schritt des V-Modells ist die Systemintegration. Hier werden die im domänenspezifischen Entwurf aufgestellten Funktionen der (Teil-)Systeme zu einem übergeordneten Produkt zusammengeschlossen. Nach [118] gibt es verschiedene Integrationsarten:

- Integration verteilter Komponenten
- Modulare Integration
- Räumliche Integration

Bei der Integration verteilter Komponenten werden Verbindungen zwischen Komponenten wie beispielsweise Aktoren und Sensoren erstellt. Dabei werden die Verbindungen durch CAN-Busse, Verkabelungen und Steckverbindungen realisiert. Der zweite Punkt, die modulare Integration, beschreibt die Zusammensetzung des Gesamtsystems aus Modulen definierter Funktionalität und standardisierter Abmessungen. Bei der räumlichen Integration bilden die Komponenten eine komplexe Funktionseinheit. Als Beispiel hierfür kann die Integration aller Komponenten eines Antriebssystems in ein Gehäuse genannt werden.

Da der ganze Konstruktionsprozess dynamisch ist, kann es vorkommen, dass es während des domänenübergreifenden Entwurfs zu Veränderungen der im Systementwurf bereits festgelegten Wirkstruktur kommen kann. Die dann entstehenden möglichen Inkompatibilitäten müssen bei der Systemintegration erkannt und beseitigt werden. Erst dann kann eine optimale Gesamtlösung gefunden werden.

2.3 Zuverlässigkeitsanalysen

Um die Zuverlässigkeit von Komponenten und Systemen näher untersuchen zu können, werden Zuverlässigkeitsanalysen eingesetzt. Mit diesen ist es möglich, sowohl erwartete Zuverlässigkeiten zu prognostizieren als auch Schwachstellen zu erkennen, so dass diese rechtzeitig beseitigt werden können. Grundsätzlich wird zwischen zwei unterschiedlichen Analysearten unterschieden. Zum einen können qualitative Analysen verwendet werden, zum anderen kann die Zuverlässigkeit auch durch quantitative Analysen bestimmt werden. Dies ist in Abb. 2.7 dargestellt.

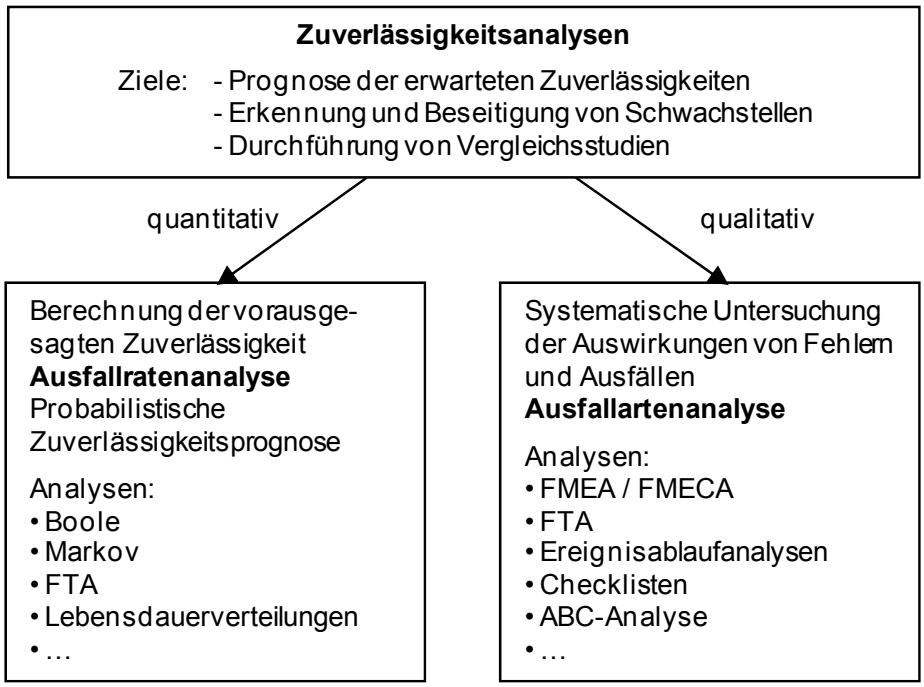


Bild 2.7: Möglichkeiten zur Analyse der Zuverlässigkeit [6]

Im Folgenden wird auf einige wichtige Zuverlässigkeitsanalysen näher eingegangen. Für weiterfolgende Informationen wird auf [6], [8] verwiesen.

2.3.1 FMEA - Failure Mode and Effects Analysis

Die FMEA ist die bekannteste und die am häufigsten eingesetzte Zuverlässigkeitsanalyse. Das Akronym FMEA ist aus dem englischen Failure Mode and Effects Analysis abgeleitet. In der DIN 25448 [17] ist die FMEA als Ausfallanalyse bezeichnet, eine andere übliche Übersetzung der FMEA ist Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse.

Ziel der FMEA ist es für beliebige Systeme oder Teilsysteme alle möglichen Ausfallarten zu identifizieren. Des Weiteren werden deren Ausfallursachen und Ausfallfolgen aufgezeigt. Da die FMEA das Ausfallrisiko mit Hilfe einer Risikoprioritätszahl (RPZ) angibt, kann die FMEA Auskunft für korrektive Maßnahmen liefern sowie darüber hinaus auch zur Bestimmung von Testfällen dienen.

Das Vorgehen der FMEA nach VDA 4.2 [116] ist in insgesamt fünf Schritte untergliedert. Diese werden anschließend noch detaillierter betrachtet:

1. Systemelemente und Systemstruktur
2. Funktionen und Funktionsstruktur
3. Durchführung der Fehleranalyse, d. h. Ermittlung von möglichen Fehlern, Fehlerursachen und Fehlerfolgen (Fehlfunktionsstruktur)
4. Risikobewertung im FMEA-Formblatt
5. Systemoptimierung

Systemelemente und Systemstruktur

Die Haupttätigkeit in diesem Schritt liegt darin, dass nach der Systemabgrenzung das zu untersuchende System in seine einzelnen Systemelemente (SE) aufgeteilt wird. Dabei wird zwischen Baugruppen, Funktionsgruppen und Bauteilen unterschieden. Anschließend werden diese hierarchisch in eine Systemelementstruktur gebracht (siehe Bild 2.8).

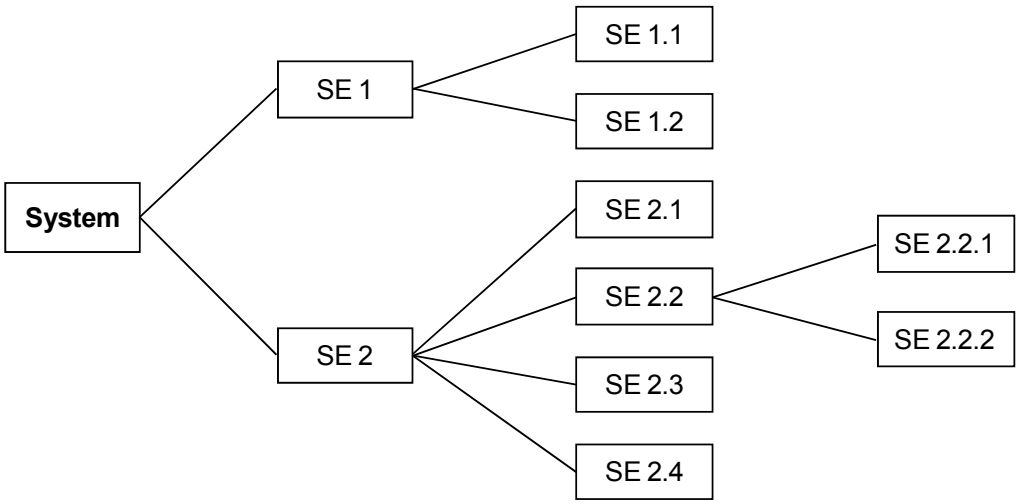


Bild 2.8: Systemelementstruktur [6]

Funktionen und Funktionsstruktur

Ausgehend von der hierarchischen Systemelementstruktur werden den einzelnen Knotenelementen, d. h. den Systemelementen Funktionen zugeordnet (Bild 2.9). Die Funktionen werden nach dem Top-Down Prinzip ermittelt. Als Hilfsmittel ist hier zum einen die Black Box Betrachtung sinnvoll. Zum anderen können auch Konstruktionsleitlinien wie beispielsweise die nach [95] verwendet werden, in denen Begriffe unter anderem zur Energie, zu Geometrien oder der Montage zu finden sind.

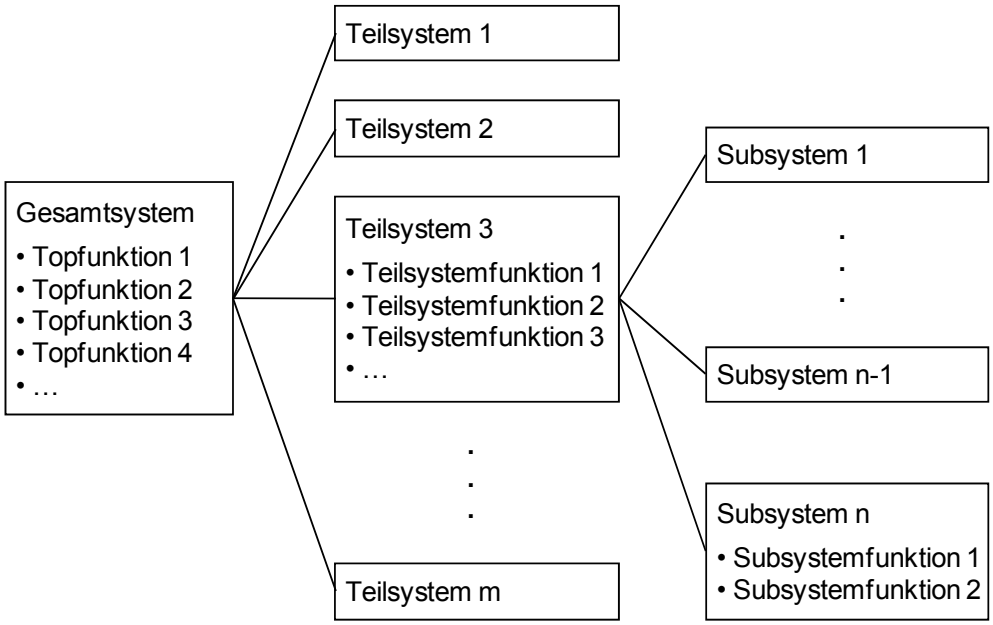


Bild 2.9: Funktionen der Systemelemente [6]

Durchführung der Fehleranalyse

In diesem Schritt wird für jedes Systemelement eine Fehleranalyse durchgeführt. Zuerst wird dafür zu den in Schritt zwei ermittelten Funktionen die Fehlfunktionen gebildet. Danach werden Fehlerfolgen und Fehlerursachen notiert. Zu deren Ermittlung bieten sich beispielsweise Kreativitätstechniken sowie Checklisten an.

Der Zusammenhang zwischen Fehlerfolgen, Fehlerarten und Fehlerursachen ist in Bild 1.10 zu sehen. Es wird offensichtlich, dass die Fehlerfolgen, Fehlerarten und Fehlerursachen zwar miteinander verknüpft sind, aber alle eine unterschiedliche Hierarchieebene besitzen. Die Fehlerursachen repräsentiert die unterste Ebene, d. h. ein weiteres Herunterbrechen sowohl aus der Funktionssicht als auch der Systemelementensicht ist bei dieser betrachteten Einheit nicht mehr möglich. Eine Ebene darüber sind die Fehlerarten zu finden. Die Fehlerfolgen werden für das Gesamtsystem aufgeschrieben und stellen somit die oberste Ebene dar. Insgesamt bestehen bei der durchzuführenden Fehleranalyse folgende Zusammenhänge [6]:

1. Mögliche Fehlerarten (FA) des betrachteten Systemelements sind seine aus den bekannten Funktionen abgeleiteten und beschriebenen Fehlfunktionen, z. B. Nichterfüllung der Funktion oder eingeschränkte Funktion.
2. Die möglichen Fehlerursachen (FU) sind die denkbaren Fehlfunktionen der in der Systemstruktur untergeordneten Systemelemente und der über Schnittstellen zugeordneten Systemelemente.
3. Die möglichen Fehlerfolgen (FF) sind die sich ergebenden Fehlfunktionen der in der Systemstruktur übergeordneten Systemelemente und der über Schnittstellen zugeordneten Systemelemente.

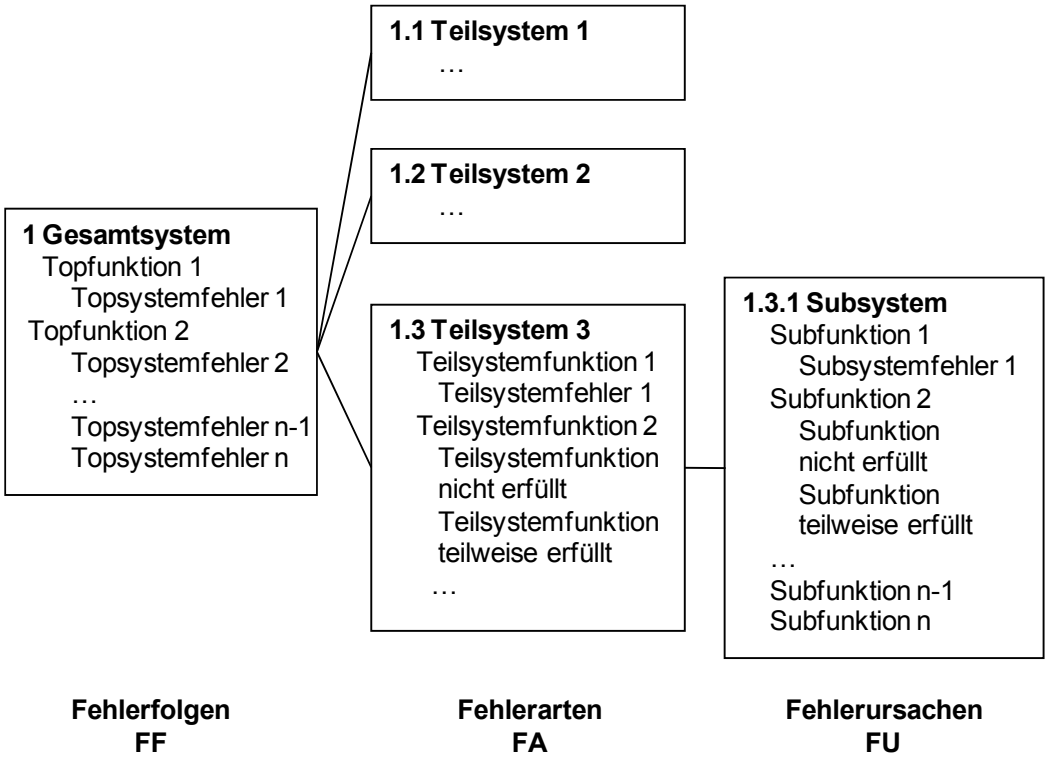


Bild 2.10: Fehlfunktionen [6]

Risikobewertung

Aufbauend auf dem vorigen Schritt werden bei der Risikobewertung zuerst die ermittelten Fehlerarten, Fehlerursachen und Fehlerfolgen in ein Formblatt nach [116] eingetragen (Bild 2.11). Anschließend wird die eigentliche Risikobewertung durchgeführt. Dazu wird sowohl die Bedeutung (B) der Fehlerfolgen, die Auftretenswahrscheinlichkeit (A) der jeweiligen Fehlerursachen als auch die Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) der jeweiligen Fehlerursachen ermittelt. Die Bewertungsskala reicht bei der Bedeutung, der Ausfallwahrscheinlichkeit und der Entdeckungswahrscheinlichkeit jeweils von 1 bis 10. Wird beispielhaft für die Bewertung die Bedeutung B herangezogen, steht der Wert 1 für eine geringe Bedeutung aus Kundensicht, der Wert 10 hingegen für eine hohe Bedeutung. Die anderen Bewertungen werden hier nicht weiter erklärt, sind aber analog zu der gezeigten. Weiterführende Informationen sind dazu in [6] zu finden. Im nächsten Schritt der Risikobewertung werden alle Bewertungen in das Formblatt übernommen. Anschließend wird ein Risiko errechnet, welches sich aus dem Produkt von Bedeutung, Ausfallwahrscheinlichkeit und der Entdeckungswahrscheinlichkeit zusammensetzt (Gl. 2.1). Dieser ermittelte Wert wird Risikoprioritätszahl RPZ genannt.

$$RPZ = B \cdot A \cdot E \tag{2.1}$$

Fehlerfolge	B	Fehlerart	Fehlerursache	Vermeidungsmaßnahme	A	Entdeckungs-maßnahme	E	RPZ	V/T
Systemelement - Antriebswelle									
Funktion: Drehmoment übertragen / wandeln									
Getriebe nicht mehr funktionsfähig	9	Bruch	Ungeeignete Materialwahl	Erfahrung der Mitarbeiter	3	Dauerlauf	2	54	Müller
				Gestaltung nach bewährten Konstruktionen	3	Dauerlauf / Test	2	54	Maier
			Falsche Konstruktive Auslegung / falsche Dimension	Erfahrung der Mitarbeiter	2	Dauerlauf	2	36	Maier
				Gestaltung nach bewährten Konstruktionen	3	Dauerlauf / Test	2	54	Schmidt
			Falsche Wärmebehandlung festgelegt	Erfahrung der Mitarbeiter	3	Dauerlauf	4	108	Müller
				Gestaltung nach bewährten Konstruktionen	3	Dauerlauf / Test	3	81	Hofmann
			Materialfehler	Korrekte Produktionsprozesse	3	Röntgen	2	54	Meier
			Unzulässige Belastung	Ermittlung von Lastkollektiven	5	Anbringen von Sensoren	2	90	Schmitt
Funktion: Abdichtung von Schmieröldruckbereichen									
Erhöhte Leckage, Kühlung und Schmierung von Getriebe-komponenten nicht gewährleistet	5	Dichtwirkung teilweise nicht gewährleistet	Falsche Oberflächenhärte	Erfahrung der Mitarbeiter	4	Dauerlauf	5	140	Schmitt
			Falsche Oberflächenrauheit	Erfahrung der Mitarbeiter	4	Dauerlauf	4	112	Schmitt
			Falsche Dimensionierung / falsche Auslegung	Erfahrung der Mitarbeiter	3	Dauerlauf	3	63	Müller
				Gestaltung nach bewährten Konstruktionen	3	Dauerlauf / Test	4	84	Meier
Erhöhter Verschleiß an Schaltelementen	7	Dichtwirkung nicht gewährleistet	Zu hohe Betriebstemperatur	Erfahrung der Mitarbeiter	4	Dauerlauf	3	84	Hoffmann
			Falsche Montage	Korrekte Produktionsprozesse	4	Sichtprüfung	5	140	Schmidt
Funktion: …									

B x A x E = RPZ

1…10 1…10 1…10 1…1000

Bild 2.11: FMEA-Formblatt mit Berechnung der Risikoprioritätszahl

Systemoptimierung

In diesem Schritt soll das bestehende vorliegende System bzw. das Teilsystem nochmals genau überprüft und optimiert werden. Basis bildet hierbei die berechnete Risikoprioritätszahl aus der Risikobewertung. Ein sinnvoller Punkt ist es, zuerst eine Grenze zu bestimmen, ab welcher die einzelnen Bewertungen näher betrachtet werden müssen. Dadurch müssen nicht alle Ausfälle untersucht werden. Hier gibt es verschiedene Ansätze. Entweder beginnt die Optimierung ab einer festgelegten Grenzrisikoprioritätszahl, beispielsweise 125 ($5 \cdot 5 \cdot 5 = 125$), oder es wird eine festgelegte Anzahl an Ausfällen nach dem Pareto-Prinzip betrachtet (ca. 20 – 30%). Zudem ist es sinnvoll auch Ausfallarten zu betrachten, bei denen eine der Bewertungen A, B oder E größer als acht ist.

Der nächste Schritt ist die Optimierung an sich. Hier müssen nach [6] Maßnahmen festgelegt werden, durch die

- das Auftreten von Fehlern reduziert wird. Dies ist beispielsweise durch Konstruktions- oder Prozessänderungen möglich.
- die Bedeutung eines Fehlers reduziert wird. Durch konzeptionelle Änderungen am Produkt wie beispielsweise Redundanz ist dies erreichbar.
- die Entdeckungswahrscheinlichkeit erhöht wird. Dies können Änderungen der Erprobungs- oder Prüfmaßnahmen und/oder der Konstruktion, des Prozesses und/oder geänderte Prüfmaßnahmen sein.

2.3.2 Boole´sche Theorie

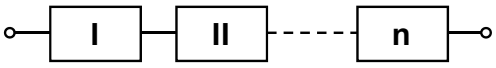
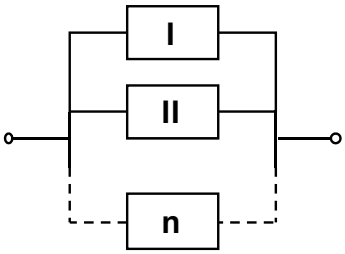
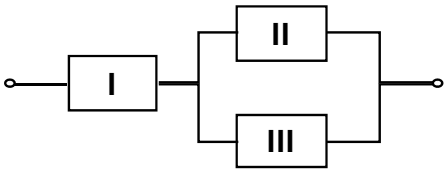
Um die Zuverlässigkeit eines Systems zu ermitteln muss im Normalfall das System getestet werden, Oft liegen aber keine Tests vor, sondern es sind nur Tests mit einzelnen Subsystemen, Komponenten oder Einzelteilen gefahren worden. Diese können aber mit Hilfe mathematischer Formeln verwendet werden um die Zuverlässigkeit des Systems zu berechnen. Hierfür hat sich in der Praxis die Boole´sche Theorie bewährt. Diese hat einige Voraussetzungen:

- Das System ist „nicht reparierbar“, d. h. der erste Systemausfall beendet die Systemlebensdauer. Bei reparierbaren Systemen kann deshalb nur bis zum ersten Systemausfall gerechnet werden.
- Die Systemelemente können nur die beiden Zustände „funktionsfähig“ oder „ausgefallen“ annehmen.
- Die Systemelemente sind „unabhängig“, d. h. das Ausfallverhalten eines Bauelements wird durch das Ausfallverhalten anderer Bauelemente nicht beeinflusst.

Zur genauen Darstellung der Systemstruktur unterscheidet die Booles´sche Theorie zwischen verschiedenen Verknüpfungsmöglichkeiten. Zum einen ist es möglich, eine Reihenstruktur nachzubilden, zum andern kann auch eine Parallelstruktur verwendet werden. Die letzte Möglichkeit stellt eine Kombination aus Reihen- und Parallelstruktur dar. Somit ist eine korrekte Nachbildung der Realität, d. h. des vorliegenden Systems möglich. In Tabelle 2.2 sind die ganzen Verknüpfungsarten nebst ihrer Berechnungsmöglichkeit zu finden. Für weiterführende Literatur wird auf [6], [8] verwiesen.

Nach VDI 4003 [121] stellt die Boole´sche Algebra die einzige Möglichkeit dar, Komponenten miteinander zu verbinden, um dann mathematisch die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems zu bestimmen.

Tabelle 2.2: Strukturarten der Boole´schen Theorie

Struktur	Schema	Zuverlässigkeit
Serienstruktur		$R_S = \prod_{i=1}^{n} R_i(t)$
Parallelstruktur		$R_S = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - R_i(t))$
Kombination von Serien- und Parallelstruktur		Berechnung über ein Ersatzschaubild

2.3.3 Fault Tree Analysis - FTA

Die Fault Tree Analysis (FTA, Fehlerbaumanalyse) ist eine Methode, welche in der Zuverlässigkeitstechnik häufig verwendet wird. Sie dient dazu die Fehlerszenarien des Systems abzubilden sowie bei Bedarf die Zuverlässigkeit zu quantifizieren. Dies bedeutet, dass die Fault Tree Analysis zum einen qualitative sowie zum anderen quantitative Ergebnisse liefern kann.

Im Gegensatz zu der FMEA geht die Fault Tree Analysis nach dem Top-Down Prinzip vor. Anstatt wie bei der FMEA Komponente für Komponente zu untersuchen, wird bei der FTA ausgehend von einem unerwünschten Ereignis untersucht, welche Ursachen und/oder Ursachenkombinationen zu diesem unerwünschten Ereignis führen können. Ursachen können dabei beispielsweise Komponentenausfälle, die sich selbstständig oder auch durch Verknüpfungen untereinander auswirken können, sein. Hierbei wird für die Beziehung zwischen den Ausfallursachen und Folgen die Boole´sche Theorie verwendet. Die Symbolik ist in DIN 25424 [16] festgelegt. In Tabelle 2.3 sind die wichtigsten Symbole zu finden.

Tabelle 2.3: Symbolik der FTA

Bildzeichen	Benennung und kurze Beschreibung
	Standardeingang: Dieses Bildzeichen steht für einen Funktionselementausfall, wenn primäres Versagen möglich ist.
&	UND-Verknüpfung: Dieses Bildzeichen steht für den logischen Durchschnitt.
≥1	ODER-Verknüpfung: Dieses Bildzeichen steht für die logische Vereinigung.
	NICHT-Verknüpfung: Dieses Bildzeichen steht für eine Negation. Falls am Eingang eine „0“ anliegt, so ist der Ausgang „1“.

Anhand eines Beispiels soll das Vorgehen und die Notationsweise der FTA verdeutlicht werden. Dabei handelt es sich um eine Raumbeleuchtung, welche in Bild 2.12 aufgezeigt wird. Die Hauptfunktion ist, dass der Raum beleuchtet wird. Ist dies nicht möglich, kann es zwei verschiedene Ursachen haben. Zum einen kann das Licht physikalisch gesehen nicht erzeugt werden, zum anderen kann die Beleuchtungseinheit nicht aktiviert und deaktiviert werden. Beide Fälle bedingen sich nicht einander, d. h. es liegt eine ODER-Verknüpfung vor. Bricht man beispielsweise den letzten Aspekt weiter herunter, kann der Schalter ausgefallen sein. Gründe für diesen Ausfall stellen entweder der Bruch der Betätigungswippe oder die Korrosion der Kontakte zum Schalter dar. Beide Ursachen können nicht mehr weiter heruntergebrochen werden.

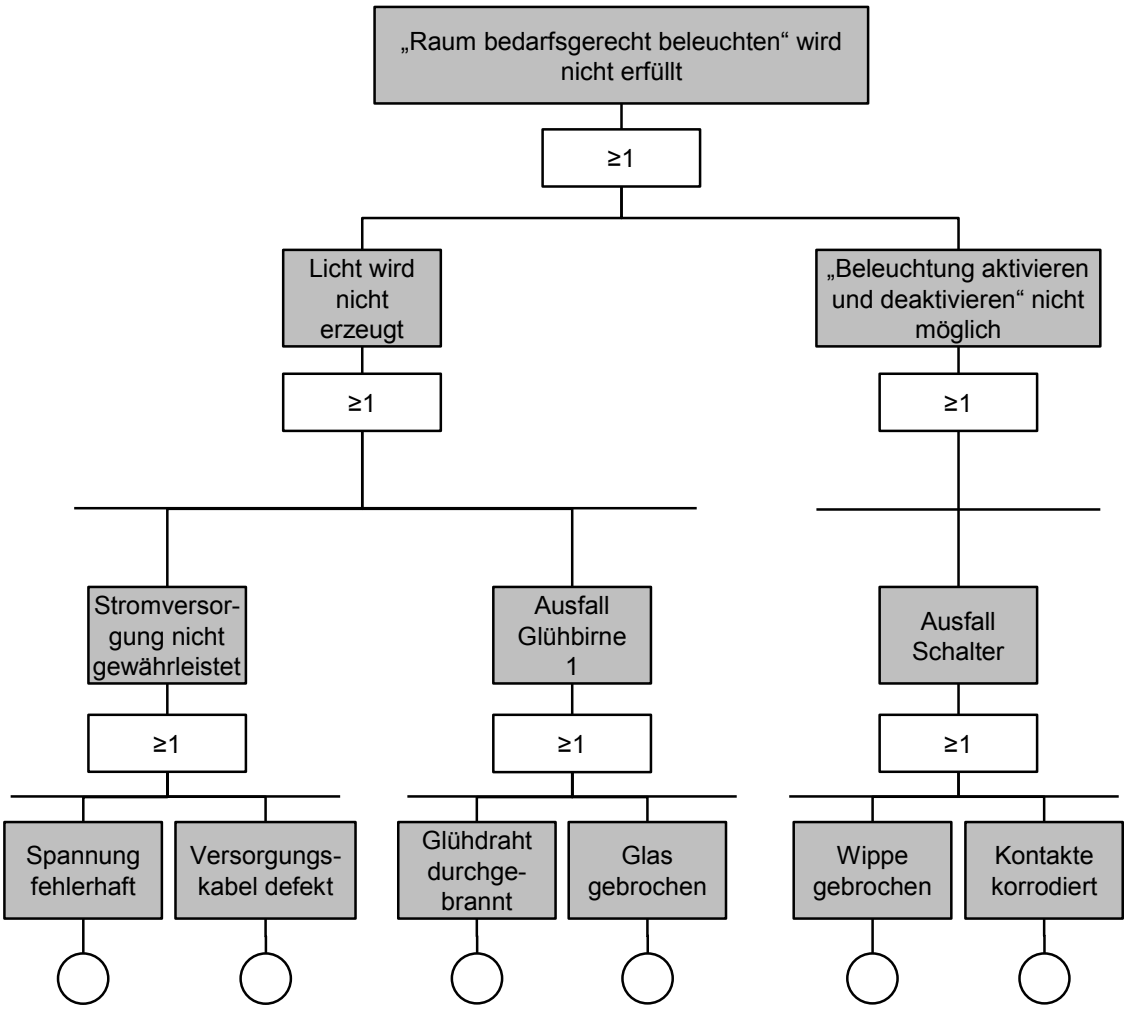


Bild 2.12: Beispielssystem Raumbeleuchtung

2.3.4 Quantitative Zuverlässigkeitsanalysen

Werden quantitative Zuverlässigkeitsanalysen angesprochen, sind Daten von Tests bzw. Feldversuchen vonnöten. Ohne diese Daten ist es nicht möglich, Aussagen über die Zuverlässigkeit zu treffen. Dies bedeutet, dass die quantitativen Analysen erst zu einem recht späten Zeitpunkt eingesetzt werden können.

Das Vorgehen bei der Auswertung der Daten verläuft immer ähnlich. Die Daten werden mit Hilfe von Verteilungen ausgewertet, welche je nach Einsatzgebiet unterschiedlich sein können. In der Mechanik wird vor allem die Weibull-Verteilung verwendet (Tabelle 2.4). Sie hat den Vorteil, dass mit ihr verschiedene „Ausfalltypen“ abgebildet werden können. Diese Ausfalltypen umfassen Frühausfälle, Zufallsausfälle sowie Verschleiß- und Ermüdungsausfälle. Allgemein wird bei der Auswertung der Daten nach Weibull zwischen einer zweiparametrigen und einer dreiparametrigen Verteilung unterschieden. Der Unterschied liegt darin, dass bei der dreiparametrigen Weibullverteilung eine so genannte ausfallfreie Zeit t_0 berücksichtigt wird. Diese ausfallfreie Zeit symbolisiert den Zeitpunkt, bis zu dem noch kein Ausfall der Kompo-

nente auftritt. Im Gegensatz dazu sind in der zweiparametrigen Weibullfunktion nur der Formparameter b sowie die charakteristische Lebensdauer T integriert. Ausfälle können bei dieser Funktion bereits schon gleich zu Beginn auftreten.

Tabelle 2.4: Formeln der 3-parametrigen Weibull-Verteilung

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

Neben der Weibull-Verteilung wird vor allem im Elektronik-Bereich die Exponential-Verteilung eingesetzt. Der Unterschied zur Weibull-Verteilung ist, dass diese nur einen Ausfalltyp abbilden kann: den Zufallsausfall. Die Besonderheit bei den Zufallsausfällen ist, dass die Ausfallrate konstant ist (Tabelle 2.5).

Tabelle 2.5: Formeln der Exponential-Verteilung

Bezeichnung	Formel
Überlebenswahrscheinlichkeit bzw. Zuverlässigkeit	$R(t) = e^{-\lambda t}$
Ausfallwahrscheinlichkeit	$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$
Dichtefunktion	$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$
Ausfallrate	$\lambda(t) = konst.$

Bei beiden angesprochenen Verteilungsarten ist die Vorgehensweise für die Ermittlung der zuverlässigkeitstechnischen Kenngrößen identisch. Zuerst werden die Test- oder Felddaten nach ihrer Ausfallzeit chronologisch aufsteigend sortiert. Dann wird den Ausfallzeiten eine Ranggröße zugeordnet. Diese ist vom Prüfumfang abhängig. Anschließend werden die ermittelten Werte in ein Zuverlässigkeitsdiagramm eingetragen. Selbstverständlich kann dies auch softwareunterstützt durchgeführt werden.

Ebenso ist es möglich, dass Informationen von nicht ausgefallenen Komponenten verwendet werden können. Stichwort ist hier der zensierte Test. Weiterführende Informationen über dieses Thema sowie über den Vertrauensbereich sind in [6], [8] zu finden.

2.4 Zuverlässigkeitsbewertung in frühen Entwicklungsphasen

Im Unterkapitel 2.2 sind bereits Zuverlässigkeitsanalysen angesprochen worden, welche in der Praxis sehr häufig eingesetzt werden. Leider ist es mit diesen Analysen nicht möglich, zuverlässigkeitstechnische Untersuchungen in frühen Entwicklungsphasen durchzuführen. Aus diesem Grund ist in der Forschergruppe DFG 460 eine Vorgehensweise entstanden, welche es ermöglicht, eine Zuverlässigkeitsbewertung für mechatronische Systeme in frühen Entwicklungsphasen durchzuführen. Im Folgenden wird diese Vorgehensweise näher erläutert.

Sinnvollerweise soll sich eine neu zu entwickelnde Methode an bereits bestehende Entwicklungsrichtlinien angliedern [7], [31], [126], um so die Entwicklungstätigkeiten sowie die Konzeptauswahlentscheidungen zu unterstützen. Hierfür ist das V-Modell aus der Richtlinie VDI 2206 für mechatronische Systeme verwendet worden (siehe Abschnitt 2.2.2).

Insgesamt umfasst die Vorgehensweise sechs Schritte (Bild 2.13). Im ersten Schritt werden Topfunktionen und Topfehlfunktionen des zu betrachteten Systems identifiziert. Beispielsweise sind Topfunktionen bei einem Getriebe nach [5]:

- Wandeln von Drehzahlen
- Wandeln von Drehmoment
- Ändern der Übersetzung

Topfehlfunktionen lassen sich im einfachsten Falle durch Negieren der Topfunktion aufstellen, was aber nicht heißt, dass pro Topfunktion nur eine Topfehlfunktion vorhanden ist. In dem vorliegenden Fall sind die Topfehlfunktionen des Getriebes:

- Ändern der Übersetzung nur eingeschränkt möglich
- Ändern der Übersetzung nicht möglich
- Wandeln der Drehzahl nur eingeschränkt möglich
- Wandeln der Drehzahl nicht möglich
- Wandeln des Drehmoments nur eingeschränkt möglich
- Wandeln des Drehmoments nicht möglich

Da die aufgestellten Topfehlfunktionen nicht alle dieselbe Bedeutung für die Zuverlässigkeit besitzen, werden den Topfehlfunktionen Klassen nach VDA 3.2 [115] sowie Zuverlässigkeitszielkenngrößen zugeordnet.

In Schritt 2 erfolgt eine detaillierte Systemdarstellung. Kernpunkt hierbei ist, dass das System näher spezifiziert wird. Informationen über das System liegen zu diesem Zeitpunkt nicht vor. Die einzige Möglichkeit ist es eine funktionale Betrachtung des Systems vorzunehmen, um anhand dieser mögliche Komponenten zu bestimmen. Hierfür werden sogenannte Anwendungsfälle (engl.: Use Cases), abgeleitet aus der Software Modellierungssprache UML (Unified Modeling Language), verwendet. In diesen

werden funktionale Abläufe notiert. Ist beispielsweise in einem Anwendungsfall die Abfrage einer Geschwindigkeitsinformation zu finden, so kann daraus gefolgert werden, dass in dem betrachteten System ein Sensor verbaut werden muss, aus dessen Signalen eine Geschwindigkeitsinformation gewonnen werden kann. Werden nun alle Anwendungsfälle systematisch nach solchen Informationen durchsucht, so lässt sich mit den gewonnenen Erkenntnissen ein erstes physikalisches Modell aufbauen, in dem die mechanischen und elektromechanischen Komponenten enthalten sind. Wechselwirkungen werden in diesem Schritt nicht betrachtet, der Schwerpunkt liegt nur im Auffinden der einzelnen Komponenten.

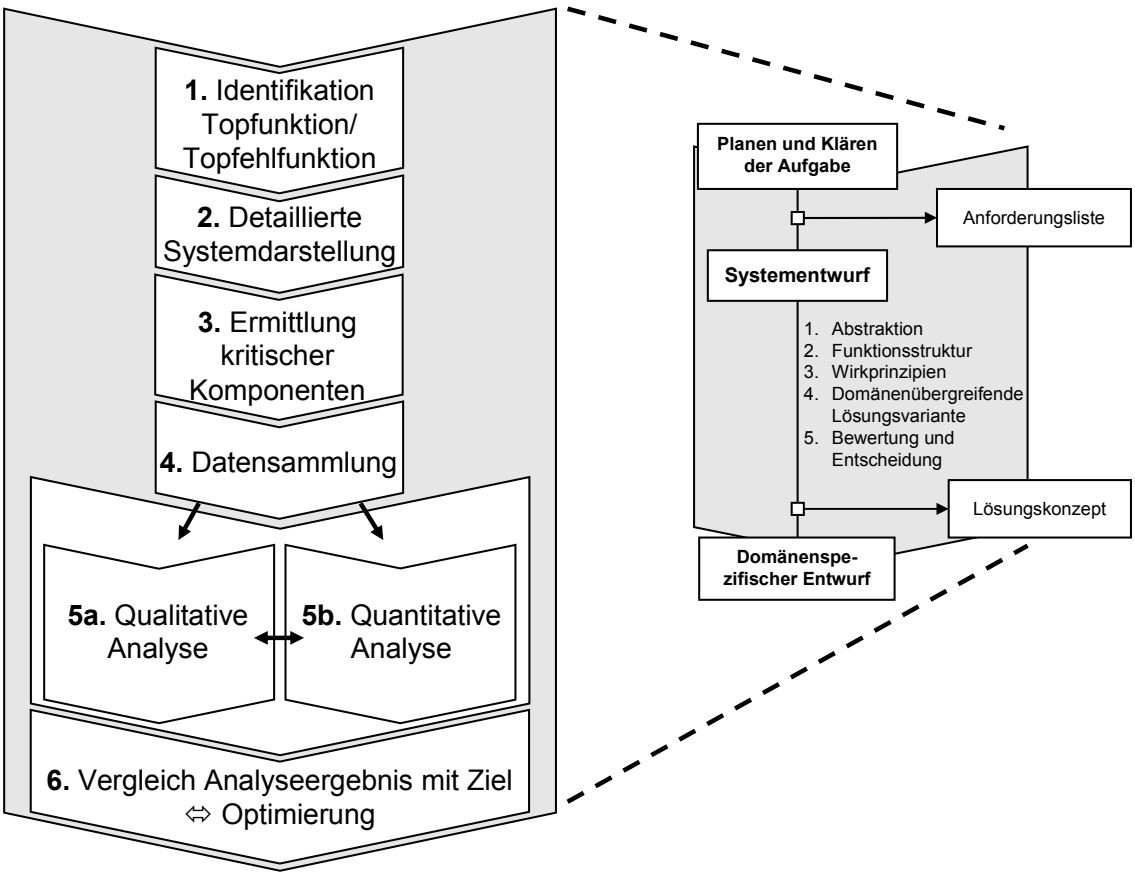


Bild 2.13: Methode zur Zuverlässigkeitsbewertung in frühen Entwicklungsphasen [5], [7], [30], [31]

Im dritten Schritt der Methode werden durch die Verwendung der Situationsbasierten Qualitativen Modellbildung und Analyse (SQMA) kritische Komponenten ermittelt. Das System wird hierzu zuerst hierarchisch in Komponenten zerlegt. Zur Modellierung der einzelnen Komponenten müssen neben den Schnittstellen sowohl mehrere Größen der Komponenten als auch das Systemverhalten definiert werden. Letzteres kann nach [19] mittels einfacher Regeln modelliert werden. Der Zusammenhang zwischen mehreren Größen innerhalb einer Komponente wird durch diese Regeln vorgegeben. Da in frühen Entwicklungsphasen keine präzisen Informationen vorliegen,

werden für die Größen qualitative Intervalle wie beispielsweise hoch, mittel, niedrig verwendet. Durch Injizieren von Fehlern kann rechnergestützt ermittelt werden, welche Komponenten für das Gesamtsystem kritisch sein können. Weiterführende Informationen zu diesem Tool finden sich in [127].

Ein elementarer Punkt in der Methode ist das Vorhandensein von Daten. Anhand dieser wird überlegt, welche Art der Analyse durchgeführt werden kann. Zum einen ist es möglich, eine qualitative Analyse wie z. B. eine FMEA oder eine FTA durchzuführen, zum anderen kann auch eine quantitative Analyse in Betracht gezogen werden. Bei der quantitativen Analyse kann vor allem Expertenwissen als Informationsquelle dienen [5], [71], [72], da zu diesem Zeitpunkt noch keine Daten von Test- und Feldversuchen vorliegen. Genauso können aber auch Daten aus Ausfallratenkatalogen oder von firmeninternen Datenbanken verwendet werden. Prinzipiell können die Daten für die quantitative Analyse auch als Verteilungen vorliegen, da bei der Methode eine Simulation durch die Monte-Carlo-Analyse möglich ist [5].

Im letzten Schritt wird, falls quantitative Daten vorliegen, das Ergebnis mit dem in Schritt 1 bestimmten Zuverlässigkeitszielkenngrößen verglichen. Ist die Differenz zwischen diesen beiden zu groß, können durch eine Iterationsschleife Komponenteneigenschaften oder die Systemstruktur optimiert werden.

Nachstehend in Tabelle 2.6 sind die Ein- und Ausgangsgrößen der wichtigsten Schritte zu finden.

Tabelle 2.6: Wichtigste Schritte der frühzeitigen Zuverlässigkeitsbewertung

Schritt	Eingangsgröße	Ausgangsgröße
1	Lastenheft	Aufstellen und Klassifizierung der Funktionen
2	Expertenwissen	Funktionale Beschreibung, mögliche Komponenten, erstes physikalisches Modell
3	Mögliche Komponenten	Kritische Komponenten
5	Daten aus Versuch, von Experten, etc.	Berechnung eines Entwicklungsspielraums, Identifikation von Schwachstellen

3 Wechselwirkungen und deren Zuverlässigkeit

In Kapitel 2 sind einige Definitionen von Begrifflichkeiten zu finden, die für die vorliegende Arbeit eine Grundlage darstellen. Gerade aber das Thema Wechselwirkung bedingt für das Verständnis der Arbeit weitere Untersuchungen. Diese umfassen einerseits detaillierte Beschreibungen wie beispielsweise Wechselwirkungen auftreten und wirken können. Andererseits darf die Umgebung in diesem Kapitel nicht vernachlässigt werden. Abschließend werden die Anforderungen an die zu erstellende Methode zur Bewertung der Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen erläutert.

3.1 Grundüberlegungen zu Wechselwirkungen

In der Definition von Wechselwirkungen in Kapitel 2 wird davon gesprochen, dass bei einer Wechselwirkung eine gegenseitige Beeinflussung von mindestens zwei Komponenten vorliegt. Im einfachsten Fall kann davon ausgegangen werden, dass eine Komponentenpaarung existiert. Werden die Komponentenpaarungen näher betrachtet, liegen insgesamt zwei grundsätzliche Arten von Wirkungsweisen der Wechselwirkungen vor.

Die erste Art ist die Wirkung zwischen den Komponenten. Hierbei ist vor allem die Wechselwirkung von angrenzenden Komponenten wichtig. Komponente 1, die direkt mit Komponente 2 verbunden ist, diese positiv, negativ oder gar nicht beeinflussen. Genauso kann es in die andere Richtung sein. Beispielsweise beeinflussen sich kraftschlüssig miteinander verbundene Komponenten durch eine Kraft-/ Momentenübertragung (Bild 3.1).

Dahingegen kann Komponente 3, die nicht direkt mit Komponente 1 verbunden ist, zwar auch von dieser beeinflusst werden, jedoch nur indirekt. Dies kann über eine gemeinsame Nachbarkomponente oder durch die Umgebung passieren. Der letzte Aspekt der beiden – die Umgebung – ist die zweite Art der Wirkungsweise von Wechselwirkungen. Diese kann nochmals untergliedert werden. Komponenten können, obwohl sie nicht direkt miteinander verbunden sind, sich gegenseitig indirekt über die Umgebung beeinflussen (Bild 3.1). Beispielsweise kann es vorkommen, dass eine Komponente sich während des Betriebs erwärmt. Dadurch wird sich die Umgebung ebenfalls erwärmen, welche dann die anderen Komponenten ebenfalls beeinflusst. Aber nicht nur auf indirekter Weise kann die Umgebung Komponenten beeinflussen. In der dritten Art der Wechselwirkungen kann z. B. die kosmische Strahlung genannt werden, welche vor allem elektronische Komponenten in ihrer Leistungsfähigkeit einschränkt. Diese Wechselwirkungen finden aber häufig nur in eine Richtung statt – von der Umgebung zu der Komponente (Bild 3.1). Auf dem ersten Blick scheint dies konträr zu der Definition von Wechselwirkungen aus Unterkapitel 2.1 zu sein. Jedoch wird hier von der gegenseitigen Beeinflussung von Komponenten gesprochen. Die Umgebung kann aber nicht als eine „richtige“ Komponente bezeichnet werden.

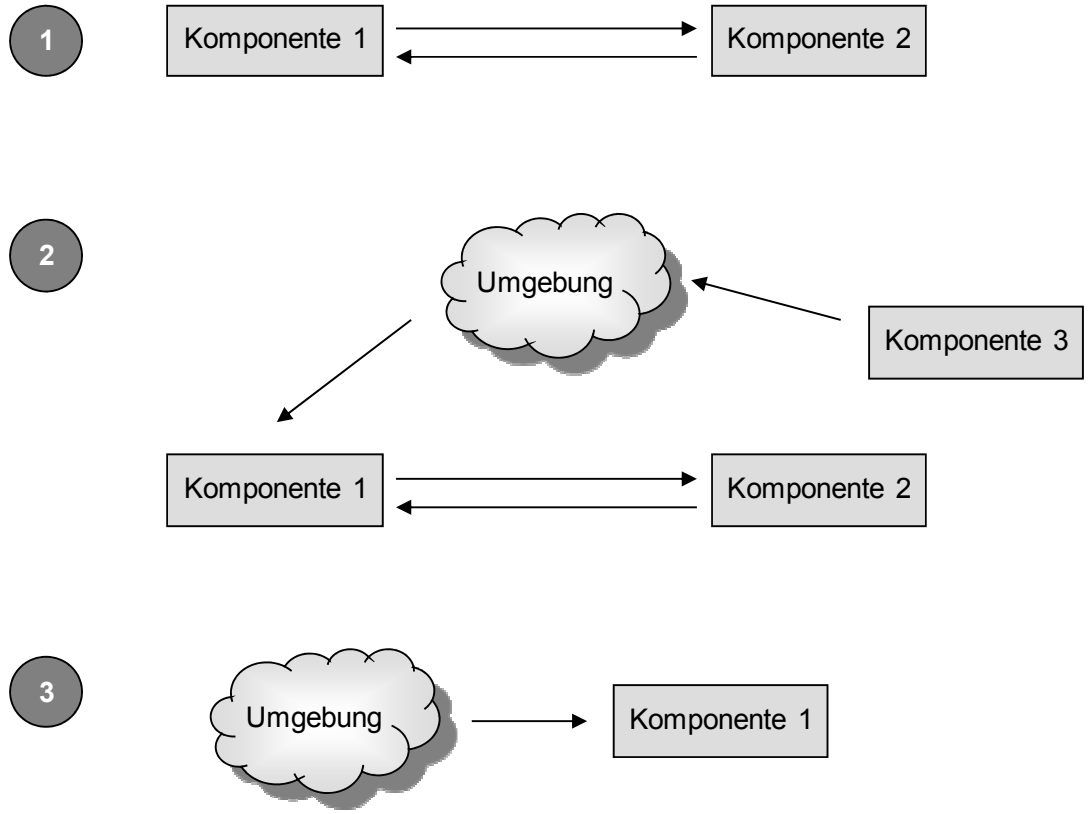


Bild 3.1: Unterschiedliche Arten von Komponentenwechselwirkungen

Aufgrund dieser Beschreibung ist es sinnvoll, dass die Wechselwirkungen für die vorliegende Arbeit nicht unabhängig von den Komponenten beschrieben werden, sondern anhand von Komponentenpaarungen ermittelt werden. Hierbei gilt die Kombination „Umgebung – Komponente“ auch als Komponentenpaarung.

Zusammenfassend wird zwischen den folgenden Wechselwirkungen unterschieden:

- Direkte Wechselwirkung zwischen Komponentenpaarungen
- Indirekte Wechselwirkung zwischen den Komponenten
- Beeinflussung einer Komponente durch die Umgebung

Zur sinnvollen Abgrenzung von jeglichen äußeren und inneren Einflüssen auf die Zuverlässigkeit werden diese im Folgenden näher erläutert. Diese stellt einen wichtigen Aspekt bei der Untersuchung von Wechselwirkungen dar.

3.2 Einflüsse auf die Komponenten

Zur vollständigen Analyse und Untersuchung der Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen müssen diverse Einflüsse – vor allem durch die Umgebung – auf die Zuverlässigkeit untersucht werden. Folgende Begrifflichkeiten sind dafür zu definieren:

- Umgebung
- Umgebungseinflüsse
- Störgrößen
- Einbauort

3.2.1 Umgebung

Die Umgebung eines betrachteten Objekts beinhaltet die klimatischen Bedingungen, die in der Nähe des Objekts auftreten. Es kann zwischen ursprünglicher und objektbeeinflusster Umgebung unterschieden werden [122].

Die ursprüngliche Umgebung ergibt sich aus den am Einsatzort vorherrschenden Einflüssen aus der Umgebung, die dort bereits auch ohne das Vorhandensein des Objekts auftreten. Die vorherrschenden Bedingungen in dieser Umgebung lassen sich bereits vor dem Einbringen des Objekts ermitteln. Diese ursprüngliche Situation in der Umgebung kann den Betrieb bzw. auch durch die bloße Anwesenheit des Objekts verändert werden, so dass eine neue Umgebung entsteht – die objektbeeinflusste Umgebung [122]. Gegenüber der ursprünglichen Umgebung kann die objektbeeinflusste Umgebung neue Verursacher von Umgebungseinflüssen enthalten, die von dem Objekt selbst stammen. Für einzelne Elemente des Objekts kann die Auftrittsstärke der Umgebungseinflüsse voneinander abweichen. Dies kann daher kommen, dass einzelne Elemente beispielsweise durch ein Gehäuse von der Umgebung abgeschirmt sind (Bild 3.2).

Wie im vorigen Abschnitt beschrieben kann die Wechselbeziehung zwischen Objekt und der Umgebung in unterschiedlicher Weise und Intensität stattfinden. Wenn das Objekt als passiver Partner der Wechselbeziehung betrachtet wird, liegt eine Umgebungseinwirkung vor. Im umgekehrten Fall, d. h. wenn das Objekt der aktive Partner ist, wird von einer Umgebungsauswirkung gesprochen [122].

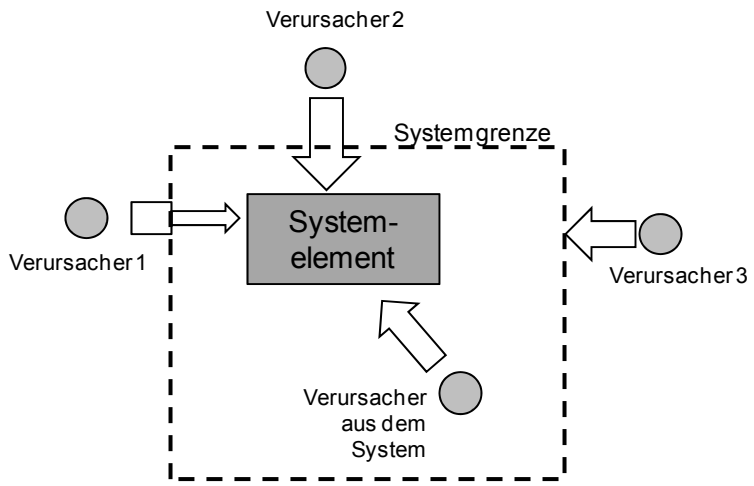


Bild 3.2: Definition von Umgebung und Verursacher

3.2.2 Umgebungseinflüsse

Wird die Zuverlässigkeit betrachtet, sind von den Umgebungseinflüssen vor allem diejenigen von Interesse, welche die Funktion als auch die Zuverlässigkeit des Systems beeinflussen können. Diese Einflüsse beschreiben die wirksame Umgebung, die

sich, wie bereits in Abschnitt 5.2.1 erläutert, in die ursprüngliche und in die objektbeeinflusste Umgebung aufteilen lassen [101]. Zuerst werden einige wichtige Begriffe näher erläutert.

Umgebungsbedingung: Die Umgebungsbedingung ist eine physikalische, chemische oder biologische Bedingung außerhalb eines Erzeugnisses, der das Erzeugnis zu einer bestimmten Zeit ausgesetzt ist [21].

Umgebungseinfluss: Ein Umgebungseinfluss ist ein physikalischer, chemischer oder biologischer Einfluss, der einzeln oder in Verbindung mit anderen Einflüssen die Umgebungsbedingung darstellt [100].

Zuverlässigkeitseinfluss: Als Zuverlässigkeitseinfluss wird die potentielle oder effektive Wirkung von Subjekten, Objekten oder der Umgebung auf die Zuverlässigkeit eines Systems verstanden. Einflüsse können prinzipiell positiv, neutral oder negativ sein.

Sind alle Umgebungseinflüsse/ -bedingungen und die Belastungen unter der Kenntnis der physikalischen, chemischen oder biologischen Korrelationen bekannt, welche auf eine Komponente wirken, kann nach [8] die Zuverlässigkeit dieser bestimmt werden. Jedoch ist diese je nach den Umgebungsbedingungen immer unterschiedlich. Dies zeigt auf, wie wichtig es ist, die richtigen Bedingungen zu kennen und diese schon rechtzeitig in die Konzeption mit einfließen zu lassen. Bei einer Komponente, welche immer unter wechselnden Umweltbedingungen eingesetzt wird, erscheint diese Fragestellung nicht trivial zu sein. Beispielsweise kann hier eine Komponente aus einem Automobil genannt werden. Typische Umgebungseinflüsse sind hier Schmutz, Dreck, Abwärme, Feuchtigkeit oder Vibration. Anhand der Aufzählungen kann erschlossen werden, dass es sich bei den Umgebungseinflüssen nicht um funktionale Einflüsse handelt.

3.2.3 Störgrößen

Oft ist eine Fehlfunktion nicht auf einen Konstruktionsfehler sondern auf Störgrößen zurückzuführen. Ergebnis einer Störgröße ist, dass das Ausgangsergebnis von dem erwarteten abweicht. Bei den Störgrößen sollte beachtet werden, dass Störgrößeneinflüsse aus den Schwankungen der Eingangsgrößen, d. h. aus den Qualitätsunterschieden der in das System eingehenden Stoff-, Energie- und/oder Signalflüsse entstehen können [100]. Die Eingangsgrößen sollten bereits bei der Konzeption durch konstruktive Anpassungen ausgeglichen werden. Die Grundlagen hierzu werden mit den Wirkprinzipien festgelegt, welche in ihrer Summe und Verkettung das Konzept des Produkts darstellen. Anzustreben ist in jedem Fall ein robustes Konzept, bei dem die Ausgangsgrößen unabhängig von der Qualität der Eingangsgrößen sind. Oft ist es so, dass die gewählte theoretische Gestalt des Konzepts durch die schwankende Werkstoffeigenschaften und den durch die Fertigung und Montage bedingten Toleranzen bezüglich Form, Lage und Oberfläche andere Eigenschaften als die vorausgesetzten ergeben [4]. Diese sollten unter Betrachtung einer hohen Zuverlässigkeit so genau wie möglich eingeschätzt werden. Wie aus den Beschreibungen zu entnehmen ist, handelt

es sich bei den Störgrößen nicht um einen Umgebungseinfluss sondern um eine funktionale Beeinflussung.

3.2.4 Einbauort

Soll eine Aussage über die Zuverlässigkeit einer Komponente getroffen werden, muss neben den Kenntnissen der Umgebungseinflüsse auch die Position der Komponente im Gesamtsystem bekannt sein. Der Einbauort charakterisiert sich durch die Position im Gesamtsystem und die dort vorherrschenden Umgebungseinflüsse. Dabei ergibt sich die Auftrittsstärke der einzelnen Einflüsse durch den Abstand von den „Verursachern“ der Umwelteinflüsse und möglichen Schutzmaßnahmen, welche im Vorfeld getroffen wurden.

Nach [100] können die Eigenschaften der objektbeeinflussten Umwelt u. a. von folgenden Einflussgrößen abhängen:

- Geometrische Verhältnisse, räumliche Lage der Komponente im System
- Massenverhältnisse von Komponente und Gesamtsystem
- Dämpfungseigenschaften, insbesondere Elastizität bzw. Dämpfung der Verbindungsstellen [123]

Der Einbauort stellt somit eine Umgebungsbedingung dar.

3.3 Recherche nach verschiedenen Einflüssen

Im Unterkapitel 3.2 sind die unterschiedlichen Definitionen von vorliegenden Einflüssen zu finden. Alleine die Definition ist aber nicht ausreichend, wenn die Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen bestimmt werden soll. Deshalb werden im Folgenden alle Belastungsarten untersucht, welche sich aus der unbeeinflussten und der objektbeeinflussten Umgebung ergeben. Zusätzlich werden noch fehlende Einflüsse und mögliche Störgrößen, welche sich auf die Zuverlässigkeit auswirken, ermittelt.

Für diese Recherche eignen sich verschiedene Quellen. Zum einen ist es die DIN 60068 [18]. Hier werden Umweltprüfungen beschrieben und dadurch Informationen zur Verfügung gestellt, welche Umwelt- bzw. Umgebungseinflüsse vorhanden sind, die untersucht werden müssen. Jedoch werden in dieser Norm nur die Einflüsse und Belastungen aufgeführt, die sich von außen ohne den Einfluss von anderen Systemen ergeben. Zum anderen wird die VDI 4005 [123], [122] untersucht, welche die Einflüsse von Umweltbedingungen auf die Zuverlässigkeit technischer Erzeugnisse erläutert. Darüber hinaus gibt es bereits eine Forschungsarbeit, welche den Zusammenhang zwischen der Zuverlässigkeit und den einzelnen Einflüsse in einer Netzstruktur aufzeigt.

In der DIN 60068 [18] sind mehrere Aspekte notiert. Es sind neben den Umgebungseinflüssen schädigende Hauptwirkungen der einzelnen Einflüsse als auch typische Schäden beschrieben (Tabelle 3.1). Wird auf die einzelnen Umgebungseinflüsse heruntergebrochen, sind überall weitere Unterteilungen wie beispielsweise Gruppen oder Schutzgrad-Kennziffern zu finden. Auf diese werden aber in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

Tabelle 3.1: Umweltprüfungen nach DIN EN 60068-1

Umweltbedingung	Hauptwirkungen	Typische Schäden
Hohe Temperatur	Wärmealterung (Oxidation, Rissbildung, Chemische Reaktion), Erweichen, Schmelzen, Sublimation, Viskositätsminderung, Verdampfen, Ausdehnung	Versagen der Isolation, Mechanisches Versagen, Verstärkte mechanische Beanspruchung, Verstärkter Verschleiß wegen Minderung der Schmierung
Niedrige Temperatur	Versprödung, Eisbildung, Viskositätserhöhung, Schrumpfung	Versagen der Isolation, Risse, Mechanisches Versagen, verstärkter Verschleiß infolge Schrumpfung
Hohe relative Luftfeuchte	Feuchte-Absorption oder -Adsorption, Quellung, Minderung der mechanischen Festigkeit	Werkstoffzerstörung, Versagen der Isolation, Mechanisches Versagen
Niedrige relative Luftfeuchte	Austrocknen, Versprödung, Minderung der mechanischen Widerstandfähigkeit, Schrumpfen	Mechanisches Versagen, Risse
Niedriger Druck	Ausdehnung, Verminderte Kühlung, Glimmentladung und Ozonbildung	Mechanisches Versagen, Undichtheiten, Elektrischer Überschlag, Überhitzung
Sonnenstrahlung	Chemische, physikalische und photochemische Reaktionen wie bspw. Oberflächenschädigung, Verfärbung, Erwärmung	Versagen der Isolation, siehe auch hohe Temperatur
Sand und Staub	Abrieb, Festfressen, Verschmutzung, Verminderte Wärmeleitfähigkeit	Erhöhter Verschleiß, elektrisches und mechanisches Versagen, Überhitzung
Korrosive Atmosphären	Chemische Reaktionen (Korrosion, Elektrolyse), Oberflächenschädigungen, Leitfähigkeitsminderung	Erhöhter Verschleiß, elektrisches und mechanisches Versagen
Wind	Stau und Sog, Ermüdung, Materialabtragung, Abrieb, Schwingungsanregung	Zusammenbruch, Mechanisches Versagen, Siehe auch Sand und Staub sowie korrosive Atmosphären

Umweltbedingung	Hauptwirkungen	Typische Schäden
Regen	Wasserabsorption, Temperaturschock, Erosion, Korrosion	Elektrisches Versagen, Rißbildung, Undichtheiten, Oberflächenschädigungen
Hagel	Verschleiß, Temperaturschock, mechanische Verformung	Zusammenbruch, Oberflächenschädigung
Schnee oder Eis	Mechanische Belastung, Wasserabsorption, Temperaturschock	Zusammenbruch, siehe auch Regen
Rascher Temperaturwechsel	Temperaturschock, Auswirkung unterschiedlicher Erwärmung	Mechanisches Versagen, Rißbildung, Schädigung von Abdichtungen
Ozon	Beschleunigte Oxidation, Versprödung, Verminderte dielektrische Festigkeit der Luft	Elektrisches und mechanisches Versagen, Haarrißbildung, Reißen
Gleichförmige Beschleunigung, Stöße, Schwingungen	Mechanische Beanspruchung, Ermüdung, Resonanzanregung	Mechanisches Versagen, Verstärkter Verschleiß beweglicher Teile, Zusammenbruch

Weitere Einflüsse sind in der VDI 4005 zu finden. Die VDI 4005 unterscheidet insgesamt vier verschiedene Einflussarten: mechanische, thermische, elektromagnetische und chemisch-biologische Einflüsse. Alle diese Einflüsse werden weiter in unterschiedliche Wirkungsarten eingeteilt. Tabelle 3.2 bis 3.5 zeigt die Einflüsse sowie deren Wirkungsarten auf.

Tabelle 3.2: Mechanische Einflüsse nach VDI 4005

Wirkungsverlauf	Wirkungsart			
	Volumenkräfte	Flächenkräfte	Linienkräfte	Punktkräfte
Konstant	Schwerkraft	Druck, Zug	Streckenlast	Einzellast
Variabel	Trägheitskraft	Reibung	Führungskräfte	Einstich
	Schock	Schlag	Schnitt	Tropfenschlag
	Prellen	Druckwelle		
	Schwingung	Geräuscheinwirkung		
		Kavitation		
		Wind, Böen		

Tabelle 3.3: Thermische Einflüsse nach VDI 4005

Wirkungs-verlauf	Wirkungsart		
	Konvektion	Leitung	Strahlung
Konstant	Raumheizung Raumkühlung	Wärmefluß	Glut Sonnenstrahlung Weltraum-Strahlung
Variabel	Bauteilkühlung	Temperaturausgleich	

Tabelle 3.4: Elektromagnetische Einflüsse nach VDI 4005

Wirkungs-verlauf	Wirkungsart		
	Leitung	Strahlung	Felder
Konstant	Gleichstrom Magnetischer Fluss	Radiowellen Licht Gamma-Strahlen Röntgenstrahlen	Polarisation
Variabel	Wechselstrom Blitz Impuls	Radiowellen Licht Gamma-Strahlen Röntgenstrahlen	Ionisation Wirbelstrom Induktion

Tabelle 3.5: Chemisch-biologische Einflüsse nach VDI 4005

Erscheinungsart	Wirkungsart				
	biologisch	fest	flüssig	gasförmig	atomar
Physikalisch	Schädlingsfraß Schimmelpilz	Reif Schnee Hagel Staub	Tau Regen Nebel Wasser	Luftfeuchte	Teilchenstrahlung
Chemisch	Fingerschweiß	Kontaktkorrosion	Salznebel		Aggressive Atmosphäre

Wie leicht zu erkennen ist, werden durch die DIN 60068 und die VDI 4005 nur Einflüsse beschrieben, aber keine Störgrößen. Diese werden aber für eine vollständige Betrachtung benötigt. Zur Abdeckung der Störgrößen, kann [85] herangezogen werden. Hier wurden Faktoren ermittelt, welche die Lebensdauer von Komponenten be-

einflussen. Anschließend wurden diese in einen Zusammenhang gebracht, um sofort auf die Lebensdauer bzw. auf die Zuverlässigkeit schließen zu können. Nach [85] ist die Zuverlässigkeit von mechanischen Komponenten direkt von der Belastung und Belastbarkeit abhängig. Es werden die folgenden Faktoren für die Belastung definiert [85]:

- Drehzahl
- Kraft
- Drehmoment
- Schwingungen
- Stöße

Die Anzahl der Belastungen sind relativ gering gehalten, da die Ausrichtung sich vor allem auf frühe Entwicklungsphasen reduziert, wo noch nicht allzu viele Informationen über die Komponente verfügbar sind. Ebenso gestaltet es sich bei der (mechanischen) Belastbarkeit. Diese beeinhalten die Einflussfaktoren, die teilweise von der Komponente abhängen:

- Temperatur
- Werkstoff
- Chemische Einflüsse
- Fertigungsverfahren
- Aufbau, Form, Gestalt

Ebenso haben einzelne Faktoren auf die Zuverlässigkeit einen Einfluss, die nicht direkt zur Belastung und zur Belastbarkeit zugeordnet werden kann. Zur genauen Untersuchung müssen diese aber mitberücksichtigt werden. Diese Faktoren sind im Einzelnen:

- Verbindungsaufbau
- Kraftübertragung
- Werkstoffprüfung
- Bedienfehler
- Montagefehler

All diese Faktoren wurden in eine Netzstruktur gefasst, damit für eine neue Komponente durch die Verwendung von Algorithmen eine Aussage über die Zuverlässigkeit getroffen werden kann (Bild 3.3). Für eine bessere Verständlichkeit sind einige der Faktoren zusammengefasst worden. Beispielsweise ist die Reibung als Ergebnis der Belastung der Komponente, der Kraftübertragung und der Werkstoffpaarung hinzugenommen worden. Ebenso wurde bei einigen aufgestellten Einflussfaktoren eine weitere Unterteilung vorgenommen. Alleine durch die von außen wirkende Temperatur kann keine Aussage über den Zuverlässigkeitseinfluss getroffen werden. Es wird zusätzlich noch die Eigenschaften des Werkstoffs benötigt, um so die Temperaturbeständigkeit zu stimmen. Genauso verhält es sich bei den Schwingungen und den chemischen Einflüssen.

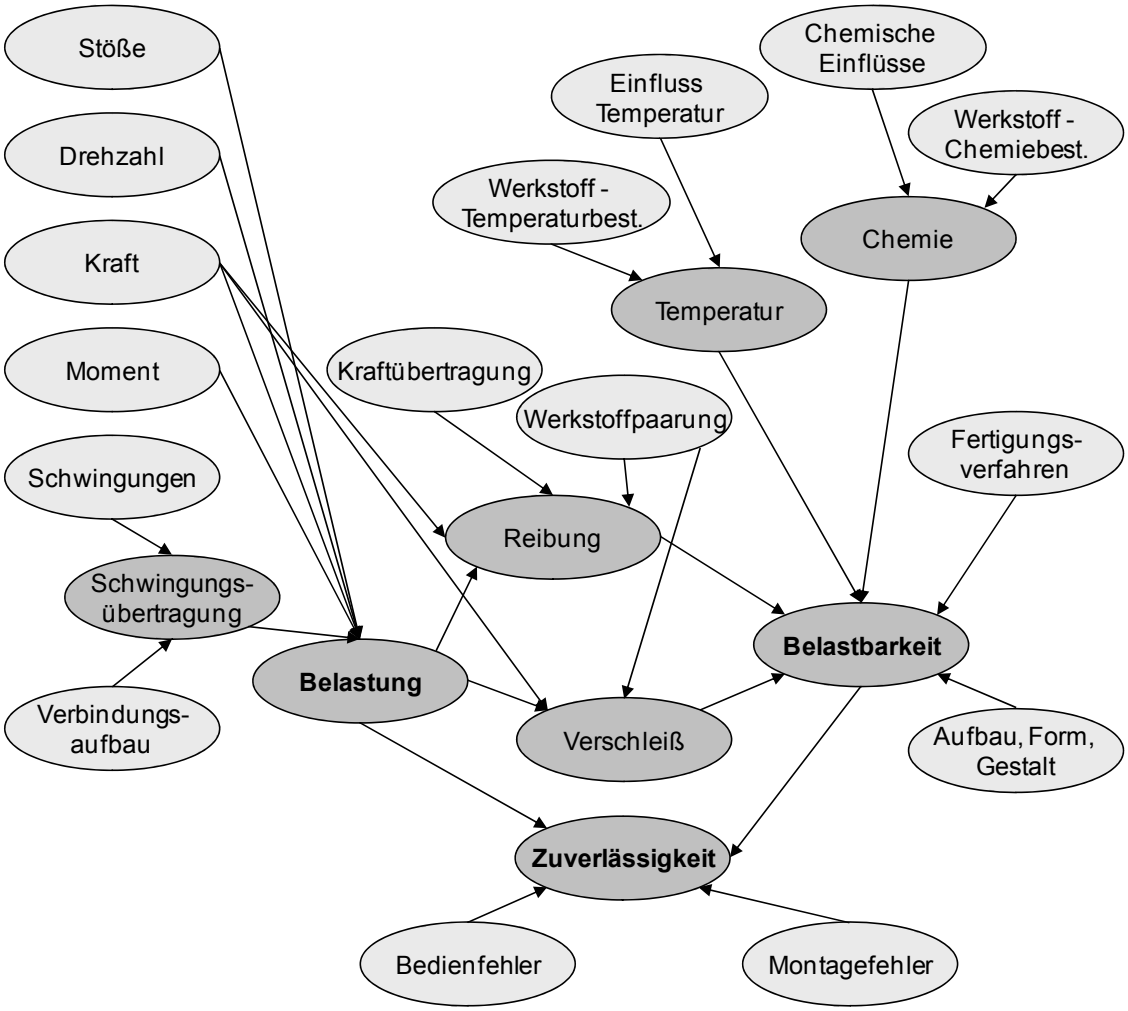


Bild 3.3: Darstellung mechanischer Einflussfaktoren auf die Zuverlässigkeit [5], [85]

3.4 Anforderungen an die zu erstellende Methode

In den vorigen Unterkapiteln sind wichtige Aspekte bezüglich der zu erstellenden Methode zur Bewertung der Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen angesprochen worden. Diese reichen von verschiedenen Definitionen von Einflüssen, Beschreibungen von Einflüssen bis hin zu der Tatsache, dass die Wechselwirkungen nicht unabhängig von den Komponenten beschrieben, sondern anhand von Komponentenpaarungen ermittelt werden.

Neben der Festlegung einer Beschreibungsart von Wechselwirkungen müssen weitere Anforderungen aufgestellt werden, wenn eine neue und umfangreiche Methode zur Bestimmung der Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen erstellt werden soll. Auch muss geklärt werden welche Informationen benötigt werden, bzw. welche Informationen überhaupt zur Verfügung stehen. Im Folgenden sind die wichtigsten Anforderungen aufgezeigt:

- Vollständige Ermittlung, Bestimmung und Bewertung der Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen
- Betrachtung von Komponentenpaarungen
- Berücksichtigung aller Arten von Einflüssen
- Einsetzbar in frühen Entwicklungsphasen
- Einfache, unkomplizierte Darstellung
- Einfach handhabbare Durchführung der Bewertung
- Unterstützung der Entwickler, so dass diese unmittelbar mögliche Konstruktionsherausforderungen aufgezeigt bekommen
- Softwareunterstützung

Des Weiteren ist es wünschenswert, wenn die Methode zur Bewertung der Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen folgende Aspekte betrachtet:

- Einbindung in bekannte und derzeit angewandte Entwicklungsmethoden
- Herauslesen von relevanten Informationen über die einzelnen Komponenten
- Unterstützung des Toleranzkettendesigns
- Aufzeigen kritischer Pfade, d. h. welche Komponentenketten müssen näher betrachtet werden

Um all die Anforderungen und Wünsche zu erfüllen, muss nun überprüft werden, ob mit den derzeit vorhandenen Notations- und Zuverlässigkeitsanalysen die Wechselwirkungen ausreichend beschrieben werden können.

4 Analyse der Notationsmöglichkeiten von Wechselwirkungen komplexer Systeme

Bei der Analyse von Wechselwirkungen spielen die Notationsmöglichkeiten eine große Rolle. Es sollen nicht nur Wechselwirkungen identifiziert werden, sondern diese sollen zum einen sinnvoll notiert werden können und zum anderen sollen anschließend die notierten Wechselwirkungen einfach lesbar bzw. verständlich sein. Im Folgenden werden verschiedene Arten der Notation vorgestellt. Diese stammen aus unterschiedlichen Bereichen, nämlich aus dem IT-Bereich, der Mathematik sowie aus dem Szenario-Management.

4.1 Schichtenmodell

Das Schichtenmodell, welches speziell für mechatronische Systeme anwendbar ist, basiert auf einem Ansatz von Hung [66]. Dieses wurde angepasst, um Wechselwirkungen in und zwischen mechatronischen Systemen zu modellieren. Nach [118] sind insgesamt drei abstrakte Arten von Wechselwirkungen berücksichtigt: Stofffluss, Leistungsfluss und Informationsfluss (Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1: Arten von Wechselwirkungen mit Beispielen

Art	Beispiel
Stofffluss	Transport von Körpern, Gasen oder Flüssigkeiten, z. B. in einer Wasserkühlung oder einer hydraulischen Bremse
Leistungsfluss	Druck, Biegung, Scherung, Wandlung elektrische in mechanische Leistung, z. B. mittels eines Elektromotors
Informationsfluss	Methodenaufrufe, Datenaustausch zwischen Prozessen, Signale zwischen elektronischen Bauteilen

Der Stofffluss ergibt sich aus dem Aufbau der Mechanik zum Transport des jeweiligen Stoffes zwischen Bauteilen. Ebenso wie der Stofffluss bedingt der Aufbau eines Systems den Leistungsfluss. Dieser tritt aber nicht nur bei mechanischen Systemen auf, sondern er ergibt sich auch aus dem Aufbau von elektronischen Systemen. Der Leistungsfluss gehorcht physikalischen Naturgesetzen und ist damit zumindest theoretisch berechen- oder simulierbar, etwa durch den Einsatz numerischer Verfahren wie der Finite-Elemente-Methode (FEM). Dagegen ergibt sich der Informationsfluss aus der Ansteuerung von elektro-mechanischen Bauteilen sowie dem Aufbau von Elektronik und Software. Im Gegensatz zu den anderen beiden Arten von Wechselwirkungen ist die Information selbst keine physikalische Größe, wird aber durch physikalische Größen, etwa elektrische Signale, übertragen.

Wird der Einfluss von Wechselwirkungen auf die Zuverlässigkeit eines Systems untersucht, so kann sich jede der drei Arten negativ auf die korrekte Funktionalität und damit auf die Zuverlässigkeit eines Systems auswirken. Gemäß der Spezifikation ei-

nes Systems muss zu einem gegebenen Zeitpunkt der jeweils geforderte Stoff-, Leistungs- und Informationsfluss vorliegen. Es tritt ein Fehlverhalten auf, wenn eine dieser Anforderungen verletzt wird. Zwar ist die Zuverlässigkeit für bereits vorhandene Teilsysteme oder Systeme teilweise bestimmbar, die Zuverlässigkeit der Wechselwirkungen lassen sich aber schwer ermitteln. Für mechanische, elektro-mechanische und einfache elektronische Systeme lassen sich Klassen von vergleichbaren Systemen bilden, innerhalb derer sich empirisch ermittelte Aussagen zur Zuverlässigkeit übertragen lassen. Beispiel hierfür sind Lager, für die sich die Zuverlässigkeit aufgrund bestimmter Kenngrößen und früherer Experimente mit einer guten Aussagekraft frühzeitig bewerten lässt. Im Gegensatz dazu ist es für komplexe elektronische Schaltungen und Softwaresysteme schwierig, aus früheren Daten auf die Zuverlässigkeit in einem neu zu entwickelnden System zu schließen. Ursachen hierfür sind die hohe Anzahl von Einflussgrößen sowie die hohe Veränderlichkeit, sodass bei einer Übertragung von System zu System Veränderungen beachtet und in die Bewertung mit einbezogen werden müssen. Ein Beispiel hierfür ist die hohe Anzahl möglicher Konfigurationen einer Schaltung in einem FPGA.

Das mechatronische Schichtenmodell wurde so konzipiert, dass sich ein System oder Teilsystem aus verschiedenen, miteinander benachbarten Schichten zusammensetzt. Bild 4.1 zeigt die Basisschichten, welche nach oben durch weitere Softwareschichten ergänzt werden können. Ein Teilsystem muss nicht notwendigerweise alle unteren Schichten enthalten, sondern kann sich beispielsweise auch nur aus einer Mechanikschicht zusammensetzen. Teilsysteme können über physikalische Verbindungen miteinander verbunden werden, etwa durch mechanische Kopplung oder den Austausch elektrischer Signale.

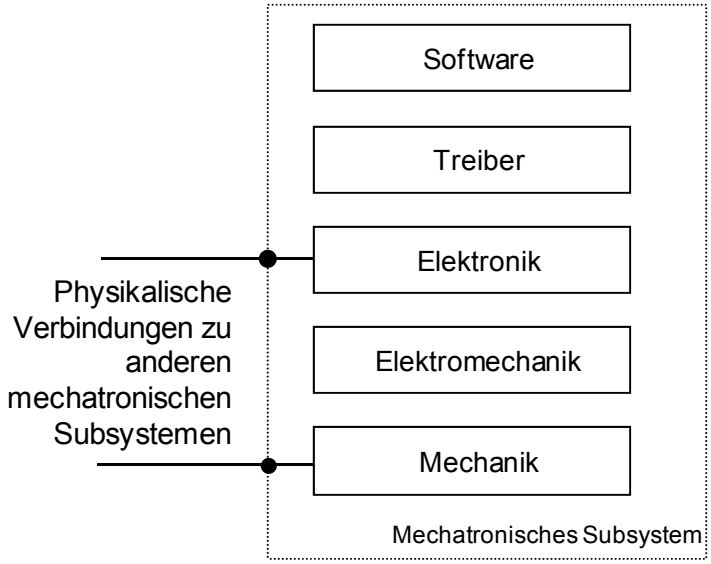


Bild 4.1: Schichtenmodell mechatronischer Teilsysteme oder Systeme

Verbindungen zwischen Teilsystemen können im vorgestellten Schichtenmodell mit der nächsthöheren und der nächsttieferen Schicht sowie denselben Schichten in ande-

ren Teilsystemen bestehen (Bild 4.2). Darüber hinaus gibt es auch Wechselwirkungen, die nicht über Verbindungen, sondern über den freien Raum wirken, beispielsweise in Form elektromagnetischer Strahlung. Diese können sowohl von einer Komponente innerhalb eines Systems ausgehen oder von außen auf alle Komponenten des Systems gleichermaßen einwirken.

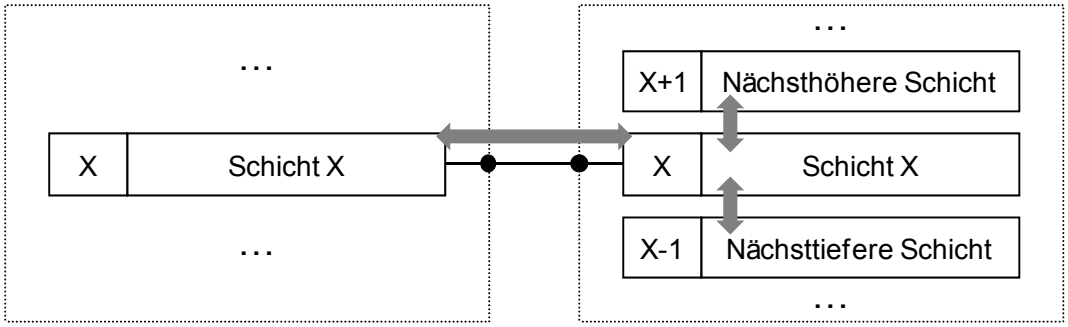


Bild 4.2: Mögliche Verbindungen zwischen den Schichten

Auf Grundlage des Modells der Wechselwirkungen sind nun mögliche Fehlerzusammenhänge in mechatronischen Systemen zu modellieren und zu analysieren. Die vorliegende Darstellung kann noch weiter spezifiziert werden. In diesem Unterkapitel sind die abstrakten Arten der Wechselwirkungen beschrieben. Diese werden mit in das Schichtenmodell eingebaut, wie in Bild 4.3 zu sehen ist [5]. Zwischen der Mechanik und der Elektromechanik ist Material- und Energiefluss zu finden, die anderen Schichten tauschen Informationen aus.

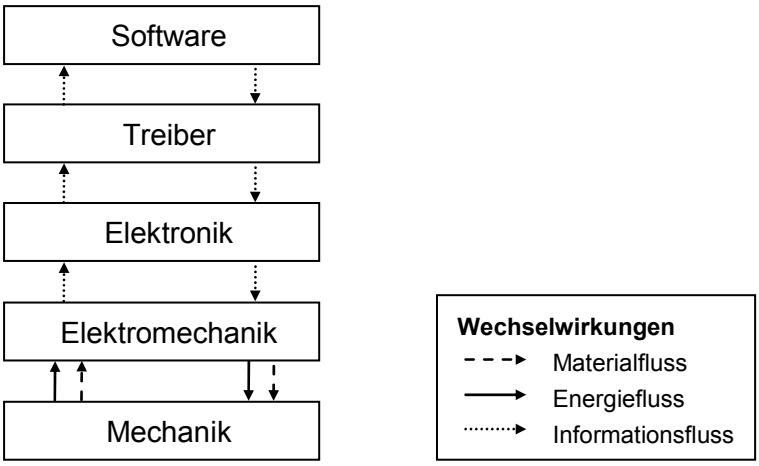


Bild 4.3: Schichtenmodell und dessen Wechselwirkungen

4.2 Darstellung von Wechselwirkungen durch eine Matrix

Das Schichtenmodell kann den Aufbau eines komplexen Systems sowie die Interaktionen der einzelnen Schichten untereinander und über die Systemgrenzen darstellen, jedoch können die Wechselwirkungen einzelner Komponenten nicht untersucht werden. Um dies abzubilden, muss eine andere Möglichkeit gesucht werden. Hierfür bietet sich eine Matrixstruktur an. Laut [9] eignet sich eine Matrix besonders gut, wenn zwei verschiedene Sichten betrachtet werden. In dem vorliegenden Fall sind dies die verschiedenen Komponenten eines komplexen Systems. Jedoch ist dies nicht der einzige Grund, warum die Darstellung mit Hilfe einer Matrix sinnvoll ist. Es sind noch weitere Vorteile zu nennen [9]:

- Die Kompaktheit der Informationsdarstellung
- Die Möglichkeit einer systematischen Abbildung von Elementen eines Systems
- eine klare und lesbare Darstellung unabhängig von der Matrixgröße

In der Literatur sind verschiedene Wechselwirkungsansätze zu finden, welche die Darstellung einer Matrix nutzen. Diese Wechselwirkungsansätze unterscheiden sich zum einen durch den Einsatzzweck und –ort sowie zum anderen durch die Erweiterungen. Eines haben aber alle gemeinsam: die Grundform der Matrix ist immer identisch. Bild 4.4 zeigt deren prinzipielles Aussehen auf.

		Komponenten									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Komponenten	1							X			
	2					X				X	
	3										
	4		X					X			
	5						X				
	6										X
	7	X			X						
	8										
	9			X		X					
	10							X	X		

Bild 4.4: Allgemeine Matrix-Darstellung von Wechselwirkungen

Die wichtigsten Varianten der Matrixdarstellungen sind:

- Konsistenzanalyse
- Einflussanalyse
- Design Structure Matrix
- Cross Impact Analyse

Im Folgenden werden diese Varianten kurz erklärt. Darüber hinaus gibt es noch weitere Matrixdarstellungen. Hierfür wird auf [33] verwiesen.

4.2.1 Konsistenzanalyse

Bei der Konsistenzmatrix wird die Matrix (siehe Bild 4.4) nur einseitig durchgeführt, da es sich um nicht gerichtete Beziehungen handelt. Aus diesem Grund ist die Matrix nur unterhalb der Diagonalen ausgefüllt. Den Ursprung findet die Konsistenzanalyse im Szenario-Management [33]. Dabei symbolisiert die Konsistenz, d. h. die Widerspruchsfreiheit, die Glaubwürdigkeit von Zukunftsbildern. Bei der Konsistenzanalyse werden folgende Fragen gestellt: Wie vertragen sich die einzelnen – wie es im Szenario-Management üblicherweise heißt – Projektionen gegenseitig? Verträgt sich die erste Projektion mit der zweiten? Widerspricht sie sich mit der dritten? Als Grundlage wird eine fünfstufige Bewertung gewählt [33].

Bewertungen:

1 = totale Inkonsistenz, d. h die beiden Projektionen schließen einander absolut aus

2 = partielle Konsistenz, d. h. sie widersprechen sich

3 = neutral oder unabhängig voneinander, d. h. sie beeinflussen sich nicht

4 = gegenseitige Begünstigung

5 = sehr starke gegenseitige Unterstützung, d. h. aufgrund des Auftretens kann mit dem Auftreten des anderen gerechnet werden

Für die weitere Auswertung sind nur die Paarungen interessant, welche einen Wert größer als eins besitzen. In Bild 4.5 ist das Beispiel einer Konsistenzanalyse zu finden. Hier wird der Zusammenhang zwischen Technologiearten thematisiert. Ein Aspekt ist der Zusammenhang zwischen der Akzeptanz der Technologie und der Arbeitslosenquote. Aus der Konsistenzanalysenmatrix kann herausgelesen werden, dass sich ein Erfolg der Technologieakzeptanz und eine höhere Arbeitslosenquote nicht beeinflussen. In der Abbildung ist dies durch die Ziffer „3“ gekennzeichnet. Zwischen der Technologieakzeptanz und der Arbeitslosigkeit gibt es die folgende Zusammenhänge: Falls die Technologieakzeptanz nicht gelingt, bedeutet dies, dass es zu einer höheren Arbeitslosigkeit kommen wird. Eine starke gegenseitige Unterstützung gibt es zwischen dem Wachstum des Bruttonationaleinkommen und einer niedrigeren Arbeitslosenquote, was durch die Ziffer „5“ ausgedrückt wird. Auf diese Weise können alle weiteren Projektionen herausgelesen werden.

	1		2		3		4	
	a	b	a	b	a	b	a	b
1. Technologieart								
a) Innovation	X							
b) Tradition								
2. Akzeptanz								
a) Erfolg	4	3	X					
b) Misserfolg	4	3						
3. Bruttonationaleinkommen								
a) Wachstum	4	2	5	3	X			
b) Rückgang	2	3	3	4				
4. Arbeitslosenquote								
a) höher	4	2	3	4	3	5	X	
b) niedrig	2	3	4	3	5	2		

Bild 4.5: Konsistenzanalyse am Beispiel von Technologiearten

4.2.2 Einflussanalyse

Ebenfalls aus dem Bereich des Szenario-Managements stammt die Einflussanalyse. Mit deren Hilfe soll die Bedeutung einzelner Einflussfaktoren für das Szenariofeld und damit ihre Eignung als Schlüsselfaktoren, d. h. als wichtige Faktoren ermittelt werden. Es können zwei Formen der Einflussanalyse unterschieden werden:

- Bei der Interdependenzanalyse sind alle Einflussfaktoren gleichwertig. Es werden die Einflussfaktoren zu Schlüsselfaktoren, die das gesamte Szenariofeld am besten charakterisieren.
- Bei der Wirkungsanalyse nehmen die Lenkungsgrößen, d. h. Faktoren, welche zur Erreichung eines Ziels aktiv ausgeschaltet werden können, eine herausgehobene Stellung ein, weil die Wirkung des Szenariofeldes auf diese Größen ermittelt wird.

Beide Formen greifen auf eine Einflussmatrix zurück, welche von J. C. Dupperin und Michel Godet 1973 [33] entwickelt wurde. Aufgebaut ist die Einflussmatrix wie in Bild 4.6 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass eine Richtungsabhängigkeit der einzelnen Paarungen vorliegt. Ursachen werden in die Zeilen eingetragen und Wirkungen kommen in die Spalten. Die Bewertung ist nicht festgelegt, jedoch ist sie auf alle Fälle mehrstufig. Ein geringer Wert bedeutet, dass ein geringer Einfluss zwischen der Paarung vorhanden ist, ein hoher Wert ist gleichbedeutend mit einem hohen Einfluss. Insgesamt ist die Matrix in vier Quadranten eingeteilt (Bild 3.6). Im 1. Quadraten (links oben) sind die Einflüsse, die zwischen den Lenkungsgrößen herrschen, notiert. Der 2. Quadrant (rechts oben) umfasst Einflüsse der Lenkungsgrößen auf die Umfeldgrößen. Dabei stellen die Umfeldgrößen nicht beeinflussbare Aspekte dar. Quadrant 3 (links unten) beschreibt die Umfeldgrößeneinflüsse auf die Lenkungsgrößen, im 4. Quadranten sind die Einflüsse zwischen den Umfeldgrößen zu finden [11].

Einfluß von ↓ auf →		Lenkungsgrößen							Umfeldgrößen								AS
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
Lenkungsgrößen	Einflussfaktor A																0
	Einflussfaktor B												1			3	4
	Einflussfaktor C						2			3							5
	Einflussfaktor D	1												1	1		3
	Einflussfaktor E			2							2						4
	Einflussfaktor F		1										2				3
	Einflussfaktor G			3							3	2					8
Umfeldgrößen	Einflussfaktor H												1			2	3
	Einflussfaktor I										2				3		5
	Einflussfaktor J			1													1
	Einflussfaktor K		2			2	1				3			1	2		11
	Einflussfaktor L								2							3	5
	Einflussfaktor M				3		2				1				2		8
	Einflussfaktor N					1				2		2					5
	Einflussfaktor O												3	2			5
PS		1	3	6	3	3	5	0	2	5	11	4	7	4	8	8	

1. Quadrant
2. Quadrant
3. Quadrant
4. Quadrant

Bild 4.6: Einflussanalyse

Als weiterer Aspekt der Einflussmatrix wird die sogenannte Aktivsumme (AS) und die Passivsumme (PS) berechnet. Dies bedeutet, dass bei der Einflussmatrix nicht nur untersucht wird wie ein Faktor auf andere Faktoren wirkt, sondern auch wie der Faktor von anderen Faktoren beeinflusst wird. Hierbei gibt die Aktivsumme den Einfluss eines Faktors auf das Gesamtsystem wieder. Sie wird durch die Addition der einzelnen Zeilenwerte berechnet und zeigt die Stärke auf, mit der ein Element insgesamt auf alle anderen Elemente einwirkt. Je größer der Einfluss des Faktors auf das System ist, umso größer wird die Aktivsumme. Im Gegensatz zur Aktivsumme wird von der Passivsumme die Frage beantwortet, wie stark ein Faktor vom Gesamtsystem beeinflusst wird. Berechnet wird die Passivsumme durch die Addition der Spaltenwerte. Auch hier gilt, je stärker der Einfluss, desto größer ist der Wert der Passivsumme. In Bild 4.6 sind die Aktiv- und Passivsumme abgebildet. Hier ist zu sehen, dass die Komponente J den größten passiven Einfluss erfährt, während die Komponente K den größten Einfluss aller Komponenten ausübt.

Die Aktiv- und die Passivsumme können zur besseren Übersichtlichkeit und Verständlichkeit durch das sogenannte Direct System Grid (DSG) aufgezeigt werden. Das DSG ist ein kartesisches Koordinatensystem, bei dem die Aktivsumme als Abszisse und die Passivsumme als Ordinate aufgetragen wird. Die Begrenzungen der einzelnen Achsen sind von Anzahl der Faktoren der Matrix abhängig. Insgesamt wird das Koordinatensystem in vier Bereiche aufgeteilt:

- Aktiver Bereich: Faktoren in diesem Bereich haben starken Einfluss auf andere Faktoren, werden aber von ihnen nur wenig beeinflusst.

- Ambivalenter Bereich: Diese Faktoren beeinflussen andere Faktoren sehr stark und werden stark beeinflusst. Eine hohe Passivität sowie Aktivität zeichnet diesen Bereich aus.
- Puffernder Bereich: Die Faktoren, welche in diesem Bereich zu finden sind, werden wenig beeinflusst und beeinflussen andere auch wenig. Sie besitzen eine relativ geringe Passivität und Aktivität.
- Passiver Bereich: Faktoren im passiven Bereich werden stark beeinflusst aber beeinflussen selbst wenig. Diese Faktoren haben eine relativ hohe Passivität bei einer geringen Aktivität.

In Bild 4.7 ist exemplarisch ein Direct System Grid abgebildet. Hierbei bildet das Beispielssystem aus Bild 4.6 die Grundlage. Auffällig in diesem Beispiel ist, dass viele der Einflüsse nicht stark ausgeprägt sind. Dadurch sind auch die Abgrenzungen zwischen den einzelnen Bereichen leicht verschoben. Dadurch ist selbst der Einfluss I, der eine Aktiv- und Passivsumme von jeweils 5 aufweist, dem ambivalenten Bereich zuzuordnen. Die Abgrenzungen werden in Abhängigkeiten der Bewertungen von Passiv- und Aktivsumme sowie aus der Anzahl der Einflüsse berechnet. Für weiterführende Informationen zur Berechnung der Grenzen der einzelnen Bereiche wird auf [33] verwiesen.

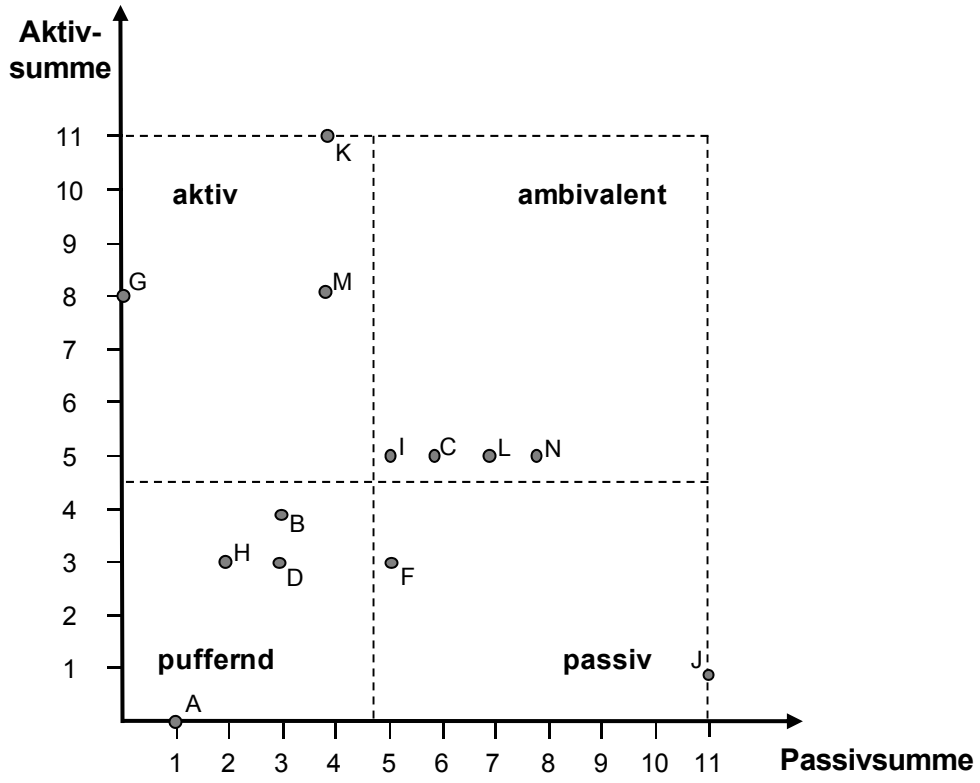


Bild 4.7: Direct System Grid

4.2.3 Design Structure Matrix (DSM)

Die Design Structure Matrix (DSM) wurde im Jahre 1960 von Don Steward entwickelt und eingeführt [54]. Hauptsächlich wird die DSM im Projektmanagement eingesetzt. Die Design Strukture Matrix kommt in vielen verschiedenen Bereichen zum Einsatz, so dass dafür verschiedene Varianten vorhanden sind. Die DSMs wurden je nach Aufgabenbereich und Einsatzgebiet angepasst und für die Problemstellung optimiert. Dabei haben sich, wie in Bild 4.8 zu sehen, zwei Arten mit jeweils zwei Untergruppen durchgesetzt. Der Aufbau aller Matrizen basiert auf der gezeigten Darstellung aus Bild 4.4. Im Folgenden werden die einzelnen Arten und ihre Besonderheiten näher erläutert.

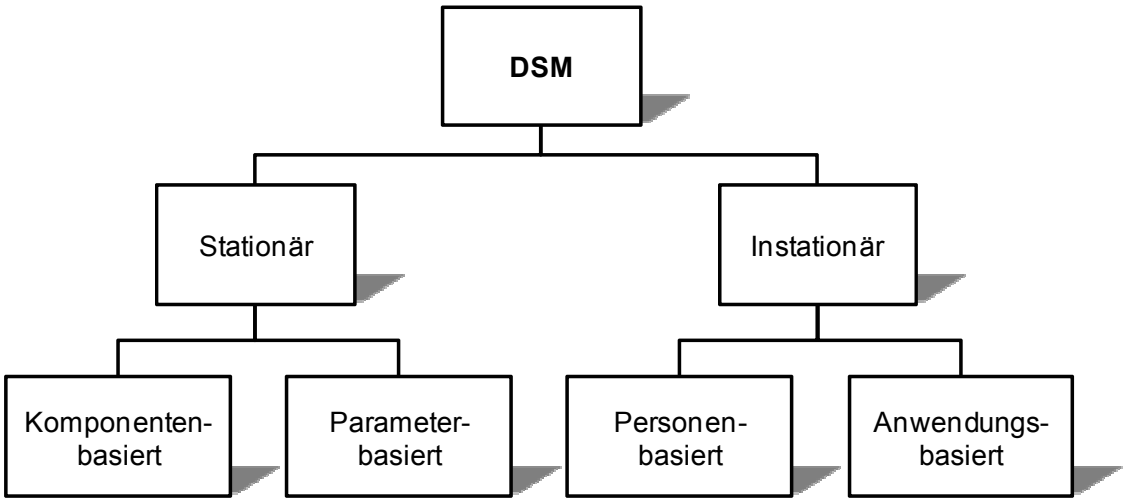


Bild 4.8: Untergliederung der Design Structure Matrix

Komponentenbasierte DSM

Eine komponentenbasierte DSM beschreibt die Wechselwirkungen einzelner Elemente in einem meist komplexen Gesamtsystem. Sie ermöglicht so eine Übersicht über das System und vereinfacht dadurch Innovationen. Das Erstellen einer solchen DSM wird im Allgemeinen in drei Schritte unterteilt:

- Zerlegung des Gesamtsystems in einzelne Elemente
- Verstehen und Dokumentieren der Interaktionen zwischen den Elementen
- Analyse der möglichen Zusammensetzung der Elemente durch „Clustering“

Dabei können je nach Einsatzgebiet verschiedene Arten von Wechselwirkungen dargelegt werden. Am häufigsten wird unterschieden zwischen den folgenden vier Beeinflussungsarten: Raum, Energie, Information und Material, wobei bei Bedarf auch zum Beispiel elektrische Wechselwirkungen oder Vibrationen betrachtet werden können. Eine einzelne DSM kann also mehrere Arten von Interaktionen darstellen. Um das Verständnis des Systems noch weiter zu vereinfachen werden die Wechselwirkungen häufig noch nach ihrer Relevanz bewertet. Dabei ersetzt man in der DSM die Kreuze durch Zahlen (z. B. von -2 für irrelevant bis +2 für sehr relevant) und verdeutlicht so,

welche Wechselwirkungen mehr und welche weniger relevant sind. Ist die DSM erstellt folgt die Analyse. Hierzu wird das sogenannte „Clustering“ verwendet. Dabei werden die Reihen und Spalten so angeordnet, dass „Cluster“ entstehen, welche jeweils zusammenhängende Baugruppen verdeutlichen. Wird beispielsweise die DSM, welche ein Klimakontrollsystem darstellt, neu angeordnet, werden drei Baugruppen erkannt, welche durch verschiedene Grautöne gekennzeichnet sind. Diese sind wiederum miteinander verknüpft (Bild 4.9).

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Sensor	A	A	X	X			X						X		
Aktoren	B	X	B		X							X	X		
Batterie	C		X	C			X						X		
Gebläsemotor	D	X			D										
Verdampfergehäuse	E					E	X								
Verdampfer	F			X		X	F								
Kompressor	G							G							
Kühler	H								H						
Motorlüfter	I									I					
Kondensator	J										J				
Gebläsebedienelemente	K		X									K			
Bedienelemente	L	X	X	X									L		
Heizkörper	M													M	
Heizungsschlauch	N														N

Clustering

		H	I	M	N	J	G	E	F	C	L	A	B	K	D
Kühler	H	H													
Motorlüfter	I		I												
Heizkörper	M			M											
Heizungsschlauch	N				N										
Kondensator	J					J									
Kompressor	G						G								
Verdampfergehäuse	E							E	x						
Verdampfer	F							x	F	x					
Batterie	C								x	C	x		x		
Bedienelemente	L									x	L	x	x		
Sensor	A								x	x	x	A	x		
Aktoren	B										x	x	B	x	x
Gebläsebedienelemente	K												x	K	
Gebläsemotor	D												x		D

Bild 4.9: Clustering der komponentenbasierten DSM am Beispiel Klimakontrollgerät

Dies erlaubt neue Möglichkeiten der Optimierung. Während die Wechselwirkungen innerhalb eines „Clusters“ versucht werden zu maximieren, werden die Wechselwirkungen zwischen den „Clustern“ minimiert [54]. Dadurch werden die Baugruppen unabhängiger voneinander und können somit auch unabhängiger voneinander angeordnet werden. Dies erlaubt völlig neue Systemarchitekturen und schafft Raum für Innovationen. Da das „Clustering“ bei größeren oder sogar 3-dimensionalen Matrizen allerdings meist sehr kompliziert ist, werden „Clustering“-Algorithmen verwendet, welche bei der Neuanordnung der Spalten und Reihen behilflich sind. Je nach Aufgabenstellung, Art der Optimierung oder geforderter Funktion bieten sich zahlreiche Algorithmen an (z. B. Diagonalabstandsminimierung). Der Algorithmus soll sowohl zur Vorbeugung negativer als auch zur Sicherung positiver Wechselbeziehungen beitragen, was eine Verbesserung des Systems zur Folge hat.

Parameterbasierte DSM

Die parameterbasierte DSM wird bei der Analyse von Systemarchitekturen genutzt, welche auf Beziehungen zwischen Parametern aufbauen. Sie ähnelt der komponentenbasierten DSM. Erstellt wird sie durch eine genaue Definition der Systemkomponenten und ihrer gegenseitigen Wechselwirkungen. Bei der Analyse helfen eine systematische Klassifizierung und ein Bewertungsschema zum Festlegen der Wechselwirkungsarten zwischen den Systemelementen und ihrer Bedeutung. Die Wechselwirkungsarten und das Bewertungsschema entsprechen dabei im Allgemeinen denen der komponentenbasierten DSM. Es werden geeignete Algorithmen eingesetzt, um die Parameterbeziehungen neu anzuordnen. Ziel ist es durch den Algorithmus alle Verbindungen oberhalb der Diagonalen zu eliminieren. Bekannt ist dieses Vorgehen unter dem Namen Partitionierung bzw. Sequenzierung. Hierin unterscheidet sich die parameterbasierte DSM von der komponentenbasierten DSM. Letztere versucht die Wechselwirkungen zu clustern. Ein weiterführendes Beispiel ist in [14], [54] zu finden.

Personenbasierte DSM

Visuell unterscheiden sich die personen- oder auch teambasierte DSM nur wenig von der komponentenbasierten DSM, allerdings ist ihr Einsatzgebiet ein anderes. Teambasierte DSM werden bei der Analyse von Organisationen, Projekten und Firmen verwendet. Dabei wird die Organisation zuerst in Einzelelemente, d. h. Teams unterteilt und danach werden die Interaktionen zwischen den Teams dokumentiert. Bei den dargestellten Wechselbeziehungen zwischen den Teams handelt es sich um Kommunikationsfluss, welcher nach verschiedenen Kriterien bewertet werden kann: Grad der Ausführlichkeit (wenig bis viel), Häufigkeit (selten bis häufig), Richtung (einzelne bis mehrere), Timing (früh bis spät). Letztendlich wird der gesamte Aufbau der Organisation durch eine geeignete Analyse der Matrix optimiert. Als Analysemethode kommt wie bei der komponentenbasierten DSM das „Clustering“ zum Einsatz, welches die Zusammenhänge der einzelnen Elemente schnell und einfach verdeutlicht. Die „Cluster“ zeigen, welche Teams oder Personen bei ihrer Arbeit eng miteinander verknüpft sind und welche eher unabhängig von anderen sind, und dient als Grundgerüst beim Aufbau der Organisation.

Anwendungsbasierte DSM

Anwendungsbasierte DSM beschreiben den Ablauf eines Projekts oder Prozesses und geben Auskunft darüber, in welcher Reihenfolge die einzelnen Aufgaben ausgeführt werden müssen bzw. können. Hierbei gibt es drei verschiedene Arten, wie Aufgaben miteinander verknüpft sein können. In Abb. 4.10 ist ein Beispiel für eine anwendungsbasierte DSM zu sehen. Sind Aufgaben unabhängig von anderen können sie gleichzeitig mit anderen (simultan/parallel) ausgeführt werden (z. B. Aufgaben 1 und 2 in Bild 4.10). Die zweite Art ist, dass ein sequentieller Informationstransfer stattfindet, die Aufgaben also von einer anderen abhängig sind (z. B. Aufgaben 3, 4 und 5 in Bild 4.10). Solche Aufgaben müssen nacheinander bearbeitet werden. Zuletzt besteht noch die Möglichkeit, dass sich die Aufgaben gegenseitig beeinflussen (z. B. Aufgabe 6 und 7 in Bild 4.10), sogenannte verflochtene oder gekoppelte Aufgaben. Um sie zu erledigen benötigt es mehrere iterative Schritte, so dass sie zum Teil sehr aufwändig sind. Deshalb wird versucht dies zu vermeiden. Zur Optimierung der Matrix wird das Sequenzieren, d. h. die Vermeidung der Kreuze oberhalb der Diagonalen angewandt Weiterführende Informationen zu diesem Thema sind in [14] zu finden.

		Aufgaben							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Aufgaben	1	1							
	2		2						
	3		x	3				x	
	4	x	x	x	4				
	5		x		x	5	x	x	
	6		x				6	x	x
	7			x			x	7	
	8					x	x		8

Bild 4.10: Anwendungsbasierte DSM

4.2.4 Cross Impact Analyse (CIA)

Ebenso wie die Konsistenzanalyse und die Einflussanalyse stammt die Cross Impact Analyse aus dem Bereich des Szenario Managements. Normalerweise sind bei den Matrixbetrachtungen die Wahrscheinlichkeiten bzw. die Bewertungen unabhängig voneinander. Dies kann aber nicht immer angenommen werden. Mit Hilfe einer Cross Impact Analyse können auch die sogenannten Kreuzeinflüsse (Cross Impacts) mit berücksichtigt werden. Darunter werden die Beziehungen verstanden, die zwischen den Wahrscheinlichkeiten bestehen.

Hierzu gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie die Einflüsse berechnet werden können [33]:

- Korrelierte Cross Impact Analyse (bedingte oder gemeinsame Wahrscheinlichkeit): Bei der bedingten Wahrscheinlichkeit wird bspw. die Wahrscheinlichkeit angege-

ben, dass im Jahre 2005 die Mobilität gesunken ist, falls im Jahre 2005 der Ölpreis steigt. Die gemeinsame Wahrscheinlichkeit ist nicht gerichtet. Sie gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass im Jahre 2005 sowohl die Mobilität gesunken als auch der Ölpreis gestiegen ist.

- Kausal bedingte bzw. statisch-kausale Cross Impact Analyse: Dieses Verfahren basiert auf den kausal bedingten Wahrscheinlichkeiten, die sich auf einen Zukunftshorizont beziehen. Hierzu ist die Eintrittsrangfolge der Annahmen festzulegen. Beispielsweise wird sie verwendet wenn die Wahrscheinlichkeit angegeben wird, dass die Mobilität sinkt, wenn zuvor der Ölpreis stark gestiegen ist.
- Dynamisch kausale Cross Impact Analyse: Hier werden mehrere Zeithorizonte miteinbezogen.

		Tom			Lisa			Paul			Katja			Max		
		+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-
Tom	+				0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1
	0				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-				0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	1
Lisa	+	0	0	0				0	0	0	0	0	0	2	0	-2
	0	0	0	0				0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-	0	0	0				0	0	0	0	0	0	-2	0	2
Paul	+	0	0	0	0	0	0				2	0	-2	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0				0	0	0	0	0	0
	-	0	0	0	0	0	0				-2	0	2	0	0	0
Katja	+	3	0	-3	2	0	-2	2	0	-2				0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				0	0	0
	-	-3	0	3	0	0	0	-2	0	2				0	0	0
Max	+	2	0	-2	1	0	-1	-3	0	3	0	0	0			
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	-	-2	0	2	-1	0	1	3	0	-3	0	0	0			

Bild 4.11: Cross Impact Analyse

Anhand eines einfachen Beispiels wird die Cross-Impact-Analyse näher erläutert. Die Cross-Impact-Analyse der Freunde Tom, Lisa, Paul, Katja und Max soll aufzeigen, wie die einzelnen Personen sich gegenseitig in ihren Antworten beeinflussen lassen. Bild 4.11 zeigt dieses anhand einer Matrix auf. Wie zu sehen ist, ist die Matrix komplexer aufgebaut als die zuvor beschriebenen. Dies kommt daher, da die Kreuzeinflüsse mitberücksichtigt werden. In dem vorliegenden Fall reichen die Bewertungen von -3 bis +3, wobei ein negativer Wert eine Ablehnung, ein positiver Wert eine Zustimmung beschreibt. So ist ersichtlich, dass Tom von Katja´s Meinung sehr stark beeinflusst wird. Umgekehrt gilt dies aber nicht. Des Weiteren vertritt Paul immer die gegenteilige Meinung wie Max (Bild 4.11). Auf dieser Art und Weise kann überprüft werden, wer durch wen beeinflusst wird.

Diese Matrix bildet nur das Gerüst für weitere Untersuchungen. So werden in einem nächsten Schritt die Konsistenzen der einzelnen Bewertungen überprüft durch die Verwendung von Aktiv- und Passivsumme. Ziel ist es, alle Inkonsistenzen zu beseitigen. Für weiterführende Literatur wird auf [33] verwiesen.

4.2.5 Papiercomputer nach Vester

Ähnlich wie die Einflussmatrix ist das Vorgehen von Vester. Im Jahre 1970 wurde von ihm ein grafisches Hilfsmittel zur Herstellung von Verbindungen zwischen verschiedenen Begriffen nach vermuteter Ursache-Wirkung-Beziehung erstellt. Das Ziel des Papiercomputers nach Vester kann mit einer einfach Frage beschrieben werden: welche Einflüsse müssen verändert werden, um ein bestimmtes Ergebnis zu erreichen? Da das Vorgehen den bisher vorgestellten Varianten ähnelt, wird der Papiercomputer nach Vester hier nicht weiter behandelt.

4.3 Unified Modeling Language (UML)

Die Unified Modeling Language (UML) wurde von der Object Management Group, einer Vereinigung von Entwicklern und Anwendern objektorientierter Technologien, entwickelt [67], [94]. Dabei stellt die Unified Modelling Language eine Sprache zur Spezifikation, Visualisierung, Konstruktion und Dokumentation von Modellen für Softwaresysteme, Geschäftsmodelle und andere Nicht-Softwaresysteme [42] dar. Sie bietet den Entwicklern die Möglichkeit den Entwurf und die Entwicklung von Modellen auf einheitlicher Basis zu diskutieren. Sie ist die weltweit am meisten genutzte Modellierungssprache und wird ständig erweitert und weiterentwickelt.

Zur Darstellung des Systems werden Diagramme verwendet. Je nach Aufgabenbereich und gewünschter Sichtweise bieten sich verschiedene Diagrammarten an, wobei die Übergänge zwischen den einzelnen Diagrammarten fließend sind. Grob können die Diagramme aber in zwei Hauptgruppen eingeteilt werden: Struktur- und Verhaltensdiagramme. Insgesamt gibt es in der aktuellen UML-Version 13 Diagrammarten. Durch diese Vielzahl werden beinahe alle Einsatzgebiete abgedeckt. Strukturdiagramme beschreiben nach [81] statische Aspekte eines Gegenstands. Dies geschieht beispielsweise mit Hilfe von Klassen, Attributen, Operationen, Beziehungen oder Schnittstellen. Im Gegensatz dazu stellen Verhaltensdiagramme die Dynamik zwischen Objekten eines Systems mithilfe von Interaktionen, Objektkonfigurationen und Zustandshistorien dar [81]. Die Verhaltensdiagramme umfassen noch eine weitere Unterteilung – die Interaktionsdiagramme. Insgesamt sind hier vier Diagrammarten zu finden. Tabelle 4.2 zeigt alle verschiedenen Diagrammarten auf.

Tabelle 4.2: Übersicht UML-Diagramme angelehnt an [81]

Diagramm	Zweck	Wesentliche Inhalte
Strukturdiagramm		
Klassendiagramm	Beziehung zwischen Klassen	Klasse, Merkmal, Beziehung
Objektdiagramm	Exemplarische Konfiguration einer Instanz	Objekt, Verknüpfung
Komponentendiagramm	Struktur und Verbindungen zwischen Komponenten	Komponente, Schnittstelle, Abhängigkeit
Kompositionsstrukturdiagramm	Dekomposition einer Klasse oder Komponente zur Laufzeit	Teil, Schnittstelle, Konnektor, Port
Paketdiagramm	Zusammenhänge zwischen Paketen	Paket, Abhängigkeit
Verteilungsdiagramm	Verteilung von Komponenten auf Knoten	Knoten, Komponente, Abhängigkeit
Verhaltensdiagramm		
Anwendungsfalldiagramm	Benutzerinteraktionen mit dem System	Anwendungsfall, Akteur
Aktivitätsdiagramm	Ablaufverhalten	Aktivität, Aktion, Übergang, Synchronisation
Zustandsdiagramm	Ereignisse und Zustände während der Lebenszeit eines Objekts	Zustand, Übergang, Ereignis, Aktion
Interaktionsdiagramm		
Sequenzdiagramm	Objektinteraktionen mit der Betonung von Sequenzen	Interaktion, Nachricht
Kommunikationsdiagramm	Objektinteraktionen mit der Betonung der Objektkonfiguration	Objektkonfiguration, Interaktion, Nachricht
Timingdiagramm	Objektinteraktionen mit der Betonung der zeitlichen Abstimmung	Objekt, zeitliche Abhängigkeit, Zustand, Ereignis
Interaktionsübersichtdiagramm	Zusammenspiel zwischen Aktivitäten und Sequenzen	Kombination von Sequenz- und Aktivitätsdiagramm

Im Folgenden soll nicht auf alle Diagrammarten eingegangen werden, sondern es werden nur die für die Arbeit interessanten näher erläutert.

4.3.1 Klassendiagramm

Zu den wichtigsten und am häufigsten eingesetzten Diagrammarten gehört das Klassendiagramm. Es stellt dar, aus welchen Klassen das System besteht und wie diese untereinander in Beziehung stehen. Nach [1] definiert eine Klasse für eine Kollektion von Objekten deren Struktur mit deren Attributen, das Verhalten durch die Operationen und die Beziehungen.

Das Klassendiagramm behandelt statische Aspekte und visualisiert den logischen Aufbau des Systems [45]. Um die Klassen und ihre Eigenschaften genauer definieren zu können, beinhalten diese den Klassennamen und die Attribute und Methoden der Klasse. Außerdem existieren verschiedene Arten, wie die Klassen miteinander in Beziehung stehen können. In Tabelle 4.3 sind diese zu finden.

Tabelle 4.3: Beziehungen innerhalb des UML-Klassendiagramms

Name	Darstellung	Aussage
Vererbung/ Generalisierung (Ist-Beziehung)	Pfeil mit unausgefüllter Pfeilspitze auf Vaterklasse	Objekt übernimmt Attribute und Methoden des Vaterobjekts
Assoziation (Hat-Beziehung)	Strich mit ausgefüllter Pfeilspitze	Ein Objekt hat ein oder mehrere andere Objekte
Aggregation (Besteht-aus-Beziehung)	Unausgefüllte Raute mit Strich	Ein Objekt besteht aus einem oder mehreren anderen Objekten, andere Objekte können aber auch ohne dieses Objekt existieren.
Komposition (starke Besteht-aus-Beziehung)	Ausgefüllte Raute mit Strich	Ein Objekt besteht aus einem oder mehreren anderen Objekte. Andere Objekte können nicht ohne dieses Objekt existieren.
Abhängigkeit	Gestrichelter Strich mit oder ohne Pfeile	Ein Objekt hängt in irgendeiner Weise von einem anderen ab.

Zum besseren Verständnis wird ein Beispiel beschrieben. Hierbei handelt es sich um ein Software-System für die Administration einer Universität (Bild 4.12). Die primäre Klasse sind Personen, welche entweder Studenten oder Professoren sein können. Dargestellt ist dies durch einen Pfeil mit unausgefüllter Pfeilspitze, d. h. einer Vererbung. Alle Personen haben eine Adresse, wo sie wohnen. Im Bild 4.12 ist dies durch einen Strich mit einer ausgefüllten Pfeilspitze symbolisiert, was eine Assoziation bedeutet. Zudem gibt es Kurse, in die sich die Studenten einschreiben können. Diese Kurse wiederum werden von den Professoren gehalten, welche ein bestimmtes Gehalt bekommen. Weitere Informationen über die Kurse ist die Räumlichkeit, in der dieser stattfindet. Der Raum selbst befindet sich in einem Gebäude. Ohne dieses Gebäude

wäre dieser Raum nicht existent. Deshalb handelt es sich um eine starke Beziehung zwischen Raum und Gebäude. Symbolisiert ist dies durch die ausgefüllte Raute. Als letztes besitzt das Gebäude eine Adresse. Nicht zu vergessen sind die Ziffern, die an jeder Klasse vermerkt sind. Diese zeigen auf, wie groß die Anzahl der jeweiligen Klassen ist.

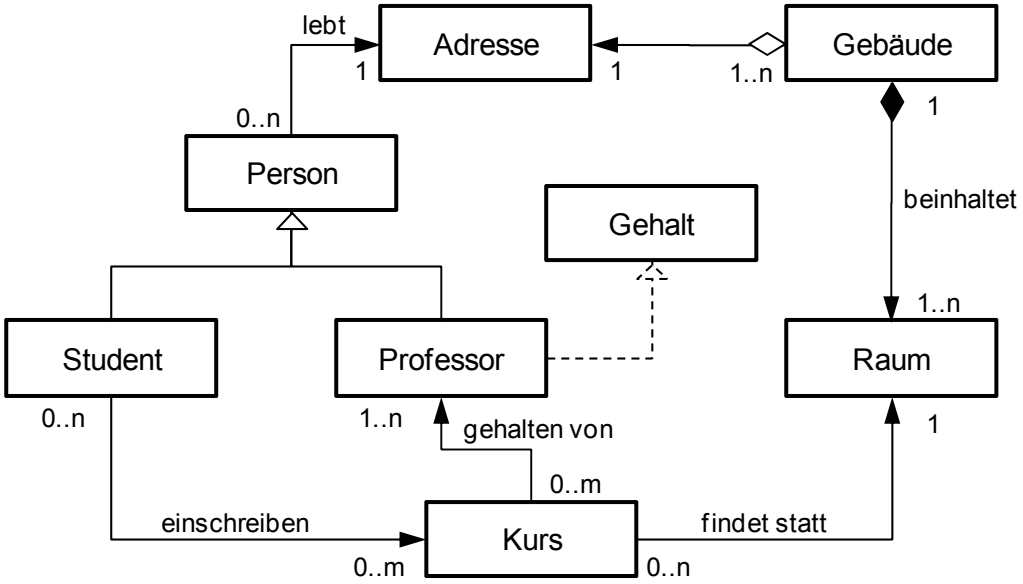


Bild 4.12: UML-Klassendiagramm am Beispiel Administration einer Universität

4.3.2 Zustandsdiagramm

Ein Objekt kann unterschiedliche Zustände annehmen. Durch das Zustandsdiagramm ist es möglich diese Zustände und Transitionen zu visualisieren. Dabei werden die Zustände und Transitionen dargestellt, die ein einzelnes Objekt durchläuft. Zustandsdiagramme sind eine bekannte objektorientierte Methode, um ein Verhalten darzustellen und zu dokumentieren wie ein Objekt auf Ereignisse – sowohl interne als auch externe – reagiert [50].

Jeder Zustand wird durch sogenannte Knoten dargestellt. Hierbei wird eine bestimmte, unveränderliche Bedingung beschrieben. Die Zustandsübergänge geschehen durch die Transitionen. Sie verbinden die einzelnen Knoten durch eine sogenannte Kante. Einer Transition kann eine Verhaltensspezifikation zugeordnet werden, während die Transition durchlaufen wird. Näheres findet sich in Bild 4.13. Hier ist das Stellen einer einfachen Digitaluhr abgebildet. Der Startzustand wird als gefüllter Kreis visualisiert, während man einen Endzustand als nicht gefüllten Kreis, in dem sich ein kleinerer voller Kreis befindet, darstellt [43]. Zu Beginn müssen die Taste 1 und 2 gedrückt werden, damit der nächste Zustand, die blinkenden Stunden, erreicht wird. Von hier können weitere Zustände über verschiedene Transitionen erreicht werden. Wird die Taste 2 gedrückt, wird die angezeigte Stunde um eine erhöht. Taste 1 bewirkt, dass

von den blinkenden Stunden auf die blinkenden Minuten umgeschaltet wird. Hier ist das Vorgehen identisch mit dem der blinkenden Stunden. Als letztes besteht die Möglichkeit die Sekunden einzustellen. Spätestens nach diesem Zustand ist die Uhr gestellt. Das Blinken kann jedoch in jedem Zustand durch das gleichzeitige Drücken von Taste 1 und 2 erreicht werden. Dann wird das Blinken beendet, was automatisch mit dem Endzustand gleichbedeutend ist.

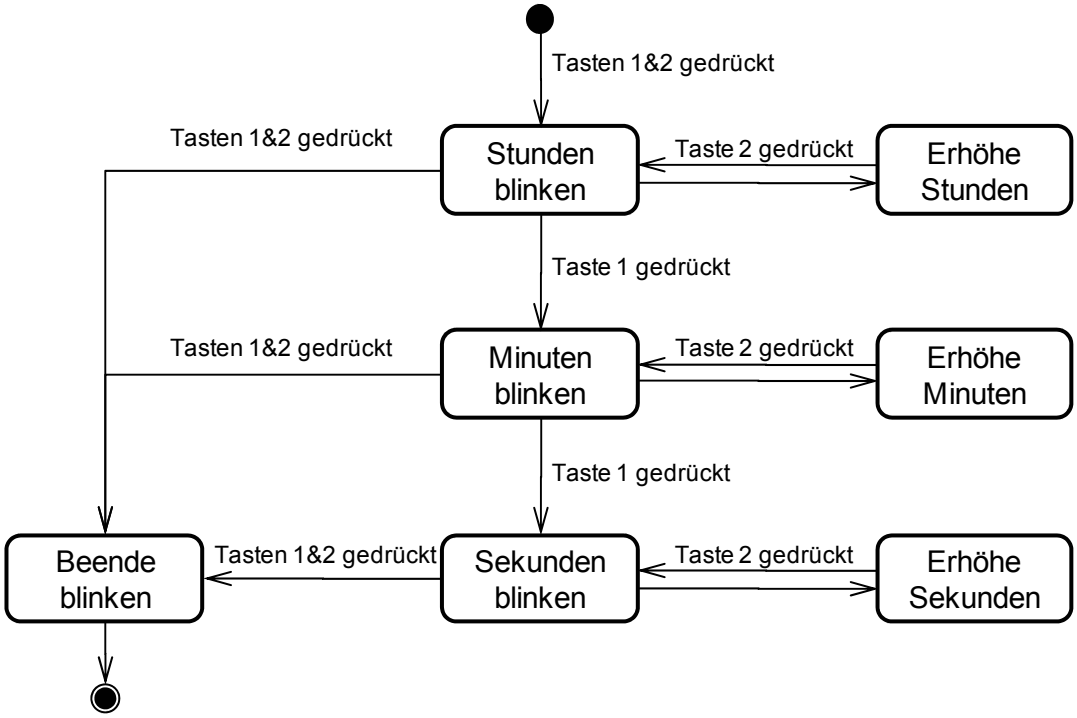


Bild 4.13: UML-Zustandsdiagramm

4.3.3 Komponentendiagramm

Komponentendiagramme werden zur Modellierung der Struktur eines Softwaresystems eingesetzt. Dies geschieht durch die Aufteilung des Systems in verschiedene Komponenten [87]. Eine Komponente kapselt dabei ein komplexes Verhalten und stellt eine ausführbare und austauschbare Softwareeinheit dar [93], die Schnittstellen zur Verfügung stellt [60]. Hierbei fungiert die Komponente oftmals als Sonderform der Klasse [40].

Die Komponenten in dem Diagramm werden als drei ineinander verschachtelte Rechtecke gezeichnet, ihre Schnittstellen sind Striche mit Kreisen am Ende. Dadurch können die verschiedenen Schnittstellen der Komponenten dargestellt werden [48]. Bild 4.14 zeigt einen EC-Karten-Automaten. Dieser beinhaltet den nötigen Zugang zu einer Datenbank, die Transaktion selbst sowie die grafische Oberfläche des Automaten.

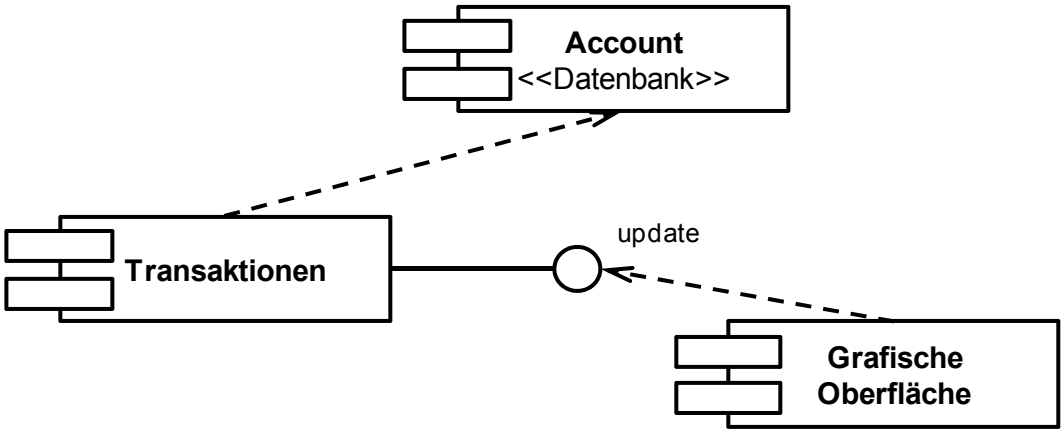


Bild 4.14: UML-Komponentendiagramm

4.3.4 Systems Modeling Language (SysML)

Die SysML ist eine auf der UML basierende standardisierte Sprache für die Modellierung von komplexen Systemen [129]. Sie unterscheidet sich von der UML nur durch einige auf die Bedürfnisse eines System-Ingenieurs zugeschnittene Besonderheiten und wird auch als Dialekt von UML bezeichnet. SysML ist weniger umfangreich als UML und hat deshalb den Ruf einfacher erlernbar zu sein. Obwohl sich SysML und UML in gewissen Teilen unterscheiden sind sie größtenteils untereinander kompatibel und können gemeinsam in ein und demselben Projekt genutzt werden.

4.4 Semantische Netze

Semantische Netze haben ihren Ursprung in der Psychologie, wo sie hauptsächlich zur Modellierung des menschlichen Gedächtnisvermögens verwendet wurden. [75]. Dabei besteht ein semantisches Netz aus Knoten, die Konzepte repräsentieren und Verbindungen (Kanten), die Beziehungen (Relationen) zwischen den Knoten herstellen [41], [109]. Semantische Netze sind in verschiedenen Formen zu finden. Nach [76] unterscheiden sie sich vor allem durch zwei Aspekte:

- Manchen semantischen Netzwerktypen liegt eine formale Definition zugrunde, anderen nicht.
- Die zur Verfügung stehende Menge an Knoten- und Verbindungstypen variiert von Netztyp zu Netztyp beträchtlich.

Insgesamt gibt es sechs verschiedene Arten von Semantischen Netzen [76]. Die wohl bekannteste Art der semantischen Netze besitzt den Schwerpunkt im Aufbau von Ontologien und Typspezifikationen, hierbei vor allem auf Klassenhierarchien. Deshalb basieren diese Netze vor allem auf „ist ein“, „Teil von“, „Mitglied von“. Relationen. In Bild 4.15 ist solch eine Relation grafisch dargestellt. Hier sind die Zusammenhänge von Tieren zu sehen. Beispielsweise kann herausgelesen werden, dass ein Strauss ein Vogel ist, der nicht fliegen kann, groß ist und lange Beine hat. Ebenso kann ein Hai

beissen, zudem ist er gefährlich und ist ein Fisch. So können weitere Zusammenhänge herausgelesen werden.

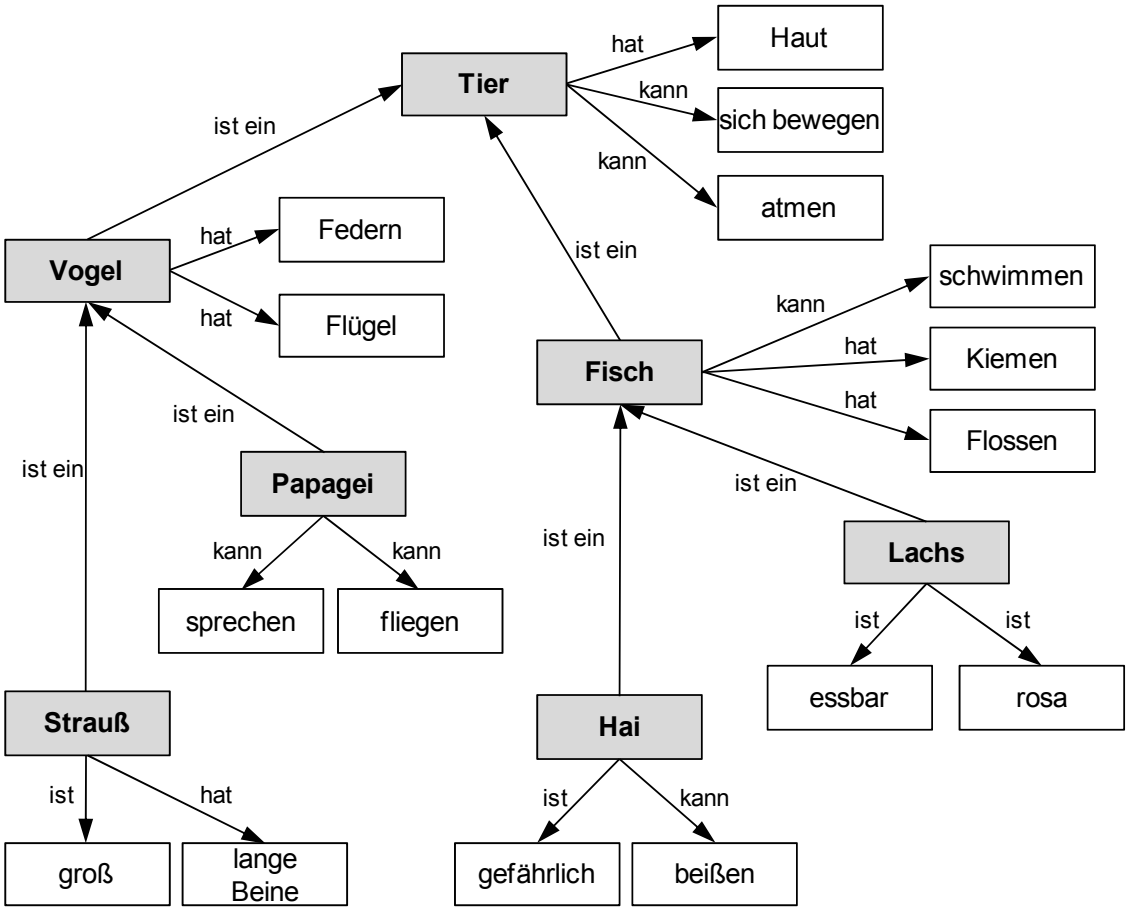


Bild 4.15: Semantisches Netz

Neben dieser Art des Netzes gibt es die Möglichkeit Aussagen und logische Sachverhalte zu beschreiben oder die Netze für die automatisierte Sprachverarbeitung zu verwenden. Auch die bekannten Bayes´schen Netze sowie die Petri Netze gehören der Gruppe der Semantischen Netze an. Diese werden im Folgenden näher behandelt.

4.4.1 Bayes´sches Netz

Die Bayes´schen Netze sind nach dem englischen Mathematiker Thomas Bayes benannt, der sich im 18. Jahrhundert intensiv mit der Wahrscheinlichkeitsrechnung beschäftigt hat. Im Jahre 1763 wurde in einem Werk veröffentlicht, wie mit bedingten Wahrscheinlichkeiten gerechnet wird. Die daraus abgeleiteten Bayes´sche Netze bestehen aus sogenannten Knoten und Kanten und werden hauptsächlich bei unsicherem Wissen eingesetzt, wobei die Graphentheorie und die Wahrscheinlichkeitsrechnung kombiniert wurden [110]. Nach [73] besitzen Bayes´schen Netze die folgenden Eigenschaften:

- Ein Bayes´sches Netz besteht aus einer Anzahl von Variablen und einer Anzahl von Verbindungen zwischen den Variablen
- Jede der Variablen hat eine endliche Anzahl von Zuständen
- Die Variablen und die Verbindungen bilden einen azyklischen Verbindungsgraphen. Das heißt, dass es keine direkte Verbindung vom ersten zum letzten Glied gibt.
- Jeder Variablen mit Eltern wird eine Potentialtabelle zugeordnet.

Die Basis der Bayes´schen Netze bildet der Satz von Bayes, welcher wie folgt lautet:

$$P(b|a) = \frac{P(a|b)P(b)}{P(a)} \tag{4.1}$$

In dieser Formel ist $P(a|b)$ die bedingte Wahrscheinlichkeit von a unter der Bedingung von b, bzw. bei $P(b|a)$ genau umgekehrt. $P(a)$ heißt die A-priori-Wahrscheinlichkeit für ein Ereignis A, $P(b)$ ist die A-priori-Wahrscheinlichkeit für ein Ereignis B. Die Bedeutung des Bayes'schen Theorems wird durch folgende Interpretation deutlich [10]: Nach Erhalt neuer Informationen in Form einer bedingten Verteilung $P(b|a)$ und unter Berücksichtigung der vorliegenden Information $P(a)$, ergibt sich der neue Kenntnisstand nach der Bayesschen Regel proportional zu $P(a|b) \propto P(b|a)P(a)$. Der neue Informationsstand wird als a posteriori-Wahrscheinlichkeit bezeichnet. Der Satz von Bayes beschreibt somit, wie bei Erlangung neuer Information die Verteilung der Variable zu berechnen ist.

Das Vorgehen zur Konstruktion eines Bayes´schen Netzes ist nach [131] in insgesamt vier Stufen eingeteilt. Im ersten Schritt werden die einzelnen Variablen des Netzes festgelegt, gefolgt von der Strukturierung des Netzes. Letzeres geschieht mit Hilfe von Kanten, die die direkte Verbindung der einzelnen Variablen, welche als Knoten gekennzeichnet werden, symbolisieren. Wichtig ist, dass beim Verbinden keine Zyklen entstehen, d. h. der Pfad darf nicht an der Stelle enden, an der er beginnt. Im dritten Schritt werden Wahrscheinlichkeitstabellen erstellt, welche die bedingten Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Elternknoten repräsentieren. Im letzten Schritt wird das Netz getestet und im Bedarfsfall angepasst.

Die Bayes´schen Netze werden in vielen unterschiedlichen Bereichen eingesetzt. Sie reichen nach [37] von der Bioinformatik, Medizin bis zur Raumfahrt. Des Weiteren können sie zur Mustererkennung in jeglichen Branchen verwendet werden. Für weitere Informationen bezüglich der Bayes´schen Netze wird auf [10] verwiesen.

4.4.2 Petri Netze

Petri Netze werden im Bereich der Produktionstechnik und auch der Zuverlässigkeitstechnik zunehmend für die Modellierung eingesetzt [15], [99], [105], [107], [125] [133]. Im Jahr 1962 wurden sie von Carl Adam Petri als Methode für die Modellierung nebenläufiger diskreter Systeme definiert [96]. Nach [22], [35] können Petrinetze

Kausalitäten, Kontaktsituationen, Nebenläufigkeit, Synchronisierungen sowie Konflikte grafisch abbilden. Genau wie die Obergruppe der Petri Netze – die Semantischen Netze – bestehen sie aus verschiedenen Arten an Knoten, die über Kanten miteinander verbunden sind [114]. Bei den Knoten wird zwischen Stellen und Transitionen unterschieden. Eine Stelle entspricht einer Zwischenablage für Daten bzw. Informationen und wird durch einen Kreis symbolisiert. Diese Stellen können Markierungen beinhalten, welche anzeigen, ob eine Stelle aktiv bzw. erfüllt ist. Eine Transition beschreibt die Verarbeitung von Daten bzw. Informationen und wird durch ein Rechteck oder einen Balken symbolisiert [57]. Anhand eines einfachen Beispiels wird erklärt, wie ein Petri Netz funktioniert. Bild 4.16 zeigt auf, wie mit Hilfe eines Petri-Netzes die Tätigkeit Verschraubung eines Bleches dargestellt wird.

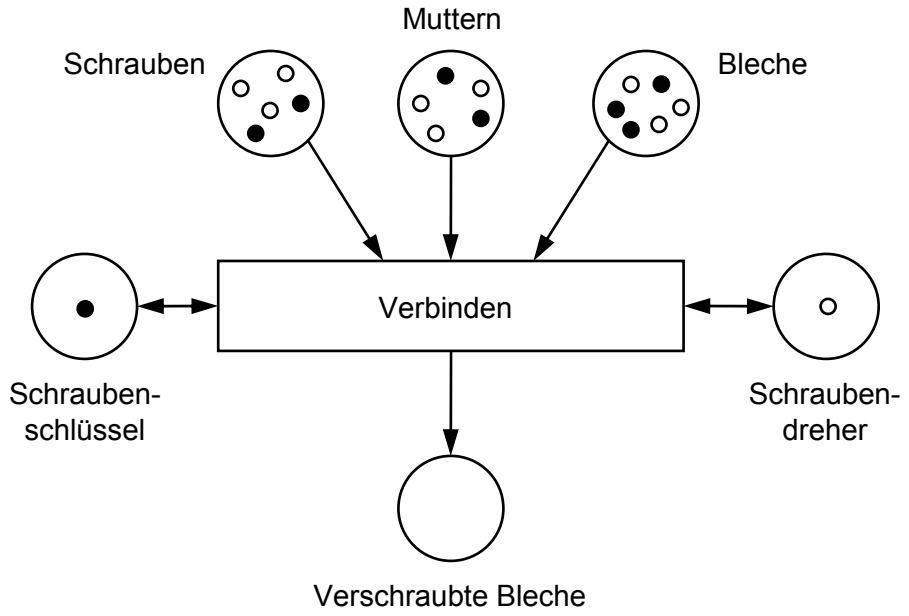


Bild 4.16: Petri Netz

Es sind sechs Stellen zu sehen, wobei die Stelle „Verschraubte Bleche“ das Ende der Tätigkeit darstellt. Die anderen Stellen werden benötigt, um die Bleche zu verschrauben. Hierbei handelt es sich um Gegenstände, welche nur einmal verwendet können bzw. immer wieder neu benötigt werden wie die Schrauben, Muttern und Bleche. Sie werden durch einen Pfeil, der nur in eine Richtung zeigt, versinnbildlicht. Die anderen Elemente wie der Schraubenschlüssel und der Schraubendreher kann bei jeder neuen Tätigkeit wiederverwendet werden. Gekennzeichnet ist dies durch einen Pfeil in beide Richtungen. Anhand der Markierungen in jeder Stelle wird deutlich, dass nebst einem Schraubenschlüssel und einem Schraubendreher fünf Schrauben, fünf Muttern und sechs Bleche benötigt werden, um die Bleche zu verschrauben. Nicht ausgefüllte Marker bedeuten, dass sie benötigt werden, aber derzeit nicht verfügbar sind, ausgefüllte Marker symbolisieren die Existenz des jeweiligen Elements. Hieraus wird deut-

lich, dass in Bild 4.16. noch einzelne Elemente fehlen, damit die Bleche miteinander verschraubt werden können.

4.5 Netzplantechnik

Die Netzplantechnik ist ein Sammelbegriff für Verfahren zur Lösung von Projektablaufproblemen. Sie hilft eine komplexe Folge von Projekttätigkeiten zu planen, durchzuführen und zu kontrollieren [104]. Ihre Wurzeln sind sehr verschieden. Ab 1957 wurden, voneinander unabhängig, Methoden entwickelt, welche eines gemeinsam haben: ein grafisches Modell, das den zeitlichen Ablaufes eines Projektes regelt [102]. In dem Modell werden über Kanten und Knoten die einzelnen Tätigkeiten notiert. Wichtig ist, dass immer ein Anfangs- und Endereignis vorliegen muss. Einen besonderen Stellenwert besitzt das Start- bzw. Zielereignis, welches den Anfang bzw. das Ende des Projektes darstellt. Der Anfang und das Ende eines jeden Ereignisses werden als Knoten bezeichnet. Die Kanten werden durch Pfeile symbolisiert und dürfen nur in eine Richtung zeigen. Wichtige Informationen wie die Dauer der einzelnen Ereignisse sind in den Knoten zu finden. Durch diese kann die Gesamtdauer des Projektes bestimmt werden. Darüber hinaus können kritische Aktivitäten, welche das Projekt verzögern aus dem fertigen Netzplan herausgelesen werden. Bild 4.17 zeigt einen Netzplan auf. Es handelt sich um eine Einrichtung eines neuen Programms in einer Firma.

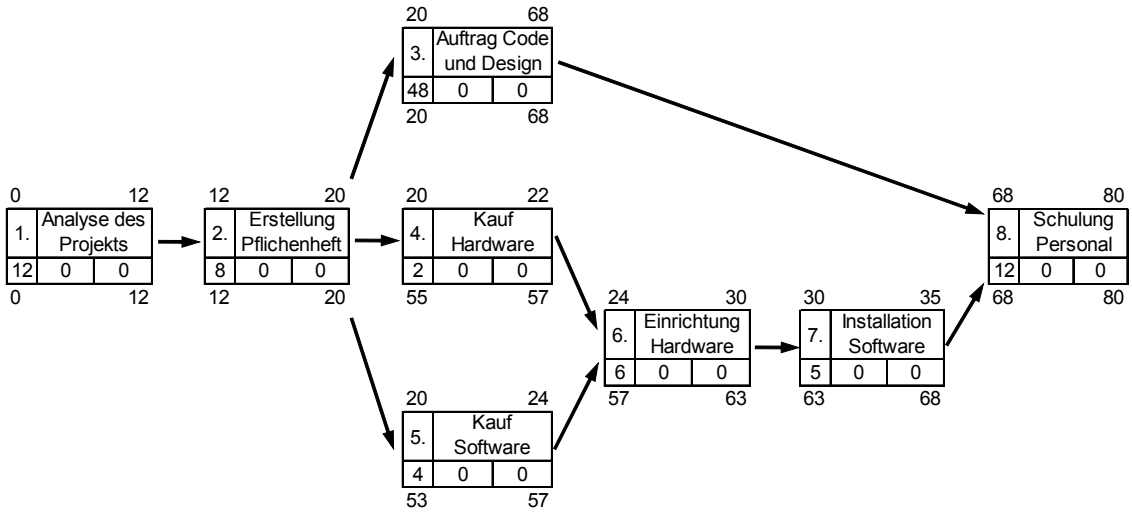


Bild 4.17: Netzplan

Es startet zuerst mit der Analyse des Projekts, was insgesamt 12 Arbeitstage benötigt. Diese Zahl ist im ersten Kasten zu sehen. Nach 12 Tagen wird ein Pflichtenheft erstellt, welches 8 Tage benötigt. Anschließend splittet sich das Vorgehen, einerseits in den Auftrag den Code selbst zu schreiben, andererseits den Kauf der Soft- und Hardware. Wie zu sehen ist, benötigt der in Auftrag gegebene Code mit 48 Arbeitstagen viel länger als der Kauf der Soft- und Hardware. Erst im 8. Schritt treffen sich die bei-

den parallel laufenden Tätigkeiten wieder. Insgesamt besitzt der untere Pfad 33 Arbeitstage Puffer. Somit ist der obere Pfad 1 – 2 – 3 – 8 der kritische, da er keinen Puffer aufweist. Weiterführende Informationen zur Netzplantechnik finden sich zum einen in [23], [56] sowie zum anderen in der Norm DIN 69900 [19], welche Begriffe sowie die Notation der Netzplantechnik erklärt.

4.6 Mathematische Betrachtung

Neben den bisher gezeigten eher qualitativen Ansätzen gibt es auch noch die Möglichkeit eine mathematische, quantitative Betrachtung zu verwenden. Hierbei handelt es sich um die Verwendung von Copulas.

Die Idee der Copulas basiert auf dem Satz von Sklar [92], welcher besagt, dass die gemeinsame Verteilungsfunktion $F(x_1, \ldots, x_n)$ in zwei Teile zerlegt wird [103]. Der eine Teil beschreibt die multivariate Abhängigkeitsstruktur, welche durch eine Copulafunktion dargestellt wird, und der andere Teil beschreibt die univariate Randverteilung der einzelnen Zufallsvariablen. So können die Abhängigkeitsstrukturen sowie die Randverteilungen getrennt voneinander aufgestellt, untersucht, geschätzt und simuliert werden. Diese Separation ist durch Bild 4.18 dargestellt. Hierbei sind die Copulafunktion durch $C(u_1, \ldots, u_n)$ gekennzeichnet, die Randbedingungen durch $F_1(x_1), \ldots, F_n(x_n)$.

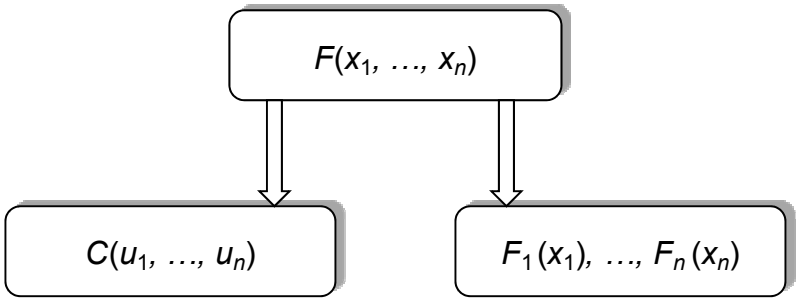


Bild 4.18: Separation nach Sklar

Im gegensätzlichen Fall kann eine Copula erstellt werden, wenn eine Copulafunktion vorliegt und in einem unabhängigen Schritt die Randverteilungen bestimmt werden. Somit können nach [103] beliebige Copulas und Randverteilungen angenommen werden und die Separation nach Sklar umgekehrt werden (Bild 4.19).

Aus den Erläuterungen wird ersichtlich, dass die Copula eine Funktion ist, die einen funktionalen Zusammenhang zwischen den Randverteilungsfunktionen verschiedener Zufallsvariablen und ihrer gemeinsamen mehrdimensionalen Wahrscheinlichkeitsverteilung angibt [5]. Mathematisch gesehen wird eine Copula als eine n-dimensionale Verteilungsfunktion auf dem Einheitswürfel definiert, deren eindimensionale Randverteilungen Gleichverteilungen auf [0,1] sind [5], d. h.

- $C(u) = 0$ für alle $u \in [0,1]^n$, falls mindestens eine Koordinate von u null ist.
- $C(u) = u_i$ für alle $u \in [0,1]^n$, falls alle Koordinaten von u außer u_i eins sind.

Zur Darstellung der Möglichkeiten der Copulas wird ein Beispiel vorgestellt, welches die Abhängigkeiten zwischen zwei Komponenten betrachtet. Dabei unterliegen die Komponenten sogenannten Shocks, d. h. eine oder beide Komponenten versagen. Modelliert wird dies mit Hilfe der Marshall-Olkin-Verteilung. Dabei seien Z_1, Z_2, Z_{12} unabhängige und exponentialverteilte Zufallsvariablen, welche die Zeiten des Auftretens eines Shocks repräsentieren, mit ihren Parametern λ_1, λ_2, λ_{12}. Der Parameter λ_{12} beschreibt den Grad der Abhängigkeit zwischen den Komponenten und liegt in dem Intervall [0, ∞[. Die hergeleitete Copula lautet

$$C_{\alpha,\beta}(u_1,u_2) = \min\left\{(1-u_1)^{1-\alpha}(1-u_2),(1-u_1)(1-u_2)^{1-\beta}\right\} + u_1 + u_2 - 1, \tag{4.2}$$

wobei $0 \le u_1, u_2 \le 1$ und $\alpha = \dfrac{\lambda_{12}}{\lambda_1 + \lambda_{12}}, \beta = \dfrac{\lambda_{12}}{\lambda_2 + \lambda_{12}}$

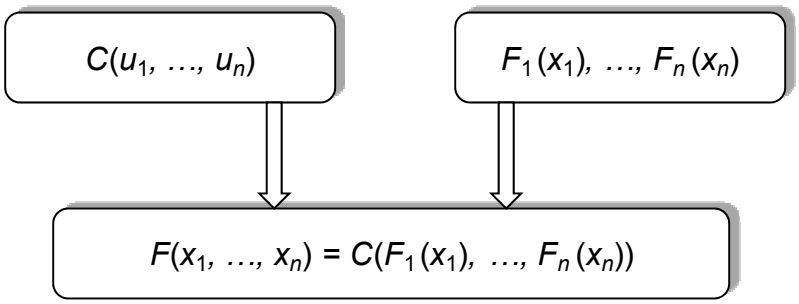


Bild 4.19: Separation nach Sklar (Umkehrung)

Falls die beiden Komponenten unabhängig voneinander sind, d. h. $\lambda_{12} \rightarrow 0$ strebt, entstehen dieselben Formeln zur Beschreibung eines Parallel- oder Seriensystems wie bei Boole. Interessant wird es, wenn der Parameter λ_{12} vergrößert wird, was gleichbedeutend mit einer steigenden Abhängigkeit zwischen den beiden Komponenten ist. Für das Parallelsystem lässt sich nach [5] erkennen, dass je größer die Abhängigkeit, d. h. λ_{12}, ist, desto kleiner ist die Zuverlässigkeit des Systems. Andererseits folgt für ein Seriensystem, dass mit wachsender Abhängigkeit die Zuverlässigkeit des Systems zunimmt. Ferner gilt, dass ein Parallelsystem in jedem Fall zuverlässiger als ein Seriensystem ist. Weiterführende Informationen hierzu sind in [5] zu finden.

4.7 Zusammenfassung und Fazit

Die bisher vorgestellten Notationsmöglichkeiten werden nochmals zusammengefasst und nach bestimmten Kriterien miteinander verglichen (Tabelle 4.4). Diese Kriterien sind beispielsweise die Lesbarkeit bei komplexen Systemen, die Einsetzbarkeit in frühen Entwicklungsphasen oder die Betrachtung der Zuverlässigkeit.

Tabelle 4.4: Bewertung der Notationsmöglichkeiten von Wechselwirkungen

	Schichtenmodell	Matrixdarstellung	UML	Semantische Netze	Netzplantechnik	Copula
Notationsweise	Knoten und Kanten	Matrix, Verknüpfung über Kreuze oder Bewertungszahlen	Meist mit Knoten und Kanten	Knoten und Kanten	Knoten und Kanten	Mathematische Formeln
Komponentenbasierte Betrachtungsweise	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja
Lesbarkeit bei komplexen Systemen	Gut	Sehr gut	Bedingt	Bedingt	Bedingt	Schwierig
Einarbeitungsphase	Gering	Gering	Mittel	Mittel	Mittel	Langwierig
Betrachtung der Zuverlässigkeit	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja
Frühzeitiger Einsatz möglich?	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein
Besonderheiten	-	Aktive und passive Beeinflussungen, Algorithmen	Flexible Darstellungsformen	Flexible Darstellungsformen	-	Quantitative Darstellung der Ergebnisse

Auffällig ist, dass bis auf die Copulas keine Notationsweise die Zuverlässigkeit beschreiben kann. Jedoch kann die Copula durch die benötigte Informationstiefe nicht frühzeitig eingesetzt werden.

5 Berücksichtigung von Wechselwirkungen in bestehenden Zuverlässigkeitsanalysen

Im letzten Kapitel lag der Schwerpunkt vor allem auf den unterschiedlichen Notationsweisen von Wechselwirkungen. Tabelle 4.4 zeigt aber einen Nachteil der gezeigten Modelle auf: es kann mit ihnen keine frühzeitige Zuverlässigkeitsaussage getroffen werden. Deshalb werden in diesem Kapitel Zuverlässigkeitsanalysen gezeigt, welche Wechselwirkungen mitberücksichtigen. Eingesetzt werden diese Zuverlässigkeitsanalysen vor allem in der Automobilindustrie.

5.1 Qualitätsmanagement bei Ford

Der Ursprung der hier aufgezeigten Qualitätsmanagementsysteme von Ford – das Schnittstellenmanagementsystems [27] und das Parameter-Diagramms [26] – liegt im Bereich der Qualität und Sicherheit. Um Passagiere wie auch andere Verkehrsteilnehmer zu schützen, ist an heutigen Fahrzeugen eine Vielzahl an Sensoren vonnöten, welche ständig den aktuellen Fahrzeugzustand messen. Dies ist nur mit einer Zunahme von funktionalen Schnittstellen möglich. Die Kehrseite ist, dass die Sicherheit mit einer Vermehrung von möglichen Fehlerquellen und die Gefahr des Auftretens von noch nicht bekannten Fehlern erkauft werden.

Deshalb ist das Ziel des Schnittstellenmanagements von Ford, dass es eine Abstimmung der Schnittstellen, insbesondere der mechanischen und elektrischen, gibt und dadurch keine relevanten Detailinformationen verloren gehen. Dies wird durch mehrere Ford-spezifische Qualitätswerkzeuge ermöglicht: die Schnittstellen-Matrix und die Schnittstellen-Beschreibung. Im Folgenden wird die Vorgehensweise vorgestellt.

Zuerst wird ein sogenanntes Blockdiagramm erzeugt, in dem alle verbauten Komponenten des Systems enthalten sind. Die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Komponenten werden durch Linien gekennzeichnet. Zudem wird zwischen äußeren und inneren Bauteilen unterschieden, d. h. es erfolgt eine saubere Systemabgrenzung. Berücksichtigt werden aber nicht nur die inneren Bauteile, sondern es werden alle Verbindungen, vor allem auch die Verbindungen zwischen innen und außen untersucht. Der nächste Schritt ist das Aufstellen einer Schnittstellen-Matrix. Das grundsätzliche Vorgehen ähnelt den im Unterkapitel 3.2 beschriebenen Matrixdarstellungen. Mit der Schnittstellen-Matrix werden alle Systemwechselwirkungen notiert. Zudem werden die Stärken der einzelnen Systemwechselwirkungen bewertet und diese in die Matrix übertragen. Insgesamt werden vier Schnittstellen-Beschreibungen untersucht, bewertet und in die Matrix eingetragen. Im Einzelnen sind diese Schnittstellen-Beschreibungen:

- Physikalische Kontakte
- Energieübertragung
- Informationsaustausch
- Materialaustausch

Im nächsten Schritt werden die Schnittstellen-Beschreibungen hinsichtlich fünf Wertungsziffern bewertet und dann in einen der vier Quadranten der Komponentenschnittstellen eingetragen (Bild 5.1). Die Wertungsziffern reichen von -2 bis +2, wobei -2 bedeutet, dass eine Interaktion verhindert werden muss, um die Funktionalität zu erfüllen, bei +2 ist die Interaktion notwendig, um die Funktionalität zu erzielen. Werden alle vier Quadranten mit Null bewertet, heißt dies, dass die beiden Komponentenpaarungen keinerlei Einfluss zueinander haben und nicht weiter betrachtet werden müssen. In Bild 4.1 ist als Beispiel eine Navigation mit PDA in einem Fahrzeug zu sehen. Wird beispielsweise die Paarung PDA-Gehäuse – GPS-Antenne betrachtet, so sind physikalische Kontakte und Energieübertragung, jeweils mit der Wertungsziffer 2 zu finden. Informationstausch und Materialaustausch haben bei dieser Komponentenpaarung keinen Einfluss, werden also mit 0 bewertet.

Navigation mit PDA im Fahrzeug	Σ Komponenten-paarungen	(1) GPS-Antenne	(2) PDA-Gehäuse	(3) Zeigestift	(4) Bildschirm	(5) Lautsprecher	(6) Speicherkarte	(7) PKW-Fahrer(in)	(8) Autohalterung	(9) Saugnapf	(10) Windschutz-scheibe	Σ potentieller Komponenten-paarungen	Σ relevanter Komponenten-paarungen
(1) GPS-Antenne	0											15	7
(2) PDA-Gehäuse	1	2 0 2 0											
(3) Zeigestift	3	0 0 0 0	2 0 0 2										
(4) Bildschirm	5	0 0 0 0	2 0 2 0	2 0 2 0									
(5) Lautsprecher	10	0 0 0 0	2 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0								
(6) Speicherkarte	15	0 0 0 0	2 0 2 0	0 0 0 0	-2 0 0 0	0 0 0 0							
(7) PKW-Fahrer(in)	21	-2 0 2 0	2 0 2 0	2 -2 2 -1	2 2 2 -1	0 2 2 0	2 0 2 0					13	11
(8) Autohalterung	28	-1 0 0 0	2 0 0 0	0 0 0 0	0 0 -2 0	0 0 -2 0	0 0 0 0	2 0 2 0					
(9) Saugnapf	36	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	2 0 2 0	2 2 0 0			17	5
(10) Windschutzscheibe	45	-2 0 2 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	-2 0 2 0	0 0 0 0	-2 0 0 0			
												45	23

Bild 5.1: Beispiel eines sogenannten Blockdiagramms für einen PDA nach [27]

Im nächsten Schritt wird die Schnittstellenbeschreibung angeschlossen. Hier werden die Schnittstellen, welche durch die Schnittstellen-Matrix entdeckt, aber noch nicht tiefgehend betrachtet wurden, detailliert untersucht. In der Schnittstellenbeschreibung werden unter anderem die folgenden Aspekte notiert: die Schnittstellenkategorie, ein Wertebereich samt der Dimension der Schnittstelle, eine Beschreibung, die Wichtigkeit, die Auswirkung sowie der Schnittstellenpartner, d. h. der Hersteller bzw. der Lieferant (siehe Bild 5.2).

Von	Nach	Schnittstelle / Fluss	Schnittstellen-kategorie	Werte-bereich	Dimension	Beschreibung	Technische Anforderung	Wichtig-keit	Aus-wirkung	Schnittstellenpartner	Status	Kommentar
PKW-Fahrer(in) → PDA												
(7)	(4)	Helligkeit der Bildschirmanzeige	E, I	150-200	[cd/m^2]	Anpassen der Bildschirmhelligkeit (Tag/Nacht)	DIN EN ISO 9241	hoch	+	Lieferant für Touchscreen	Grün	
(7)	(3)	Hand-Menü-Bedienung mit Kontaktstift auf Touchpad	P	5 +/- 0,1	[mm]	Durchmesser Kontaktstift		mittel	+		Grün	
(7)	(3)	Hand-Menü-Bedienung mit Kontaktstift auf Touchpad	P	110 +/- 0,2	[mm]	Länge Kontaktstift		mittel			Grün	
(7)	(5)	Lautsprecher-Lautstärke	E, I	30 - 60	[dB]	Einstellen der Lautstärke		mittel			Grün	
(7)	(2)	Gerät einschalten / ausschalten	E,I	2 +/- 0,1	[N]	Kontaktdruck am Schalter		mittel			Grün	
PDA → PKW- Fahrer(in)												
(5)	(7)	Akustische Information	I	40 - 70	[dB]	Sprachwiedergabe	ISO 226:2003	hoch	+		Grün	
(4)	(7)	Optische Anzeige	I	300 - 600	[lux]	Auflösen der Bildschirmhelligkeit		hoch	+	Lieferant für Touchscreen	Grün	
(4)	(7)	Optische Anzeige	I	4000 +/- 10	[mm^2]	Fläche Bildschirm		hoch	+	Lieferant für Touchscreen	Grün	
Autohalterung → PDA-Gehäuse												
(8)	(2)	Mechanische Aufnahme PDA in Halterung	P	70 +/- 0,1	[mm]	Länge PDA-Aufnahme in x		mittel	+	Lieferant Kunststoffhalterung	Gelb	Be-sprechung
(8)	(2)	Mechanische Aufnahme PDA in Halterung	P	16 +/- 0,1	[mm]	Länge PDA-Aufnahme in y		gering	+	Lieferant Kunststoffhalterung	Gelb	Be-sprechung
(8)	(2)	Mechanische Aufnahme PDA in Halterung	P	25 +/- 0,1	[mm]	Länge PDA-Aufnahme in z		mittel	+	Lieferant Kunststoffhalterung	Gelb	Be-sprechung
PKW-Fahrer(in) → Windschutzscheibe												
(7)	(10)	Freie Sicht durch Windschutzscheibe	I	Sichtfläche	[mm^2]	keine Anbauteile im Sichtfeld		hoch			Grün	

Bild 5.2: Beispiel einer Schnittstellenbeschreibung für einen PDA nach [27]

Des Weiteren ist eine Kommentarspalte eingefügt, die z. B. zeigt, welche Aufgaben noch erledigt werden müssen.

Ein anderes Werkzeug zur Steigerung der Qualität bzw. der Zuverlässigkeit ist das Parameter-Diagramm. Mit diesem kann die Funktionsweise komplexer technischer Systeme grafisch beschrieben und dadurch auch mögliche Fehlerzustände sowie Störgrößen ermittelt werden. Der Grundsatz des Parameter-Diagramms stützt sich auf der Aussage, dass die Robustheit eines Produktes gewährleistet sein soll. Unter Robustheit ist die Differenz zwischen der Belastung auf das Produkt und die Belastbarkeit zu verstehen. Einfach ausgedrückt kann die Robustheit auch als Abstand zur Fehlermöglichkeit beschrieben werden [26]. Ziel des Parameter-Diagramms ist es, schon im Vorfeld unerwünschte Systemzustände zu ermitteln um die Fehler auf ein Minimum zu reduzieren. Es wird folgendermaßen vorgegangen:

1. Es wird ein Blockdiagramm aufgestellt, welches alle Komponenten innerhalb und außerhalb der Systemgrenze beinhaltet. Dieser Punkt beinhaltet auch eine klar definierte Systemgrenze, da nur die innerhalb der Systemgrenze liegenden Komponenten verändert werden können.
2. Auf das System können ganz verschiedene Arten von Störungen und Größen einwirken. Beispielsweise können sie sowohl von Aktionen des Kunden oder von Nachbarsystemen als auch von der Umwelt kommen. Aus diesem Grund werden in diesem Schritt die Eingangssignale des Systems notiert. Zu beachten ist, dass die Eingangssignale in einer messbaren Einheit und mit einem Wertebereich versehen sind.
3. Als nächstes wird eine Systemantwort erstellt, d. h. die beabsichtigte Funktion des Systems. Die Systemantwort muss nicht dieselbe physikalische Einheit wie das Eingangssignal besitzen.
4. Nach der aufgestellten erwünschten Funktion müssen die unvermeidbaren Verluste wie z. B. Reibung und die unerwünschten Nebeneffekte in das Parameter-Diagramm aufgenommen werden. Wichtig ist hierbei die Unterscheidung zur FMEA. Die Nebeneffekte entsprechen nicht den möglichen Fehlern aus der FMEA. Diese Fehlerbeschreibungen aus der FMEA haben immer eine Korrelation mit der zu erfüllenden Funktion und dementsprechend die gleiche physikalische Einheit. Im Gegensatz dazu haben die unerwünschten Nebeneffekte abweichende SI-Einheiten. Unerwünschte Nebeneffekte sind beispielsweise Leckage, Überhitzung, Windgeräusche, Quietschen oder Geruch.
5. Anschließend werden die sogenannten Kontrollfaktoren bestimmt, welche den veränderbaren Konstruktionsparametern aus der inneren Systemgrenze entsprechen. Durch eine geschickte Einstellung der Parameter kann die Robustheit des Systems erhöht werden. Dies kann beispielsweise über eine statistische Versuchsplanung geschehen.
6. Der letzte Schritt umfasst das Auffinden von Störgrößen, welche definitionsgemäß die ideale Funktion eines Systems beeinflussen oder beinträchtigen. Es wird zwischen internen und externen Störgrößen unterschieden. Interne Störgrößen sind die Streuungen, die durch die Produktion entstehen. Hier ist vor allem

auf die Toleranzen der einzelnen Bauteile bzw. auf die Toleranzketten zu achten. Bei den externen Störgrößen handelt es sich um Bauteilveränderungen über der Zeit. Beispielsweise kann die Leistungsfähigkeitsreduktion zu einem Versagen des Systems führen. Aber auch Aspekte wie der Kundengebrauch und die Umweltbedingungen werden in diesem Punkt untersucht.

5.2 Quality Function Deployment (QFD)

Quality Function Deployment beschreibt eine durchgängige Methode zur kunden- und marktorientierten Entwicklung von Produkten und Dienstleistungen [49]. Die Grundlage der QFD bildet die Trennung der Kundenanforderungen von den technischen Funktionen des zu entwickelnden Produkts. Im sogenannten House of Quality werden die Ergebnisse dieser Analyse visualisiert. Nach [61] ist das House of Quality ein wichtiges Werkzeug zur Analyse, Planung und Umsetzung der Qualitätsanforderungen der Kunden.

Die wichtigsten Schritte bei der Erstellung eines House of Quality sind wie folgt:

1. Die ermittelten Kundenwünsche werden aufgelistet. Diese sollten nach geeigneten Kriterien geordnet und gewichtet sein.
2. Nun wird das eigene Produkt mit Konkurrenzprodukten verglichen.
3. Anhand der im ersten Punkt aufgestellten Kundenwünsche werden die Qualitätsmerkmale des Produkts abgeleitet.
4. In der anschließenden Korrelationsmatrix werden die Beziehungen zwischen den Kundenwünschen und den Qualitätsmerkmalen erfasst. Hierbei kann zwischen verschieden starken Beziehungen unterschieden werden. So können recht einfach die Zielkonflikte zwischen Kundenwünschen und Qualitätsmerkmalen aufgezeigt werden.
5. Im Dach des House of Quality entsteht eine Wechselbeziehungsmatrix. Hier werden die Korrelationen zwischen den einzelnen Qualitätsmerkmalen eingetragen. Somit werden alle Beziehungen – ob positiv oder negativ – bewertet.
6. Die Qualitätsmerkmale werden auf ihre Realisierbarkeit überprüft. Zudem wird die Realisierbarkeit bewertet.
7. In einem letzten Schritt wird die Bedeutung der technischen Qualitätsanforderung rechnerisch ermittelt.

In Bild 5.3 ist ein vollständiges House of Quality für einen Wagenheber zu finden. Neben der Bewertung des eigenen Produkts ist zusätzlich ein Konkurrenzprodukt eingetragen.

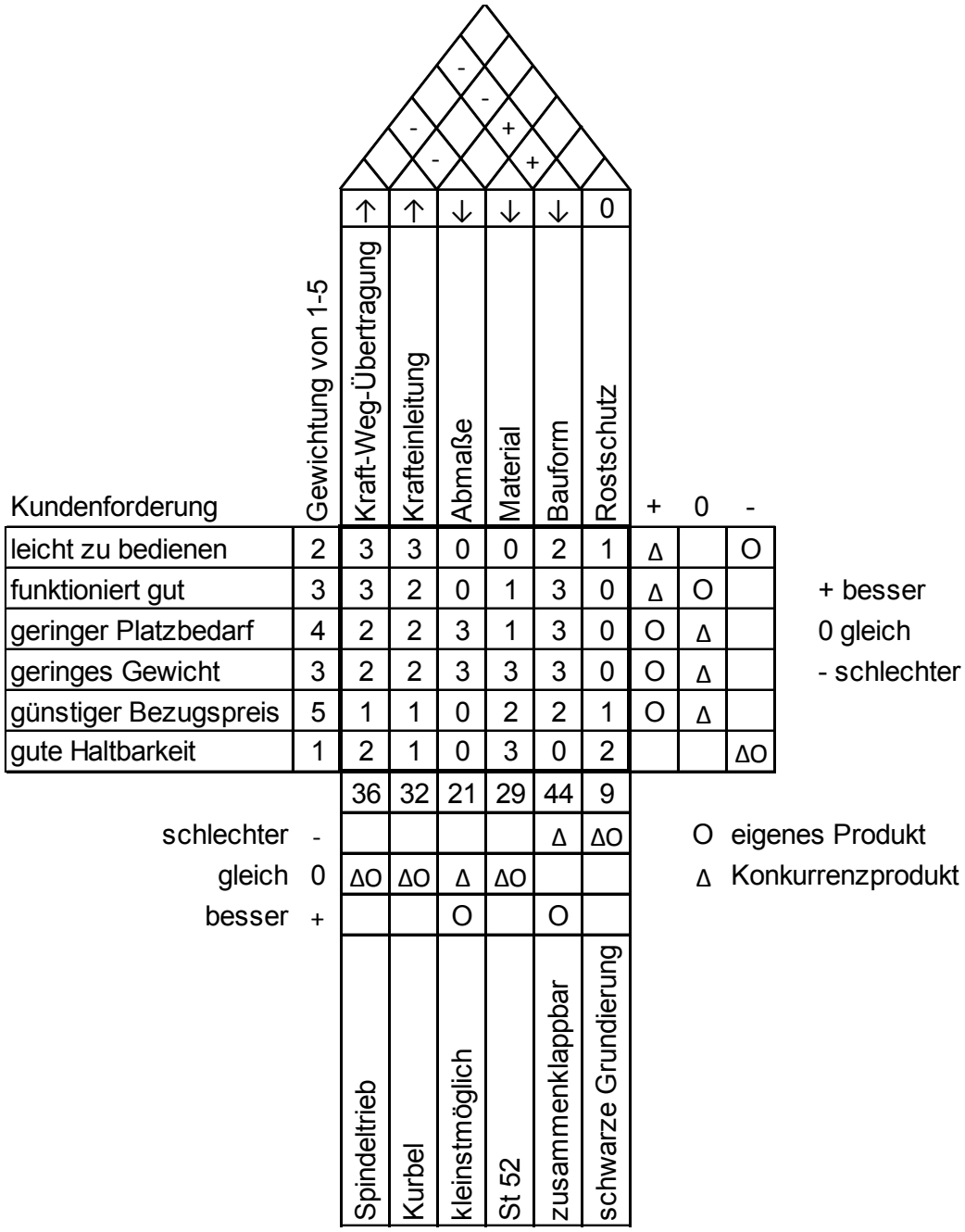


Bild 5.3: Beispiel für ein House of Quality

5.3 Herausforderung Toleranzkettendesign für robuste mechatronische Fahrzeugfunktionen

Eine ähnliche Zielrichtung wie das Parameter-Diagramm von Ford (siehe Unterkapitel 5.1) fokussiert die Daimler AG [36]. Hier wird davon ausgegangen, dass durch die Steigerung der Systemrobustheit die Zuverlässigkeit positiv beeinflusst wird. Anders als bei Ford wird vor allem das Toleranzkettendesign betrachtet. Durch verschiedene Rechenverfahren werden die Toleranzketten simuliert bzw. die Informationen für weitere Optimierungen geliefert. Da in DIN 7186 (9) [20] die Definition des Begriffs

Einzeltoleranz als Differenz zwischen zugelassenem Größt- und Kleinstwert einer messbaren Eigenschaft festgelegt ist, müssen für diesen Ansatz einige Eingangsgrößen vorhanden sein. Beispielsweise sind die Toleranzen einer jeden Komponente für die Betrachtung vonnöten. Es wird zwischen einer unteren und einer oberen Toleranzgrenze unterschieden, die bestimmungsgemäß aus dem Lastenheft bzw. aus den Zeichnungen entnommen werden. Ein Soll-/Ist-Vergleich muss darüber entscheiden, wie robust jede Komponente ist. Je weiter die Ist-Toleranz von den Grenztoleranzen entfernt ist, desto robuster ist sie. Falls der Ist-Wert außerhalb der Toleranz liegt, bedeutet dies eine Fehlfunktion. Neben den reinen Toleranzwerten werden auch noch Sicherheitswerte anhand einer Daimler-spezifischen Risikobewertung und Umgebungsbedingungen als Eingangsinformationen benötigt. Als letzter Schritt erfolgen die Toleranzrechnung und die Auswertung. Je nachdem welche Eingangsinformationen zur Verfügung stehen wird ein passendes Rechenverfahren eingesetzt.

5.4 Qualitative Bewertung von Umgebungseinflüssen und Komponentenwechselwirkungen

Mit Hilfe des Ansatzes von [83] sollen der Umgebungseinfluss und die Komponentenwechselwirkungen auf die Zuverlässigkeit eines Produktes bereits in frühen Entwicklungsphasen qualitativ bewertet werden. So ist es möglich, dass trotz ungenauen Daten eine Abschätzung der Einflüsse bei diversen Einsatzbedingungen getroffen werden kann. Insgesamt umfasst das Vorgehen sieben Schritte. Zu Beginn steht eine Strukturierung auf Komponenten- bzw. Funktionsebene an. Durch die Verwendung einer Wechselwirkungsmatrix können die Verknüpfungen der Komponenten bzw. der Funktionen notiert werden. Im zweiten Schritt werden die verschiedenen Umgebungseinflussarten identifiziert. Danach werden sogenannte Umgebungsklassen definiert, welche die unterschiedlichen Einbauorte widerspiegeln, beispielsweise den Motorraum oder den Innenraum eines Autos. Diese sind wichtig, da die Umwelteinflüsse je nach Einbauort unterschiedlich sind. Der vierte Schritt umfasst die Bewertung der Umgebungsklassen. Anschließend werden die Umgebungseinflüsse sowie die getroffenen oder eingeplanten Schutzmaßnahmen getrennt voneinander bewertet. Sie werden in fünf Bewertungsstufen von hoch (1) bis risikoneutral (0) in 0,25-Schritten eingestuft. Es entstehen verschiedene Kombinationsmöglichkeiten, wenn die theoretische Stärke des Umgebungseinflusses mit dem Risiko trotz Schutzmaßnahmen kombiniert wird. [83] spricht von der resultierenden Stärke des Umgebungseinflusses, welche ebenfalls im Zahlenraum [0; 1] definiert wurde. Im sechsten Schritt wird die Einfluss-Umgebungs-Zuverlässigkeits-Kennzahl (EUZ-Kennzahl) ermittelt. Die Kennzahl ist ein Produkt der Bewertung der Intensität der Umgebungseinflussart, welche vom Einbauort abhängt, und der Bewertung der resultierenden Stärke des Umgebungseinflusses. Der letzte Schritt umfasst die Möglichkeit, dass durch das Aufsummieren der einzelnen EUZ-Kennzahlen einer jeden Komponente eine Aussage über das Gesamtsystem, sowie für jeden einzelnen Umwelteinfluss, getroffen wird.

5.5 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Kapitel wurden Vorgehensweisen vorgestellt, welche die Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen beschreiben können. In der untenstehenden Tabelle 5.1 sind die wichtigsten Faktoren der einzelnen Vorgehensweisen aufgelistet und bewertet.

Tabelle 5.1: Bewertung bestehender Zuverlässigkeitsanalysen mit Wechselwirkungsdarstellungen

	Qualitätsmanagement FORD	QFD	Toleranzkettendesign Daimler	Qual. Bewertung der Umgebungseinflüsse
Notationsweise	Matrix und Tabelle	Matrix	Mathematische Formeln	Tabellen
Art der Zuverlässigkeitsbetrachtung	Zwischen den Komponenten	Fokus eher auf Qualität	Toleranzketten	Umgebungseinflüsse
Aussagegüte der Zuverlässigkeit	Gut	Mäßig	Mäßig	Mäßig
Komponentenbasierte Betrachtungsweise	Ja	Ja	Ja	Ja
Lesbarkeit bei komplexen Systemen	Gut	Gut	Mäßig	Gut
Einarbeitungsphase	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch
Frühzeitiger Einsatz möglich?	Nein	Ja	Nein	Ja

Bei den meisten Vorgehensweisen wird die Zuverlässigkeit nur teilweise bestimmt bzw. die getroffene Aussagegüte der Zuverlässigkeit ist nur mäßig. Beispielsweise wird bei dem Ansatz von Daimler die Zuverlässigkeit nur über die Toleranzen definiert. Auch ist es bei einigen Modellen nicht möglich, eine frühzeitige Bewertung durchzuführen.

6 Methode zur Zuverlässigkeitsbewertung von Wechselwirkungen

In den vorigen Kapiteln ist über verschiedene Notationsmöglichkeiten von Wechselwirkungen als auch bestehende Modelle, welche die Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen berücksichtigen, gesprochen worden. Leider können aber die vorgestellten Modelle (Kapitel 4 und 5) nicht den im Unterkapitel 3.4 formulierten Anforderungen für eine Methode zur Bestimmung der Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen genügen. Aus diesem Grund muss eine neue Methode erstellt werden.

6.1 Konzeption einer Methode

Um eine neue Methode zu konzipieren, sollte zuerst überlegt werden, welche Informationen einem zur Verfügung stehen, vor allem, wenn die Methode in frühen Phasen der Entwicklung eingesetzt werden soll. Hierbei spielen die möglichen Komponentenpaarungen des Systems eine zentrale Rolle, da ohne deren Kenntnisse keine Aussagen über die Zuverlässigkeit der Wechselwirkungen getroffen werden können. Mögliche Komponentenpaarungen können, natürlich abhängig in welcher Phase sich die Entwicklung befindet, recht früh bestimmt werden. Wird die Entwicklungsmethode VDI 2221 [119] für den Maschinenbau betrachtet, so sind bereits in Schritt 4, spätestens aber in Schritt 5 Informationen über mögliche Komponentenpaarungen anhand einer Skizze oder vergleichbares vorhanden (siehe Abschnitt 2.2.1). Ebenso können die Komponenten von Vorgängersystemen oder von in der Funktionalität ähnlichen bereits existierenden Systemen bestimmt werden.

Neben den Komponentenpaarungen muss auch ein Bewertungsschema festgelegt werden. Dies erweist sich jedoch als nicht ganz so einfach. Zwar sind in Kapitel 4 verschiedene Arten zur Notation von Wechselwirkungen erläutert worden, jedoch muss geprüft werden, wie und ob sie den gestellten Anforderungen und den Wünschen entsprechen. Im Folgenden werden alle Notationsmöglichkeiten diskutiert:

- Eine der häufigsten Arten zur Darstellung von Wechselwirkungen ist die Matrix. Hier werden ursprünglich die Komponenten sowohl in x- als auch in y- Richtung aufgeschrieben. Anschließend wird überprüft, an welcher Stelle eine Wechselwirkung vorhanden ist. Dies ist auch in dem vorliegenden Fall möglich, jedoch bietet es keinen Mehrwert zu den Informationen, die schon aus der Skizze herausgelesen werden. Der einzige Vorteil besteht darin, dass die Darstellung mit Hilfe einer Matrix viel übersichtlicher und auch einfach zu lesen ist. Trotzdem muss überlegt werden, wie die einzelnen zu bewertenden Wechselwirkungs-Einflüsse mit integriert werden können.
- Bei der Programmiersprache UML können, je nachdem welche Diagrammart gewählt wird, die einzelnen Komponenten einfach dargestellt werden. Speziell beim Komponentendiagramm kann ähnlich wie bei einer Skizze die Abhängigkeiten abgebildet werden. Weitere Informationen können teilweise in den Knoten notiert werden. Hier müssten dann alle ermittelten Zuverlässigkeitsinformationen integriert

werden. Theoretisch ist dies zwar möglich, jedoch stellt sich hierbei die Frage der Übersichtlichkeit. Diese ist nur bedingt gegeben, da jede Komponente separat angeklickt werden muss. Zudem werden bei einer hohen Anzahl der Verbindungen einer Komponente viele Informationen enthalten sein, die nicht zwangsläufig einfach den richtigen Komponentenpaarungen zuordenbar ist.

- Der Aufbau von Semantischen Netzen besteht aus Kanten, Knoten und Beziehungen. So können theoretisch Komponenten einfach und schnell miteinander verknüpft werden. Jedoch ist der Mehrgewinn gegenüber einer Skizze nicht sichtbar. Weitere Informationen können nur durch einen Mehraufwand der Modellierung gewonnen werden. Darunter leiden aber die Lesbarkeit und die Verständlichkeit sehr stark. So ist auch das Semantische Netz nur bedingt sinnvoll bei der Betrachtung der Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen.
- Die Netzplantechnik kann nur die Komponentenbeziehungen aufstellen und eignet sich dadurch für die gestellten Anforderungen nicht.

Anhand dieser Aussagen wird deutlich, dass die alleinige Verwendung einer der angesprochenen Notationsmöglichkeiten nicht ausreicht um eine vollständige Bewertung der Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen zu gewährleisten. Ebenso müssen weitere Informationen über die Komponenten bzw. die Komponentenpaarungen gesucht werden, um eine Bewertung zu ermöglichen. Eine sinnvolle Möglichkeit ist es, mögliche Fehlzustände oder ungewollte, unzulässige Zustände einer Komponente zu notieren. Diese können dann dazu führen, dass die benachbarte Komponente dadurch beeinflusst wird. So ist es möglich, weitere Zuverlässigkeitsinformationen der Komponentenpaarungen zu ermitteln. Das Vorgehen scheint auf den ersten Blick einer Failure Mode and Effects Analysis, kurz FMEA ähnlich zu sein (vgl. Abschnitt 2.3.1). Der Unterschied zwischen der FMEA und der Wechselwirkungsbewertung ist jedoch recht groß. In der FMEA werden Fehlerarten, Fehlerursachen und Fehlerfolgen behandelt. Dabei befinden sich alle drei angesprochenen unterschiedlichen Fehler auf verschiedenen strukturellen Ebenen. Die Fehlerfolge steht in der obersten Ebene, darunter die Fehlerfolgen und in der untersten Ebene die Fehlerursachen. Das bedeutet, dass die FMEA nie benachbarte Komponenten betrachtet, welche sich in der Hierarchiestruktur auf derselben Ebene befinden, sondern immer die Fehlerursachen, Fehlerarten und Fehlerfolgen auf der Subsystem-, Teilsystem- und Gesamtsystemebene sucht und analysiert (siehe Bild 2.10). Dies kann aber bei einer Betrachtung von Wechselwirkungen nicht funktionieren. Hier muss, durch die Analyse von Komponentenpaarungen, die Untersuchung auf alle Fälle auf eine Ebene reduziert werden (Bild 6.1). Eine ebenenübergreifende Analyse ist nicht sinnvoll.

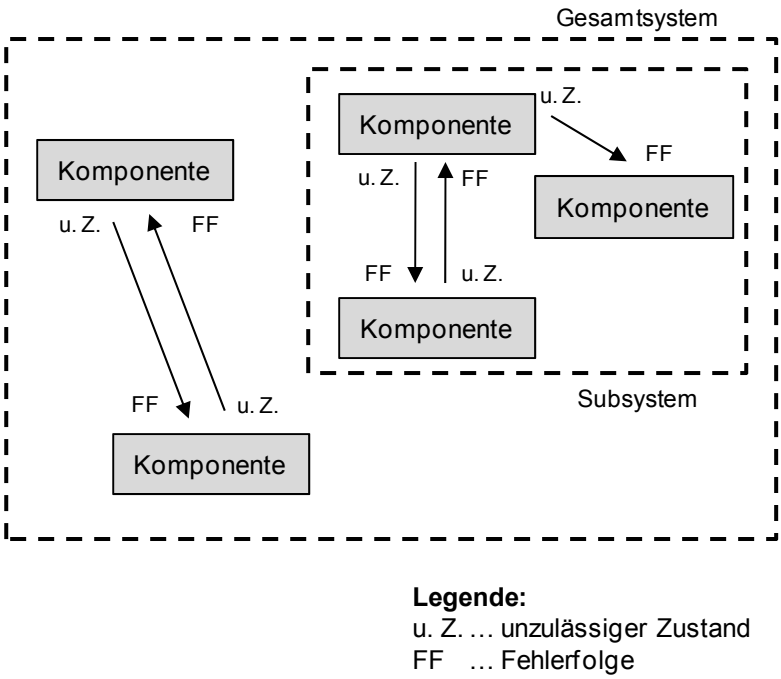


Bild 6.1: Darstellung von unzulässigen Zuständen und Fehlerfolgen bei der Betrachtung von Wechselwirkungen in den einzelnen Systemebenen

Angelehnt an die FMEA wird für die Bewertung von Wechselwirkungen eine Tabelle erstellt, in die unterschiedliche Informationen eingetragen werden (Bild 6.2). Diese Tabelle besteht aus zwei Abschnitten. Im ersten Abschnitt werden allgemeine Angaben über die beteiligten Komponenten notiert. Der nächste Abschnitt befasst sich mit der Zuverlässigkeit. Beim Ausfüllen der Tabelle müssen zuallererst die zwei Komponenten, welche miteinander interagieren, aufgeschrieben werden (Abschnitt 1). Die erste Spalte der Tabelle stellt die Komponente dar, von der die Wechselwirkung ausgeht. Dies bedeutet, dass Wechselwirkungen zwischen einem Komponentenpaar zwei mögliche Richtungen besitzen können. Aus diesem Grund können Komponentenpaarungen insgesamt zweimal auftreten – einmal steht die Komponente in der ersten Spalte und das andere Mal in der zweiten Spalte. In den nächsten Spalten der Tabelle werden die Wechselwirkungen gemäß [VDI04] in Materialfluss, Energiefluss und Informationsfluss unterteilt [30], [126].

Allgemein					*Zuverlässigkeit*						
Beteiligte Komponente *(1, Startpunkt)*	***Beteiligte Komponente*** *(2, Endpunkt)*	***Art der Wechselwirkung***			***Einfluss auf die Zuverlässigkeit***	***Unzulässiger Zustand von Komponente 1***	***Fehlerfolgen für Komponente 2***	***Bedeutung für die Systemzuverlässigkeit***	***Auftretenswahrscheinlichkeit Fehlfunktion Komponente 1***	***Auftretenswahrscheinlichkeit Fehlerfolge Komponente 2***	***Vorbedingungen***	***Wechselwirkungsfaktor***
		Infofluss	*Stofffluss*	*Leistungsfluss*								
Welle	Aktor			X	negativ	• Bruch • Blockieren • Vibration	• Verzug • Keine direkte Auswirkung • Bruch	Sehr hoch (5) Sehr hoch (5) Mäßig (3)	Mäßig (3) Gering (2) Hoch (4)	Gering (2) Sehr gering (1) Mäßig(3)	Auslegung	**30** **10** **36**
Aktor	Welle			X	negativ	• Blockieren • Verschleiß	• Bruch • Falsche Funktionalität	Sehr hoch (5) Mäßig (3)	Gering (2) Mäßig (3)	Gering (2) Gering (2)	Werkstoffpaarung	**20** **18**
Umwelt	Welle			X	negativ	• Temperatur • Elektromagnetische Strahlung	• Kriechen • Keine direkte Auswirkung	Gering (2) Sehr gering (1)	Mäßig (3) Sehr gering (1)	Gering (2) Sehr gering (1)		**12** **1**
...	...											

Bild 6.2: Wechselwirkungstabelle

Im nächsten Abschnitt, der sich mit der Zuverlässigkeit befasst, wird zu Beginn der Einfluss der Komponentenpaarung auf die Zuverlässigkeit abgefragt. Die Komponentenpaarung kann die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems entweder positiv, negativ oder gar nicht beeinflussen. Beispielsweise kann hier eine Reduzierung bzw. eine Begrenzung von Belastungen auf ein mechanisches System durch einen regelungstechnischen Eingriff genannt werden. Hierbei wird die Zuverlässigkeit gesteigert, d. h. die Zuverlässigkeit wird positiv beeinflusst. Als nächstes werden mögliche unzulässige Zustände von Komponente 1 aufgeschrieben. Entscheidend für die unzulässigen Zustände sind auch die Vorbedingungen, die erst zu einem solchen Zustand führen (Bild 6.3). Diese können aber in ihrem Auftreten sehr unterschiedlich sein. Beispielsweise kann die Vorbedingung von einer angrenzenden Komponente in Form eines Fehlers, der auch wieder von einer anderen Komponente ausgelöst wurde, kommen. Des Weiteren ist es möglich, dass der Fehlzustand zum einen konstruktiv durch eine falsche Auslegung oder zum anderen auch durch die Umwelt eintritt. Alle Vorbedingungen werden in einer separaten Spalte notiert. Mit Hilfe dieser können auch Fehlerketten aufgespürt werden. Dies bedeutet, dass eine Komponente x, die nicht mit Komponente y direkt verbunden ist, diese doch indirekt beeinflussen kann.

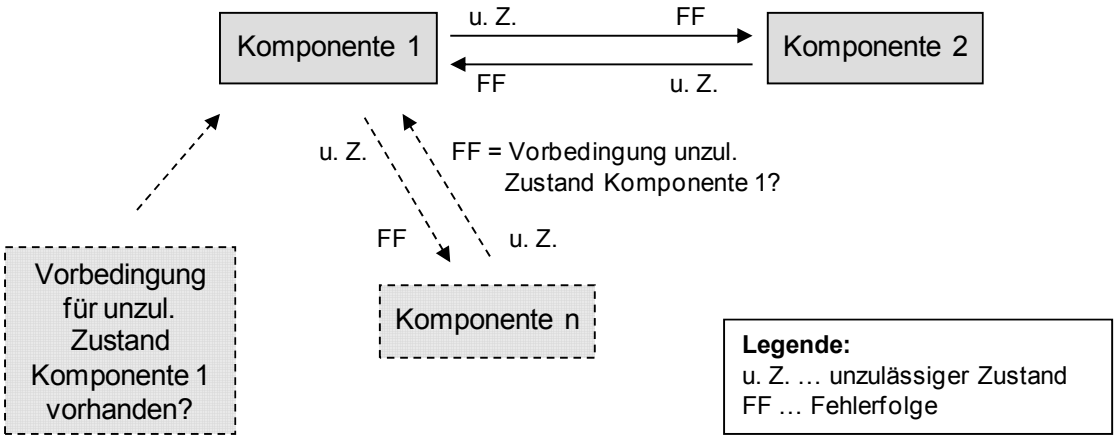


Bild 6.3: Wechselwirkungen und Vorbedingungen

Anschließend werden die Fehlerfolgen notiert, jedoch nicht für Komponente 1, sondern für Komponente 2. Die reine Bewertung wird im nächsten Schritt vorgenommen. Hierzu wird die Bedeutung für die Systemzuverlässigkeit, die Auftretenswahrscheinlichkeit der unzulässigen Zustände von Komponente 1 sowie die Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerfolge von Komponente 2 beurteilt. Klassiert werden die Bewertungsgrößen in fünf Bereiche: sehr gering (1), gering (2), mäßig (3), hoch (4) und sehr hoch (5). Bei der nachfolgend auszufüllenden Spalte, dem Wechselwirkungsfaktor, werden die Größen der obigen Einzelbewertungen multipliziert. Dadurch entstehen Werte, welche zwischen 1 und 125 liegen. Aus diesen können dann kritische Komponentenpaarungen herausgelesen werden und diese dann nach Bedarf verändert werden, so dass sich die Bewertungszahl reduziert. Ähnlich wie bei der FMEA gibt es

unterschiedliche Möglichkeiten, ab welcher Bewertungszahl eine Nachbesserung erforderlich ist. Die Optimierung soll bei der Ausfallart mit der größten Bewertungszahl beginnen und kann entweder bei einer gewissen Untergrenze beendet werden oder es kann das Pareto-Prinzips angewendet werden.

Um die Denkweise der Bewertungstabelle zu verstehen wird diese anhand eines kleinen Beispiels erläutert. Es wird eine mechatronische Komponentenpaarung verwendet: Welle – Aktor. Die Startkomponente ist die Welle, d. h. die Wechselwirkungen in Form des Leistungsflusses gehen von ihr aus. Tritt ein unzulässiger Zustand der Welle ein, so wird die Zuverlässigkeit negativ beeinflusst. Ein möglicher unzulässiger Zustand der Welle kann z. B. ein Bruch sein. Um nicht nur bei der Bewertung auf ein reines Komponentenpaarungsdenken beschränkt zu sein, müssen auch auf die Vorbedingungen für die unzulässigen Zustände eingegangen werden. Beim Bruch der Welle sind die Vorbedingungen auf die Auslegung beschränkt, d. h. andere Komponenten oder die Umwelt können diesen Zustand nicht hervorrufen bzw. beeinflussen. Als nächstes müssen die Fehlerfolgen für den Aktor bestimmt werden. Im Falle des Bruchs der Welle kann sich der Aktor verziehen, so dass es zu Funktionseinschränkungen bis hin zum Ausfall des Aktors kommen kann. Im letzten Schritt werden diese bisher nur schriftlich notierten Informationen mit Hilfe von Bewertungsziffern quantitativ dargestellt. Dabei wird die Bedeutung des Bruchs der Welle auf die Systemzuverlässigkeit als sehr hoch (5) dargestellt, da das Gesamtsystem nicht mehr funktionsfähig ist. Die Auftretenswahrscheinlichkeit des Bruchs der Welle wird ebenso wie die Fehlerfolge des Aktorverzugs als mäßig bzw. gering eingestuft. Insgesamt wird ein Wechselwirkungsfaktor von 30 ermittelt.

Die ganze Bewertung baut auf Wissen von Experten. In frühen Entwicklungsphasen ist diese Art der Informationsgewinnung häufig die einzige. Oftmals scheitert aber die Abfrage des Expertenwissens an verschiedenen Punkten. So kann es vorkommen, dass die Informationen, die häufig zwischen mehreren Personen ausgetauscht werden, nicht immer korrekt aufgenommen und abgefragt werden. Nach [88] gibt es insgesamt vier Schritte des Informationsaustauschs. Zuerst muss der Experte die Frage des Gegenübers verstehen. Anschließend muss sich der Experte an die relevanten Informationen erinnern, um die Fragen beantworten zu können. Diese Informationen werden dann beurteilt und bewertet. Als letztes werden die Informationen sowie die Bewertungen dem Gegenüber mitgeteilt. Eine weitere Fehlerquelle ist, dass die Person, welche die Informationen aufnimmt, diese nicht im Sinne des Experten versteht. Neben den Fehlern des Informationsaustauschs können auch die abgefragten Informationen zu einer Herausforderung führen. Je nach Fragestellung muss sich der Experte mit Informationen auseinandersetzen, die zu ungenauen Antworten führen, da der Experte Vereinfachungen und Annahmen treffen muss [88]. Muss die abgefragte Information sehr präzise sein, fällt dies einem Experten sehr schwer. Tabelle 6.1 zeigt exemplarisch die unterschiedlichen Schwierigkeitsstufen, wenn nach quantitativen Zuverlässigkeitskennwerte gefragt wird. Dabei steht eine geringe Ziffer für einen einfachen Schwierigkeitsgrad, eine hohe Ziffer für einen hohen Schwierigkeitsgrad.

Tabelle 6.1: Schwierigkeitsstufen Expertenwissen

Ziel der Frage	Schwierigkeitsgrad
Erster und letzter Ausfall	1
Maxima und Mittelwerte	2
Wahrscheinlichkeiten	3
Verteilungsparameter	4

Aus diesem Grund ist es sinnvoll, Experten so gut wie möglich zu unterstützen. Eine sinnvolle Möglichkeit stellt die Verwendung einer Art Checkliste dar. Hier kann der Experte anhand vorgegeben Informationen über den unzulässigen Zustand sowie deren Folgen entscheiden, welches für die jeweilige Komponentenpaarung zutrifft. Dadurch wird die Bewertung stark vereinfacht. Die Checklisten müssen für jede Domäne separat notiert werden. Im Folgenden werden unzulässige Zustände in allen Domänen vorgestellt (Tabelle 6.2). Anschließend wird exemplarisch für die Mechanik deren Fehlerfolgen vorgestellt. Dabei ist zu erwähnen, dass sich die unzulässigen Zustände und die Fehlerfolgen kaum unterscheiden. Als Fehlerfolgen können alle unzulässigen Zustände übernommen werden, es müssen aber noch einige weitere ergänzt werden.

Tabelle 6.2: Checkliste

Mechanik	Software	Elektronik
• Vibration / Schwingung • Blockieren • Verkanten • Druck falsch • Drucklos • Korrosion • Schmierung nicht ordnungsgemäß • Anriss • Bruch • Setzen • Materialwahl • Pitting / Ermüdung • Klemmen • Spiel • Dimensionierung (Durchmesser, …) • Oberflächenrauigkeit	• Falsche Spezifikation • Falsche Syntax • Laufzeitfehler • Fehlerhafter Algorithmus • Falsches Design • Falscher Entwurf • Tippfehler • …	• Bitflip • Belegung falsch • Verzögerungsfehler • Übersprechen • Kosmische Strahlung • Ungültige Codewörter • Platine defekt • Falsche Frequenz • Stromlos • …

Mechanik	Software	Elektronik
• Rauheit • Toleranz • Temperatur • Feuchtigkeit • Schmutz / Verunreinigungen • Örtliche Lage/ Abmessung • Unwucht • Verschleiß • Pressung zu hoch / zu niedrig • Spannung • Fertigung allgemein • …		

Als Fehlerfolgen für die Mechanik sind neben den Zuständen aus Tabelle 6.2 beispielhaft die folgenden zu nennen:

- Überhitzung /Temperatur
- Lärm
- Keine Auswirkung
- Montageproblem
- Funktion / Kraftschluss kann nicht gewährleistet werden
- Beschädigung
- Schlupf
- …

Zwar kann durch diese Vorgehensweise die Zuverlässigkeit der Wechselwirkungen bewertet werden, jedoch stellt sich die Frage, welche Informationen ein Entwickler dadurch verwenden kann. Ein Entwickler möchte im Normalfall einen einfachen und schnellen Überblick, welche Komponentenpaarungen kritisch sein können und vor allem welche Aspekte er speziell betrachten muss. Da in den Anforderungen aus Unterkapitel 3.4 eine Unterstützung der Entwickler gefordert wird, bietet es sich an diese Vorgehensweise um Informationen für Entwickler zu erweitern. Anhand eines einfachen Beispiels soll dies vollzogen werden. Komponente 1 ist eine Welle, Komponente 2 ein Lager. Von den angesprochenen Einflüssen aus Unterkapitel 3.3 wird eine ausgewählt, welche häufig erwähnt wird – die Temperatur. Jetzt stellt sich die folgende Frage: wie kann die Temperatur einer Komponente die andere beeinflussen? Ein einfacher Zusammenhang ist, dass bei der Erhöhung bzw. Senken der Temperatur einer Komponente an der Komponente, welche direkt mit dieser verbunden ist, ebenso eine Temperaturänderung gemessen wird. Dies alleine ist nicht ausreichend, um eine Verbindung zur Zuverlässigkeit herauszulesen. Deshalb muss ein anderes Kriterium verwendet werden: der Temperaturkoeffizienten beider Komponenten. Sind die Koef-

fizienten stark unterschiedlich, kann durch eine Temperaturänderung die Zuverlässigkeit stark betroffen sein. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, gleiche bzw. ähnliche Temperaturkoeffizienten zu verwenden, falls auf die betrachtete Komponentenpaarung öfters Temperaturänderungen wirken. In [79] sind weitere Einflussfaktoren zu finden, welche in frühen Entwicklungsphasen bestimmt werden können:

- **Temperatur:** Verbundene Komponenten können unterschiedliche Temperaturkoeffizienten haben. Falls die Umgebungstemperatur häufig variiert, kann die Zuverlässigkeit der Komponentenpaarung betroffen sein.
- **Korrosion:** Falls eine Komponentenpaarung unterschiedlich edle Metalle hat, kann Kontaktkorrosion entstehen. Des Weiteren kann die Korrosion durch Feuchtigkeit entstehen.
- **Vibration:** Falls eine Komponente zu vibrieren beginnt, kann die angrenzende Komponente beeinflusst werden. Im schlimmsten Fall kann eine der Komponenten brechen.
- **Passung:** Wird eine Passung falsch gewählt, kann eine Komponentenpaarung vielleicht nicht mehr die Kraft oder das Moment wie vorgesehen übertragen. Jedoch kann eine zu eng gewählte Passung zu einer zu hohen Hertzschen Pressung und somit zum Versagen führen.
- **Toleranz:** Besitzen verbundene Komponenten eine falsch gewählte Toleranz, so führt dies zu einer Einschränkung der Funktionalität.
- **Oberflächenrauigkeit:** Ebenso wie bei den Toleranzen kämpfen Komponentenpaarungen mit einer falsch gewählten Oberflächenrauigkeit mit einer Funktionalitätsreduktion.
- **Zusammenbau:** Komponenten sollen einfach zusammenzubauen sein. Andernfalls können sie durch den Einbau in das System beschädigt oder zerstört werden.

Die Bewertung dieser Faktoren kann auf verschiedene Arten erfolgen. [79] schlägt als Diskussionsgrundlage insgesamt drei Varianten zur Bewertung vor.

Bei Variante 1 werden die einzelnen Einflüsse, die im Unterkapitel 5.4 ermittelt wurden, einzeln aufgelistet. In jede Zeile werden die Komponentenpaarungen notiert, welche beispielsweise durch eine Skizze herausgelesen werden können. Anschließend werden die Einflüsse für jede Komponentenpaarung bewertet (Bild 6.4). Dabei können die Bewertungsstufen flexibel gehandhabt werden. Eine Möglichkeit der Darstellung wäre eine Gewichtung von 1 bis 5, wobei die Ziffer 1 hier bedeuten würde, dass der Einfluss auf die Zuverlässigkeit sehr gering ist. Im Gegensatz dazu würde die Ziffer 5 einen hohen Einfluss auf die Zuverlässigkeit ausdrücken. Eine andere Möglichkeit der Darstellung wäre über eine Ampelfunktion. Zwar ist diese nur dreistufig, jedoch hat diese den Vorteil, dass der Entwickler sehr schnell die wichtigsten Zuverlässigkeitsmerkmale des Systems herauslesen kann.

		Tempe-ratur	Korrosion	Vibration	Passung	Toleranz	Oberflächen-rauigkeit	Zusammen-bau
Komponentenpaarung	Welle - Aktor	mittel (2)	niedrig (1)	hoch (3)	…	…	…	…
	Aktor - Welle	…	…	…				
	…							
	…							
	…							

Bild 6.4: Variante 1 zur Bewertung von Zuverlässigkeitseinflüssen

Bei Variante 2 wird im Gegensatz zu Variante 1 nicht eine absolute Bewertung der einzelnen Zuverlässigkeitseinflüsse vorgenommen. Es werden alle Zuverlässigkeitseinflüsse einzeln betrachtet. Dabei werden alle Komponentenpaarungen in eine bestimmte Reihenfolge gebracht, so dass die Komponentenpaarungen mit dem größten Einfluss auf die Zuverlässigkeit ganz oben stehen. Folglich steht die Komponentenpaarung mit dem geringsten Einfluss auf die Zuverlässigkeit ganz unten in der Liste (Bild 6.5).

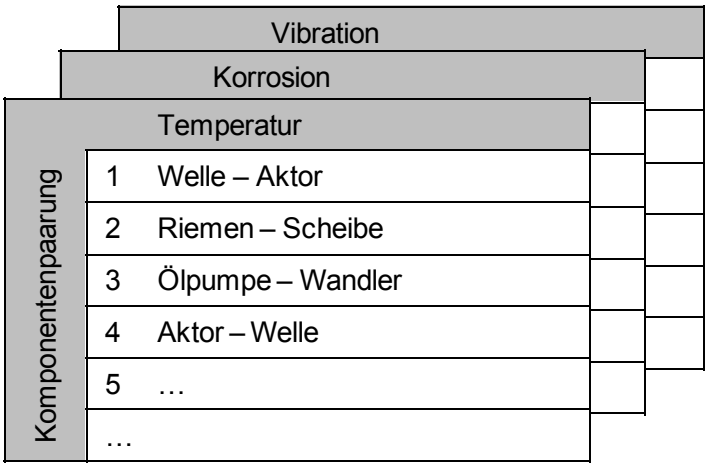


Bild 6.5: Variante 2 zur Bewertung von Zuverlässigkeitseinflüssen

Variante 3 vergleicht die einzelnen Einflüsse in einer Matrixstruktur, wie sie schon im Unterkapitel 4.2 beschrieben wurde, miteinander. Dabei stehen aber nicht die einzelnen Komponenten in der Spalte und Zeile, sondern die einzelnen Zuverlässigkeitseinflüsse. Insgesamt entspricht die Anzahl an Bewertungsmatrizen genau der Anzahl an Komponentenpaarungen. Die Bewertung selbst wird 3-stufig durchgeführt. Entweder ist der Einfluss der 1. Komponente auf die Zuverlässigkeit größer (+), gleich (0) oder geringer (-) als der Einfluss von Komponente 2. So kann für jede Komponentenpaarung die größten Einflüsse auf die Zuverlässigkeit systematisch erarbeitet werden.

Diese kann mit Hilfe der Aktiv- und der Passivsumme, wie sie von der Einflussanalyse (Abschnitt 4.2.2) bekannt ist, ermittelt werden (Bild 6.6).

	Temperatur	Korrosion	Vibration	Passung	Toleranz	Oberflächenrauigkeit	Zusammenbau
Temperatur		0	+	-	…	…	…
Korrosion	0		-	+	0	…	
Vibration	+	-		…	…		
Passung	+	0	0				
Toleranz	…						
Oberflächenrauigkeit							
Zusammenbau							

Bild 6.6: Variante 3 zur Bewertung von Zuverlässigkeitseinflüssen

Alle drei Varianten besitzen die Möglichkeit, dass die Zuverlässigkeitseinflüsse einer Komponentenpaarung bestimmt werden können. Trotzdem sind sie in ihrem Aufbau verschieden. Grundsätzlich muss überlegt werden, welche der drei Varianten die sinnvollste darstellt. Vor allem die Variante 1 besitzt den Vorteil, dass sie durch den gleichen Grundaufbau wie die oben erläuterte Bewertungstabelle in diese integrierbar ist. Dadurch können die Zuverlässigkeitseinflüsse bei Bedarf einfach an die Bewertungstabelle angegliedert werden, so dass zum einen ein ausführlicher Überblick über die Wechselwirkungen samt deren Bewertung als auch eine Unterstützung der Entwickler durch die Bewertung von Zuverlässigkeitseinflüssen gewährleistet ist (Bild 6.7).

Zu den bisherigen zwei Abschnitten der Bewertungstabelle kommt noch ein weiterer Abschnitt dazu. Im letzten Abschnitt werden – wie bereits schon in diesem Unterkapitel unter der Beschreibung von Variante 1 – dem Entwickler Informationen über die Konstruktion, Fertigung und Montage zur Verfügung gestellt. Dazu werden dem Experten im Vorfeld Fragen zu den unterschiedlichen Zuverlässigkeitseinflüssen gestellt. Sind die Einflüsse wichtig, wird das Feld rot angezeigt, muss auf die Einflüsse nicht geachtet werden, erscheint das Feld grün. Dadurch kann der Entwickler schnell und einfach sehen, auf was bei der Neukonstruktion bzw. der Anpassungskonstruktion geachtet werden muss.

Allgemein				
Beteiligte Komponente (1, Startpunkt)	Beteiligte Komponente (2, Endpunkt)	Art der Wechselwirkung		
		Info-fluss	Stoff-fluss	Lei-stungs-fluss
Welle	Aktor			X
Aktor	Welle			X
Umwelt	Welle			X
...	...			

Zuverlässigkeit							
Einfluss auf die Zuver-lässigkeit	Unzulässiger Zustand von Kompo-nente 1	Fehlerfolgen für Komponente 2	Bedeutung für die Systemzu-verlässigkeit	Auftretens-wahr-scheinlichkeit Fehlfunktion Komponente 1	Auftretens-wahr-scheinlichkeit Fehlerfolge Komponente 2	Vorbedin-gungen	Wechsel-wir-kungs-faktor
negativ	• Bruch • Blockieren • Vibration	• Verzug • Keine direkte Auswirkung • Bruch	Sehr hoch (5) Sehr hoch (5) Mäßig (3)	Mäßig (3) Gering (2) Hoch (4)	Gering (2) Sehr gering (1) Mäßig(3)	Auslegung	30 10 36
negativ	• Blockieren • Verschleiß	• Bruch • Falsche Funktionalität	Sehr hoch (5) Mäßig (3)	Gering (2) Mäßig (3)	Gering (2) Gering (2)	Werkstoff-paarung	20 18
negativ	• Temperatur • Elektro-magnetische Strahlung	• Kriechen • Keine direkte Auswirkung	Gering (2) Sehr gering (1)	Mäßig (3) Sehr gering (1)	Gering (2) Sehr gering (1)		12 1

Konstruktion/ Fertigung/ Montage						
Unterschiedliche Temperatur-koeffizienten wichtig?	Kann Korrosion auftreten?	Passungen wichtig?	Toleranzen wichtig?	Oberflächen-rauigkeiten wichtig?	Können Vibrationen auftreten?	Ist der Zusam-menbau wichtig?
Mittel	Mittel	Ja	Ja	Mittel	Ja	Mittel
Mittel	Mittel	Nein	Mittel	Mittel	Nein	Mittel
Mittel	Nein	Ja	Ja	Nein	Mittel	Nein

Bild 6.7: Wechselwirkungstabelle

6.2 Darstellung und Ermittlung von kritischen Komponenten bzw. Komponentenpaarungen

Die im Unterkapitel 6.1 vorgestellte Wechselwirkungstabelle stellt das zentrale Element zur Bewertung der Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen dar. Jedoch können durch wenige zusätzliche Schritte weitere Informationen erhalten werden. Auch eine Einbindung an bestehende Entwicklungsmethoden soll möglich sein.

Zu Beginn der Entwicklung stehen meist Skizzen oder ähnliches zur Verfügung. Diese sollte als erste Informationsquelle verwendet werden [32]. Mit Hilfe dieser können

einzelne Komponenten identifiziert und benannt werden. Äußere Einflussfaktoren sind zwar anhand der Skizze nicht bestimmbar, können aber trotzdem durch die Berücksichtigung der Spezifikationen der Skizze hinzugefügt werden. Anschließend können die Komponentenpaarungen – sowohl Komponenten untereinander als auch Komponente und Umgebung – eingezeichnet bzw. bestimmt werden (Bild 6.8).

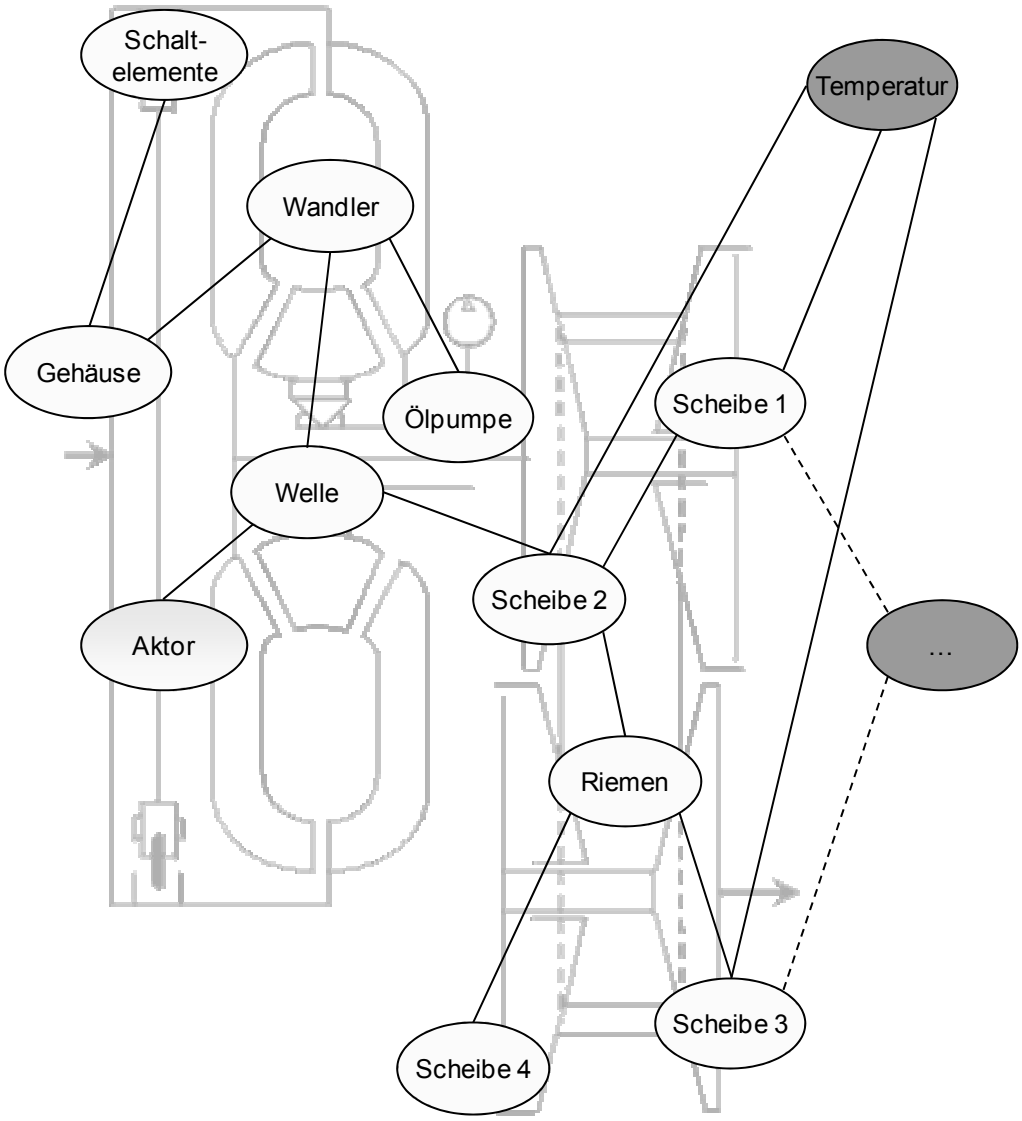


Bild 6.8: Bestimmung der Komponenten mit Hilfe einer Skizze [32]

Sinnvoll gestaltet sich der nächste Schritt: die Verwendung einer Matrixstruktur, in die alle Komponentenpaarungen eingetragen werden. Hierdurch ist es möglich, fehlende Komponentenpaarungen schnell zu entdecken, zudem kann diese Matrixstruktur für weitere Schritte verwendet werden. Die Komponentenpaarungen werden in der Matrix erstmals durch ein Kreuz symbolisiert. Der nächste Schritt umfasst die im Unterkapitel 6.1 ausführlich erklärte Bewertung der Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen unter Verwendung der Wechselwirkungstabelle. Die Bewertungen werden anschließend in die Matrixstruktur übernommen. Dadurch sind nun nicht mehr Kreuze

in der Matrix zu finden, sondern die Bewertungsziffern aus der Wechselwirkungstabelle. Nun ist es möglich – angelehnt an die Einflussanalyse (Abschnitt 4.2.2) – eine Aktiv- und Passivsumme zu berechnen. Dies bedeutet, dass Informationen über die Komponenten bestimmt werden, wie diese die Wechselwirkungen anderer Komponenten beeinflusst bzw. von den Wechselwirkungen derer beeinflusst wird. Des Weiteren können durch die Matrixdarstellung kritische Pfade bestimmt werden. Ein kritischer Pfad kann verschiedene Aspekte aufzeigen: zum einen wird die absolute Anzahl an Komponenten bestimmt, welche miteinander verbunden sind, zum anderen kann durch die Verwendung der Bewertungsziffern aus der Wechselwirkungstabelle durch Addition dieser eine kritische Ziffer berechnet werden. Somit wird schnell deutlich, welcher Pfad bzw. die Komponenten in dem Pfad nochmals überarbeitet bzw. nochmals näher betrachtet werden soll.

6.3 Ablauf der Zuverlässigkeitsmethode zur frühzeitigen Bewertung von Wechselwirkungen

Die Zuverlässigkeitsmethode zur frühzeitigen Bewertung von Wechselwirkungen kann in mehrere Schritte zusammengefasst werden. Dadurch ist es möglich alle in frühen Entwicklungsphasen vorliegenden Informationen abzubilden. Im Folgenden werden diese einzelnen Schritte aufgelistet:

1. Verwendung einer Skizze
2. Bezeichnung der einzelnen Komponenten
3. Berücksichtigung äußerer Einflussfaktoren
4. Verbinden der Komponenten
5. Erstellen einer Matrix
6. Verbindungen aus der Skizze in die Matrix übernehmen
7. Erstellen einer Tabelle
8. Bewertung
9. Rückführung der Bewertung in die Matrix
10. Erstellen von kritischen Pfaden mit Hilfe der Matrix
11. Bewertung der kritischen Pfade

7 Software-Tool

Eine der Anforderungen an die Zuverlässigkeitsbewertungsmethode von Wechselwirkungen ist die Verwendung eines Software-Tools. Mit diesem ist es möglich, einige der Schritte automatisiert ausführen zu lassen. Zu Beginn muss zwei Begriffe voneinander abgetrennt werden, nämlich Automatisierung und Rechnerunterstützung. Automatisierung stammt von dem griechischen Wort „automatos“ und bedeutet nach [39] sich selbst bewegend bzw. von selbst geschehend. [82] bezeichnet einen Automaten als ein selbstständig arbeitendes technisches System wie beispielsweise einen Zigarettenautomaten oder einen Fahrkartenautomaten. Der Begriff Automatisierung kann allgemein verwendet werden, wenn eine Maschine, ein Gerät oder ein technisches System mit Hilfe von elektrischen, mechanischen, pneumatischen oder hydraulischen Einrichtungen in die Lage versetzt wird, mehr oder weniger selbstständig zu arbeiten [82]. Durch diesen Vorgang werden menschliche Tätigkeiten durch maschinelle Einrichtungen ersetzt.

Durch die Automatisierung wird zwar, wie oben zu entnehmen ist, die menschliche Tätigkeiten verdrängt, jedoch können aus diesem scheinbar negativen Aspekt einige Vorteile gezogen werden.

- Laut [98] sind repetitive Aufgaben demotivierend und bremsen letztlich die Effizienz von Mitarbeitern.
- Der teilweise recht große manuelle Aufwand wird deutlich verringert. Dies führt zu:
    - einer Kostenreduktion,
    - effizienteren Arbeitsabläufe
    - Minimierung der Fehlerquellen und Fehlerquoten [28], [98].

Im Gegensatz zur Automatisierung werden bei der Rechnerunterstützung keine menschlichen Tätigkeiten verdrängt. Wie der Name bereits schon sagt, wird hier ein Entwickler in vielen Phasen des Entwicklungsprozesses durch Anwendung rechnergestützter Systeme auf leistungsfähiger Hardware unterstützt. Dies bedeutet, Software-Systeme wie beispielsweise CAD (Computer Aided Design) sowie das in diesem Kapitel vorgestellte Software-Tool fällt in die Kategorie Rechnerunterstützung.

7.1 Anforderungen an das SW-Tool

Das zu entwickelnde Software-Tool soll mehreren Anforderungen genügen. Vor allem sollen aufwändige Arbeiten wie beispielsweise die Auswertung der kritischen Pfade anhand der Matrixdarstellung rechnergestützt dargestellt werden (siehe Unterkapitel 3.4). Jedoch sollen sich die Anforderungen nicht nur auf die Tätigkeiten, welche die Bediener entlasten, reduzieren, sondern auch die Inhalte, die Funktionalität und das Layout des Tools müssen mitberücksichtigt werden. Im Folgenden sind die Anforderungen an das Software-Tool zu finden:

- Laden und Editieren einer Bild-Datei
- Dynamische Erstellung und Bearbeitung von Komponenten

- Anlegen und Bearbeitung von Verbindungen und ergonomische Darstellung als Graph
- Synchronisierte Verwaltung der Komponenten und Verbindungen
- Darstellung und Editieren einer Tabelle
- Laden und Speichern der Informationen
- Betriebsfreundliches, ergonomisches Layout

Für die Erstellung und vor allem die Erfüllung aller Anforderungen ist die Programmiersprache wichtig. Prinzipiell gibt es genügend Sprachen, welche für dieses Tool in Frage kommen. Im Folgenden werden verschiedene Möglichkeiten zur Umsetzung aufgezeigt.

7.2 Programmiersprachen und Softwareplattform

Für das Software-Tool sind insgesamt drei Programmiersprachen, ein bestehendes Datenbanksystem und eine automatisierte Oberfläche untersucht worden. Im Einzelnen sind dies:

- Java
- Visual C#
- Visual Basic
- Microsoft Access
- Makroprogrammierung

Java ist eine von der Firma SUN Microsystems entwickelte Programmiersprache. Sie repräsentiert die Gruppe der objektorientierten Programmiersprachen. Eine objektorientierte Programmierung basiert auf so genannten Objekten, deren Verknüpfungen und Vererbung [69]. In einem Objekt sind Funktionen und Daten möglichst eng zusammengefasst. Ein Objekt wird nach außen stark gekapselt, damit Methoden von fremden Objekten die enthaltenen Daten nicht manipulieren. Die Programmierung reduziert sich in erster Linie auf die Auswahl und Konstruktion der passenden Objekte und deren sinnvollen Verbindungen, denn in Bibliotheken sind die meisten Objekte bereits enthalten [12]. Java besitzt nach [65], [74] eine umfangreiche Klassenbibliothek und ist plattformunabhängig. Dies bedeutet, dass eine Anwendung nicht auf ein Betriebssystem oder eine andere bestimmte Software angewiesen ist. Des Weiteren entsprechen die Ausdrücke in Java weitgehend denen von C bzw. C++ [80].

Visual C# wurde im Jahre 2001von Microsoft veröffentlicht. Die Basis von Visual C# bildet ein .NET Framework [25], welches eine umfangreiche Klassenbibliothek unter Windows-Betriebssystemen darstellt. Dadurch ist es im Gegensatz zu Java nicht plattformunabhängig. Nach [24] ist der Grundsatz von Visual C#, dass unterschiedlichen Programmiersprachen eine gemeinsame Basis geboten wird und nicht wie bei Java auf allen Plattformen präsent zu sein. Somit kann einem Programmierer zu Beginn die Entscheidung abgenommen werden, welche Programmiersprache er wählt. Im .NET Framework spielt dies keine Rolle [24]. Laut [111] ist die Syntax von Visual C# ähnlich wie von C++. Ebenfalls wie Java ist Visual C# den objektorientierten Programmiersprachen zuzuordnen.

Seine Ursprünge von **Visual Basic** bildet die Programmiersprache Basic. Bei Basic handelt es sich um eine einfache Sprache, welche Begriffe aus dem englischen direkt übernommen hat. Nach und nach wurden Basic mehrere Funktionalitäten hinzugefügt. Zuerst war dies die Funktion der interaktiven Gestaltung von Benutzeroberflächen im Jahre 1991 [130]. Dies war der Ursprung von Visual Basic. Mittlerweile wurde Visual Basic an das von Windows entwickelte .NET-Framework angegliedert und repräsentiert eine objektorientierte Programmiersprache. Durch die .NET Einbindung ist Visual Basic recht ähnlich zu C#, nur die Syntax unterscheidet sich etwas [78]. Ein Nachteil von Visual Basic liegt darin, dass von seitens Microsoft eher die Sprache C# unterstützt und weiterentwickelt wird [77].

Access ist nach [29] ein Datenbankmanagementsystem von Microsoft, welches mit riesigen Datenmengen umgehen kann. Die Daten werden in einer relationale Datenbank gespeichert [112]. Dies bedeutet, dass

- alle Daten in Form von zweidimensionalen Tabellen dargestellt werden.
- zwischen den Tabellen Beziehungen dargestellt werden, so dass Mehrfachnennungen von Daten vermieden werden.
- das Datenbanksystem einen umfangreichen Befehlsvorrat zur Veränderung und Abfrage der Tabellen bietet.

Wie für die Microsoft-Produkte üblich, gibt es Datenaustauschmöglichkeiten untereinander. Vor allem die Schnittstelle zu Excel ist sehr sinnvoll, da hiermit Auswertungen gemacht werden können. Es sind auch andere Schnittstellen vorhanden. Beispielsweise können auch andere Datenbanksysteme wie beispielsweise SQL-Server angesprochen werden [62].

Unter **Makros** wird im Betriebssystem Microsoft Windows eine Automatisierung der Oberfläche verstanden. Nach [86] kann ein Makro als die Zusammenfassung von Befehlen, Anweisungen und Funktionen, die auf "Knopfdruck" ausgeführt werden können, definiert werden. Dies geschieht mit Hilfe von sogenannten Makrorecordern, welche einzelne Befehlsfolgen und Bedienungsschritte aufzeichnet. Als Programmiersprache für die Makros dient Visual Basics for Applications (VBA).

Ausgehend von den Anforderungen an die Programmiersprache müssen die vorgestellten unterschiedlichen Möglichkeiten bewertet werden. Neben der Erstellung, Editierung und Darstellung von Objekten, dem Laden von einer Bilddatei, der Synchronisationsmöglichkeit, einer leichten Erstellung von Datenbanken und Verknüpfung dieser ist auch die grafische Benutzeroberfläche (Graphical User Interface, kurz: GUI) wichtig. Im Jahre 1981 wurde nach [3] mit der Software „Star“ der Grundstein der grafischen Betriebsoberfläche mit Mausbedienung gelegt. Seit diesem Zeitpunkt wurde verstärkter Wert auf die Ergonomie von Computersoftware gelegt. Hauptelemente einer grafischen Benutzungsoberfläche sind unter anderem Fenster, Schaltflächen, Werkzeugleisten, Schieberegler und Symbole. Mittlerweile gibt es sogar schon Anforderungen an die grafischen Benutzungsschnittstellen im Rahmen der Mensch-Computer-Kommunikation [68].

Im Folgenden werden die fünf Möglichkeiten anhand festgelegter Kriterien miteinander verglichen (Tabelle 7.1).

Tabelle 7.1: Anforderungen an die Programmiersprachen

Anforderungen	Java	Visual C#	Visual Basic	MS Access	Makros
OO – GUI*	OO gut GUI OK	OO gut GUI gut	OO OK GUI OK	Für Datenbankprogrammierung und –bearbeitung sehr geeignet. Jedoch ist es für die Objektorien-tierte Programmierung nicht geeignet.	Bei analogen Arbeiten sehr nützlich. Für den vorliegenden Fall jedoch nicht.
Erstellung der Objekte	Ja	Ja	ja		
Editieren der Objekte	Ja	Ja	Ja		
Darstellung der Objekte	Ja	Ja	Ja		
Drag & Drop	Ja	Ja	Ja		
Laden & Speichern	Ja	Ja	Ja		
Bilddatei laden	Ja	Ja	Ja		
Graphische Programmierung	Ja	Sehr flexibel	Ja		
Möglichkeiten zur Synchronisation	Nein	Ja (WPF)	Ja (WPF)		
Datenbank	schlecht	Sehr gut	gut		

* OO = Objektoriertiert, GUI = Graphical Unit Interface (grafische Benutzeroberfläche)

Wie aus Tabelle 7.1 zu entnehmen ist, fallen bereits die Möglichkeit Microsoft Access sowie die Makroprogrammierung heraus. Auch die Verwendung von Java ist durch fehlende Synchronisationsmöglichkeit hinfällig. Bei Java gibt es im Gegensatz zu dem .NET-Framework wenige feste Bibliotheken, d. h. wiederverwendbare selbstständige Programmkomponenten. Eine Art der Bibliothek des .NET-Frameworks ist u. a. auch der Zugriff auf Datenbanken [90]. Diese müssen in Java händisch angelegt und verknüpft werden. Dadurch entsteht ein viel größerer Aufwand [38]. Ein weiterer Vorteil bei Visual C# und Visual Basic ist die Verwendung von der Technologie Windows Presentation Foundation (WPF). Mit dieser ist es möglich, die Darstellung einer Anwendung vollkommen getrennt vom Programmcode zu entwerfen [128]. Beim letzten Punkt – die Aufstellung, Verwaltung, Verwendung und Darstellung von Datenbanken – ist die Sprache Visual C# die beste. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass aufgrund der neuen Technologie Windows Presentation Foundation, welche die Datenverwaltung und das Layout trennt, dem Aspekt der Datenbank sowie der derzeit besten Unterstützung und Weiterentwicklung seitens Microsoft, die Entscheidung auf Visual Studio 2008 mit der Programmiersprache „Visual C#“ fiel.

7.3 Aufbau und Funktionsweise des SW-Tools

In diesem Unterkapitel werden der Aufbau des Software-Tools, die grafische Bedienung sowie die technische Realisierung näher erläutert. Zudem wird ein Beispiel präsentiert um aufzuzeigen, wie man gestützt durch das Programm die Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen bestimmen kann.

Den ersten Eindruck des Programms verschafft ein Blick auf die grafische Oberfläche (Bild 7.1). Einen Großteil der Fläche ist für die einzulesende Abbildung sowie die zu erstellenden Komponentenbezeichnungen und deren Verbindungen vorgesehen. Die Komponenten werden als Knoten dargestellt, die Verbindungen mit Knoten. Die einzelnen Boxen können aber vergrößert und verkleinert werden, so dass jedem Benutzer die für sich optimale Oberfläche zur Verfügung steht. Es wird schnell deutlich, dass das Tool sich stark an Microsoft-Produkte anlehnt, was die Verständlichkeit und die Ergonomie steigert. Die GUI hat mehrere Bestandteile. Im Folgenden werden sie aufgezählt und erklärt.

- Die **Steuerleiste,** welche im oberen Teil der Oberfläche zu finden ist, enthält insgesamt drei Menüs: Datei, Bearbeiten und Anordnen. Das Menü „Datei“ ist in Öffnen, Speichern und Drucken der Datenstände untergliedert. Unter dem Menü „Bearbeiten“ können Elemente gelöscht werden. Der letzte Menüpunkt „Anordnen“ erlaubt es, dass die Elemente nach Gruppen und in verschiedenen Ebenen angeordnet werden.
- Im **Eingabeblock,** welcher sich rechts oben befindet, können die Beschreibungen der Komponente editiert werden. Um eine größere Übersichtlichkeit zu erreichen, werden die einzelnen Komponentenbezeichnungen in dem jeweiligen Knoten auf fünf Ziffern beschränkt. Systemintern wird diese Eingabe im Feld „Name“ gespeichert. Die exakte Bezeichnung der Komponenten wird in das Feld „Bezeichnung“ innerhalb des beschriebenen Eingabeblocks eingegeben.
- Falls eine eingelesene Abbildung sehr groß und detailliert ist, kann die **Zoombox,** welche sich links befindet, verwendet werden. Mit dieser ist es möglich, die Abbildung in mehrere Stufen größer oder kleiner zu zoomen. Zum einen kann die vollständige Darstellung der Abbildung gewählt werden, als auch vordefinierte Zoomstufen.
- In den Reiter **Toolbox**, welche sich am rechten Rand befindet, werden zum einen die Komponenten samt deren Namen und Bezeichnung automatisch aufgenommen. Dafür müssen zuerst Knoten, welche die Komponenten symbolisieren, angelegt werden. Zum anderen sind auch noch die verbundenen Komponentenpaarungen zu finden. Die Verbindungen entsprechen den Wechselwirkungen zwischen den Komponenten. Eine Verbindung zeigt immer nur in eine Richtung. Es kann also die Quelle und die Senke eindeutig definiert werden.
- Im anderen Reiter – **Tabelle** – wird automatisch eine Tabelle angelegt. In dieser sind wieder die Komponentenpaarungen zu finden, die bereits ermittelt wurden. Der Kopf der Tabelle entspricht dabei genau dem von Bild 7.1. Die Zeilen, welche noch nicht ausgefüllt sind, können hier editiert werden.

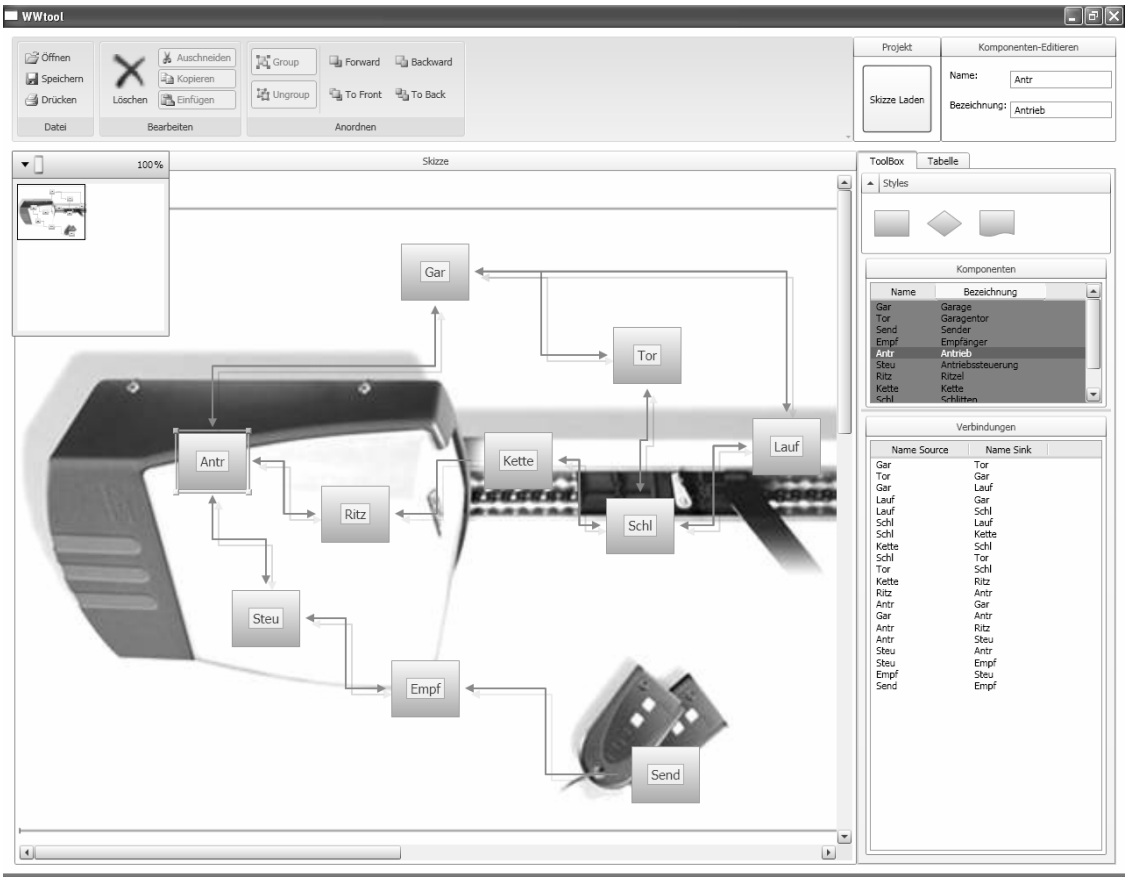


Bild 7.1: Grafische Oberfläche des SW-Tools

7.4 Bedienung und Vorgehensweise

In diesem Unterkapitel wird aufgezeigt, wie das SW-Tool bedient wird, um die Zuverlässigkeitsbewertung von den Wechselwirkungen in einem System zu erlangen. Hierbei wird nicht auf jeden einzelnen Schritt eingegangen, sondern nur die wichtigsten Schritte erklärt.

Nach dem Starten des Programms wird als erstes eine Skizze oder Vergleichbares geladen. Dazu ist ein Button rechts oben vorgesehen. Nach dem Anklicken von diesem erscheint ein Fenster, welches wie im Windows Explorer üblich ist, die gesamte Verzeichnisstruktur des Systems aufzeigt. Die zu ladende Skizze wird auf diesem Weg ausgewählt und in das Programm geladen. Als Dateiformat stehen die üblichen Bilddateien wie beispielsweise *.jpg oder *.bmp zur Verfügung. Das Bild ist nun in dem großen Fenster zu sehen. Es kann nun nach Belieben größer oder kleiner gezogen werden, jedoch ist es nicht möglich, die Skizze in dem Tool zu editieren. Im nächsten Schritt werden alle Komponenten, welche in der Skizze zu sehen sind, bezeichnet. Auf der rechten Seite sind verschiedene „Styles“ zu finden, welche die Komponentenknoten unterschiedlich aussehen lassen und dadurch auch einfacher unterscheidbar machen. Die einzelnen Styles werden per Drag and Drop an die gewünschte Position im Fenster gezogen. Anschließend kann es natürlich noch verändert werden, zum ei-

nen die Position als auch die Größe. Dazu muss der Mauscursor verwendet werden. Ist er mittig des Elements positioniert, kann die Position verschoben werden. Dabei ändert sich der Mauszeiger zu vier Pfeilspitzen, die nach links, rechts, oben und unten zeigen. Zur Änderung der Größe muss das Style als erstes durch einen Klick ausgewählt sein. Anschließend muss der Mauszeiger in einer der Ecken bewegt werden, so dass sich der Zeiger so ändert, dass zwei Spitzen angezeigt werden, welche nach links oben und rechts unten zeigen. Durch ein Ziehen kann die Größe geändert werden. Zur besseren Unterscheidung der einzelnen Komponenten dient neben den verschiedenen Stylesarten die Bezeichnung der Komponente. Dazu sind rechts oben zwei Felder zu finden – Name und Bezeichnung, siehe hierzu Unterkapitel 7.3. Diese zwei Felder werden auch in dem Feld „Komponenten“, welche rechts mittig zu finden ist, übernommen. Hier werden alle Komponenten, welche im Fenster eingetragen sind, automatisiert eingetragen (Bild 8.1). So kann immer geprüft werden, welche Komponenten vorhanden sind. Neben den Komponenten aus dem System müssen auch noch weitere äußere Einflüsse, wie beispielweise die Temperatur eingetragen werden. All diese erwähnten Schritte zur Erstellung der einzelnen Komponenten muss der Bediener selbsttätig machen.

Der nächste Schritt umfasst die Erstellung von Verbindungen. Ähnlich wie bei Microsoft Powerpoint fährt man den Mauszeiger über ein Style und es erscheinen vier blaue kleine Rechtecke links, rechts, oben und unten. Klickt man einen dieser Rechtecke an und hält die Maustaste gedrückt, erscheint eine Verbindungslinie. Diese wird zu einem anderen Style bewegt, an dem dann auch vier kleine blaue Rechtecke erscheinen. Nun können diese durch Loslassen der Maustaste verbunden werden. Dabei erscheint an der zweiten Komponente eine Pfeilspitze, d. h. die Komponente 1 zeigt auf die Komponente 2. Soll eine Verbindung in beide Richtungen eingerichtet werden, muss dieselbe Prozedur noch andersherum erfolgen. Der einzige Unterschied bei der Verbindungserstellung in diesem SW-Tool zu dem Programm Microsoft Powerpoint besteht darin, dass die Verbindung nicht vorher ausgewählt werden muss. Jede einzelne Verbindung wird automatisch rechts unten zeilenweise eingetragen, wobei die erste Komponente den Startpunkt symbolisiert und die zweite Komponente die beeinflusste ist. Ähnlich wie bei der Erstellung der Komponenten muss der Bediener auch alle Verbindungen zwischen den Komponenten selbst eintragen.

Sind die Komponentenpaarungen alle bestimmt, so kann der nächste wichtige Schritt beschrieben werden: die Tabelle. Dazu wird der Reiter „Tabelle“, welcher auf der rechten Seite zu finden ist, ausgewählt. Die Ansicht wechselt von der reinen Komponenten- und Verbindungsdarstellung auf eine tabellarische Darstellung. Es sind bereits alle Komponentenpaarungen zu sehen, welche im vorigen Schritt aufgestellt wurden. Dies geschieht rechnergestützt. Das einzige, was in der Tabelle noch eingetragen wird, sind die einzelnen Arten der Wechselwirkungen und die Bewertung. Beide Darstellungsarten sind miteinander verknüpft, d. h. sollte die Bezeichnung einer Komponente in der Tabelle verändert werden, so wird dies in die Skizze mit übernommen.

Alle folgenden Schritte wie die Berechnung der kritischen Komponenten und Pfade werden automatisch vom Software-Tool bearbeitet, d. h. der Benutzer muss keine

weitere Aktion vollführen. Hierfür sind in dem Software-Tool Algorithmen hinterlegt, auf die in der Arbeit nicht näher eingegangen wird.

8 Anwendungsbeispiel

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode zur frühzeitigen Bewertung der Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen soll anhand eines Beispiels verdeutlicht werden. Als Beispielsystem wird ein elektrischer Garagentoröffner verwendet, da dieser ein mechatronisches System darstellt. So kann gezeigt werden, dass die Tabellendarstellung und die damit verbundene Vorgehensweise für alle Domänen anwendbar ist.

8.1 Elektrischer Garagentoröffner

Elektrische Garagentoröffner übernehmen das Öffnen und das Schließen von Garagentoren. Der Vorteil ist, dass man sich zum Öffnen bzw. Schließen der Garage nicht mehr aus dem Fahrzeug bewegen muss. Auch ist es möglich, dass das Garagentor bereits innerhalb eines bestimmten Radius bedient werden kann, so dass das Garagentor sich bereits in der gewünschten Stellung befindet, sobald man sich diesem nähert. Das Herzstück des elektrischen Garagentoröffners bildet der Antrieb. Weitere Elemente sind die Laufschiene, der Laufwagen, Empfänger sowie der Sender. Im Bild 8.1 ist schematisch ein elektrischer Garagentoröffner aufgezeigt.

Bild 8.1: Darstellung eines elektrischen Garagentoröffners

Hier sind alle Möglichkeiten der Ansteuerung integriert. Neben einem Handsender kann das Garagentor auch durch einen Schalter, durch eine Ziffernkombination oder durch einen Schlüssel in Position gebracht werden. Für das vorliegende Beispiel wird aber nur die Variante mit dem Handsender aufgezeigt.

8.2 Bestimmung und Bewertung der Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen eines elektrischen Garagentoröffners

In dem Beispiel elektrischer Garagentoröffner werden alle im Unterkapitel 6.2 erläuterten Schritte aufgezeigt. Darüber hinaus wird auf diese nochmals näher eingegangen.

Im ersten Schritt der Bestimmung und Bewertung der Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen wird aufgezeigt, wie und wann sich die Methode an eine aktuelle Entwicklungsmethode wie die VDI 2221 oder die VDI 2206 angliedern lässt, so dass keine doppelte Arbeit resultiert. Beide Entwicklungsmethoden gehen zuerst von der Anforderungsliste aus, um über Funktionsstrukturen zu einer Prinzipskizze oder vergleichbarem zu gelangen. Diese kann je nach Bearbeitungsstufe sehr detailliert oder auch recht abstrakt sein.

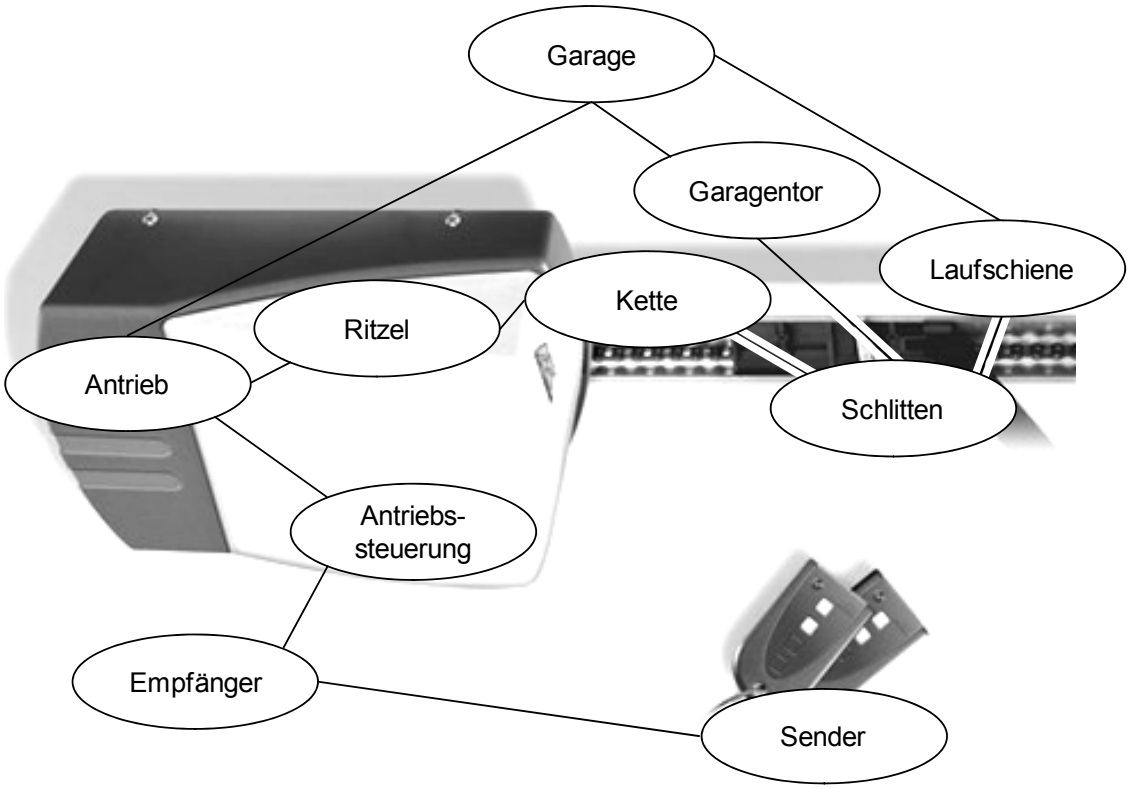


Bild 8.2: Komponenten eines elektrischen Garagentoröffners

An diesem Punkt kann die Zuverlässigkeitsmethode beginnen. Zur Bestimmung der Zuverlässigkeit von Wechselwirkungen sind zuallererst die beteiligten Komponenten und deren Verknüpfungen von Bedeutung. Aus diesen werden dann die Komponen-

tenpaarungen herausgelesen. Jedoch sind die Informationen, die eine Skizze enthalten, nicht unbedingt ausreichend, um eine Zuverlässigkeitsbetrachtung von Wechselwirkungen durchzuführen. Nicht nur die Komponenten können untereinander interagieren, es können auch Wechselwirkungen zwischen den Komponenten und der Umwelt stattfinden. Deshalb ist es notwendig auch noch die Umwelt in die Betrachtung mit einzubeziehen. Für das Beispiel des elektrischen Garagentoröffners ist in Bild 8.2 eine exemplarische Darstellung zu sehen. Diese ist durch die Komponentenbezeichnungen und deren Verbindungen überlagert. Auf diesem Weg können recht einfach und schnell alle Komponenten samt deren Schnittstellen bestimmt werden. Beispielsweise ist bei dem elektrischen Garagentoröffner der Antrieb, ein Ritzel, eine Laufschiene, ein Schlitten sowie ein Sender und Empfänger zu sehen.

Die Komponenten sowie deren Verbindungen müssen anschließend in die Tabelle übertragen werden, um so die Zuverlässigkeitsbewertung starten zu können. Leider gestaltet es sich nicht so einfach, alle Komponentenpaarungen auf diese Weise einzutragen. Es kann schnell vorkommen, dass eine Verbindung übersehen wird, da sich diese Notation als recht unübersichtlich erweist. Unterkapitel 4.2 bietet hierzu eine recht einfache Lösung: die Darstellung der Verbindungen in einer Matrixstruktur. So können auch Komponenten, die – auch wenn es selten vorkommt – nur in eine Richtung wirken, übersichtlich notiert werden. Eine solche Matrix für das Beispielsystem kann dem Bild 8.3 entnommen werden.

Elektrischer Garagentoröffner	Garage	Garagentor	Laufschiene	Schlitten	Antrieb	Ritzel	Kette	Antriebssteuerung	Sender	Empfänger
Garage		X	X		X					
Garagentor	X			X						
Laufschiene	X			X						
Schlitten		X	X				X			
Antrieb	X					X		X		
Ritzel					X		X			
Kette				X		X				
Antriebssteuerung					X					X
Sender										X
Empfänger								X		

Bild 8.3: Matrixdarstellung der Wechselwirkungen

Allgemein						*Konstruktion/ Fertigung/ Montage*						
Beteiligte Komponente *(1, Startpunkt)*	***Beteiligte Komponente*** *(2, Endpunkt)*	***Art der Wechselwirkung***			...	***Unterschied-liche Temperatur-koeffizienten wichtig?***	***Kann Korrosion auftreten?***	***Pas-sungen wichtig?***	***Toleranzen wichtig?***	***Oberflächen-rauigkeiten wichtig?***	***Können Vibrationen auftreten?***	***Ist der Zusam-menbau wichtig ?***
		Info-fluss	*Stoff-fluss*	*Lei-stungs-fluss*								
Antrieb	Ritzel			X	...	Mittel	Mittel	Ja	Ja	Nein	Ja	Mittel
Sender	Empfänger	X			...	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Ritzel	Antrieb			X	...	Nein	Mittel	Mittel	Mittel	Nein	Nein	Mittel

Bild 8.4: Wechselwirkungstabelle elektrischer Garagentoröffner (1)

Allgemein			*Zuverlässigkeit*							
Beteiligte Komponente *(1, Startpunkt)*	***Beteiligte Komponente*** *(2, Endpunkt)*	...	***Einfluss auf die Zuverlässigkeit***	***Unzulässiger Zustand von Komponente 1***	***Fehlerfolgen für Komponente 2***	***Bedeutung für die Systemzuverlässigkeit***	***Auftretenswahrscheinlichkeit Fehlfunktion Komponente 1***	***Auftretenswahrscheinlichkeit Fehlerfolge Komponente 2***	***Vorbedingungen***	***Wechselwirkungsfaktor***
Antrieb	Ritzel	...	negativ	• Bruch	• Nichterfüllung der Funktion	Sehr Hoch (5)	Gering (2)	Hoch (4)	• Falsche Auslegung	**40**
					• Verzug	Hoch (4)		Sehr gering (1)		**8**
				• Zu große Toleranz	• Nichterfüllung der Funktion	Hoch (4)	Mäßig (3)	Sehr gering (1)	• Falsche Auslegung	**12**
					• Beeinträchtigung der Funktion	Mäßig (3)		Gering (2)		**18**
				• Falsche Passung	• Kraftübertragung beeinflusst	Gering (2)	Gering (2)	Mäßig (3)		**12**
					• Fließen	Gering (2)		Sehr gering (1)		**4**
				• Oberflächenrauigkeit	• Kraftübertragung beeinflusst	Gering (2)	Gering (2)	Sehr gering (1)		**4**
				• Vibration	• Verkanten / Lösen	Sehr Gering (1)	Hoch (4)	Gering (2)	• Fertigung / Anregung	**8**
				• Temperatur	• Nichterfüllung der Funktion	Mäßig (3)	Gering (2)	Sehr gering (1)	• Falsche Auslegung	**6**
				• Unwucht	• Kraftübertragung beeinflusst	Gering (2)	Sehr gering (1)	Sehr gering (1)		**2**
Sender	Empfänger	...	negativ	• Senden in falscher Frequenz	• Nichterfüllung der Funktion	Hoch (4)	Sehr gering (1)	Mäßig (3)	• Auslegung / Konfiguration	**12**
				• Sendesignal zu schwach	• Nichterfüllung der Funktion	Hoch (4)	Mäßig (3)	Mäßig (3)	• Batterie / Entfernung	**36**
				• Platine defekt	• Nichterfüllung der Funktion	Hoch (4)	Sehr gering (1)	Mäßig (3)	• Herstellung	**12**
				• Bitflip	• Information falsch übertragen	Hoch (4)	Gering (2)	Sehr gering (1)	• Kosmische Strahlung	**8**
Ritzel	Antrieb	...	negativ	• Bruch	• Keine Auswirkung	Gering (2)	Sehr gering (1)	Sehr gering (1)		**2**
				• ...	• ...					

Bild 8.5: Wechselwirkungstabelle elektrischer Garagentoröffner (2)

Ausgehend von der aufgestellten Matrix können nun alle Komponentenpaarungen einfach in die vorgestellte Tabelle übernommen werden (Bild 8.4 und 8.5). Hierfür müssen die Komponenten nach ihrer Leserichtung korrekt übertragen werden.

Zur besseren Übersichtlichkeit ist die Darstellung der Wechselwirkungstabelle leicht geändert worden. Zuerst ist die Unterstützung des Entwicklers zu sehen (Bild 8.4) und erst dann die Zuverlässigkeitsbewertung (Bild 8.5).

Die Komponentenpaarung erscheint zumeist zweimal, wobei Komponente 1 einmal als Startkomponente und einmal als Endkomponente vorkommt. Die Ausnahme bildet die Komponentenpaarung Sender – Empfänger, welcher nur in eine Richtung nennenswerte Wechselwirkungen aufweist. Dies ist durch die „Verknüpfung“ über die Umwelt zu begründen. Exemplarisch werden zwei bewertete Komponentenpaarungen herausgegriffen, um das Vorgehen etwas näher zu beleuchten. Zum einen ist es der Antrieb und das daran montierte Ritzel. Dabei wird das Teilsystem Antrieb nicht weiter unterteilt. Es besitzt neben dem Motor auch noch eine Welle, welche die Drehbewegungen und das Moment überträgt. Zum anderen wird eine elektrische Verbindung betrachtet: Sender und Empfänger des Garagentoröffners. Diese beiden ausgewählten Beispiele unterscheiden sich grundlegend, auch in ihren unzulässigen Zustände und Fehlerfolgen. Dadurch wird ein breites Spektrum der Leistungsfähigkeit der Zuverlässigkeitsmethode aufgezeigt.

Bei der Komponentenpaarung Antrieb – Ritzel werden beim Antrieb die unzulässigen Zustände aufgezeigt, d. h. in der Tabelle wird die 1. Zeile betrachtet, in dem der Antrieb als Startkomponente zu finden ist. Im Folgenden werden alle unzulässigen Zustände des Antriebs sowie deren Fehlerfolgen für das Ritzel angesprochen.

- **Bruch der Welle:** Ein solcher Zustand kann mehrere Gründe haben. Zum einen kann die Auslegung fehlerhaft sein, das heißt beispielsweise ist der Durchmesser zu gering oder das gewählte Material nicht geeignet. Dadurch kann die vom System geforderte Belastung nicht ertragen werden. Andererseits kann die Welle auch altersbedingt brechen. Durch die schwingende Beanspruchung der Welle werden im Laufe der Zeit die ertragbaren Lastwechsel abnehmen, was schlussendlich im Bruch der Welle endet. Ein Bruch der Welle stellt sich als kritischer Aspekt im Bezug auf die Zuverlässigkeit dar. Durch einen Bruch ist die gesamte Funktion des Systems beeinträchtigt, da die trivialste Fehlerfolge für das Ritzel beim Bruch der Welle die Nichterfüllung der Funktion, d. h. die Übertragung der Drehbewegung und des Moments, ist. Dies sollte auf alle Fälle vermieden werden. Des Weiteren kann im Moment des Bruchs der Welle schlimmstenfalls auch das Ritzel beschädigt werden. Hier ist aber die Wahrscheinlichkeit des Eintretens sehr gering.
- **Toleranz:** Die Toleranz des Antriebs, besser und einfacher gesprochen, die der Welle des Antriebs kann von der vorgegeben Toleranz abweichen. Auf den ersten Blick mag ja dieser Aspekt nicht relevant wirken, jedoch kann durch eine falsche Toleranz die erwünschte Funktionserfüllung beeinträchtigt werden. Dies kann bis zur Nichterfüllung der Drehbewegung auf das Ritzel führen, was mit einem Systemausfall gleichbedeutend ist.

- **Passung:** Sind die Passungen falsch gewählt, sind mehrere Szenarien denkbar. Entsteht eine Presspassung, können durch die Hertz'sche Pressung so hohe Flächenpressungen entstehen, so dass das Material anfängt zu fließen und dadurch die Funktionalität nicht mehr vorhanden ist. Im anderen Fall kann durch eine Spielpassung die Kraftübertragung nicht mehr oder nur eingeschränkt gewährleistet werden.
- **Oberflächenrauigkeit:** Ähnlich wie bei den Passungen kann auch eine falsch gewählte Oberflächenrauigkeit zu funktionalen Einbußen führen. Diese muss exakt gewählt werden. Eine zu raue Oberfläche hat eine Erhöhung der Reibung zur Folge. Da die Reibung mit dem Verschleiß korreliert, resultiert daraus eine verkürzte Lebensdauer der Komponenten. Auf der anderen Seite kann eine zu glatte Oberfläche eventuell die Haftung nicht gewährleisten, wodurch die Funktion des Bauteils gefährdet sein kann. In dem vorliegenden Fall der Verbindung Antrieb – Ritzel ist aber die Oberflächenrauigkeit nicht sehr wichtig, d. h. die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems wird nicht stark von der Wahl der Oberflächenrauigkeit beeinflusst.
- **Vibration:** Durch einen nicht exakt gefertigten Antrieb, welcher beispielsweise exzentrisch läuft, oder durch eine Anregung von außen kann bei bestimmten Umdrehungszahlen die Welle anfangen zu vibrieren. Als Folge dieser Vibrationen kann das an der Welle befestigte Ritzel sich verkanten oder lösen. Dies wird jedoch nur im ungünstigsten Fall eintreten und kann vernachlässigt werden.
- **Temperatur:** Ein weiterer Aspekt als unzulässiger Zustand ist die Temperatur. Diese kann, verursacht beispielsweise durch die Umwelt oder auch durch die Reibung im Antrieb zu hoch werden. Dadurch kann, bei sehr unterschiedlichen Temperaturkoeffizienten von Antrieb und Ritzel, im schlimmsten Fall die Verbindung beider gelöst werden. Da im vorliegenden Beispiel die Materialien ähnlich sind, wird der beschriebene Fall nicht eintreten.
- **Unwucht:** Hier ist vor allem die Welle des Antriebs gemeint. Bei falscher Fertigung kann die Welle unrund laufen und die Drehbewegungen der Komponentenpaarung Antrieb – Ritzel nicht mehr bestimmungsgemäß übertragen. Betroffen ist vor allem auch die dann anschließende Komponente – die Kette.

Werden alle unzulässigen Zustände des Antriebes und die Fehlerfolgen des Ritzels sowie deren Zuverlässigkeitsbewertungen betrachtet, wird klar, dass vor allem der unzulässige Zustand Bruch zu betrachten ist. Ebenso müssen die Toleranzen des Antriebs sorgfältig geprüft werden, damit das Gesamtsystem zuverlässig arbeitet. Jedoch sollte nicht nur die Zuverlässigkeitsbewertung bei der Auslegung des neuen Systems verwendet werden. Auch die anschließenden Abfragen für die Entwickler dürfen nicht vernachlässigt werden. Im vorliegenden Fall wird deutlich, dass der Entwickler vor allem die Passungen und die Toleranzen beachten muss.

Das andere Beispiel, die Komponentenpaarung Sender – Empfänger ist nicht der Domäne Mechanik zuzuordnen, sondern der Elektronik. Dadurch sind auch die erfassten unzulässigen Zustände und deren Fehlerfolgen unterschiedlich. Der eher auf den Bereich der Mechanik fixierte Teil zur Unterstützung der Entwickler ist für diese Domäne nur teilweise interessant. Die einzelnen unzulässigen Zustände des Senders sind untenstehend zu finden. Hier sind auch die Vorbedingungen für diese Zustände als

auch die Fehlzustände des Empfängers notiert. Alle Informationen können aus den Bildern 8.4 und 8.5 herausgelesen werden.

- **Senden** in falscher Frequenz: Das Auftreten dieses unzulässigen Zustands kann unterschiedliche Gründe haben. Entweder ist die Auslegung des Senders zu Beginn nicht auf den Empfänger abgestimmt oder der Sender ist in der falschen Frequenz konfiguriert worden. Beides ist aber auf die menschliche Zuverlässigkeit zurückzuführen. Die daraus resultierende Fehlerfolge für den Empfänger ist, dass kein Signal ankommt und die Funktion nicht gewährleistet ist. Wird für das Gesamtsystem eine hohe Zuverlässigkeit angestrebt, sollte dieser Zustand vermieden werden.
- **Sendesignal zu schwach**: Neben der Verwendung der falschen Frequenz kann das Sendesignal zu schwach sein. Im Gegensatz zum vorigen Fall muss aber ein zu schwaches Sendesignal nicht die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems vollständig beeinflussen, jedoch ist die Funktion teilweise nicht mehr gewährleistet. Mögliche Vorbedingungen für diesen Zustand sind beispielsweise eine leere Batterie oder eine zu große Entfernung von Sender zu Empfänger.
- **Platine defekt:** Ist die Platine defekt, kann auch in diesem Fall wieder keine Information vom Sender an den Empfänger gelangen. Dies bedeutet, dass die Komponentenpaarung komplett ausfällt. Eine defekte Platine ist auf Herstellungsfehler zurückzuführen. Beispielsweise kann eine kalte Lötstelle diesen Defekt auslösen.
- **Bitflip:** Ein Bitflip bewirkt, dass sich ein Bit fälschlicherweise von 0 auf 1 oder umgekehrt ändert. Dies kann unterschiedliche Ursachen haben, beispielsweise kosmische Strahlung. Als Folge können Informationen gefälscht oder inkorrekt übermittelt werden. Üblicherweise kommt dies durch eingebaute Fehlerkorrekturen nicht allzu häufig vor, so dass die Zuverlässigkeit dadurch nicht stark beeinflusst wird.

Aus dem aufgeführten Beispiel der Komponentenpaarung Sender – Empfänger kann herausgelesen werden, dass der unzulässige Zustand Sendesignal zu schwach im Betrieb die Zuverlässigkeit am meisten beeinflusst. Beispielsweise könnte hier als konstruktive Veränderung ein stärkerer Akku integriert werden. Oder es kann nachgedacht werden, ein Ladegerät für den Sender im Lieferumfang bereit zu stellen.

Nach der Zuverlässigkeitsbewertung der Wechselwirkungen können die gewonnenen Ergebnisse auf unterschiedliche Art weiterverwendet werden. Zum einen muss bei hohen Bewertungen überlegt werden, ob der vorliegende unzulässige Zustand verhindert werden kann oder ob die Auswirkungen auf die Nachkomponente reduziert werden können. Dies bedarf unter Umständen konstruktiver Änderungen, die dann das Gesamtsystem ändern werden. Zum anderen können die Bewertungszahlen in die bereits existierende Matrix zurückgeführt werden. So erscheinen statt der einfachen Markierungen einer Verbindung tiefergreifende Informationen. Mit diesen können weitere Untersuchungen angeschlossen werden (Bild 8.6).

Die Matrixdarstellung kann unterschiedliche Informationen über das untersuchte System bieten. Dies wären:

- Wie viele Nachbarkomponenten besitzt eine Komponente?
- Welche Komponente beeinflusst das System am stärksten?

- Welche Komponente wird am stärksten beeinflusst?
- Welches sind die kritischen Pfade des Systems? Welche Gesamtbewertungsziffer besitzen diese?

Elektrischer Garagentoröffner	Garage	Garagentor	Laufschiene	Schlitten	Antrieb	Ritzel	Kette	Antriebssteuerung	Sender	Empfänger	Aktivsumme (AS)
Garage		12	1		2						15
Garagentor	1			27							28
Laufschiene	1			6							7
Schlitten		1	8				4				13
Antrieb	1					40		1			42
Ritzel					8		18				26
Kette				2		18					20
Antriebssteuerung					27					8	35
Sender										36	36
Empfänger								12			12
Passivsumme (PS)	3	13	9	35	37	58	22	13	0	44	

Bild 7.6: Bewertung der Wechselwirkungen eines elektrischen Garagentoröffners

Der erste Punkt – die Anzahl der Nachbarkomponenten – kann auch ohne die zusätzlichen Bewertungsziffern herausgelesen werden. Entscheidend ist nur, wie viele Komponenten, d. h. entweder Kreuze oder Bewertungszahlen in einer Zeile zu finden sind. Beispielsweise kann herausgelesen werden, dass die Kette insgesamt zwei Nachbarkomponenten besitzt – den Schlitten und das Ritzel. Die größte Anzahl an Nachbarelemente besitzt – mit jeweils drei – die Garage, der Schlitten und der Antrieb. Der zweite und dritte Punkt aus der Auflistung kann eigentlich zusammengezogen werden. Vom Vorgehen entspricht dies der Auswertung der Aktiv- und der Passivsumme. Dabei werden zeilenweise und spaltenweise alle Bewertungen addiert. Die Summe, welche dann am Ende der Zeile notiert wird, entspricht der Kennziffer der aktiven Beeinflussung. Im Gegensatz dazu wird die passive Beeinflussung einer Komponente durch die Kennziffer, welche durch das Addieren der Spalten berechnet wird, aufgezeigt. Für das Beispielsystem zeigt sich, dass die Komponente Antrieb mit dem Wert von 42 den stärksten Einfluss besitzt, gefolgt von dem Sender und der Antriebssteuerung. Die Komponente Ritzel dahingegen wird am stärksten von den Wechselwirkungen der anderen Komponenten beeinflusst, was sich durch die Passiv-

summe von 58 ablesen lässt. Anhand dieser Aussagen muss überlegt werden, wie diese hohen Beeinflussungen in der Auslegung mit berücksichtigt wurden. Beispielsweise ist es für das Ritzel sinnvoll, keinen Kunststoff zu verwenden, da dieser im Gegensatz zu Stahl eine nicht so große Festigkeit besitzt. Die Ergebnisse müssen dem Entwickler zur Verfügung gestellt werden, um die Zuverlässigkeit des Systems weiter zu steigern. Der letzte Punkt beinhaltet die Erfassung und Bewertung von kritischen Pfaden. Anhand eines kleinen Beispiels wird das Vorgehen erläutert. Komponente 1 ist mit Komponente 2 und 3 verbunden, Komponente 2 mit Komponente 4. Die Komponente 4 hat keine weitere Verbindung. Dies bedeutet, dass eine Komponentenkette 1-2-4 vorliegt. Darüber hinaus gibt es natürlich noch weitere Komponentenketten. In dem vorliegenden Beispiel ist eine mögliche Komponentenkette Garage – Garagentor – Schlitten – Kette – Ritzel – Antrieb – Antriebssteuerung – Empfänger (Bild 7.7).

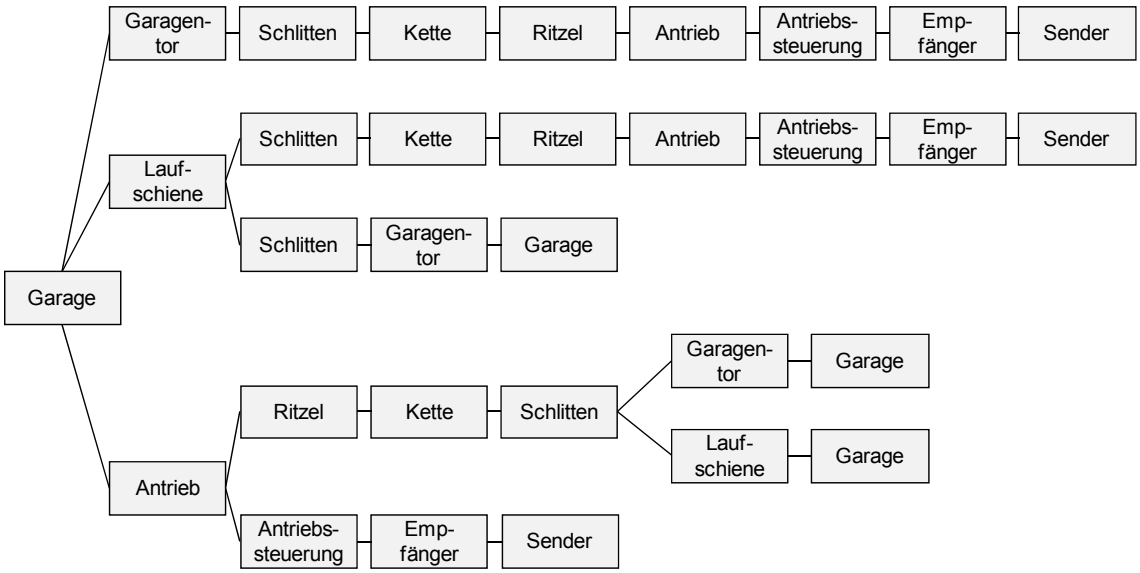


Bild 7.7: Komponentenketten eines elektrischen Garagentoröffners

Für diese bestimmten Komponentenketten werden im nächsten Schritt die einzelnen Bewertungsziffern verwendet und durch einfache Addition eine Gesamtbewertungsziffer für diese Kette bestimmt. Ausschlaggebend sind nicht immer nur die Anzahl der beinhalteten Komponenten, sondern die Gesamtbewertungsziffer. Es kann vorkommen, dass eine Komponentenkette, die nur ein Drittel der Komponentenanzahl wie eine andere Kette besitzt, eine höhere Gesamtbewertungsziffer erreicht. Das Erfassen der kritischen Pfade wird je nach Größe des untersuchten Systems meist nur durch einen Algorithmus ermittelbar. Für die obige Komponentenkette lautet die Gesamtbewertungsziffer 78.

9 Zusammenfassung

Die heutige Entwicklung von Produkten ist gekennzeichnet durch immer steigende Komponentenanzahlen, komplexeren Aufbauten und Kombination mehrerer unterschiedlicher Domänen. Hierdurch ist es zwar möglich, dem Kunden neue Funktionalitäten zu präsentieren, jedoch muss die dadurch steigende Anzahl an Schnittstellen zum einen untersucht, analysiert und bewertet werden, um diese dann zuverlässig gestalten zu können.

Kernpunkt dieser Arbeit bildete deshalb die Entwicklung einer Methode, die es ermöglicht, Wechselwirkungen zwischen Komponenten bereits in frühen Entwicklungsphasen aufzuzeigen. Diese werden dann anschließend auf ihre Zuverlässigkeit untersucht und bewertet.

Zunächst wurden verschiedene Begriffe definiert und die Grundlagen über Zuverlässigkeitsanalysen und Entwicklungsmethoden behandelt. Hier wurde schnell deutlich, dass zwar eine Zuverlässigkeitsanalyse komplexer Systeme in frühen Entwicklungsphasen vorhanden ist, diese aber keine Wechselwirkungen zwischen Komponenten berücksichtigt.

Anschließend wurde auf die Wechselwirkungen näher eingegangen. Neben einer vollständigen Analyse von Umgebungsbedingungen und Zuverlässigkeitseinflüssen wurden Anforderungen an die neu zu entwickelnde Methode zur Zuverlässigkeitsbewertung von Wechselwirkungen festgelegt.

Im Folgenden wurden zum einen Notationsmöglichkeiten für die Analyse von Wechselwirkungen, welche aus verschiedenen Ingenieurbereichen stammen, vorgestellt. Da aber hier meistens der direkte Bezug zur Zuverlässigkeit fehlte, wurden diese noch durch bestehende Zuverlässigkeitsanalysen für Wechselwirkungen ergänzt. Ein Nachteil dieser Analysen ist, dass keine in frühen Entwicklungsphasen eingesetzt werden kann.

Im nächsten Schritt wurde schrittweise eine Methode zur Zuverlässigkeitsbewertung von Wechselwirkungen vorgestellt. Diese Methode ermöglicht es, unzulässige Zuständen und Fehlerfolgen der Wechselwirkungen mit Hilfe einer Tabellendarstellung einen sogenannten Wechselwirkungsfaktor zu berechnen. Des Weiteren können unterschiedliche Importanzen von Komponentenpaarungen für den Entwickler aufgezeigt werden. Neben dem Aufzeigen aller Schritte wurde auch erläutert, wie die Methode sich in bestehende Entwicklungsmethoden eingliedern kann.

Als nächster Schritt wurde ein Software-Tool gezeigt, welches die aufgestellte Methode zur Zuverlässigkeitsbewertung von Wechselwirkungen unterstützt. Um die Methode in ihrer Gesamtheit zu präsentieren, wurde ein mechatronisches Beispielsystem – ein elektronischer Garagentoröffner – eingeführt und die Methode Schritt für Schritt erläutert.

10 Literatur

[1] Balzert, H.: Lehrbuch der Objektmodellierung – Analyse und Entwurf mit der UML 2. 2. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, 2004.

[2] Balzert, H.: Lehrbuch der Software-Technik. Spektrum Akad. Verlag, Heidelberg, 1996.

[3] Balzert, H.; Priemer, J.: Java 6 Anwendungen programmieren: Von der GUI-Programmierung bis zur Datenbank-Anbindung. W3l, 2008.

[4] Beitz, Grothe: Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau. 20. Auflage, Berlin: Springer, 2001.

[5] Bertsche, B.; Göhner, P;, Schinköthe, W.; Wunderlich, H.-J.: Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme: Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen. Berlin: Springer, 2008.

[6] Bertsche, B.; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3. Auflage, Berlin: Springer, 2004.

[7] Bertsche, B.; Wacker, M..; Gäng, J.: Entwicklung zuverlässiger Getriebe. 7. Internationales Stuttgarter Symposium, 20. – 21. März 2007, Stuttgart.

[8] Birolini, A.: Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen. 4. Auflage, Berlin: Springer, 1997.

[9] Bongulielmi, L.: Die Konfigurations- und Verträglichkeitsmatrix als Beitrag zur Darstellung konfigurationsrelevanter Aspekte im Produktentstehungsprozess, Dissertation, Zürich, 2002.

[10] Borth, M.: Wissensgewinnung auf Bayes-Netz-Mengen. Universität Ulm, Dissertation, 2004.

[11] Brenner, J.; Herrmann, M.; Nehrig, M.: Möglichkeiten partizipativer Entscheidungsfindungsprozessen am Beispiel des Verkehrs. Arbeitsbericht, Nr. 120, Universität Stuttgart, 1999.

[12] Brockhaus – Die Enzyklopädie in 30 Bänden. 21. völlig neu bearbeitete Auflage, Leipzig, Mannheim: F.A.Brockhaus, 2005.

[13] Bröhl, H. P.: Das V-Modell – der Standard für die Softwareentwicklung. 2. Auflage, Oldenbourg-Verlag, München, 1995.

[14] Buchmiller, V.: Komponentenbasierte Zuverlässigkeitsanalyse von Wechselwirkungen in frühen Entwicklungsphasen. Studienarbeit, Institut für Maschinenelemente, 2008.

[15] Desrochers, A. A.; Al-Jaar, R. Y.: Applications Of Petri Nets In Manufacturing Systems. Modeling, Control, And Performance Analysis. IEEE Press, 1995.

[16] Deutsches Institut für Normung: DIN 25424 – Fehlerbaumanalyse. Berlin: Beuth, 1990.

[17] Deutsches Institut für Normung: DIN 25448 – Ausfalleffektanalyse. Berlin: Beuth, 1990.

[18] Deutsches Institut für Normung: DIN 60068: Umweltprüfungen. Berlin: Beuth, 1994.

[19] Deutsches Institut für Normung: DIN 69900 – Projektmanagement - Netzplantechnik; Beschreibungen und Begriffe. Berlin: Beuth, 2009.

[20] Deutsches Institut für Normung: DIN 7186 Statistische Tolerierung – Begriffe, Anwendungsrichtlinien und Zeichnungsangaben, Berlin: Beuth, 1974.

[21] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 60721, Leitfaden für die Korrelation und Umsetzung der Klassen von Umgebungsbedingungen. Berlin: Beuth, 1997.

[22] DiCesare, F.; Harhalakis, G.; Proth, J. M.; Silva; M.; Vernandat, F.B.: Practice of Petri Nets in Manufacturing. London: Chapman & Hall, 1993.

[23] Domschke, W.; Drexl, A.: Einführung in Operations Research. Berlin: Springer, 2007.

[24] Eller, F.: Visual C# 2008 – Grundlagen, Programmiertechniken, Datenbanken. Windows-Programmierung mit WPF und Windows Forms. Addison-Wesley, 2008.

[25] Eller, F.; Kofler, M.: Visual C# - Grundlagen, Programmiertechniken, Windows-Programmierung. Addison-Wesley, 2005.

[26] Fritzsche, R.: Erstellung von Parameter-Diagrammen in der Automobilindustrie: Richtlinien, Kriterien und Anwendungsbeispiele. ATZ 06/2006, Jahrgang 108, 2006.

[27] Fritzsche, R.: Systeme sollen sich verstehen ATZ 06/2006 Jahrgang 108.

[28] ftp://ftp.software.ibm.com/software/emea/de/tivoli/TID14039-DEDE-00.pdf Aufgerufen: 14.11.2009

[29] Fuller, L.; Cook, K.; Kaufeld, J.: Access 2007 für Dummies, Wiley-VCH, 2007.

[30] Gäng, J.; Bertsche, B.: An Approach to Describe Interactions in and between Mechatronic Systems. ESREL 2008, 22nd – 25th September, Valencia, Spain.

[31] Gäng, J.; Wedel, M.; Bertsche, B.; Göhner, P.: Determining Mechatronic System Reliability Using Quantitative and Qualitative Methods. ESREL, Stavanger, Norwegen, 2007.

[32] Gäng, J.; Bertsche, B.: Frühzeitige komponentenbasierte Zuverlässigkeitsbewertung von Wechselwirkungen in mechatronischen Systemen, 6. Paderborner Workshop: Entwurf mechatronischer Systeme, Heinz Nixdorf Institut, Paderborn, 2. – 3. April 2009.

[33] Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlake, O.: Szenario-Management – Planen und Führen mit Szenarien. 2. Auflage, Hanser, 1996.

[34] Gausemeier, J.; Lückel, J.: Entwicklungsumgebungen Mechatronik – Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd 80, Paderborn, 2000.

[35] Haas, P.: Stochastic Petri nets: modelling, stability, simulation. New York: Springer 2002.

[36] Haueis, M.; Badstübner, U.; Villarin, L.; Lens, T.; Missbach, J.; Bittmann, A.; Huttenlocher, M.: Herausforderung Toleranzkettendesign für robuste mechatronische Fahrzeugfunktionen. VDI-Bericht Nr. 1984, Tagung Technische Zuverlässigkeit, Stuttgart, 2007.

[37] Heffner, A.: Bayes´sche Netzwerke, 2002.
http://www.heffners.de/uni/bayes/bayes.html
Aufgerufen: 23.10.2009

[38] Hein, M.; Zeller, H.: Java WebServices . Entwicklung plattformübergreifender Dienste mit XML und SOAP. Addison-Wesley, 2003.

[39] Hermann, U.: Knauers etymologisches Wörterbuch. München: Droemer Knaur, 1982.

[40] Hohlwegler, V.: UML 2 & MDA. Universität Konstanz, 2004.
http://www.inf.uni-konstanz.de/soft/teaching/ws04/mass/UML%202%20&%20MDA.pdf
Aufgerufen: 11.12.2009

[41] http://infofrosch.info/s/se/semantisches_netz.html
Aufgerufen: 5.11.2009

[42] http://ivs.cs.uni-magdeburg.de/~dumke/UML/
Aufgerufen: 23.1.2010

[43] http://ivs.cs.uni-magdeburg.de/~dumke/UML/21.htm
Aufgerufen: 19.11.2009

[44] http://lexikon.freenet.de/Schnittstelle_(Programmierung)
Aufgerufen: 30.10.2009

[45] http://michael.hahsler.net/JAVA_old/UML/uml_2.pdf
Aufgerufen: 2.12.2009

[46] http://n.ethz.ch/~tareka/%C3%BCbung2.html
Aufgerufen: 3.12.2009

[47] http://scanner.leimbert.de/tglossar.html
Aufgerufen: 27.11.2009

[48] http://swt.cs.tu-berlin.de/lehre/seminar/ss02/Referate/Ahm02%20-%20Komponentenbasierte%20SE.final.pdf
Aufgerufen: 10.01.2010

[49] http://www.4managers.de/themen/Quality-Function-Deployment/
Aufgerufen: 5.8.2009

[50] http://www.altova.com/de/umodel/zustandsdiagramme.html
Aufgerufen: 21.12.2009

[51] http://www.avalaris.com/deu/content/opensource_glossar.html
Aufgerufen: 17.12.2009

[52] http://www.dat.de/servlet/com.bil.ep.mediaman.servlet.Download?fileid=560
Aufgerufen: 29.11.2009

[53] http://www.dataphysics.de/deutsch/service_gloss.htm
Aufgerufen: 2.11.2009

[54] http://www.dsmweb.org
Aufgerufen: 25.6.2009

[55] http://www.eib-kroner.de/glossar.html
Aufgerufen: 14.1.2010

[56] http://www.informatik.uni-bremen.de/gdpa/methods_d/m-npt.htm
Aufgerufen: 5.10.2009

[57] http://www.is.informatik.uni-duisburg.de/courses/mod_ws05/skript/kapitel405.pdf
Aufgerufen: 29.12.2009

[58] http://www.salutogenese-zentrum.de/cms/main/glossar/
Aufgerufen: 8.10.2009

[59] http://www.stangl.eu/psychologie/definition/Interaktion.shtml
Aufgerufen: 15.5.2009

[60] http://www.torsten-horn.de/techdocs/uml.htm
Aufgerufen: 30.9.2009

[61] http://www.uni-graz.at/inmwww_house.pdf
Aufgerufen: 10.12.2009

[62] http://www.uniklinikum-giessen.de/res58/access2003skript.pdf
Aufgerufen: 5.1.2010

[63] http://www.video-intern.com/index.php
Aufgerufen: 29.1.2010

[64] http://www1.tfh-berlin.de/labore/gos/pdf/Mechatronik%20Definition_Uebersicht.pdf
Aufgerufen: 2.8.2009

[65] http://www-e.uni-magdeburg.de/urzs/java/jein1.html
Aufgerufen: 17.1.2010

[66] Hung, S. T., Gabel, M. J.: An Open System Interconnection Model for Mechatronics. In: Proc. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Vol.1, 2001, pp. 440 – 445.

[67] International Organization für Standardization: ISO/IEC 19501: Unified Modeling Language (UML), Version 1.4.2. Genf, 2005.

[68] Internationale Organisation für Normung: EN ISO 9241-10: Grundsätze der Dialoggestaltung. Berlin: Beuth, 1999.

[69] Internationale Organisation für Normung: ISO/IEC 2382-15: Informationstechnik - Begriffe - Teil 15: Programmiersprachen, Berlin: Beuth, 1998.

[70] Isermann, R.: Mechatronische Systeme – Grundlagen. 2. Auflage, Berlin: Springer, 2007.

[71] Jäger, P.; Bertsche, B.: A New Approach To Gathering Failure Behavior Information About Mechanical Components Based On Expert Knowledge. Proc. RAMS 2004 Conference, 26th-29th January 2004, Los Angeles, CA.

[72] Jäger, P.; Bertsche, B.: A New Approach To Use Employee Knowledge for Cost Reduction of Maintenance Strategies. Proc. 26th ESReDA Seminar, 11th-12th May 2004, Tampere, Finland.

[73] Jensen, F.: Bayesian Networks and Decision Graphs. New York: Springer, 2001.

[74] Jobst, F.: Programmieren in Java. 5. Auflage, Hanser, 2005.

[75] Karagiannis, D.; Telesko, R.: Wissensmanagement: Konzepte der künstlichen Intelligenz und des Softcomputing. Oldenbourg, 2001.

[76] Kirchner, M.: Semantische Netze, 2002.
http://www.linuxco.de/stud/kirchner_osem_semnet_ausarbeitung.pdf
Aufgerufen: 7.12.2009

[77] Kofler, M.: Visual Basic 2008. Grundlagen, ADO.NET, Windows Presentation Foundation. Addison-Wesley, 2008.

[78] Kofler, M.: Visual Basic.NET: Grundlagen, Programmiertechniken, Windows-Anwendungen. Addison-Wesley, 2006.

[79] Krolo, A.; Gäng, J.; Bertsche, B.: Early Allocation of Reliability Information based on Component Interactions. International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics, Beijing, China, 21.−23. October 2009.

[80] Krüger, G.; Stark, T.: Handbuch der Java-Programmierung. 6. Auflage, Addison-Wesley Longman, 2009.

[81] Kurbel, K.; Becker, J.; Gronau, N.; Sinz, E.; Suhl, L.: Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik – Online Lexikon, Oldenbourg.
http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/wi-enzyklopaedie/lexikon/is-management/Systementwicklung/Hauptaktivitaten-der-Systementwicklung/Problemanalyse-/Objektorientierte-Modellierung/UML-basierte-Modellierung
Aufgerufen: 18.1.2010

[82] Lauber, R.; Göhner, P.: Prozessautomatisierung 1. 3. Auflage, Springer, Berlin, 1999.

[83] Leopold, T.; Pickard, K.; Bertsche, B.: Qualitative Bewertung von Umgebungseinflüssen und Komponentenwechselwirkungen auf die Zuverlässigkeit. VDI-Bericht Nr. 1984, Tagung Technische Zuverlässigkeit, Stuttgart, 2007.

[84] Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Berlin: Springer, 2009.

[85] Menrad, A.: Ermittlung von Einflussfaktoren der Zuverlässigkeit auf Datenbasis anwendbar auf frühe Entwicklungsphasen. Studienarbeit, Institut für Maschinenelemente, Stuttgart, 2008.

[86] Mewes, W.: Excel 2007 für Controller. Addison-Wesley, 2009.

[87] Meyer, J.: Modellierung von Softwarekomponenten für mechatronische Systeme in UML auf Basis von Systemstrukturen. Diplomarbeit, Universität Paderborn, 2006.

[88] Meyer, M. A.; Booker, J. M.: Eliciting and Analyzing Expert Judgment: A Practical Guide. Academic Press, London, 1991.

[89] Meyers Enzyklopädisches Lexikon in 25 Bändern, 2002.

[90] Monadjemi, P.: Visual Basic 2005. Markt und Technik, 2008.

[91] Montgomery, D. C.: Design and Analysis of Experiments. John Wiley and Sons, 1991, ISBN 0-471-52994-X, S. 197.

[92] Nelson, R. B.: An introduction to copulas. New York: Springer, 2008.

[93] Oestereich, B.: Objekt-orientierte Softwareentwicklung – Analyse und Design mit der Unified Modeling Language, Oldenbourg Verlag, 5. Edition, 2001.

[94] OMG: Unified Modeling Language: Superstructure Version 2.0. Technical Report, Object Management Group, 2005.

[95] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grothe, Karl-Heinz: Konstruktionslehre – Grundlagen. 7. Auflage, Berlin: Springer, 2006.

[96] Petri, C. A.: Kommunikation mit Automaten. Dissertation, Institut für Instrumentelle Mathematik, Universität Bonn, 1962. Second Edition: New York: Griffiss Air Force Base, Technical Report RADC-TR-65--377, Vol.1, 1966.

[97] Pöschl, M.: Die geplante Zuverlässigkeit – Disziplinenübergreifende Wechselwirkungen mechatronischer Produkte immer schwerer zu durchschauen – neues Konzept soll helfen. A&D Kompendium 2008/2009, Das Referenzbuch für industrielle Automation, 2008.

[98] Prezzi, C.; Probst, R.: Effizienzsteigerung durch Automatisierung von Arbeitsabläufen. Innovation Management, Nr.4, 2008.

[99] Proth, J.-M.; Xie, X.: Petri nets: A tool for design and management of manufacturing. Sussex: Wiley, 1996.

[100] Renz, M.: Analyse von Umgebungsbedingungen und Integration in die FMEA. Diplomarbeit, Institut für Maschinenelemente, Stuttgart, 2007.

[101] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. 2. Auflage, Springer, Berlin, 2004.

[102] Runzheimer, B.; Cleff, T.; Schäfer, W.: Operations Research 1: Lineare Planungsrechnung und Netzplantechnik. 8. Auflage, Gabler, 2005.

[103] Scharlo, D.: Quantifizierung von Marktrisiken mittels Copula Funktionen: Eine empirische Analyse. Grin, 2009.

[104] Schierenbeck, H.: Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre. Oldenbourg, 2003.

[105] Schneeweiss, W. G.: Petri nets for reliability modeling: in the fields of engineering safety and dependability. Hagen: LiLoLe, 1999.

[106] Schumann, M.: Management von virtuellen Unternehmen: Softwareunterstützung und innovative Technologien. Niedersächsische Staats- und Universitäts-Bibliothek, 2005.

[107] Silva, M.; Teruel, E.; Valette, R.; Hervé, P.: Petri Nets and Production Systems. In: Rozenberg, G. (ed.): Lectures on Petri nets II: Applications. Lecture notes in Computer Science 1492, pp 85-124, 1998.

[108] Soderlind, S. D.: Consumer Economics: A Pratical Overview. M E Sharpe Inc, 2001.

[109] Spreckelsen, C.; Spitzer, K.: Wissensbasen und Expertensysteme in der Medizin: KI-Ansätze zwischen klinischer Entscheidungsunterstützung und medizinischem Wissensmanagement. Vieweg und Teubner, 2008.

[110] Stockhammer, P.: Einführung in Bayessche Netzwerke. Hauptseminar Wirtschaftsinformatik, Technische Universität Clausthal, 2006. http://winf5.in.tu-clausthal.de/winf/ws0506/seminar/08-BN-Vortrag.pdf Aufgerufen: 20.12.2009

[111] Strasser, S.; Louis, D.: Visual C# in 21 Tagen: Schritt für Schritt zum Profi. Markt+Technik, 2009.

[112] Tiemeyer, E.; Konopasek, K.: Access 2000: Kompakt, Komplett, kompetent. Markt+Technik, 1999.

[113] Tipler, P. A.: Physik. Heidelberg: Spektrum, 1994.

[114] Trost, M.: Gesamtheitliche Anlagenmodellierung und –analyse auf Basis stochastischer Netzverfahren. Dissertation, Universität Stuttgart, 2008.

[115] Verband der Automobilindustrie: VDA Band 3, Teil 2 – Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie – Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten, 3. Auflage, Frankfurt, 2000.

[116] Verband der Automobilindustrie: VDA Band 4 Teil 2 – Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz System FMEA. Frankfurt, 1996.

[117] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2223 – Methodisches Entwerfen technischer Produkte. Berlin: Beuth, 2004.

[118] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2206 – Entwicklungsmethodik für mechatonische Systeme. Berlin: Beuth, 2004.

[119] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2221 – Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth, 1993.

[120] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2222 – Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Berlin: Beuth, 1997.

[121] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4003 – Zuverlässigkeitsmanagement. Berlin: Beuth, 2007.

[122] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4005 Blatt 1 – Einflüsse von Umweltbedingungen auf die Zuverlässigkeit technischer Erzeugnisse; Grundlagen. Berlin: Beuth, 1981.

[123] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4005 Blatt 2 – Einflüsse von Umweltbedingungen auf die Zuverlässigkeit technischer Erzeugnisse; Mechanische Einflüsse der Umwelt. Berlin: Beuth, 1983.

[124] Viering, M. G.; Liebchen, Jens H.; Kochendörfer, Bernd: Managementleistungen im Lebenszyklus von Immobilien. Berlin: Springer, 2007.

[125] Volovoi, V. V.: Modeling of System Reliability Using Petri Nets with Aging Tokens. Reliability Engineering and System Safety, 84, no. 2, pp. 149-161, 2004.

[126] Wedel, M.; Gäng, J.; Arnaout, T.; Göhner, P.; Bertsche, B.; Wunderlich, H.-J.: Domänenübergreifende Zuverlässigkeitsbewertung in frühen Entwicklungsphasen unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen. 5. Paderborner Workshop, 22. – 23. März 2007, Heinz Nixdorf Institut, Paderborn, HNI Verlagsschriftenreihe.

[127] Wedel, M.; Göhner, P.: Eine ganzheitliche qualitative Vorgehensweise zur Erhöhung der Zuverlässigkeit programmierbarer mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen, Workshop "Zuverlässigkeit in eingebetteten Systemen" RWTH Aachen, 13.-14.10.2005.

[128] Wegener, J.; Schwichtenberg, H.: Windows Presentation Foundation (.NET WPF): Grafische Benutzerschnittstellen mit .NET 3.5. Hanser, 2008.

[129] Weilkiens, T.: Systems Engineering mit SysML/UML, Modellierung, Analyse, Design. 2. Auflage, dpunkt, 2008.

[130] Wenz, C.; Hauser, T.; Samaschke, K.; Kotz, J.: ASP.NET 3.5 mit Visual Basic 2008. Leistungsfähige Webapplikationen programmieren. Addison-Wesley, 2008.

[131] Wittig, F.: Maschinelles Lernen Bayes´scher Netze für benutzeradaptive Systeme. Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2002.

[132] www.mediqual.ch/glossaire_d.htm
Aufgerufen: 29.10.2009

[133] Zimmermann, A.: Modellierung und Bewertung von Fertigungssystemen mit Petri-Netzen. Dissertation, Berlin, Techn. Universität, Fachbereich 13-Informatik, 1997.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Jochen Alexander Gäng
Geburtsdatum, -ort	24.10.1979 in Heilbronn
Staatsangehörigkeit	Deutsch

Schulbildung

1986 – 1990	Grundschule Horkheim
1990 – 1999	Mönchsee-Gymnasium Heilbronn

Zivildienst

1999 – 2000	Dialyse Heilbronn

Studium

2000 – 2006	Fahrzeug- und Motorentechnik, Universität Stuttgart Hauptfächer: - Kraftfahrzeuge - Konstruktionstechnik
28.2.2006	Abschluss als Diplom-Ingenieur

Beruflicher Werdegang

2006 – 2009	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart
2010 – 2011	Berater bei Jäger & Hitziger (JHP), Beratungsgesellschaft für Produktzuverlässigkeit in Stuttgart
Seit 2012	Reliability and Safety Ingenieur, Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH

Liste der bisher erschienenen Berichte aus dem IMA:

Nr.	Verfasser	Titel
1	H.K. Müller	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion von Hochdruckdichtungen an schnellaufenden Wellen
2	W. Passera	Konzentrisch laufende Gewinde-Wellen-Dichtung im laminaren Bereich
	K. Karow	Konzentrische Doppelgewindewellendichtung im laminaren Bereich
3	F.E. Breit	Die Kreiszylinderschalendichtung: Eine Axialspaltdichtung mit druckabhängiger Spaltweite
	W. Sommer	Dichtungen an Mehrphasensystemen: Berührungsfreie Wellendichtungen mit hochviskosen Sperrflüssigkeiten
4	K. Heitel	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion konzentrisch und exzentrisch betriebener Gewindewellendichtungen im laminaren Bereich
5	K.-H. Hirschmann	Beitrag zur Berechnung der Geometrie von Evolventenverzahnungen
6	H. Däuble	Durchfluß und Druckverlauf im radial durchströmten Dichtspalt bei pulsierendem Druck
7	J. Rybak	Einheitliche Berechnung von Schneidrädern für Außen- und Innenverzahnungen. Beitrag zu Eingriffsstörungen beim Hohlrad-Verzahnen mittels Schneidräder
8	D. Franz	Rechnergestütztes Entwerfen von Varianten auf der Grundlage gesammelter Erfahrungswerte
9	E. Lauster	Untersuchungen und Berechnungen zum Wärmehaushalt mechanischer Schaltgetriebe
10		Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. K. Talke
11	G. Ott	Untersuchungen zum dynamischen Leckage- und Reibverhalten von Radialwellendichtringen
12	E. Fuchs	Untersuchung des elastohydrodynamischen Verhaltens von berührungsfreien Hochdruckdichtungen
13	G. Sedlak	Rechnerunterstütztes Aufnehmen und Auswerten spannungsoptischer Bilder
14	W. Wolf	Programmsystem zur Analyse und Optimierung von Fahrzeuggetrieben
15	H. v. Eiff	Einfluß der Verzahnungsgeometrie auf die Zahnfußbeanspruchung innen- und außenverzahnter Geradstirnräder
16	N. Messner	Untersuchung von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
17	V. Schade	Entwicklung eines Verfahrens zur Einflanken-Wälzprüfung und einer rechnergestützten Auswertemethode für Stirnräder
18	A. Gührer	Beitrag zur Optimierung von Antriebssträngen bei Fahrzeugen
19	R. Nill	Das Schwingungsverhalten loser Bauteile in Fahrzeuggetrieben
20	M. Kammüller	Zum Abdichtverhalten von Radial-Wellendichtringen
21	H. Truong	Strukturorientiertes Modellieren, Optimieren und Identifizieren von Mehrkörpersystemen
22	H. Liu	Rechnergestützte Bilderfassung, -verarbeitung und -auswertung in der Spannungsoptik
23	W. Haas	Berührungsfreie Wellendichtungen für flüssigkeitsbespritzte Dichtstellen
24	M. Plank	Das Betriebsverhalten von Wälzlagern im Drehzahlbereich bis 100.000/min bei Kleinstmengenschmierung
25	A. Wolf	Untersuchungen zum Abdichtverhalten von druckbelastbaren Elastomer- und PTFE-Wellendichtungen
26	P. Waidner	Vorgänge im Dichtspalt wasserabdichtender Gleitringdichtungen
27	Hirschmann u.a.	Veröffentlichungen aus Anlaß des 75. Geburtstags von Prof. Dr.-Ing. Kurt Talke
28	B. Bertsche	Zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit von Maschinenbau-Produkten
29	G. Lechner; K.-H.Hirschmann; B. Bertsche	Forschungsarbeiten zur Zuverlässigkeit im Maschinenbau
30	H.-J. Prokop	Zum Abdicht- und Reibungsverhalten von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
31	K. Kleinbach	Qualitätsbeurteilung von Kegelradsätzen durch integrierte Prüfung von Tragbild, Einflankenwälzabweichung und Spielverlauf
32	E. Zürn	Beitrag zur Erhöhung der Meßgenauigkeit und -geschwindigkeit eines Mehrkoordinatentasters
33	F. Jauch	Optimierung des Antriebsstranges von Kraftfahrzeugen durch Fahrsimulation
34	J. Grabscheid	Entwicklung einer Kegelrad-Laufprüfmaschine mit thermografischer Tragbilderfassung
35	A. Hölderlin	Verknüpfung von rechnerunterstützter Konstruktion und Koordinatenmeßtechnik
36	J. Kurfess	Abdichten von Flüssigkeiten mit Magnetflüssigkeitsdichtungen

Nr.	Verfasser	Titel
37	G. Borenius	Zur rechnerischen Schädigungsakkumulation in der Erprobung von Kraftfahrzeugteilen bei stochastischer Belastung mit variabler Mittellast
38	E. Fritz	Abdichtung von Maschinenspindeln
39	E. Fritz; W. Haas; H.K. Müller	Berührungsfreie Spindelabdichtungen im Werkzeugmaschinenbau. Konstruktionskatalog
40	B. Jenisch	Abdichten mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer und Polytetrafluorethylen
41	G. Weidner	Klappern und Rasseln von Fahrzeuggetrieben
42	A. Herzog	Erweiterung des Datenmodells eines 2D CAD-Systems zur Programmierung von Mehrkoordinatenmeßgeräten
43	T. Roser	Wissensbasiertes Konstruieren am Beispiel von Getrieben
44	P. Wäschle	Entlastete Wellendichtringe
45	Z. Wu	Vergleich und Entwicklung von Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen
46	W. Richter	Nichtwiederholbarer Schlag von Wälzlagereinheiten für Festplattenlaufwerke
47	R. Durst	Rechnerunterstützte Nutprofilentwicklung und clusteranalytische Methoden zur Optimierung von Gewindewerkzeugen
48	G.S. Müller	Das Abdichtverhalten von Gleitringdichtungen aus Siliziumkarbid
49	W.-E. Krieg	Untersuchungen an Gehäuseabdichtungen von hochbelasteten Getrieben
50	J. Grill	Zur Krümmungstheorie von Hüllflächen und ihrer Anwendung bei Werkzeugen und Verzahnungen
51	M. Jäckle	Entlüftung von Getrieben
52	M. Köchling	Beitrag zur Auslegung von geradverzahnten Stirnrädern mit beliebiger Flankenform
53	M. Hildebrandt	Schadensfrüherkennung an Wälzkontakten mit Körperschall-Referenzsignalen
54	H. Kaiser	Konstruieren im Verbund von Expertensystem, CAD-System, Datenbank und Wiederholteilsuchsystem
55	N. Stanger	Berührungsfrei abdichten bei kleinem Bauraum
56	R. Lenk	Zuverlässigkeitsanalyse von komplexen Systemen am Beispiel PKW-Automatikgetriebe
57	H. Naunheimer	Beitrag zur Entwicklung von Stufenlosgetrieben mittels Fahrsimulation
58	G. Neumann	Thermografische Tragbilderfassung an rotierenden Zahnrädern
59	G. Wüstenhagen	Beitrag zur Optimierung des Entlasteten Wellendichtrings
60	P. Brodbeck	Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Bauteilzuverlässigkeit und zur Systemberechnung nach dem Booleschen Modell
61	Ch. Hoffmann	Untersuchungen an PTFE-Wellendichtungen
62	V. Hettich	Identifikation und Modellierung des Materialverhaltens dynamisch beanspruchter Flächendichtungen
63	K. Riedl	Pulsationsoptimierte Außenzahnradpumpen mit ungleichförmig übersetzenden Radpaaren
64	D. Schwuchow	Sonderverzahnungen für Zahnradpumpen mit minimaler Volumenstrompulsation
65	T. Spörl	Modulares Fahrsimulationsprogramm für beliebig aufgebaute Fahrzeugtriebstränge und Anwendung auf Hybridantriebe
66	K. Zhao	Entwicklung eines räumlichen Toleranzmodells zur Optimierung der Produktqualität
67	K. Heusel	Qualitätssteigerung von Planetengetrieben durch Selektive Montage
68	T. Wagner	Entwicklung eines Qualitätsinformationssystems für die Konstruktion
69	H. Zelßmann	Optimierung des Betriebsverhaltens von Getriebeentlüftungen
70	E. Bock	Schwimmende Wellendichtringe
71	S. Ring	Anwendung der Verzahnungstheorie auf die Modellierung und Simulation des Werkzeugschleifens
72	M. Klöpfer	Dynamisch beanspruchte Dichtverbindungen von Getriebegehäusen
73	C.-H. Lang	Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
74	W. Haas	Berührungsfreies Abdichten im Maschinenbau unter besonderer Berücksichtigung der Fanglabyrinthe
75	P. Schiberna	Geschwindigkeitsvorgabe für Fahrsimulationen mittels Verkehrssimulation
76	W. Elser	Beitrag zur Optimierung von Wälzgetrieben
77	P. Marx	Durchgängige, bauteilübergreifende Auslegung von Maschinenelementen mit unscharfen Vorgaben
78	J. Kopsch	Unterstützung der Konstruktionstätigkeiten mit einem Aktiven Semantischen Netz
79	J. Rach	Beitrag zur Minimierung von Klapper- und Rasselgeräuschen von Fahrzeuggetrieben
80	U. Häussler	Generalisierte Berechnung räumlicher Verzahnungen und ihre Anwendung auf Wälzfräserherstellung und Wälzfräsen
81	M. Hüsges	Steigerung der Tolerierungsfähigkeit unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten
82	X. Nastos	Ein räumliches Toleranzbewertungssystem für die Konstruktion

Nr.	Verfasser	Titel
83	A. Seifried	Eine neue Methode zur Berechnung von Rollenlagern über lagerinterne Kontakt-Beanspruchungen
84	Ch. Dörr	Ermittlung von Getriebelastkollektiven mittels Winkelbeschleunigungen
85	A. Veil	Integration der Berechnung von Systemzuverlässigkeiten in den CAD-Konstruktionsprozeß
86	U. Frenzel	Rückenstrukturierte Hydraulikstangendichtungen aus Polyurethan
87	U. Braun	Optimierung von Außenzahnradpumpen mit pulsationsarmer Sonderverzahnung
88	M. Lambert	Abdichtung von Werkzeugmaschinen-Flachführungen
89	R. Kubalczyk	Gehäusegestaltung von Fahrzeuggetrieben im Abdichtbereich
90	M. Oberle	Spielbeeinflussende Toleranzparameter bei Planetengetrieben
91	S. N. Dogan	Zur Minimierung der Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
92	M. Bast	Beitrag zur werkstückorientierten Konstruktion von Zerspanwerkzeugen
93	M. Ebenhoch	Eignung von additiv generierten Prototypen zur frühzeitigen Spannungsanalyse im Produkt-entwicklungsprozeß
94	A. Fritz	Berechnung und Monte-Carlo Simulation der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme
95	O. Schrems	Die Fertigung als Versuchsfeld für die qualitätsgerechte Produktoptimierung
96	M. Jäckle	Untersuchungen zur elastischen Verformung von Fahrzeuggetrieben
97	H. Haiser	PTFE-Compounds im dynamischen Dichtkontakt bei druckbelastbaren Radial-Wellendichtungen
98	M. Rettenmaier	Entwicklung eines Modellierungs-Hilfssystems für Rapid Prototyping gerechte Bauteile
99	M. Przybilla	Methodisches Konstruieren von Leichtbauelementen für hochdynamische Werkzeug-maschinen
100	M. Olbrich	Werkstoffmodelle zur Finiten-Elemente-Analyse von PTFE-Wellendichtungen
101	M. Kunz	Ermittlung des Einflusses fahrzeug-, fahrer- und verkehrsspezifischer Parameter auf die Ge-triebelastkollektive mittels Fahrsimulation
102	H. Ruppert	CAD-integrierte Zuverlässigkeitsanalyse und -optimierung
103	S. Kilian	Entwicklung hochdynamisch beanspruchter Flächendichtverbindungen
104	A. Flaig	Untersuchung von umweltschonenden Antriebskonzepten für Kraftfahrzeuge mittels Simulation
105	B. Luo	Überprüfung und Weiterentwicklung der Zuverlässigkeitsmodelle im Maschinenbau mittels Mono-Bauteil-Systemen
106	L. Schüppenhauer	Erhöhung der Verfügbarkeit von Daten für die Gestaltung und Berechnung der Zuverlässig-keit von Systemen
107	J. Ryborz	Klapper - und Rasselgeräuschverhalten von Pkw- und Nkw- Getrieben
108	M. Würthner	Rotierende Wellen gegen Kühlschmierstoff und Partikel berührungsfrei abdichten
109	C. Gitt	Analyse und Synthese leistungsverzweigter Stufenlosgetriebe
110	A. Krolo	Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen
111	G. Schöllhammer	Entwicklung und Untersuchung inverser Wellendichtsysteme
112	K. Fronius	Gehäusegestaltung im Abdichtbereich unter pulsierendem Innendruck
113	A. Weidler	Ermittlung von Raffungsfaktoren für die Getriebeerprobung
114	B. Stiegler	Berührungsfreie Dichtsysteme für Anwendungen im Fahrzeug- und Maschinenbau
115	T. Kunstfeld	Einfluss der Wellenoberfläche auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen
116	M. Janssen	Abstreifer für Werkzeugmaschinenführungen
117	S. Buhl	Wechselbeziehungen im Dichtsystem von Radial-Wellendichtring, Gegenlauffläche und Flu-id
118	P. Pozsgai	Realitätsnahe Modellierung und Analyse der operativen Zuverlässigkeitskennwerte technischer Systeme
119	H. Li	Untersuchungen zum realen Bewegungsverhalten von Losteilen in Fahrzeuggetrieben
120	B. Otte	Strukturierung und Bewertung von Eingangsdaten für Zuverlässigkeitsanalysen
121	P. Jäger	Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen
122	T. Hitziger	Übertragbarkeit von Vorkenntnissen bei der Zuverlässigkeitstestplanung
123	M. Delonga	Zuverlässigkeitsmanagementsystem auf Basis von Felddaten
124	M. Maisch	Zuverlässigkeitsorientiertes Erprobungskonzept für Nutzfahrzeuggetriebe unter Berücksich-tigung von Betriebsdaten
125	J. Orso	Berührungsfreies Abdichten schnelllaufender Spindeln gegen feine Stäube
126	F. Bauer	PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille - Analyse, Funktionsweise und Erweiterung der Einsatzgrenzen
127	M. Stockmeier	Entwicklung von Klapper- und rasselgeräuschfreien Fahrzeuggetrieben

Nr.	Verfasser	Titel
128	M. Trost	Gesamtheitliche Anlagenmodellierung und -analyse auf Basis stochastischer Netzverfahren
129	P. Lambeck	Unterstützung der Kreativität von verteilten Konstrukteuren mit einem Aktiven Semantischen Netz
130	K. Pickard	Erweiterte qualitative Zuverlässigkeitsanalyse mit Ausfallprognose von Systemen
131	W. Novak	Geräusch- und Wirkungsgradoptimierung bei Fahrzeuggetrieben durch Festradentkopplung
132	M. Henzler	Radialdichtungen unter hoher Druckbelastung in Drehübertragern von Werkzeugmaschinen
133	B. Rzepka	Konzeption eines aktiven semantischen Zuverlässigkeitsinformationssystems
134	C.G. Pflüger	Abdichtung schnelllaufender Hochdruck-Drehübertrager mittels Rechteckring und hocheffizient strukturierter Gleitfläche
135	G. Baitinger	Multiskalenansatz mit Mikrostrukturanalyse zur Drallbeurteilung von Dichtungsgegenlaufflächen