

Daniel Hofmann

**Verknüpfungsmodell
zuverlässigkeitsrelevanter Informationen
in der Produktentwicklung mechatronischer
Systeme**

D 93
ISBN 978-3-936100-44-X

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

Verknüpfungsmodell zuverlässigkeits- relevanter Informationen in der Produktent- wicklung mechatronischer Systeme

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. Daniel Hofmann

geboren in Stuttgart-Bad Cannstatt

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper (i.R.)
Tag der mündlichen Prüfung:	04. März 2013

Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart

2013

Vorwort

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche, Leiter des Instituts für Maschinenelemente, danke ich für die Ermöglichung dieser Arbeit und seine fortwährende Unterstützung. Hervorheben möchte ich hierbei die Eröffnung der Möglichkeit, meine wissenschaftlichen Erfahrungen als Gastwissenschaftler an der University of Ottawa, ON, Kanada, zu erweitern. Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper (i.R.) für die Übernahme des Mitberichts.

Ferner danke ich allen Kollegen aus dem Daimler-Kooperationsprojekt „Geplante Zuverlässigkeit“, die mir in vier Jahren den Paralleleinstieg in die wissenschaftliche Welt und den industriellen Alltag erleichtert haben und mich bei der Ausrichtung zahlreicher Veranstaltungen unterstützt haben.

Auch bei allen Professoren und Mitwirkenden zur Antragsstellung des Sonderforschungsbereiches SFB 851 bedanke ich mich für all die Fachgespräche und Erörterungen, die mein Gedankenbild auch im Hinblick auf die vorliegende Arbeit erweitert haben.

Der „entfernteste“ Dank gilt Herrn Prof. Balbir Dhillon von der University of Ottawa, ON, Kanada, der mich während meines Aufenthalts als Gastwissenschaftler in jeglicher Hinsicht fachlich unterstützt und gefördert hat.

Allen Mitarbeitern des Instituts für Maschinenelemente danke ich für das jederzeit unkomplizierte und angenehme Arbeitsklima sowie den Mitgliedern des Bereichs „Zuverlässigkeitstechnik“ für die kollegiale fachliche Unterstützung.

Hervorheben möchte ich dabei Dr.-Ing. Anna Krolo, Dr.-Ing. Jochen Gäng, Dr.-Ing. Daniel Kirschmann und Dipl.-Ing. Michael Kopp, die mich durch zahlreiche fachliche Diskussionen sowie kritische Anmerkungen sowohl bei der Erstellung dieser Arbeit als auch im Rahmen meiner weiteren wissenschaftlichen Tätigkeit nach Kräften unterstützt haben.

Frau Judith Lübeck danke ich für ihre Geduld während der Erstellung dieser Arbeit und die stetige Motivation.

Abschließender Dank geht an meine Eltern für die Förderung, Motivation und Unterstützung, welche sie mir während Studium und Promotion entgegengebracht haben.

Weil der Stadt, im März 2013

Daniel Hofmann

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes	iv
Abstract.....	vii
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung.....	2
1.2 Ziele dieser Arbeit.....	4
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Grundlagen.....	8
2.1 Begriffe und Definitionen	8
2.2 Zuverlässigkeit.....	15
2.2.1 Zuverlässigkeitszielorientierte Entwicklung.....	15
2.2.2 Wesentliche zuverlässigkeitstechnische Parameter komplexer mechatronischer Systeme	15
2.2.3 Methoden in der Zuverlässigkeitstechnik	16
2.2.4 Daten in der Zuverlässigkeitstechnik	17
2.3 Zusammenhang Daten - Informationen - Wissen in der zuverlässigkeitsorientierten Entwicklung	18
2.4 Darstellung von Informationen in Prozessen.....	19
2.4.1 Matrizendarstellungen	20
2.4.2 Graphendarstellungen.....	22
3 Stand der Forschung und Technik	23
3.1 Mechatronik	23
3.2 Informationen und der Zusammenhang mit Daten und Wissen	24
3.3 Entwicklungsprozesse	26
3.3.1 Entwicklungsprozesse in der Mechatronik	26
3.3.2 Entwicklungsprozesse im Maschinenbau	28
3.3.3 Entwicklungsprozesse in der Elektrotechnik.....	29
3.3.4 Entwicklungsprozesse in der Softwaretechnik	30
3.4 Zuverlässigkeitstechnik.....	30
3.4.1 Zuverlässigkeit in den Domänen.....	31
3.4.2 Zuverlässigkeitsmodelle	33
3.4.3 Zuverlässigkeitsmanagement und -prozesse.....	34
3.4.4 Zuverlässigkeitstechnische Informationsmodellierung.....	34
3.5 Prozessverknüpfung und Informationsflüsse.....	35

4	Basiselemente zur Gestaltung eines Informationsmodells	37
4.1	Basiselemente aus Prozesssicht	37
4.2	Basiselemente aus Methodensicht	42
4.3	Basiselemente aus Systemsicht	43
4.4	Übersicht: Identifizierte Basiselemente.....	45
5	Matrizenbasiertes Informationsverknüpfungsmodell	47
5.1	Modellbasierte Verknüpfung - Prozesssicht	47
5.1.1	Entwicklungsprozesse als Teil der Prozesssicht.....	47
5.1.2	Anbindung des Zuverlässigkeitsprozesses an den Entwicklungsprozess.....	50
5.1.3	Dokumente als Teil der Prozesssicht.....	53
5.1.4	Anbindung der Dokumente in der Prozesssicht	55
5.2	Modellbasierte Verknüpfung - Methodensicht	56
5.2.1	Methoden als Elemente zur Flexibilisierung individuell angepasster Zuverlässigkeitsentwicklung.....	56
5.2.2	Anbindung der Methodensicht an die Prozesssicht	59
5.3	Modellbasierte Verknüpfung - Systemsicht	61
5.3.1	Systemkomponenten und Systemfunktionen als Teil der Systemsicht	62
5.3.2	Anbindung der Systemsicht an die Prozess- und Methodensicht	64
5.4	Verknüpfung von Prozess-, Methoden- und Systemsicht.....	66
5.5	Aufwandsoptimierte Verknüpfung der Sichten.....	70
6	Zuverlässigkeitsinformationsmodell und Wissensentwicklung	76
6.1	Zuverlässigkeitsinformationsmodell.....	76
6.1.1	Zuverlässigkeitsinformationsmodell - Prozesssicht.....	77
6.1.2	Zuverlässigkeitsinformationsmodell - Methodensicht.....	84
6.1.3	Zuverlässigkeitsinformationsmodell - Systemsicht.....	87
6.1.4	Zuverlässigkeitsinformationsmodell und matrizenbasiertes Informationsverknüpfungsmodell	95
6.2	Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung	96
6.2.1	Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung - Prozesssicht.....	97
6.2.2	Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung - Methodensicht.....	98

6.2.3	Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung - Systemsicht.....	100
6.3	Zuverlässigkeitsinformationsmodelle und Systemlandschaft	103
6.4	Technische Umsetzung des Zuverlässigkeitsinformationsmodells	104
7	Anwendungsbeispiel	106
7.1	Vorstellung	106
7.2	Prozesse, Dokumente und Methoden	107
7.3	Das matrizenbasierte Informationsverknüpfungsmodell.....	109
7.4	Die Zuverlässigkeitsinformationsmodelle	114
7.4.1	Eigenschaften und Kennzahlen des Prozessschrittes „Anforderungen“	114
7.4.2	Zusammenhang der Zuverlässigkeitsinformationsmodelle (Systemsicht) am Beispiel der Komponente „elektrischer Motor“	115
8	Zusammenfassung und Ausblick	119
9	Literatur	121
10	Anhang	131

Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes

6 σ	Six Sigma
AG	Auftraggeber
AN	Auftragnehmer
ANSI	American National Standards Institute
<i>BEG</i>	Beeinflussungsgrad einer Information
<i>BEG_i</i>	Beeinflussungsgrad von Prozess-/Methodenschritt, Systemkomponente oder -funktion
CMMI	Capability Maturity Model Integration
D	Detection, deutsch: Entdeckungswahrscheinlichkeit (bei einer FMEA)
D _{verkn}	verknüpfte mechatronische Domänen
DAT	Deutsche Automobil Treuhand
DfSS	Design for Six Sigma
DIKW	Data-Information-Knowledge-Wisdom
<i>DKG</i>	Dokumentenverknüpfungsgrad
DMM	Domain Mapping Matrix
<i>DPG</i>	Diskrepanzgrad einer Information
<i>DPG_i</i>	Diskrepanzgrad von Prozess-/Methodenschritt, Systemkomponente oder -funktion
DRBFM	Design Review based on Failure Mode
DSM	Design Structure Matrix, auch: Dependency Structure Matrix
E/A	Ein-/Ausgang
EI	Elektronik
EDM	Engineering Data Management
ER	Entity Relationship
ERM	Entity-Relationship-Modellierung

$f(t)$	Ausfalldichte zum Zeitpunkt t, engl.: failure density function
$F(t)$	Ausfallwahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt t, engl.: Failure distribution
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis, dt.: Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (zum Beispiel lt. DIN EN 60812), auch bekannt als Fehler-Möglichkeiten- und -Einfluss-Analyse (zum Beispiel lt. QS-9000)
FRACAS	Failure Reporting, Analysis and Corrective Action Systems
FTA	Fault Tree Analysis, deutsch: Fehlzustandsbaumanalyse
I	Informationen über eine Komponente oder Funktion
I_{aus}	ausgehende Informationen
$I_{D_{aus}}$	zu Dokumenten ausgehende Informationen
$I_{D_{ein}}$	von Dokumenten eingehende Informationen
I_{ein}	eingehende Informationen
$I_{M_{aus}}$	zu Methoden ausgehende Informationen
I_{mB}	Informationen mit Beeinflussung durch die neue Information
I_{mD}	Informationen mit Diskrepanzen zur neuen Information
$I_{M_{ein}}$	von Methoden eingehende Informationen
IDG	Informationsverdichtungsgrad
IPEMM	Integriertes Produktentstehung-Management Modell
KLH	Komponentenlastenheft
MDM	Multiple Domain Matrix
Me	Mechanik
MG	Mechatronisierungsgrad
MKG	Methodenverknüpfungsgrad
MS	Meilenstein
Mt	Mechatronik
MVM	Münchener Vorgehensmodell

O	Occurrence, deutsch: Auftretenswahrscheinlichkeit (bei einer FMEA)
OO	Objektorientierung
PDM	Product Data Management
ppm	parts per million, deutsch: Teile pro 1 Million Teile
PS	Prozessschritt
QFD	Quality Function Deployment
$R(t)$	Zuverlässigkeit zum Zeitpunkt t, engl.: Reliability
RUP	Rational Unified Process
S	Severity, deutsch: Schwere (bei einer FMEA)
Sf	Systemfunktion
Sk	Systemkomponente
SPARC	Standards Planning and Requirements Committee
SPICE	Software Process Improvement and Capability Determination
SQMA	Situationsbasierte Qualitative Modellbildung und Analyse
SW	Software
UML	Unified Modeling Language
XT	Extreme Tailoring
ZIM	Zuverlässigkeitsinformationsmodell
ZIM-We	Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung
Zuv	Zuverlässigkeit

Abstract

Both the complexity in mechatronic product development and the information density are currently increasing rather rapidly. Since there is no additional support for an efficient and effective reliability-oriented product development, this may cause negative influence on product quality and reliability.

This thesis aims at raising the reliability of complex mechatronic products by observing reliability relevant information and information flows during development. In particular, reliability analyses and prognoses as well as the accompanying methods are to be integrated into product development in a structural way. Furthermore, mechatronic domains, development processes and reliability processes are supposed to move together by highlighting information and information flows in a comprehensive reliability information model. This model will encourage a holistic reliability-oriented approach for developing complex mechatronic systems. An expansion of the reliability information model deals with the deployment of reliability-relevant development knowledge.

To identify standardized connection elements, development processes are analysed according to the state of the art. In addition, different possibilities of specification for the connection model are considered.

Using “process view”, “system view” and “method view”, a matrix-based connection model for all reliability-relevant development information is being developed. Furthermore, the information is united in the so called reliability information model (German: Zuverlässigkeitsinformationsmodell, ZIM). This model allows to individually memorise information about product development and the product itself in a structured way. Therefore special transfer documents, description sheets and analyses are applied.

Expanding the model to deal with reliability-relevant knowledge, the so called reliability information model for knowledge development (German: Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung, ZIM-We) has been set up. This model enables the use of already memorised information, dependancies and analysis results to make the outcome of future product development more reliable.

The possibilities of the connection model and the reliability information model are shown using the mechatronic example of an electrically operated window regulator.

1 Einleitung

Steigende Kundenanforderungen und damit einhergehende Komplexitätssteigerungen der Produkte setzen die Unternehmen heutzutage vor große Herausforderungen, um die Forderungen in kurzer Zeit, zu vertretbaren Kosten und insbesondere hoher Qualität und Zuverlässigkeit zu erfüllen.

Die damit einhergehende stärkere Mechatronisierung der Produkte, also die Verbindung der Domänen „Mechanik“, „Elektronik“ und „Informationstechnologie“ erfordert insbesondere im Hinblick auf eine zuverlässigkeitsorientierte Entwicklung eine deutliche Fokussierung auf stimmige, aufeinander abgestimmte und dennoch flexible Entwicklungsprozesse. Um der zunehmenden Entwicklungskomplexität und der damit verbundenen Informationsdichte adäquat zu begegnen und gleichsam eine hohe Produktzuverlässigkeit gewährleisten zu können, sind aktuell keine Hilfsmittel zur Unterstützung einer effizienten und effektiven zuverlässigkeitsorientierten Entwicklung verfügbar.

Dass jedoch die Zuverlässigkeit noch immer als eines der wesentlichen Kaufmerkmale gilt, zeigen aktuelle Kundenbefragungen nach den Erwartungen beim Kauf eines neuen Fahrzeuges als Beispiel eines komplexen mechatronischen Systems. So wird in Umfragen der Deutschen Automobil Treuhand (DAT) die Zuverlässigkeit beim Kauf von Fahrzeugen als wichtigstes Kriterium gesetzt, siehe. Abbildung 1 [DAT11].

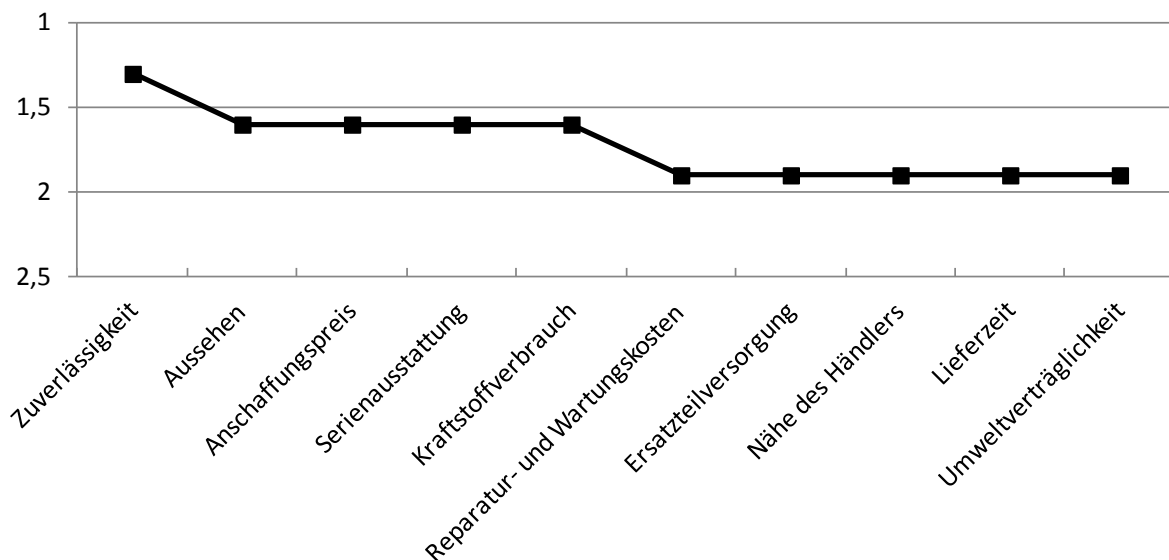


Abbildung 1: Kriterien beim Fahrzeugkauf gemäß [DAT11]; Beurteilung: 1 = sehr wichtig; 4 = unwichtig

In weltweiten Befragungen zeigt sich bezüglich der Relevanz von Zuverlässigkeit als entscheidendes Kaufkriterium ein ähnliches Bild, siehe Abbildung 2 [Wym07].

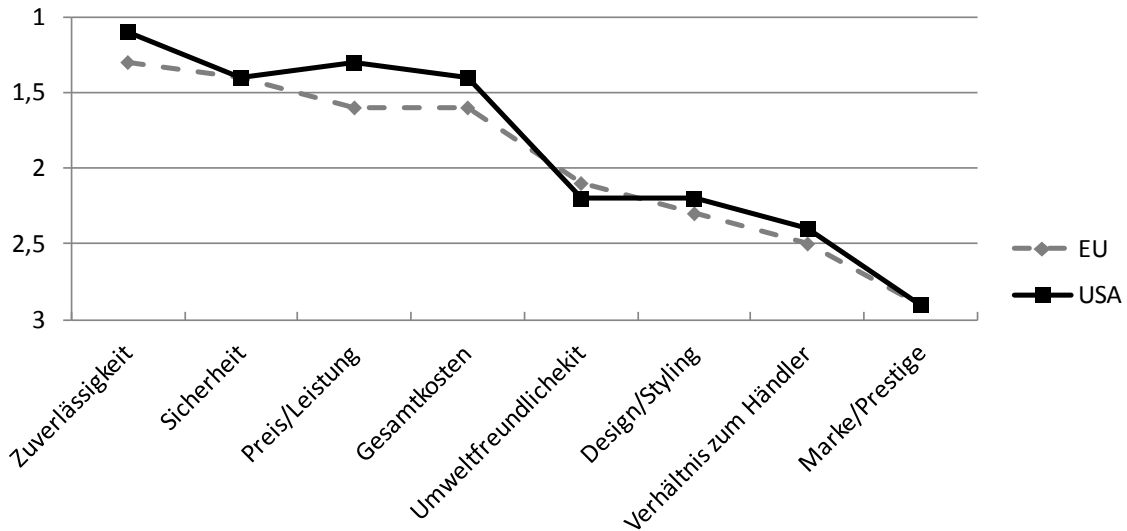


Abbildung 2: Kundenerwartungen beim Kauf eines neuen Fahrzeuges [Wym07]; Beurteilung: 1 = sehr wichtig

Dieser Erwartung steht jedoch die aus aktuellen Ergebnissen des Kraftfahrtbundesamtes ermittelte Anzahl der Nachfass- und Rückrufaktionen entgegen, die alleine in der Bundesrepublik Deutschland in den letzten Jahren stark anstieg beziehungsweise aktuell auf sehr hohem Niveau stabil ist, siehe Abbildung 3.

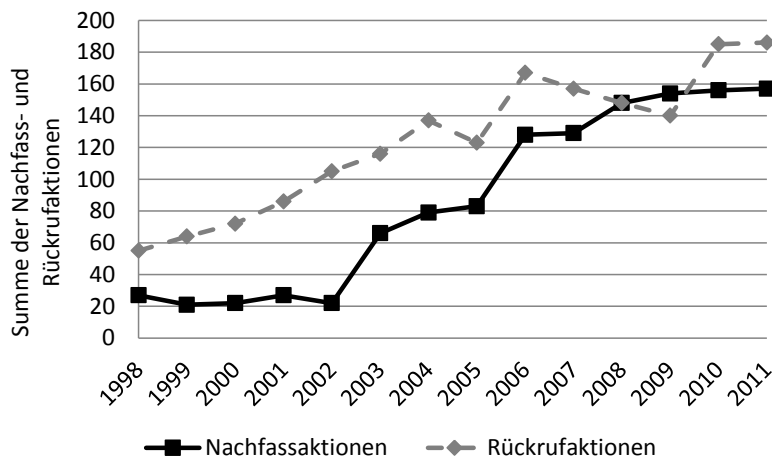


Abbildung 3: Anzahl der Nachfass- und Rückrufaktionen [KBA11]

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die Diskrepanz zwischen den Erwartungen und der Realität zeigt deutlich auf, dass die Zuverlässigkeit komplexer mechatronischer Systeme, zu denen Kraftfahrzeuge heute zweifelsohne zählen, mit dem Anstieg von Funktionalität und Komplexität nicht Schritt halten konnte. Einen wesentlichen Beitrag hierzu liefert auch die Tatsache, dass die Technologiefortschritte in den Einzeldomänen unterschiedlich verlaufen. Während in der Domäne Mechanik meist Evolutionen erkennbar sind (zum Beispiel leichtere Werkstoffe, Optimierungen,...) ste-

hen in der Domäne Elektronik neue Technologien im ca. zweijährigen Rhythmus zur Verfügung. Bedenkt man eine Entwicklungszeit, zum Beispiel bei Fahrzeugen von über fünf Jahren, so zeigt sich die Notwendigkeit für die Unternehmen, in der Produktentwicklung mitunter sehr dynamisch agieren zu müssen. Diese Entwicklung kann bei unzureichender Prozessausgestaltung und nicht strukturierter Verwendung zuverlässigkeitsrelevanter Informationen unwillkürlich einen negativen Einfluss auf die Zuverlässigkeit des Systems oder die Kosten der Produktentwicklung haben.

Abbildung 4 bildet den Zusammenhang zwischen Kostenfestlegung und Entwicklungsphasen ab. Die sogenannte „Rule of Ten“ (Abbildung 5) zeigt den Zusammenhang zwischen den Fehlerkosten und den Lebenszyklusphasen beziehungsweise die Kosten zur Behebung potentieller Fehler auf. Die Kombination aus beiden zeigt deutlich, dass eine geringe Fehleranzahl beziehungsweise eine hohe Systemzuverlässigkeit insbesondere in der frühen Entwicklungsphase erreicht werden muss, um auch die Kosten zu beherrschen. Dies rückt die Entwicklungsprozesse in den Fokus.

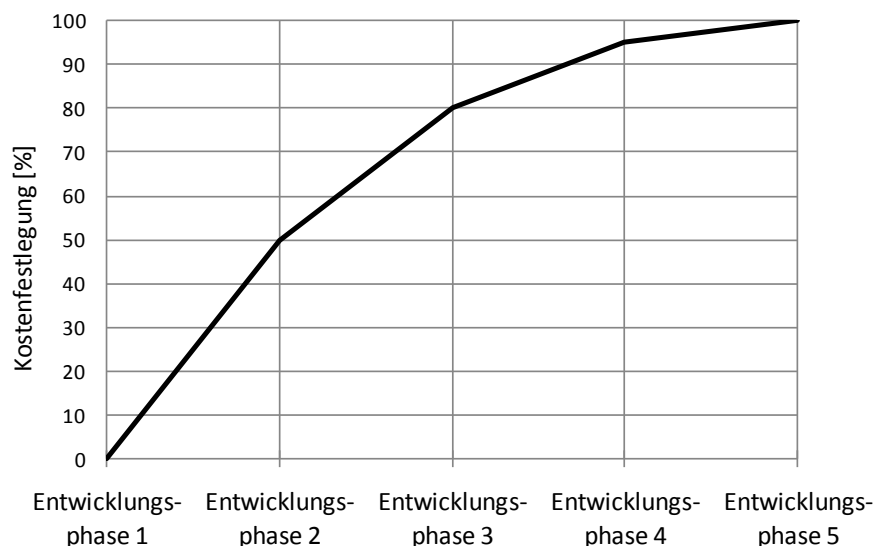


Abbildung 4: Kostenfestlegung in Abhängigkeit der Entwicklungsphasen [LeKa03]

Eine bisher noch ungelöste Herausforderung besteht nach [Ber et al.09] darin, dass bei der Entwicklung mechatronischer Systeme Domänen vernetzt sind, die in ihrer Entwicklung unterschiedliche „Sprachen“ sprechen und zudem unterschiedlichen Entwicklungsabläufen und -prozessen unterliegen. Erst mit der VDI 2206 [VDI04] wurde ein Entwicklungsvorgehen mitsamt einem Prozess beschrieben, das alle drei Domänen vereinen und gemeinsam abbilden soll. Eine Integration von Zuverlässigkeitsaufgaben ist damit jedoch nicht verbunden. Dies führt dazu, dass Zuverlässigkeitsmethoden meist nicht gewinnbringend in allen Domänen verankert sind, da auf die spezifischen Belange der Einzelprozesse und -domänen nicht hinreichend Rücksicht genommen wird. Zudem existieren keine beziehungsweise nur unzureichend detaillierte Beschreibungen von Zuverlässigkeitsprozessen, die für mechatronische Systeme

sinnvoll und relevant sind. Beides hat eine unnötig niedrige Systemzuverlässigkeit zur Folge.

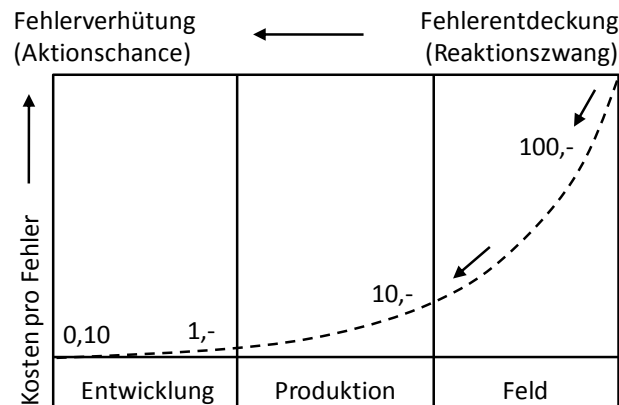


Abbildung 5: „Rule of Ten“, in Anlehnung an [Ber04]

Ein wesentlicher Anteil zur Erreichung einer hohen Systemzuverlässigkeit liegt insbesondere in den noch nicht genügend vernetzten Informationsflüssen innerhalb der einzelnen Prozesse. Dies gilt sowohl für die mechatronische Produktentwicklung als auch für den Zuverlässigkeitsprozess. Bislang wird der Hauptfokus im Bereich der zuverlässigkeitsorientierten Entwicklung entweder auf die Ebene der Daten (zum Beispiel Product Data Management, Engineering Data Management) oder die Ebene des Wissens (Wissensmanagement, Expertenwissen) gelegt. Die dazwischen liegende Ebene der Informationen wird jedoch lediglich als Trägerschicht wahrgenommen und ist somit nicht beziehungsweise nur unzureichend in dieses Geflecht eingebunden. Doch erst mit Kenntnis der Informationsflüsse beziehungsweise der Informationen lassen sich bekannte oder zukünftige Zuverlässigkeitsmethoden gewinnbringend für die gesamte Entwicklung einbinden und die Ebenen „Daten“ und „Wissen“ strukturiert verknüpfen. Darüber hinaus gilt dies umso mehr für die Informationsflüsse zwischen Entwicklungs- und Zuverlässigkeitsprozess.

1.2 Ziele dieser Arbeit

Diese Arbeit hat das Ziel, die Zuverlässigkeit komplexer mechatronischer Systeme durch eine umfassende Betrachtung von Informationen in der Produktentwicklung zu steigern.

Insbesondere soll sie es ermöglichen, Zuverlässigkeitsanalysen und -prognosen sowie die damit einhergehenden Methoden strukturiert in die Entwicklungs- und Zuverlässigkeitsprozesse einzubinden. Darüber hinaus sollen durch die Darstellung der Informationen beziehungsweise der Informationsflüsse in einem übergreifenden systemorientierten Zuverlässigkeitsinformationsmodell sowohl die Domänen der Mechatronik als auch der mechatronische Entwicklungsprozess und der Zuverlässigkeitsprozess enger aneinanderrücken. Dadurch soll ein ganzheitliches zuverlässigkeitsorientiertes Entwick-

lungsvorgehen für komplexe mechatronische Systeme ermöglicht werden. Hierbei gilt es auch, eine Verknüpfung zwischen Prozess und System zu integrieren. Durch diesen übergreifenden Ansatz wird zudem das Ziel verfolgt, die Systemzuverlässigkeit durch eine bessere Sichtbarkeit und somit auch Verfügbarkeit der bereits in frühen Entwicklungsphasen vorhandenen expliziten und impliziten Informationen steigern zu können.

Letztlich soll durch diese Arbeit eine ganzheitliche zuverlässigkeitsorientierte Sicht auf Informationen durch eine modellbasierte Verknüpfung während des Entwicklungsprozesses möglich sein. Auch die Zusammenhänge von „Daten“, „Informationen“ und „Wissen“ werden betrachtet, da nur die strukturierte Verknüpfung aller dieser Ebenen zu einer möglichst hohen Systemzuverlässigkeit führen kann. Dies wird insbesondere dann der Fall sein, wenn sowohl aus den systembezogenen Informationen als auch aus den Informationsflüssen in den Prozessen der Produktentwicklung Lehren gezogen und im Sinne von Wissen für weitere Entwicklungen zur Verfügung gestellt werden können. Zudem beschreibt auch [LeKa03], dass die Produktentwicklung schneller werden kann, wenn der Informationsfluss im Unternehmen beziehungsweise zwischen den Domänen verbessert wird.

Mit einem zuverlässigkeitsorientierten Entwicklungsprozess, dessen Informationsflüsse bekannt und analysiert sind, lässt sich schon während der Entwicklung die Anzahl der Produktänderungen durch bekannte Informationsflüsse früh reduzieren und die dennoch notwendigen lassen sich besser und kostengünstiger managen. Dies führt im Sinne der „Rule of Ten“ (Abbildung 5) zu deutlich geringeren Kosten.

Nebenbei soll diese Arbeit durch eine prozess- und systemverbindende Sichtweise insbesondere das Managementverständnis für die Belange einer zuverlässigkeitsorientierten Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme stärken.

Die Möglichkeit zur Verallgemeinerung und damit zur Einbindung dieser Erkenntnisse in spätere Wissensmanagementsysteme soll durch ein allgemeines und vereinfachtes Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ergänzt werden.

Am Beispiel eines Systems aus der Automobilindustrie und ausgewählter Phasen in der Produktentwicklung sollen die Ergebnisse dieser Arbeit validiert werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit gliedert sich gemäß der Arbeitsschwerpunkte in die in Abbildung 6 dargestellten Kapitel.

Das Kapitel „Grundlagen“ umfasst neben notwendigen Begriffen und Definitionen Grundlagen zur Zuverlässigkeit. Ferner werden grundlegende Erkenntnisse zum Zusammenhang zwischen Daten-Informationen-Wissen sowie zu verschiedenen Modellierungsdarstellungen für Informationen wie Matrixstrukturen und Graphendarstellungen vorgestellt.

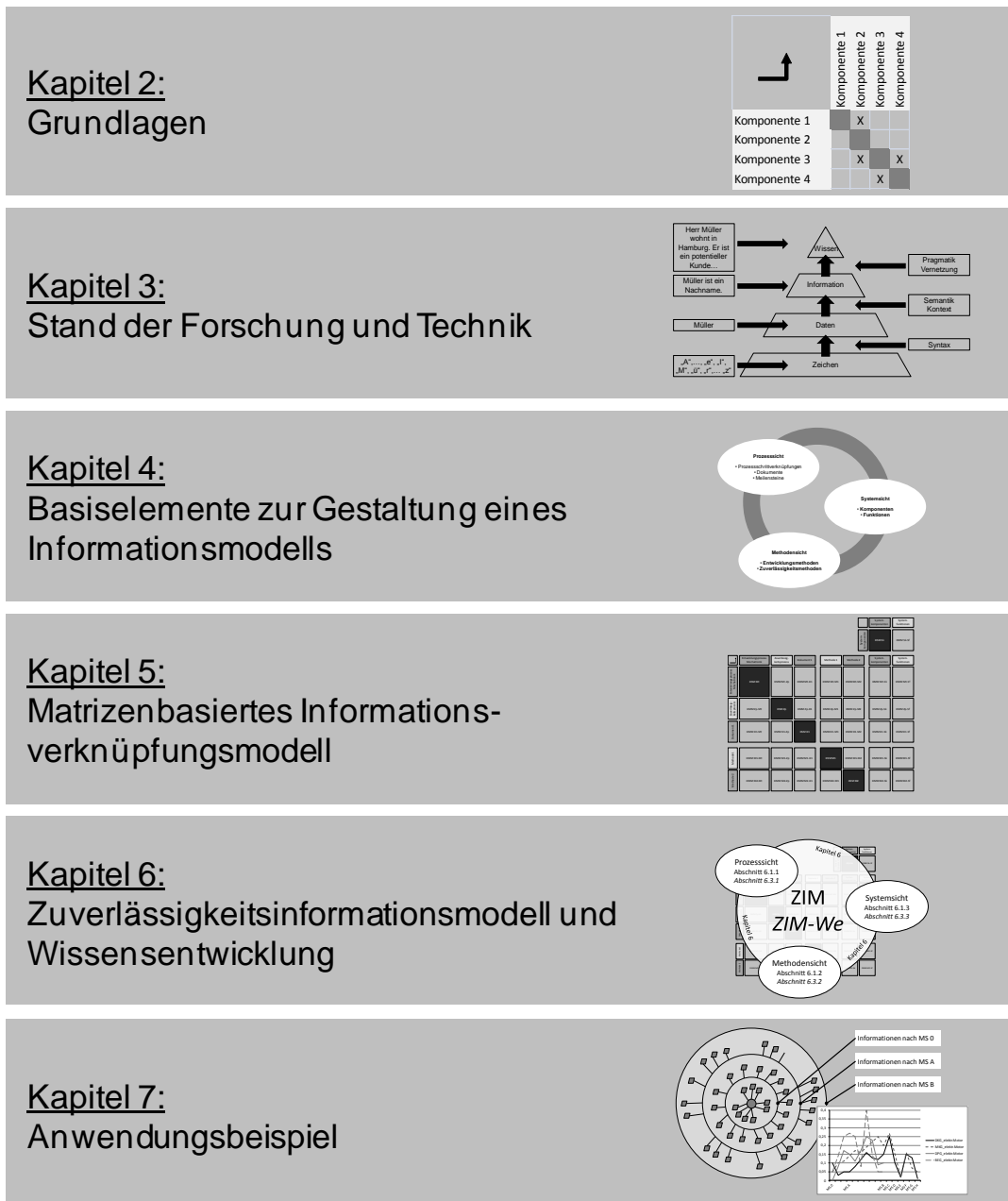


Abbildung 6: Aufbau der Arbeit

Im Kapitel „Stand der Forschung und Technik“ werden aktuelle Verfahren und Vorgehensweisen in der zuverlässigkeitsorientierten Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme vorgestellt. Im Besonderen werden dabei die Mechatronik, die Informationen in der Systementwicklung sowie die Verbindung zu Daten und Wissen, die Entwicklungs- und Zuverlässigkeitsprozesse und auch die zuverlässigkeitstechnische Informationsmodellierung komplexer Systeme betrachtet.

Das Kapitel „Basiselemente zur Gestaltung eines Informationsmodells“ befasst sich mit Basiselementen aus System-, Prozess- und Methodensicht, die für das Verknüpfungs- und Zuverlässigkeitsinformationsmodells weiter Verwendung finden.

Das anschließende Kapitel „Matrizenbasiertes Informationsverknüpfungsmo- dell“ befasst sich mit der prozessorientierten, der methodenorientierten und der systemspezifischen Sicht auf zuverlässigkeitsrelevante Informationen und Informationsflüsse. Durch die Prozesssicht wird auf Basis von Entwicklungs- und Zuverlässigkeitsprozessen der Grundstein für ein entsprechendes Verknüpfungsmo- dell gelegt. Dieses ist darauf ausgelegt, auch die Entwicklungs- prozesse der mechatronischen Domänen oder individuelle Anpassungen zu berücksichtigen. Eine Ergänzung erfährt das Vorgehen um die prozess- und systembegleitenden Entwicklungsdokumente. Zudem werden über die Metho- densicht die Zuverlässigkeitsmethoden beziehungsweise deren Informationen und Informationsflüsse in die erstellte Vorgehensweise eingebunden. Die Sys- temsicht fokussiert die besonders charakterisierenden Elemente „Komponente“ und „Funktion“. Das bereits vorgestellte prozedurale Vorgehen wird um diese Elemente ergänzt.

Das Kapitel „Zuverlässigkeitsinformationsmodell und Wissensentwicklung“ stellt über die Informationsflüsse hinaus die umfassende Sammlung und Auf- bereitung aller für ein zu entwickelndes System bekannten zuverlässig- keitsrelevanten Informationen inklusive deren Abhängigkeiten in einem Verknüpfungs- und Zuverlässigkeitsinformationsmodell (ZIM) dar. Zudem stellt dieses Kapitel den Ansatz eines Modells zur Wissensentwicklung (ZIM-We) basierend auf dem Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM vor und gibt einen Ausblick auf eine mögliche Umsetzung.

Das Kapitel „Anwendungsbeispiel“ umfasst die Validierung der vorgestellten Vorgehensweise anhand des Auszugs aus der Entwicklung eines mechatroni- schen elektrischen Fensterhebers. Dabei werden neben dem Verknüp- fungsmodell auch die Vorzüge des Zuverlässigkeitsinformationsmodells auf- gezeigt.

Das Kapitel „Zusammenfassung und Ausblick“ stellt die Ergebnisse dieser Ar- beit kompakt dar und zeigt im Ausblick mögliche darauf aufbauende For- schungsansätze, Erweiterungen und Verknüpfungen.

2 Grundlagen

In Kapitel 2 werden die für diese Arbeit relevanten Begriffe in alphabetischer Reihenfolge eingeführt und definiert. Zudem werden die Grundlagen der Zuverlässigkeit, des Zusammenhangs zwischen Daten - Informationen - Wissen in der zuverlässigkeitsorientierten Produktentwicklung sowie der Darstellungsmöglichkeiten von Informationen in Prozessen vorgestellt.

2.1 Begriffe und Definitionen

In der Welt der Mechatronik mit den drei gewachsenen Domänen Mechanik, Elektronik und Software ist eine einheitliche Begriffswelt und Sprache Grundvoraussetzung [Ber et al.09]. Insbesondere aufgrund nicht eindeutiger Begriffe, auch hervorgerufen durch die Notwendigkeit, gewachsene englische und deutsche Begriffe in Verbindung zu bringen, hat sich im Bereich der Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme in einigen Fällen eine Zweideutigkeit auch auf Normenebene entwickelt. Daher ist eine umfassende Definition beziehungsweise eindeutige Benennung der gängigen Begriffe unerlässlich. Alle für diese Arbeit relevanten Begriffe sind nachfolgend in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt.

Daten:

[DIN97] definiert Daten wie folgt:

„Daten sind Gebilde aus Zeichen oder kontinuierliche Funktionen, die aufgrund bekannter oder unterstellter Abmachungen Informationen darstellen, vorrangig zum Zweck der Verarbeitung und als deren Ergebnis.“

In [Str et al.04] werden Daten wie folgt beschrieben:

„Daten bestehen aus einer Zeichenfolge. Sie sind wirkungs- und bedeutungslos.“

Informationen:

Für den Begriff „Information“ oder „Informationen“ existieren in verschiedenen Bereichen zahlreiche Definitionen und Begriffsbeschreibungen.

Eine geläufige Definition des umgangssprachlichen Gebrauchs von Informationen lautet nach [Sei82] wie folgt:

„Information ist eine [...] gegenwarts- und praxisbezogene Mitteilung über Dinge, die uns im Augenblick zu wissen wichtig sind.“

Aus Sicht von [Hüb96] kann eine Information sowohl als auslösendes als auch als unterstützendes Element von Tätigkeiten in verschiedenen Lebensbereichen betrachtet werden.

Eine sehr umfassende und detaillierte Definition des Begriffes liefert [Spi98]:

„Information als inhaltlicher Kernbestandteil des Wissens besteht in der auf vielfältige Weise (in Worten, Bildern, Gesten u. dgl.) ausdrückbaren Deklaration dessen, was - behauptungsgemäß angeblich, mutmaßlich, fälschlich - der Fall ist (war, sein wird, sein könnte), und zwar durch Angabe der ausgeschlossenen Alternativen im Möglichkeitsraum einer bestimmten Welt.“

Komponente:

In der Begriffswelt der Domäne „Mechanik“ wird der Begriff „Komponente“ vielfach synonym zum Begriff „Bauteil“ verwendet. Sowohl in der Domäne „Elektronik“ als auch insbesondere in der Domäne „Software“ wird der Begriff „Komponente“ weniger mit einer physischen Einheit als vielmehr mit einer funktionalen Einheit verbunden. In Anlehnung an [DiGe01] wird der Begriff „Komponente“ im Rahmen dieser Arbeit für alle Domänen wie folgt verstanden:

„Eine Komponente bezeichnet eine abgeschlossene physische oder funktionale technische Einheit. Sie besteht aus definierten Schnittstellen, die die Verbindung mit anderen Komponenten ermöglichen. Die Komponente selbst wird als sogenannte „black-box“ betrachtet, das heißt der innere Aufbau und die technisch/funktionale Umsetzung sind nicht einsehbar und für die betreffenden Anforderungen nicht relevant.“

Ein System kann demnach aus einer Vielzahl verschiedener, über ihre Schnittstellen verknüpfter Komponenten aufgebaut werden. Durch Hinzufügen oder Entfernen einzelner Komponenten kann ein System an neue Anforderungen angepasst werden.

Mechatronik:

Gemäß [VDI04] verfügt der Begriff „Mechatronik“ noch über keine einheitliche und allgemein anerkannte Definition. Vielmehr sei eine ständige Weiterentwicklung des Begriffes zu beobachten. Im deutschsprachigen Raum hat folgende Definition die größte Verbreitung erreicht, welche die Synergie zwischen den einzelnen Disziplinen (auch: Domänen) hervorhebt [Ise08]:

„Mechatronik ist ein interdisziplinäres Gebiet, bei dem folgende Disziplinen zusammenwirken: mechanische und mit ihnen gekoppelte Systeme, elektronische Systeme, Informationstechnik. Dabei ist das mechanische System im Hinblick auf die Funktionen dominierend. Es werden synergetische Effekte angestrebt, die mehr beinhalten als die reine Addition der Disziplinen.“

Dieser Arbeit wird jedoch die erweiterte Definition nach [Har et al.96] zugrunde gelegt, da sie die Integration der drei Domänen sowohl beim Design von Systemen als auch von Prozessen in den Fokus rückt:

„[Mechatronics is]...the synergetic integration of mechanical engineering with electronic and intelligent computer control in the design and manufacturing of industrial products and processes.“

Gemäß dieser Definition wird in dieser Arbeit ein mechatronisches System als eine Kombination der Domänen Mechanik, Elektronik und Software (gelegentlich auch als Informationsverarbeitung bezeichnet) verstanden. Elektronik umfasst hierbei - im Gegensatz zu manch anderem Verständnis - lediglich physisch repräsentierte Bauteile. Die teils hinterlegte Software wird - aufgrund des unterschiedlichen Verständnisses im Hinblick auf die Zuverlässigkeit und die verbundenen Prozesse - nicht der Elektronik zugerechnet.

Methode:

[PoLi08] beschreibt eine Methode wie folgt:

„Der Begriff Methode kennzeichnet die Beschreibung eines regelbasierten und planmäßigen Vorgehens, nach dessen Vorgabe bestimmte Tätigkeiten auszuführen sind, um ein gewisses Ziel zu erreichen.“

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff „Methode“ verstanden als:

Allgemein eine geistige Grundlage für planmäßiges, folgerichtiges Verfahren, Vorgehen, Forschen, Handeln oder die Art und Weise der Durchführung. Es ist eine Art und Weise eines Vorgehens, um systematisch neue Erkenntnisse zu erlangen. Eine Methode stellt die Ableitung eines Planes beziehungsweise einer Handlungsanweisung dar, welcher/welche ein gegebenes Problem lösen soll.

Modell:

[VDI93] versteht ein Modell als:

„Abstrahierte Darstellung eines Produkts (zum Beispiel durch dessen Daten, Eigenschaften oder Gestalt).“

In dieser Arbeit wird ein Modell jedoch enger gefasst: als Formulierung der zu lösenden Problemstellung in einer einheitlichen Sprache, zum Beispiel der mathematischen. Es soll vollständig und brauchbar für den jeweiligen Zweck sein. Grundidee bei der Formulierung eines wissenschaftlichen Modells ist die Reduktion von Komplexität. Nach [Pet et al.10] stellt ein Modell eine vereinfachte Abbildung der Realität dar.

Darüber hinaus wird im Sinne der eigenen Modellbildung auch die Definition von [Ste93] einbezogen:

„Modelle sind

- *subjektrelativ, da Auswahl des Originals und der Abbildungsregeln auf den Erzeuger zugeschnitten,*
- *zweckrelativ, da auf Belange des Erzeugers ausgerichtet, und*
- *perspektivisch, da der Blickwinkel des Erzeugers eingeht.“*

Prozess:

Die gängigste Definition eines Prozesses ist auch die als am allgemeingültigsten bezeichnete und findet sich in [ISO05]. Darin wird ein Prozess definiert als:

„Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, der Eingaben in Ergebnisse umwandelt.“

Prozessbaustein:

Ein sogenannter Prozessschritt oder Prozessbaustein ist die nächst niedrigere Gliederungsebene eines Prozesses und wird gemäß [VDI04] wie folgt definiert:

„Eine abgeschlossene Einheit von Tätigkeiten, die dazu dienen, ein bestimmtes Zwischenziel zu erreichen. Ein Prozessbaustein enthält darüber hinaus eine Beschreibung der Eingangs- und Ausgangsinformationen, Klassifizierungskriterien und Zusatzinformationen (wie unterstützende Methoden oder erforderliche Kompetenzen), die das Arbeiten mit dem Prozessbaustein unterstützen.“

System:

Nach [ISO05] bezeichnet der Begriff „System“ einen Satz von in Wechselwirkung stehenden Elementen.

Gemäß [DIN04] hat ein System in Zusammenhang mit Zuverlässigkeit

- einen festgelegten Zweck, ausgedrückt durch geforderte Funktionen, und
- festgelegte Betriebs- und Einsatzbedingungen sowie
- definierte Grenzen

und ist zudem hierarchisch aufgebaut.

In Ergänzung hierzu wird die Definition in [HaDa02] exakter gefasst:

„Ein System besitzt eine Systemgrenze und enthält mehrere Elemente, die untereinander in Beziehung stehen. Die Systemgrenze wird in Abhängigkeit des Betrachtungsfokus mehr oder weniger willkürlich gezogen. Systeme sind meistens offen und können somit ebenfalls Beziehungen zum Umfeld oder Umfeldsystemen aufweisen.“

[VDI93] definiert ein technisches System ebenfalls in Beziehung zum Umfeld als:

„Gesamtheit von der Umgebung abgrenzbarer (Systemgrenzen), geordneter und verknüpfter Elemente, die mit diesen durch technische Eingangs- und Ausgangsgrößen in Verbindung stehen.“

Wissen:

Eine einzelne Definition von Wissen zu finden, die allen damit befassten Disziplinen gerecht wird, ist der Philosophie bislang nicht gelungen. So sagte bereits [Wer74] im Jahre 1974:

„Informationsbegriffe gibt es nahezu so viele, wie es Autoren gibt, die darüber schreiben“.

Dennoch wird hier versucht, einige für diese Arbeit relevante Aussagen und Definitionen des Begriffs Wissen zu nennen.

Unter anderem [Göt02] und [Wie01] beschreiben Wissen wie folgt:

„Wissen entsteht schrittweise aus einer Vielzahl von miteinander vernetzter Information und deren erfahrungsbasierter Interpretation. Wissen ermöglicht es dem Wissensträger, Aktionen in Gang zu setzen.“

Diese Beschreibung hebt auch das Vorhandensein von Information und deren Verknüpfung als wesentliches Element von Wissen hervor.

Eine weitere Definition, die sich dieser Abhängigkeiten bedient, ist die von [Pro10]:

„Wissen bezeichnet die Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten, die Individuen zur Lösung von Problemen einsetzen. Dies umfasst sowohl theoretische Erkenntnisse als auch praktische Alltagsregeln und Handlungsanweisungen. Wissen stützt sich auf Daten und Informationen, ist im Gegensatz zu diesen jedoch immer an Personen gebunden. Es wird von Individuen konstruiert und repräsentiert deren Erwartungen über Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge.“

Für weitere Verweise auf einschlägige Literatur bieten sich beispielsweise [Leh et al.09] oder [Loh09] an.

Zuverlässigkeit:

Für die Zuverlässigkeit existieren nach [Rak02] zahlreiche Definitionen. Eine allgemein gefasste Definition des Begriffs Zuverlässigkeit lautet in [DKE02]:

„Zuverlässigkeit: Zusammenfassender Ausdruck zur Beschreibung der Verfügbarkeit und ihrer Einflussfaktoren Funktionsfähigkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft.“

Eine enger gefasste und gebräuchlichere Definition des Begriffs findet sich in [Bit86]:

„Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Einheit während einer definierten Zeitdauer unter angegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt.“

Wird der Begriff „Einheit“ hier als „System“ verstanden, finden sich die dort definierten Grenzen in dieser Definition wieder.

Eine ebenfalls gebräuchliche Definition der „Zuverlässigkeit“, die über die Funktionsfähigkeit hinaus noch zwischen „Ausfall“ und „Versagen“ unterscheidet und insofern insbesondere für mechatronische Systeme von Bedeutung ist, wird in [VDI86] eingeführt:

„Die Funktionszuverlässigkeit ist die Überlebenswahrscheinlichkeit gegenüber Ausfällen/Versagensereignissen, die eine/mehrere definierte (Nutz-/Schutz-) Leistungsfunktionen aufheben oder unzulässig beeinträchtigen. Ihr zugeordnet sind die Funktionsausfallrate und dementsprechend andere ausfall-/versagensbezogene Kenngrößen.“

Gemäß DIN 40041 [DIN90], beendet dabei ein Ausfall die Funktionsfähigkeit einer Einheit; ein Versagen derselben jedoch tritt erst auf, sobald die geforderte Funktion (aufgrund eines Ausfalls) bei Anforderung der entsprechenden Funktion durch den Nutzer oder das System nicht erbracht wird.

Für detailliertere Ausführungen im Hinblick auf allgemeine Zuverlässigkeitsdefinitionen wird auf [KoPe04], im Hinblick auf für die Mechatronik spezifischere auch auf [Jäg07] verweisen. Ein Modell zur Beschreibung der mechatronischen Zuverlässigkeitszustände findet sich in [Arn et al.04].

Zuverlässigkeit in der Mechanik:

In der Domäne Mechanik sind insbesondere zwei zuverlässigkeitstechnische Begriffe geläufig: der des Ausfalls und der des Versagens. Diese werden in [DIN90] definiert.

Die Definition eines Ausfalls lautet:

„Beendigung der Funktionsfähigkeit einer materiellen Einheit im Rahmen der zugelassenen Beanspruchung.“

Es wird darauf hingewiesen, dass der Ausfall dann zum Versagen führt, wenn die Erfüllung der geforderten Funktion verlangt wird.

Die Definition des Versagens lautet:

„Entstehen einer Störung bei zugelassenem Einsatz der Einheit aufgrund einer in ihr selbst liegenden Ursache.“

Zuverlässigkeit in der Elektronik:

In der Elektronik auf dem Gebiet der Zuverlässigkeit gebräuchliche Begriffe sind „fault“, „error“ und „failure“, die nach [Avi et al.01] zueinander in Abhängigkeit stehen.

Ein „failure“ liegt demnach dann vor, wenn sich das System in einem unkorrekten Zustand befindet. Dies kann daher rühren, dass es einerseits nicht der Spezifikation entspricht, andererseits, dass die Spezifikation die Systemfunktion nicht angemessen beschreibt.

Ein „error“ ist der Teil des Systems, der einen „failure“ auslöst und somit Ursache desselben.

Ein „fault“ ist die angenommene Ursache eines „errors“ und wird als aktiv bezeichnet wenn dieser (in einer gewissen Konstellation) einen „error“ hervorruft oder als passiv beziehungsweise schlafend wenn er zwar vorhanden ist, jedoch keinen „error“ auslöst.

Zuverlässigkeit in der Software:

Eine weitverbreitete Definition von Softwarezuverlässigkeit findet sich in [Sho84] und lautet wie folgt:

„Software reliability is the probability, that a given software system operates for some time period without software error, on the machine for which it was designed, given that it is used within the design limits.“

Auch im Bereich der Softwarezuverlässigkeit haben sich die Begriffe „fault“ und „failure“ [BaEb08] etabliert, wenngleich mit leicht anderer Sichtweise als in der Elektronik.

Dabei wird grundsätzlich zwischen zwei Arten von Fehlern differenziert: den Programmier- und den Spezifikationsfehlern (Planungsfehler). Wenn die Spezifikation einwandfrei erfolgt ist, sind Programmierfehler die Ursache für die Fehlfunktion einer Software.

[Mus et al.90] definiert den Begriff „fault“ (oder auch „bug“) als Repräsentant des Programmierfehlers wie folgt:

„A fault is the defect in the program that, when executed under particular conditions, causes a failure.“

Ein „failure“ hingegen bezeichnet die Auswirkungen, die der Produktnutzer bemerkt.

Neuerdings zeichnet sich jedoch auch auf dem Gebiet der Softwarezuverlässigkeit eine Dreiteilung ab, die neben „fault“ und „failure“ auch den Begriff „error“ umfasst [Rod02]. Auch hier gilt, dass ein „fault“ Ursache eines „errors“ ist, ein „error“ zu einem „failure“ führen kann.

Diese Dreiteilung deckt sich somit mit der Begriffswelt in der Elektronik [Avi et al.01].

2.2 Zuverlässigkeit

Nachfolgend werden die für diese Arbeit notwendigen zuverlässigkeitstechnischen Grundlagen, welche sich insbesondere auf die zuverlässigkeitszielorientierte Entwicklung beziehen, kurz vorgestellt.

2.2.1 Zuverlässigkeitszielorientierte Entwicklung

Zur Erzielung und Entwicklung einer definierten Systemzuverlässigkeit insbesondere komplexer mechatronischer Systeme wird üblicherweise eine zuverlässigkeitszielorientierte Systementwicklung eingeschlagen. Dies bedeutet, dass mittels frühzeitig gesetzter Zuverlässigkeitsziele für das Gesamtsystem oder Funktionen ein Rahmen für die weitere zuverlässigkeitsorientierte Entwicklung abgesteckt wird. Durch verschiedene bekannte Aufteilungsstrategien, wie die „Gleichmäßige Aufteilung konstanter Ausfallraten“, die „Akzentuierte Aufteilung anhand der Systemkomplexität“, die „Akzentuierte Aufteilung auf Basis des Wettbewerbs (beziehungsweise Vorgängers)“ oder die „Aufteilung auf Basis von Pannenstatistiken“ kann dieses Ziel bis auf die Komponentenebene heruntergebrochen und dann als Entwicklungsziel für die Einzeldomänen weiterverwendet werden. Das Zuverlässigkeitsziel selbst kann beispielsweise mithilfe von Expertenwissen, Feld- oder Testdaten von Vorgänger-, Vergleichs- oder Konkurrenzprodukten ermittelt werden.

2.2.2 Wesentliche zuverlässigkeitstechnische Parameter komplexer mechatronischer Systeme

Die Zuverlässigkeit $R(t)$ bezeichnet das Komplement der Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ und beschreibt somit eine zeitabhängige Wahrscheinlichkeit für den Nicht-Ausfall eines Systems.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ errechnet sich aus der Dichtefunktion $f(t)$ der Ausfälle über der Zeit t durch Integration:

$$\text{Gl. 2.1: } F(t) = \int f(t)dt$$

Die Zuverlässigkeit $R(t)$ als Komplement errechnet sich damit zu:

Gl. 2.2: $R(t) = 1 - F(t)$.

Übliche Verteilungsfunktionen der Zuverlässigkeit sind beispielsweise die Exponentialverteilung, die Weibull-Verteilung oder die logarithmische Normalverteilung.

Zur Ermittlung und Bestimmung der Systemzuverlässigkeit ist unter anderem die Kenntnis der Redundanz von Komponenten oder Funktionen notwendig. Als Redundanz wird dabei das zusätzliche Vorhandensein funktional gleicher oder vergleichbarer Komponenten oder Funktionen eines technischen Systems bezeichnet. Auch das Prinzip der Fehlertoleranz beziehungsweise fehler-toleranten Systemauslegung lässt sich im weitesten Sinne der Redundanz zuordnen.

Redundante Strukturen lassen sich durch die zuverlässigkeitstechnische Modellierung des betreffenden Systems schnell und anschaulich erkennen und abbilden. Ein für einfache Zwecke - auch für komplexe mechatronische Systeme - geeignetes und weit verbreitetes Zuverlässigkeitsmodell ist das sogenannte Modell nach Boole. Mit diesem können mittels der Booleschen Algebra (UND-, ODER-, NICHT-Verknüpfungen) insbesondere komponentenbasierte Systeme einfach abgebildet werden. Auch Redundanzen lassen sich mit Hilfe der Booleschen Modellierung darstellen und zeigen sich durch Parallelstrukturen im Booleschen Modell. Nicht-redundante Systemteile hingegen sind als Serienstrukturen modelliert. Für weitergehende Informationen wird auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen, zum Beispiel [Ber04]. Diese Modellierung findet in zahlreichen zuverlässigkeitstechnischen Methoden Anwendung.

2.2.3 Methoden in der Zuverlässigkeitstechnik

Methoden sind ein hilfreiches Instrument, um die vielfältigen Herausforderungen in der zuverlässigkeitsorientierten Systementwicklung zu beherrschen. Aufgrund der Eigenschaft, Methoden zur gezielten Lösung einzelner (meist zusammenhängender oder komplexer) Problemstellungen einzusetzen, existiert mittlerweile eine unüberschaubare Vielzahl an Methoden, die für teils individuellste Problemstellungen konzipiert wurden.

Als drei der wesentlichsten zuverlässigkeitstechnischen beziehungsweise zuverlässigkeitsnahen Methoden gelten die „Failure Mode and Effects Analysis“ (FMEA), die „Fault Tree Analysis“ (FTA) und die „Quality Function Deployment“ (QFD).

Auf die FMEA, die FTA, die „Qualitative Konzeptbewertung“ und die „Quantitative Konzeptbewertung“ wird im Rahmen des Anwendungsbeispiels in dieser Arbeit noch Bezug genommen. Diese vier Methoden werden nachfolgend knapp erläutert.

Die FMEA kann auf Produkte und Prozesse angewendet werden und bildet in einem Formblatt Zusammenhänge zwischen Fehlerart, Fehlerursache und Fehlerfolgen ab. Über die Parameter „Aufretenswahrscheinlichkeit“ (O, englisch: Occurrence), „Entdeckungswahrscheinlichkeit“ (D, englisch: Detection) und „Schwere“ (S, englisch: Severity) wird für jede Fehlerart eine sogenannte Risikoprioritätszahl (RPN, englisch: Risk Priority Number) ermittelt, die zu einer Priorisierung verhelfen soll. Die FMEA ist weit verbreitet, umfangreich dokumentiert (zum Beispiel [Ber04], [Sta03]) sowie genormt, siehe [DIN06]. Die Erstellung einer FMEA ist grundsätzlich sehr aufwändig.

Die Fehlzustandsbaumanalyse ist eine deduktive Methode, mit der die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Fehlers bestimmt werden kann. Sie kann sowohl qualitativ als auch quantitativ angewendet werden und verwendet die Boolesche Algebra um Fehlfunktionen und daraus resultierende Ereignisse auf verschiedenen Ebenen zu verknüpfen. Auch die FTA ist weit verbreitet, umfassend dokumentiert (zum Beispiel [Bir07], [O'Ne03], [Yan07]) und genormt, siehe [DIN07]. Eine FTA ist tendenziell aufwändig.

Die „Qualitative Konzeptbewertung“ sowie die „Quantitative Konzeptbewertung“ sind relativ neue Entwicklungen und finden daher aktuell keine annähernd so weite Verbreitung wie FMEA oder FTA. Dennoch sind sie sehr hilfreich, bereits in frühen Entwicklungsphasen die Zuverlässigkeit aktiv zu gestalten. Die „Qualitative Konzeptbewertung“ setzt sich dabei zum Ziel, unter anderem aus Sicht der Zuverlässigkeit zu einer objektiven und nachvollziehbaren Konzeptentscheidung bei Vorliegen verschiedener konkurrierender (mechatronischer) Systemkonzepte zu führen. Hierzu werden auf Basis einer funktionalen Betrachtung Kennzahlen wie die „Technische Umsetzbarkeit U“ oder der „Kosten-Zeit-Faktor K“ sowie die sogenannten „Entwicklungsfähigkeiten E“ errechnet. Für nähere Informationen wird auf [Man et al.07b] verwiesen.

Die „Quantitative Konzeptbewertung“ führt für das ausgewählte Konzept die zuverlässigkeitstechnische Analyse weiter. Mittels eines Zuverlässigkeitsziels und auf Basis von Felddaten von Vorgängersystemen oder vergleichbaren Systemen werden nach aktuellem Entwicklungsstatus tatsächlich erreichbare Zuverlässigkeitswerte ermittelt und mithilfe eines Zuverlässigkeitsmodells Kritikalitäten, Sensitivitäten und mögliche Optimierungen erarbeitet. Insbesondere der Spielraum zwischen Zuverlässigkeitsziel und aktuellem Status bezüglich Zuverlässigkeit wird entwicklungsbegleitend betrachtet. Für Details empfiehlt sich [Hof et al.09].

2.2.4 Daten in der Zuverlässigkeitstechnik

Als Basis statistischer Ausfallverteilungen beziehungsweise der Ausfallwahrscheinlichkeit und der Zuverlässigkeit einer Komponente oder eines Systems dienen Zuverlässigkeitsdaten über Komponenten- beziehungsweise Systemausfälle. Diese beruhen in der Regel auf Testdaten, welche in Zuverlässig-

keitstests ermittelt werden. Aufgrund der Notwendigkeit von Erprobungsträgern beziehungsweise Serienbauteilen sind Zuverlässigkeitstests jedoch erst in späten Phasen der Produktentwicklung möglich. Daher werden vielfach Daten von Vorgängersystemen oder vergleichbaren Komponenten herangezogen und ausgewertet.

Generell wird zur Fehleranalyse und Ableitung korrekativer Maßnahmen oftmals das sogenannte „Failure Reporting, Analysis and Corrective Action Systems“ (FRACAS) eingesetzt. Hierzu ist jedoch eine Softwareunterstützung unumgänglich.

Im Gegensatz zu Zuverlässigkeitsinformationen, die insbesondere in der Systementwicklung von wesentlicher Bedeutung sind, kommt den Daten damit in der Analyse und Auswertung der erreichten Zuverlässigkeit Bedeutung zu. Der grundlegende Zusammenhang zwischen Daten, Informationen und Wissen in der zuverlässigkeitsorientierten Entwicklung wird kurz im nachfolgenden Abschnitt 2.3 beleuchtet.

2.3 Zusammenhang Daten - Informationen - Wissen in der zuverlässigkeitsorientierten Entwicklung

Wie schon in Abschnitt 2.2 aufgezeigt, stellen Daten in der Zuverlässigkeitstechnik die Basis für statistische Analysen und Auswertungen dar. Die umfassende Nutzbarkeit von Daten für Zuverlässigkeitsanalysen beschreibt unter anderem auch [DIN04]. Genannt werden hierin beispielsweise die Schätzung von Garantiekosten, die Instandhaltungsplanung oder die Ersatzteilplanung. Diese Größen stehen jedoch in direktem Zusammenhang zum Ausfallverhalten des Systems beziehungsweise der Komponente, die durch die Daten abgebildet werden.

In der zuverlässigkeitsorientierten Systementwicklung stehen hingegen - auch mangels geeigneter Daten - die Informationen im Fokus. Diese werden - basierend auf Anforderungen und Annahmen sowie teilweise Daten vergleichbarer Komponenten oder Vorgängersysteme - zunehmend detaillierter oder neu verknüpft. Durch die Komplexität der Systeme und der Entwicklungsprozesse selbst ist ein umfassendes Informationsmanagement notwendig, wie auch [Krc10] beschreibt. Demnach besteht für ein gutes Informationsmanagement „eine der wesentlichen Aufgaben [darin], die erforderlichen Informationen zur richtigen Zeit und im richtigen Format zum Entscheider zu bringen.“ Für eine zielgerichtete zuverlässigkeitsorientierte Entwicklung ist daher das Handeln, Managen, Neu-Verknüpfen und Reduzieren der Vielfalt und Menge an Informationen die wesentliche Herausforderung. In Kombination mit den später ermittelten Test- oder Felddaten können zuverlässigkeitsrelevante Informationen den kompletten Life-Cycle eines Systems aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht abbilden und weitere Analysen für zukünftige Entwicklungen ermöglichen.

Nicht die Informationen allein, sondern vielmehr auch Informationen über Informationen, sogenannte Metainformationen, unterstützen bei Informationsreduktionen und -neuverknüpfungen. Unter Metainformation werden Informationen, die zum vollständigen Verständnis der eigentlichen Information notwendig sind beziehungsweise diese näher beschreiben, charakterisieren oder gliedern, verstanden. So kann beispielsweise eine im Test ermittelte Zuverlässigkeit von $R(t) = 97\%$ für einen elektrischen Fensterheber nach 10.000 Lastwechseln als gutes Ergebnis betrachtet werden - mit zusätzlichen Metainformationen wie beispielsweise Temperaturkollektiv, Öffnungs-/ Schließgeschwindigkeit im Test, verwendeter zuverlässigkeitstechnischer Struktur, Finanzbudget in der Entwicklung et cetera kann die Einschätzung jedoch anders lauten. In vielen Fällen sind somit die Daten oder Informationen alleine nicht aussagekräftig genug, sondern ergeben erst mit zusätzlichen Metainformationen ein „rundes Bild“.

Dies kann durch den zunehmenden Aufbau von zuverlässigkeitsrelevantem Wissen vertieft werden, wie dies beispielsweise in [Mül09] im Rahmen sogenannter „Muster“ vorgestellt wurde. Zum Aufbau einer umfassenden Wissenslandschaft ist jedoch die entwicklungsbegleitende Sammlung, Analyse, Bewertung und Kombination der Zuverlässigkeitsinformationen in Verbindung mit den Zuverlässigkeitsdaten unerlässlich. Dies beschreibt beispielsweise auch [PeBl06] mit: „Die zentrale Anforderung an die nächste Generation von Wissensmanagement-Systemen ist die Möglichkeit, Informationen geeignet zu kombinieren, um damit implizites Wissen ableiten und somit neues Wissen generieren zu können.“

Eine Herausforderung für den Aufbau von Wissensmodellen stellt dabei jedoch die gezielte Reduktion der vorhandenen Informationen und Daten dar. Diese Herausforderung geht einher mit der in der Lerntheorie verbreiteten Erkenntnis, dass zum Erlernen von Faktenwissen „organisierende und reduzierende Prozesse wie Weglassen, Selektion, Generalisation, Konstruktion“ notwendig sind, siehe [Arb et al.06].

2.4 Darstellung von Informationen in Prozessen

Zur Darstellung von Informationen in Prozessen haben sich in der wissenschaftlichen Landschaft zwei Möglichkeiten entwickelt. Diese finden insbesondere auch im Bereich der Analyse und Beschreibung komplexer Systeme in jeglicher Hinsicht erfolgreich Anwendung, zum Beispiel bei Prozessanalysen, Team- und Ressourcenanalysen sowie technischen Strukturanalysen [Lin et al.09].

Die beiden Darstellungsformen, die eine solche Abbildung, Modellierung und teilweise auch Manipulation beziehungsweise mathematische Analyse ermöglichen [Lin et al.09], sind:

- Matrixdarstellungen, wie die Design Structure Matrix (DSM), die Domain Mapping Matrix (DMM) oder die Multiple Domain Matrix (MDM), sowie andererseits
- Graphendarstellungen, wie beispielsweise gerichtete oder sogar gewichtete Graphen.

Eine umfassende und grundlegende Betrachtung beider Darstellungsformen bietet Lindemann in [Lin et al.09]. Nachfolgend werden die Grundlagen der für diese Arbeit relevanten Matrixdarstellungen in Abschnitt 2.4.1 vorgestellt. Auf die Grundlagen zur Graphentheorie wird in Abschnitt 2.4.2 sehr kurz eingegangen, da eine Matrixdarstellung prinzipiell in eine Graphendarstellung überführt werden kann und umgekehrt [And91].

2.4.1 Matrizendarstellungen

Bei Lindemann [Lin et al.09] werden für die drei verschiedenen Matrizentypen die Begriffe Design Structure Matrix (DSM), Domain Mapping Matrix (DMM) und Multiple Domain Matrix (MDM) geprägt. Eine Design Structure Matrix ist jedoch zudem unter dem Begriff Dependency Structure Matrix bekannt.

Allen drei Matrixformen ist gemeinsam, dass sie in Zeilen- und Spaltendarstellungen die Abhängigkeiten zwischen Elementen im Sinne ungewichteter oder gewichteter Eintragungen abbilden können. Die Matrizen können hierzu theoretisch beliebig groß und umfassend sein, im Sinne einer auch nachvollziehbaren Bearbeitbarkeit sollten jedoch nach [Ale64] 140 Einträge bei Weitem unterschritten bleiben. Reflexive, das heißt auf sich selbst bezogene Beziehungen sind nicht zulässig. Somit ist die Diagonale einer Design Structure Matrix immer leer beziehungsweise ausgegraut.

2.4.1.1 Design Structure Matrix (DSM)

Eine Design Structure Matrix ist eine quadratische Matrix in der Form $N \times N$, die die Abhängigkeiten zwischen Elementen derselben Domäne, beispielsweise Komponenten, abbilden kann. Dazu werden sowohl auf der Abszisse als auch auf der Ordinate die zu analysierenden Komponenten aufgetragen und die zwischen diesen existierenden Abhängigkeiten beispielsweise binär durch ein „X“ gekennzeichnet. Design Structure Matrizen werden nach Browning prinzipiell in statische Design Structure Matrizen (für zum Beispiel Komponenten- und Teambetrachtungen) und zeitbasierte Design Structure Matrizen (für Aktivitäts- und Parameterbetrachtungen) unterschieden [Bro01]. Eine statische Design Structure Matrix mit vier Abhängigkeiten zwischen den Komponenten 1 bis 4 ist in Abbildung 7 links dargestellt.

Zur weiteren Analyse einer Design Structure Matrix haben sich unter anderem die Methoden des Banding, Clustering und Partitioning etabliert.

Das Clustering zielt dabei auf die Ermittlung von Modulen (Komponentenblöcken) in einer Design Structure Matrix mit engen Abhängigkeiten innerhalb und eher geringen außerhalb ab, das Banding und Partitioning hingegen auf die Minimierung von Feedbackschleifen (zeitlich oder organisatorisch). Für Details wird insbesondere auf [Lin et al.09] verwiesen.

2.4.1.2 Domain Mapping Matrix (DMM)

Bei einer Domain Mapping Matrix (DMM) handelt es sich im weitesten Sinne ebenfalls um eine Design Structure Matrix, die jedoch Abhängigkeiten zwischen unterschiedlichen Elementen abbildet und somit im Regelfall eine N x M-Matrix bildet, siehe Abbildung 7 rechts.

	Komponente 1	Komponente 2	Komponente 3	Komponente 4
Komponente 1		X		
Komponente 2				
Komponente 3		X		X
Komponente 4			X	

	Funktion 1	Funktion 2	Funktion 3
Komponente 1		X	
Komponente 2			
Komponente 3		X	X
Komponente 4			X

Abbildung 7: Beispiel einer Design Structure Matrix (DSM), links, und einer Domain Mapping Matrix (DMM), rechts

Ein typisches Beispiel ist die Darstellung der Abhängigkeiten zwischen Komponenten und Funktionen, siehe auch Abbildung 7 rechts. Die Pfeildarstellung in der linken oberen Ecke gibt die Leserichtung der Matrizendarstellung an. In diesem Fall bedeutet die Darstellung, dass die Zeile von der Spalte Informationen benötigt: der Informationsfluss erfolgt somit von Spalte zu Zeile. Eine Domain Mapping Matrix lässt prinzipiell das Clustering zu.

Typische Beispiele für Domain Mapping Matrizen finden sich im House of Quality einer QFD (Quality Function Deployment). In der Summe finden sich im House of Quality drei Domain Mapping Matrizen; die bekannteste ist dabei die Domain Mapping Matrix zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen den Kundenanforderungen und den Produktmerkmalen beziehungsweise technischen Anforderungen.

2.4.1.3 Multiple Domain Matrix (MDM)

Bei einer Multiple Domain Matrix handelt es sich um multidimensionale Abbildungen der Abhängigkeiten zwischen Elementen theoretisch beliebig vieler Domänen. Diese bieten somit die ganze Flexibilität, die zur Analyse komplexer

Systeme notwendig ist, sind jedoch mit der Einschränkung teilweise nur schwerer theoretischer Beherrschbarkeit und Analysierbarkeit behaftet [Lin et al.09]. Dennoch bieten sie zahlreiche Freiheiten bezüglich der mathematischen und theoretischen Möglichkeiten, um von bereits bekannten Abhängigkeiten auf bislang noch unbekannte Abhängigkeiten indirekt zu schließen. Eine prinzipielle Darstellung einer Multiple Domain Matrix zeigt Abbildung 8.


	Komponente 1	Komponente 2	Komponente 3	Komponente 4	Funktion 1	Funktion 2	Funktion 3	Funktion 4	Funktion 5	Funktion 6
	Komponente 1		X				X			
Komponente 2									X	
Komponente 3		X		X		X	X	X		
Komponente 4			X				X			X
Funktion 1						X	X		X	X
Funktion 2								X	X	X
Funktion 3					X				X	
Funktion 4						X	X			
Funktion 5							X			X
Funktion 6								X	X	

Abbildung 8: Beispiel einer Multiple-Domain Matrix, bestehend aus zwei Design Structure Matrizen und zwei Domain Mapping Matrizen

2.4.2 Graphendarstellungen

Die Graphentheorie ist ein Teilgebiet der Mathematik und befasst sich mit Graphen und deren Eigenschaften. Sie bietet darüber hinaus Algorithmen und Methoden zur Analyse und Darstellung von Graphen. Wie bereits erwähnt, stellt die Darstellung in Matrixform lediglich eine andere Repräsentationsform eines Graphen dar, weshalb die theoretischen Ansätze der Graphentheorie auch auf die Möglichkeiten zur Analyse von Matrizen Einfluss haben. Beide Repräsentationsformen haben jedoch eigene Vor- und Nachteile, die die Verwendung der einen oder anderen beziehungsweise teilweise auch die kombinatorische Verwendung beider Repräsentationen sinnvoll erscheinen lässt [Lin et al.09]. Prinzipiell besteht ein Graph aus Knoten und Kanten, wobei Kanten die Knoten miteinander verbinden und somit Abhängigkeiten darstellen. Ein Graph kann ebenfalls gerichtet oder ungerichtet beziehungsweise gewichtet oder ungewichtet sein [HaDa02].

3 Stand der Forschung und Technik

In den nachfolgenden Abschnitten wird der für diese Arbeit relevante Stand der Forschung und Technik beschrieben.

3.1 Mechatronik

Ursprünglich stammt der Begriff „Mechatronik“ bereits aus dem Jahre 1969 und wurde vom Präsidenten der Firma Yaskawa Electronic Corporation geprägt [Har et al.96]. Die damals als „mechatronische Systeme“ bezeichneten Produkte umfassten mechanische Systeme, die durch elektronische Komponenten unterstützt wurden, um neuen Funktionen und Anforderungen zu entsprechen.

Wenngleich der Begriff „Mechatronik“ schon relativ alt ist, hat das entsprechende Fachgebiet jedoch erst in den letzten beiden Jahrzehnten auch in der industriellen Breite zunehmend an Bedeutung gewonnen, da steigende Funktionsumfänge den Einsatz mechatronischer Systeme unumgänglich machen [Ber et al.09].

Als Mechatronik wird in Wissenschaft und Technik dabei das interdisziplinäre Zusammenwirken der Domänen „Mechanik“, „Elektronik“ und „Informationsverarbeitung“, zum Beispiel [VDI04], beziehungsweise „Software“, zum Beispiel [Ber et al.09], bezeichnet. Das Zusammenwirken der einzelnen Domänen in der Mechatronik wird durch Abbildung 9 verdeutlicht.

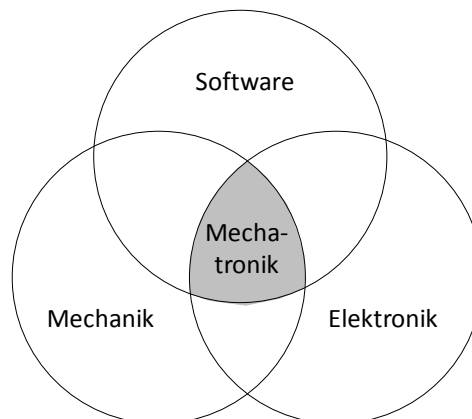


Abbildung 9: Zusammenwirken der Einzeldomänen, in Anlehnung an [Ber et al.09]

Im Rahmen dieser Arbeit finden die Begriffe Mechanik, Elektronik und Software Anwendung.

Neben der Mechatronik haben sich mittlerweile auch verwandte oder artverwandte Fachbereiche entwickelt. Hierzu zählen beispielsweise Elektromechanik, Feinwerktechnik, Mikrosystemtechnik und Adaptronik.

Eine allgemein anerkannte Grundstruktur zum Aufbau mechatronischer Systeme findet sich in [VDI04] und ist in Abbildung 10 abgebildet. Danach besteht ein System aus einem „Grundsystem“ (beispielsweise mechanisch), darin eingebauten Sensoren und angeschlossener Informationsverarbeitung. Ergebnisse der Informationsverarbeitung werden über die Aktoren wieder direkt am Grundsystem ausgeführt.

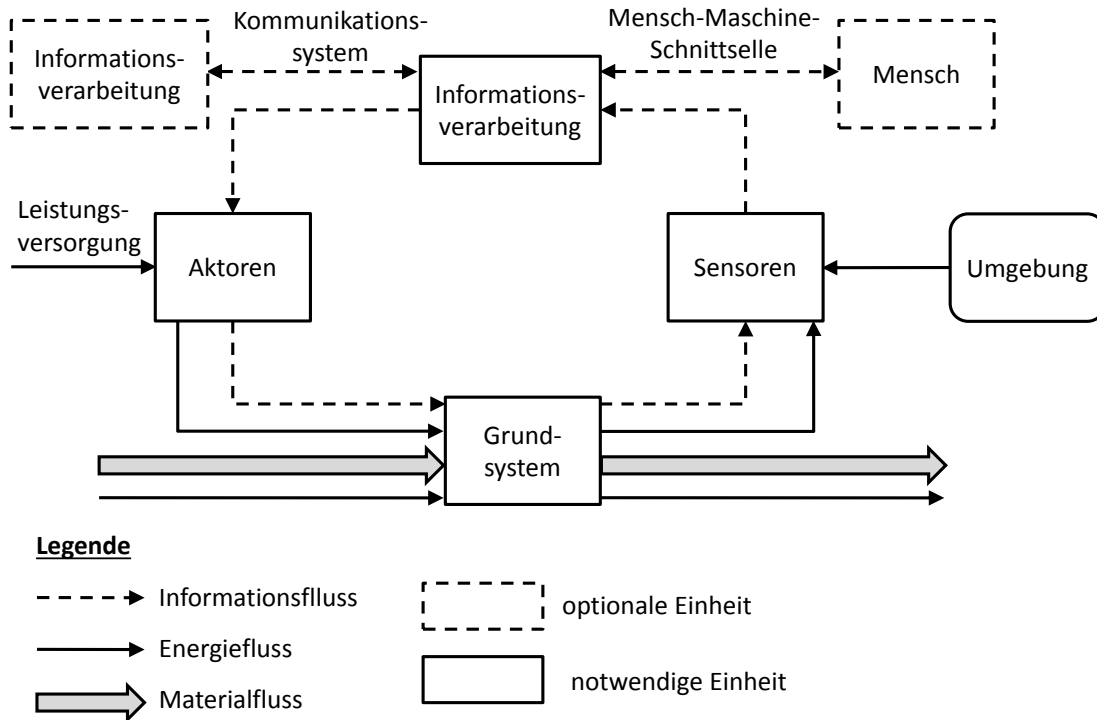


Abbildung 10: Grundstruktur eines mechatronischen Systems nach [VDI04]

Heutige Forschungsgebiete im Bereich der Mechatronik konzentrieren sich beispielsweise auf die bessere Einbindung und den strukturierteren Umgang mit den hochdynamischen Domänen Elektronik und Software, zum Beispiel durch Modularisierung [Czi08]. Ein weiteres Gebiet ist die bessere Verknüpfung und Harmonisierung der verschiedenen Domänen schon in der Produktentwicklung, beispielsweise durch Vereinheitlichung der Begriffswelten [VDI94], [ScSc10].

3.2 Informationen und der Zusammenhang mit Daten und Wissen

Wie Abschnitt 2.1 zeigt, werden die Begriffe „Daten“, „Informationen“ und „Wissen“ zumindest umgangssprachlich und oft auch wissenschaftlich nicht strikt getrennt voneinander verwendet. Dies mag daran liegen, dass keine einheitliche und übergreifende Definition vorliegt. Nachfolgend werden die Begriffe voneinander abgegrenzt.

Der Begriff „Information“ findet sich in der Wissenschaftslandschaft in direkter Verknüpfung mit den Begriffen „Daten“ und „Wissen“. In diesem Zusammen-

hang hat die sogenannte DIKW-Hierarchy (Data-Information-Knowledge-Wisdom) weite Verbreitung gefunden. Erstmals erwähnt wird diese 1987 von Zeleny [Zel87] beziehungsweise 1989 von Ackoff [Ack89]. Eine aktuelle Darstellung dieser Zusammenhänge findet sich beispielsweise in [Zel05] oder [Bod06], siehe Abbildung 11.

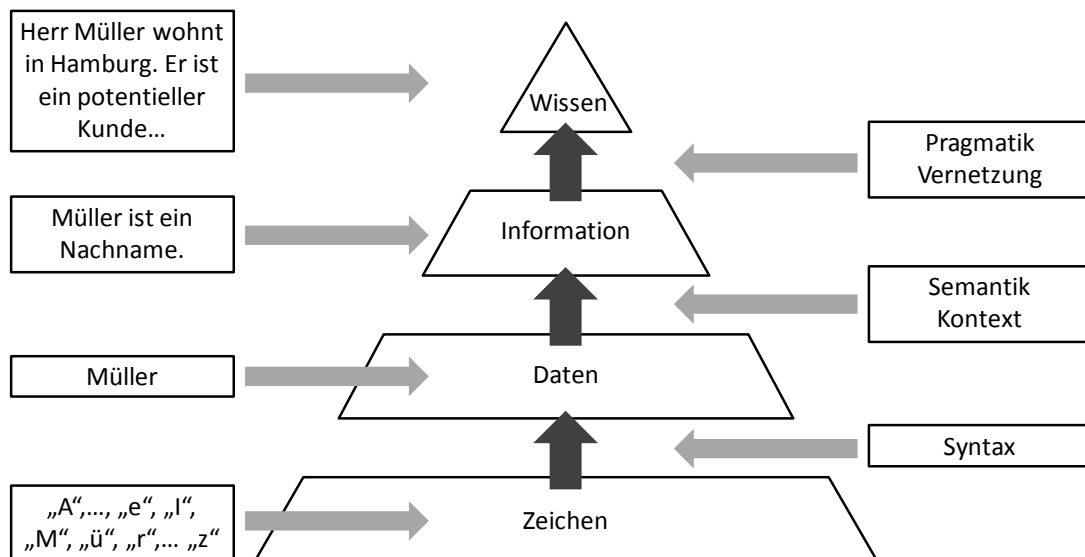


Abbildung 11: Begriffshierarchie zwischen Zeichen, Daten, Informationen und Wissen nach [Bod06]

Unter der DIKW-Hierarchie wird verstanden, dass Zeichen erst durch eine geeignete Syntax zu Daten und erst in Verbindung mit einem Kontext beziehungsweise einer Bedeutung (Semantik) zu Informationen werden können. Werden diese Informationen vernetzt, kann Wissen entstehen. Somit sind Informationen unabdingbar für die Entwicklung von Wissen. Um jedoch möglichst umfassendes Wissen generieren zu können, ist die Kenntnis der Informationen während allen Phasen der Produktentwicklung notwendig.

Zunehmend wird die Information selbst auch als Produktionsfaktor und Ressource angesehen [Zim72] und [Pie04], und zählt somit auch zu den Wirtschaftsgütern [Bod93].

In der Literatur werden Informationen unter anderem folgende Eigenschaften zugesprochen [Esc85], [Pic10], [Pie04]:

- Informationen sind immaterielle Güter, die auch bei mehrfacher Nutzung nicht verbraucht werden.
- Der Wert der Information hängt von der kontextspezifischen und von der zeitlichen Verwendung ab.
- Der Wert der Information kann durch das Hinzufügen, Selektieren, Konkretisieren und Weglassen verändert werden. Information ist erweiterbar und verdichtbar.
- Es gibt unterschiedliche Qualitäten von Informationen, wie zum Beispiel Genauigkeit, Vollständigkeit, Zeitgenauigkeit und Zuverlässigkeit.

Auf dieser Basis hat sich der Bereich des Informationsmanagements, dessen Existenz sich durch die Abweichungen von den materiellen Produktionsfaktoren herleiten lässt, etabliert. Arbeiten zum Informationsmanagement beziehen sich meist auf Wirtschaftsprozesse und Unternehmen im Allgemeinen, nicht jedoch auf die Entwicklungsprozesse [Krc10]. Hier wird der Fokus oftmals auf die Ebene „Daten“ und zunehmend auch die Ebene „Wissen“ gelegt.

Laut Ehrlenspiel haben Informationen und insbesondere Informationsflüsse in der Produktentwicklung eine wesentliche Bedeutung, da sie gerade für die Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme sehr wichtig und hilfreich sind [Ehr09].

Dennoch wurde den Informationen beziehungsweise den Informationsflüssen bislang weder in den etablierten Prozessen wie VDI 2206 [VDI04], oder VDI 2221 [VDI93], noch in den Methodenentwicklungen und -beschreibungen große Beachtung beigemessen. Eine Darstellung von Informationsflüssen und somit eine Ebene zur Analyse von Schnittstellen existiert üblicherweise nicht [Ber et al.09]. Hier liegen wesentliche Arbeiten wiederum auf den Ebenen „Daten“ und „Wissen“ [Ott06], [Mül09].

Im Zusammenhang mit den Arbeiten auf dem Gebiet der Informationssysteme spielen die Datenmanagementsysteme eine wesentliche Rolle. Es sind insbesondere in den ingenieurtechnischen Disziplinen die Begriffe Product Data Management (PDM) und Engineering Data Management (EDM) zu nennen [Sto08], [Eig01]. Darüber hinaus gewinnt auch hier das Wissensmanagement zunehmend an Bedeutung [Göt02], [Pro10].

3.3 Entwicklungsprozesse

Für den Begriff „Entwicklungsprozesse“ hat sich in der Wissenschaft auch der Begriff „Entwicklungsmethodiken“ gefestigt. Neben allgemeinen Methodiken zur Entwicklung von Systemen und Produkten haben sich in den Einzeldomänen über Jahre und Jahrzehnte hinweg eigene Prozesse, die entsprechend auf die aktuellen Belange der jeweiligen Domäne zugeschnitten sind, etabliert. Darüber hinaus haben sich auch einzelne übergeordnete Prozesse für die mechatronische Systementwicklung ausgeprägt. Der aktuelle Stand der Wissenschaft wird nachfolgend angedeutet.

3.3.1 Entwicklungsprozesse in der Mechatronik

Die VDI 2422 als Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik [VDI94] adressiert zwar nicht direkt die mechatronische Systementwicklung, dennoch stellt sie eine Basis für weitere, darauf aufbauende Entwicklungsprozesse und -methodiken dar.

Deutlich mehr Einfluss auf die Wissenschaftslandschaft hat jedoch die Richtlinie VDI 2206 gewonnen, die als „Entwicklungsmethodik für mechatronische

Systeme“ explizit die Mechatronikentwicklung adressiert [VDI04]. Daher hat sie sich im gesamten Fachgebiet als Quasi-Standard festgesetzt und wurde beziehungsweise wird für viele weitere Abwandlungen und Anwendungen modifiziert.

Aus diesem Grund wird hier auf die wesentlichen Elemente der VDI 2206 übersichtsartig eingegangen. Details sind in [VDI04] nachzulesen.

Das Vorgehensmodell der VDI 2206 stützt sich insbesondere auf drei Elemente:

- einen allgemeinen Problemlösungszyklus auf der Mikroebene,
- das V-Modell auf der Makroebene,
- vordefinierte Prozessbausteine zur Bearbeitung wiederkehrender Arbeitsschritte.

Das V-Modell gliedert sich dabei in die prinzipiellen Phasen „Systementwurf“, „Domänenspezifischer Entwurf“, „Systemintegration“ und „Eigenschaftsabsicherung“, umfasst von der „Modellbildung und -analyse“. Das V-Modell wird bis zum Ende der Entwicklung mehrere Male durchlaufen [VDI04]. Das prinzipielle V-Modell ist in Abbildung 12 dargestellt.

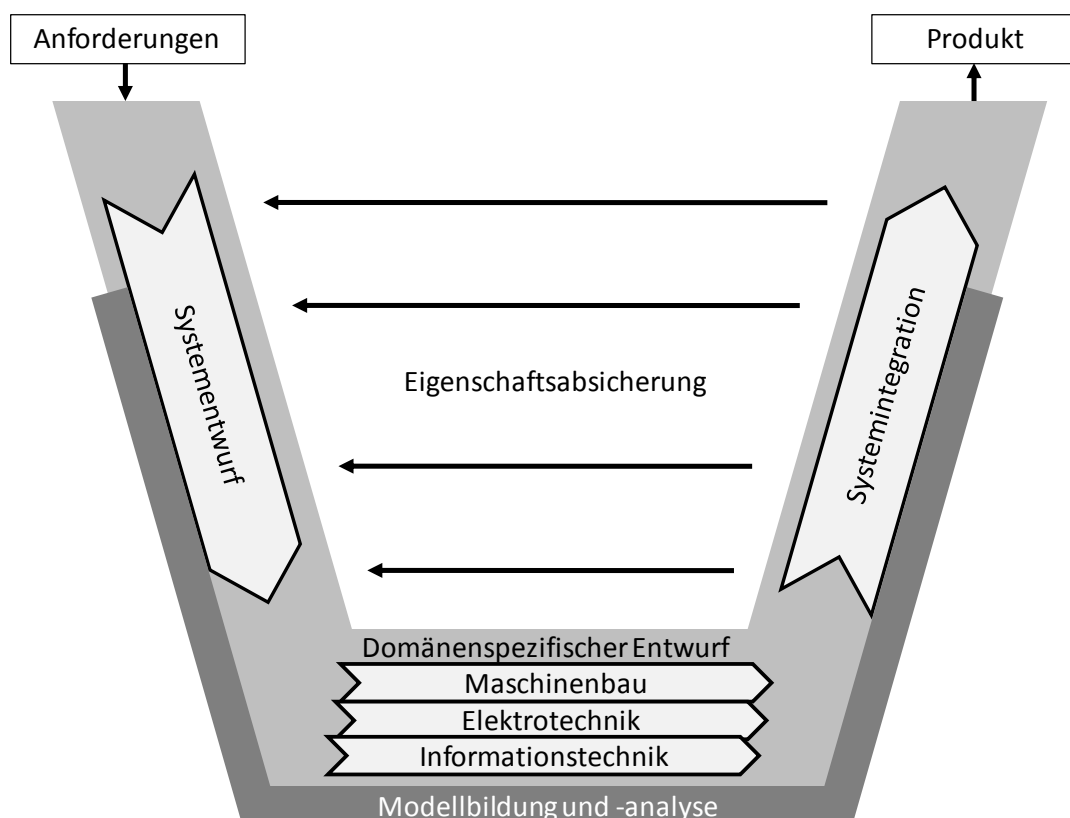


Abbildung 12: V-Modell als Makrozyklus [VDI04]

Nachfolgend werden weitere Entwicklungsmethodiken für mechatronische Systeme in einer kurzen Übersicht vorgestellt. Eine Entwicklungsmethodik für die Mikrosystemtechnik wurde von Watty erarbeitet [Wat06]. Von Hahn, Lückel

und Wittler wurde der „Objekt-Orientierte Mechatronische Entwurf“ entwickelt [Hah et al.97]. Shi hat in [Shi04] mit dem Customization-Based Design eine Methodik zur Entwicklung multitechnologischer Systeme vorgestellt. Lippold stellt in [Lip01] eine domänenübergreifende Konzeptionsumgebung dar. Kaltenbach präsentiert mit dem Phasenmodell in [Kal97] einen Top-down-Prozess für den Entwurfsprozess mechatronischer Systeme. Isermann veröffentlicht in [Ise08] zwölf Schritte beim Entwurf mechatronischer Systeme, die sich vor allem für die Entwicklung von Mehrkörpersystemen eignen.

3.3.2 Entwicklungsprozesse im Maschinenbau

In der Domäne Mechanik gibt es eine Vielzahl an Entwicklungsmethodiken und -prozessen, die sich jedoch bei weitem nicht alle im wissenschaftlichen Umfeld etabliert haben. Nachfolgend wird eine relevante Auswahl an Prozessen kurz vorgestellt.

Ein allgemeiner Prozess zum Entwickeln technischer Systeme, der jedoch insbesondere im Maschinenbau von wissenschaftlicher Relevanz ist, ist die Richtlinie VDI 2221. Diese gliedert sich in insgesamt sieben Prozessschritte und kann im Detail in [VDI93] eingesehen werden. Ein etabliertes vierstufiges Vorgehen zur Produktentwicklung mechanischer Systeme ist die Entwicklungsmethodik nach Pahl [Pah07]. Pahl und auch Roth [Rot00] unterscheiden sich lediglich in ihrer verwendeten Nomenklatur von der VDI 2221. Albers stellt in [AlMe07] das sogenannte Integrierte Produktentstehungs-Management Modell (IPEMM) vor, welches sich für integrierte Produktentstehungsprozesse eignet. Ein weiteres Vorgehensmodell zum Entwurf technischer Systeme ist das sogenannte Münchner Vorgehensmodell (MVM), das von Lindemann in [Lin09] dargestellt wird und sieben Schritte umfasst, siehe Abbildung 13. Das Standardvorgehen wird durch die eingezeichneten Pfeile dargestellt.

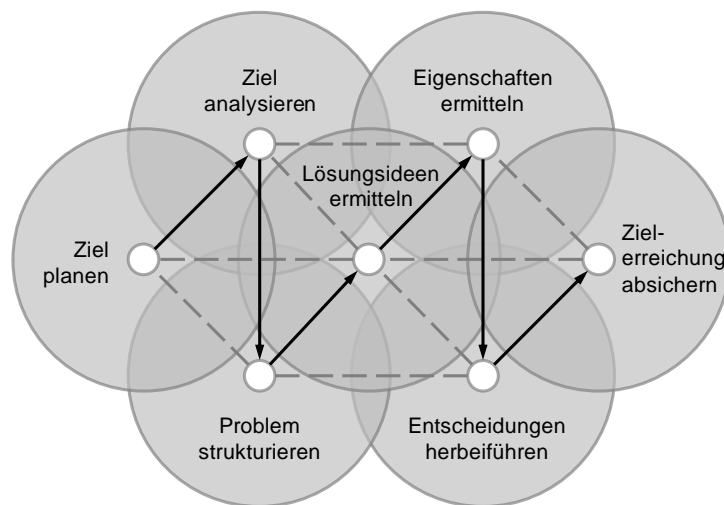


Abbildung 13: Münchner Vorgehensmodell (MVM) nach [Lin09]

In [Ehr09] beschreibt Ehrlenspiel den sechs Teilschritte umfassenden und in drei Arbeitsschritte gegliederten sogenannten Problemlösungszyklus der Sys-

temtechnik. Ein Vorgehen in sieben Schritten hat Hansen in [Han74] vorgeschlagen. Hubka, dessen Vorgehensmodell sich in schöpferische und algorithmisierbare Schritte aufteilen lässt, schlägt vier Stufen vor, die sich weiter aufteilen lassen [Hub76]. Bahrmann lehnt sich in [Bah77] an die VDI 2221 an, untergliedert jedoch in fünf Entwicklungsstufen, die sich in 14 Arbeitsanweisungen weiter unterteilen lassen. Ein ebenfalls fünfstufiges Vorgehen wird bereits in [Kes54] aufgestellt. Kallmeyer beschreibt in [Kal98] eine siebenstufige Methode zur Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme. Auch Bürdek [Bür75], Tschochner [Tsc54] und Claussen [CIRo98], beschrieben eigene Entwicklungsprozesse für Systeme des Maschinenbaus.

3.3.3 Entwicklungsprozesse in der Elektrotechnik

Die folgend aufgezeigten Prozesse stellen einen Überblick über den derzeitigen Stand der Forschung auf dem Gebiet der Entwicklungsmethodiken und -prozesse in der Domäne „Elektronik“ dar.

Da Elektronik- und Softwareentwicklung in der Regel sehr eng miteinander verwoben sind, erscheint es schlüssig, dass sich die wesentlichen Entwicklungsmodelle der Domäne Elektronik aus Entwurfsmodellen der Softwaretechnik heraus entwickelt haben. Dies gilt für alle drei nachfolgend dargestellten Prozesse. Sie wurden und werden oftmals auf die spezifischen Belange der Elektronikentwicklung angepasst.

Ein sehr weit verbreitetes und als sogenanntes „Wasserfallmodell“ bekannt gewordenes Vorgehensmodell wurde bereits im Jahre 1970 durch Royce [Roy70] veröffentlicht und anschließend durch Boehm modifiziert [Boe et al.82]. Dieses Modell ist nach Chroust [Chr92] das wahrscheinlich am häufigsten verwendete Vorgehensmodell. Ein weiteres Modell, das sogenannte Spiralmodell, hat ebenfalls Boehm eingeführt, mit dem Ziel, das Wasserfallmodell zu verbessern [Boe87]. Es beschreibt ein iteratives Vorgehen bei der Entwicklung mit mehreren Prototypenphasen, das durch die Darstellung als Spirale verdeutlicht wird. Das Modell, das sich mittlerweile als Standard-Vorgehensmodell etabliert hat, ist das sogenannte V-Modell, auf dem auch das V-Modell der VDI 2206 basiert. Ausgehend vom Wasserfallmodell, das in gewisser Weise „zusammengeklappt“ wurde, stellt es ein symmetrisches Vorgehensmodell in V-Form dar. Durch Gegenüberstellung der jeweiligen Entwicklungs- und Testschritte auf gleicher Ebene wird die Verbindung zwischen Entwicklungs- und Testschritt deutlich und somit auch die abzurufende Referenz. Der Ursprung des V-Modells stammt vom deutschen Bundesministerium für Verteidigung. Die aktuelle Version des V-Modells ist unter V-Modell XT bekannt [IAB05]. Glunz stellt in [Glu94] ein Vorgehen für den Hardwareentwurf vor, das sich an Methoden der Softwareentwicklung anlehnt. Benz stellt in [Ben04] eine speziell auf die Entwicklung sicherheitsrelevanter Elektroniksysteme im Automobil abgestimmte Entwicklungsmethodik vor.

Weitere Methodiken und aktuelle Hilfsmittel, die nicht selbst als Prozess einzustufen sind, jedoch zur Verbesserung der Entwicklungsprozesse in der integrierten Elektronik- und Softwareentwicklung beitragen sollen, sind:

- einerseits das Capability Maturity Model Integration (CMMI) [SEI10] oder [Chr et al.09],
- andererseits die Norm ISO/IEC 15504, die auch als Software Process Improvement and Capability Determination (SPICE) bekannt ist und von der es eine spezielle Abwandlung für den Automobilbereich gibt. Details hierzu finden sich in [ISO06] und zum Beispiel [Mül07].

3.3.4 Entwicklungsprozesse in der Softwaretechnik

Wie bereits bei der Domäne „Elektronik“ in Abschnitt 3.3.3 erwähnt, haben einige der dort angesprochenen Prozesse ihren Ursprung in der Softwaretechnik. Daher wird an dieser Stelle für nähere Informationen zum Wasserfall-, Spiral- oder V-Modell auf Abschnitt 3.3.3 und die dort aufgeführte Literatur verwiesen.

Ferner existieren jedoch in der Wissenschaft und Technik noch weitere Prozesse auf dem Gebiet der Softwaretechnik, von denen nachfolgend einige erwähnt werden.

Auf kommerzieller Basis mit der entsprechenden Softwareunterstützung wird der Rational Unified Process (RUP) vertrieben. Dieser Prozess legt grundlegende Kernarbeitsschritte und ergänzende Arbeitsschritte fest [Jac et al.99]. Ein daran angelehnter Prozess ist der Open Unified Process. Ein Vorgehensmodell für die agile Softwareentwicklung ist mit Scrum in [DeSt91] veröffentlicht worden.

3.4 Zuverlässigkeitstechnik

Aktuelle Arbeiten im Bereich der Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme fokussieren die Betrachtung und Bewertung der Zuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen [Ber et al.09], [GaAu10]. Einen wesentlichen Beitrag hierzu haben die Ergebnisse der Forschergruppe DFG 460 geliefert, zum Beispiel [Jäg07]. Weitere Arbeiten konzentrieren sich auf die einzelnen Domänen oder zielen auf die Ganzheitlichkeit bei der Zuverlässigkeitsbetrachtung mechatronischer Systeme ab. Ein Beispiel hierfür ist die Einbindung von Wechselwirkungen in die Zuverlässigkeitsbewertung [GäBe09], [Kro et al.09].

Ein weiteres Arbeitsgebiet befasst sich mit dem Management von Zuverlässigkeit über die Entwicklung hinweg. Delonga hat hier beispielsweise ein Zuverlässigkeitsmanagementsystem auf Basis von Felddaten erarbeitet [Del07].

Krolo [Kro04], und Hitziger [Hit07], haben sich mit der Einbindung von Vorkenntnissen zur Zuverlässigkeitstestplanung beschäftigt. Mit der Strukturie-

Die Erfassung und Bewertung von Eingangsdaten für Zuverlässigkeitsanalysen hat sich Otte in [Ott06] befasst. Müller widmete sich der Integration von Verlässlichkeitsanalysen und -konzepten innerhalb der Entwicklungsmethodik mechatronischer Systeme [Mül09]. Hierzu verwendet er das System von sogenannten Mustern in einer Wissensdatenbank. Allgemeine Ansätze in der mechatronischen Entwicklung zur Verbindung von Daten und Wissen durch die Informationsbetrachtung sind derzeit nicht erkennbar.

Weitere Arbeiten befassen sich beispielsweise mit Verlässlichkeit, fehlertoleranten Systemen, Zuverlässigkeitssimulationen oder der Fuzzifizierung, die als Möglichkeit zur Strukturierung und Nutzbarmachung von Expertenwissen eingesetzt werden kann.

3.4.1 Zuverlässigkeit in den Domänen

Die nachfolgenden Absätze beschreiben die spezifischen Charakteristika der Zuverlässigkeit in den einzelnen Domänen der Mechatronik.

Mechanik:

Das Zuverlässigkeitsverständnis in der Mechanik unterscheidet sich deutlich von den beiden anderen Domänen, da mechanische Strukturen im Wesentlichen durch physische Einheiten und somit durch Masse geprägt sind [Jäg07]. In komplexen Systemen, wie beispielsweise Fahrzeugen, führt dies dazu, dass mechanische Systeme nur in sehr seltenen Fällen redundant ausgelegt sind. Das hat zur Folge, dass sich Unzuverlässigkeit bei einer Funktionsanforderung direkt in einem Ausfall des Systems niederschlägt.

Mechanische Bauteile sind durch eine mit zunehmender Betriebszeit steigende Ausfallrate, also sogenannte Drift- oder Verschleißausfälle, gekennzeichnet [Ber04]. Typische Beispiele für Driftverhalten sind die zunehmende Undichtheit von Dichtelementen, die ab einer definierten Leckagerate als ausgefallen gelten, oder die Materialermüdung von Zahnrädern in einem mechanischen Stirnradgetriebe. Zudem ist bei mechanischen Systemen die Unterscheidung verschiedener möglicher Ausfallarten charakteristisch und wesentlich [Bir07], [Ber04], [Mur et al.08]. Am Beispiel der Stirnverzahnung könnte es sich hierbei um Zahnbruch oder Grübchenbildung handeln, die je nach Umgebungsbedingungen und insbesondere je nach Belastungsprofil auftreten. Des Weiteren können Mängel bei der Fertigung und sonstige Qualitätsprobleme auftreten und zu sogenannten Frühausfällen führen. In Kombination mit einer konstanten Ausfallrate über den Großteil der Einsatzdauer ergibt sich dann ein über die Zeit badewannenartiger Verlauf der Ausfallrate. Dieses Verhalten wird üblicherweise durch die sogenannte Weibullverteilung modelliert [Wil04].

Um die Zuverlässigkeit mechanischer Systeme abbilden und modellieren zu können, ist die Kenntnis aller möglichen Ausfallarten obligatorisch.

Für den Ausfall mechanischer Bauteile und Elemente sind vor allem physikalische Größen wie Kräfte, Schwingungen et cetera maßgebend. Auslegungsfehler, die die Zuverlässigkeit nachhaltig beeinflussen, spielen auch bei mechanischen Systemen eine bedeutende Rolle im Ausfallverhalten. Der Grund hierfür liegt darin, dass beispielsweise physikalische Zusammenhänge teilweise auch heute nur unzureichend verstanden sind.

Kennzeichnende bekannte Modelle zur Beschreibung des Ausfallverhaltens mechanischer Systeme sind beispielsweise die Wöhlerkurve (auch: Wöhlerlinie oder Wöhlerdiagramm) [Die92], oder die sogenannte Stress-Strength-Interference [O'Ne03].

Für nähere Informationen wird auf die einschlägige Literatur verwiesen [Ber04], [Bir07], [Bit86], [Dhi07], [Die92], [O'Ne03], [Yan07].

Elektronik:

Im Gegensatz zu mechanischen Systemen oder Systemelementen verhält sich nach [Pau98] komplexe Elektronik bezüglich ihres Ausfallverhaltens anders: sie fällt rein zufällig über die gesamte Lebensdauer hinweg aus. Dieses Verhalten elektronischer Komponenten wird daher idealerweise durch die Exponentialverteilung abgebildet [Ber04]. Eine Exponentialverteilung lässt sich prinzipiell auch durch eine Weibullverteilung beschreiben.

Generell gilt, dass Ausfallmechanismen für elektronische Bauteile meistens physikalischer oder chemischer Natur sind. Nach [Bir07] führen diese zu den vier wesentlichen Ausfallarten Kurzschluss, Unterbrechung, Drift und Funktionsfehler. Beispiele für Ausfallmechanismen sind Temperatur(zyklen) oder Feuchtigkeit, die durch auslösende Korrosion auch zu Driftausfällen führen können. Ein wesentliches Modell zur mathematischen Beschreibung des Temperaturverhaltens ist das Arrhenius-Modell [O'Ne03].

Im Gegensatz zu mechanischen Bauteilen und ähnlich wie bei Softwaresystemen sind jedoch bei elektronischen Bauteilen insbesondere entwicklungsbedingte Fehler von Bedeutung [Jäg07]. Diese Fehler kommen durch die zunehmende Komplexität der von den Entwicklern zu entwerfenden integrierten Schaltkreise zustande. Diese repräsentieren - wie Software auch - einen Algorithmus, der jedoch im Sinne physikalischer Bauelemente und Schaltkreise umgesetzt ist. Zur Entwicklung des auf dem Chip umzusetzenden Algorithmus werden nach [Ben05] meist Hardwarebeschreibungssprachen eingesetzt, die ähnlich wie die Programmiersprachen bei der Entwicklung von Software zu sehen sind. Somit ist die Zuverlässigkeit von Elektronik insbesondere auch durch Spezifikations- und Implementierungsfehler in Entwicklung und Design gekennzeichnet. Ein weiteres für die Zuverlässigkeit der Elektronik relevantes Kriterium ist, dass sie die verbindende Ebene zwischen der Mechanik und der

Software darstellt und somit gegebenenfalls anfällig auf Änderungen in den beiden anderen Domänen reagieren kann [Wed et al.07].

Software:

Im Vergleich zur Mechanik und Elektronik unterscheidet sich die Software in Bezug auf Zuverlässigkeit dahingehend, dass sie keinem Verschleiß unterliegt. Mit dem Abschließen des Programmiervorgangs, dem Kompilieren und dem Debugging ist die Zuverlässigkeit und Funktionsfähigkeit der Software dauerhaft festgelegt [Jäg07].

Ein Versagen tritt nach [Bec89] ausschließlich dann auf, wenn eine ungeprüfte Anwendungskonstellation existiert und ein Programmierfehler vorliegt, der bei dieser Anwendungskonstellation zu einem Versagen der Software führt.

Dies bedeutet, dass für das Auftreten von Softwareversagen bestimmte Konstellationen der Anwendung maßgebend sind, innerhalb derer die Software abläuft. Da das Auftreten solcher Konstellationen rein zufällig ist [Bec89], wird die Zuverlässigkeit in der Domäne Software üblicherweise probabilistisch definiert.

Wie auch schon bei der Domäne Elektronik - jedoch noch in viel umfassenderem Maße - sind daher Spezifikationsfehler für die Zuverlässigkeit von Software maßgeblich. Hinzu kommen noch Implementierungsfehler, die zu einem Softwareverhalten führen, das nicht spezifikationsgemäß ist. Die Spezifikationsfehler hingegen führen zu einem spezifikationsgemäßen Verhalten der Software, das nicht der Erwartung der beteiligten Partner beziehungsweise des Anwenders entspricht. Ein Grund hierfür ist eine unzureichende oder fehlerhafte Konzeptionierung und Vorbereitung der Software. Dass Spezifikationsfehler als Hauptauslöser für geringe Softwarezuverlässigkeit auszumachen sind, hat beispielsweise [HSE03] in einer Studie nachgewiesen.

Den beiden wesentlichen Fehlerarten bei der Softwareentwicklung entsprechen auch die beiden in dieser Domäne gebräuchlichen Begriffe „Validierung“ und „Verifikation“.

Validierung bedeutet eine Überprüfung der Spezifikation auf Richtigkeit (Leitfrage: „Habe ich das Richtige gemacht?“), Verifikation bedeutet eine Überprüfung des Codes auf Korrektheit (Leitfrage: „Habe ich es richtig gemacht?“), [BaEb08].

3.4.2 Zuverlässigkeitsmodelle

Zur Darstellung und Abbildung der Zuverlässigkeit von Systemen werden üblicherweise einige wenige Modelle verwendet, die nachfolgend kurz dargestellt werden.

Das grundlegende Zuverlässigkeitsmodell ist das sogenannte Boolesche Modell oder Modell nach Boole. Darüber hinaus existieren Modelle wie der Feh-

lerbaum (FTA: Fault Tree Analysis), der Ereignisbaum (ETA: Event Tree Analysis), das Markov-, das Boole-Markov-Modell oder Zuverlässigkeitswachstumsmodelle. Letztgenannte finden insbesondere zur Prognose der Softwarezuverlässigkeit Anwendung. Die bekanntesten hiervon sind das Jelinski-Moranda-, das Goel-Okumoto- oder das Musa-Okumoto-Modell.

Details finden sich in der einschlägigen Literatur, zum Beispiel [Ber04].

3.4.3 Zuverlässigkeitsmanagement und -prozesse

Aus Sicht der Literatur existiert eine Vielzahl an Beschreibungen zum Managen von Zuverlässigkeit. Doch über die einschlägige Literatur hinaus, zum Beispiel [Ber04], [Bir07], [Dhi07], [Kec02] oder [Yan07], befassen sich weitere oft nur mit dem Managen von Qualität im Sinne der Norm ISO 9001. Einen Ansatz zum Zuverlässigkeitsmanagement zeigt Delonga in [Del07] auf. In DIN-EN 60300-2 werden neben Managementaufgaben im Bereich der Zuverlässigkeit auch konkrete Prozessschritte aufgezeigt [DIN04].

Darüber hinaus existieren jedoch umfassende Arbeiten, die darauf zielen, das Managen von Zuverlässigkeit durch einen Zuverlässigkeitsprozess zu vereinfachen. Hierzu schlägt beispielsweise [Ber04] ein Vorgehen in vier Phasen vor. Auch Yang stellt die Zuverlässigkeitsaufgaben im Produktlebenszyklus in sechs Phasen umfassend dar [Yan07]. Birolini beschreibt die Zuverlässigkeitstätigkeiten in drei wesentlichen Phasen [Bir07]. Aurich baut sein Prozessmodell in Matrixform auf und gliedert dieses in vier Entwicklungsphasen [Aur et al.07]. Ein sehr umfassendes, jedoch auf die Belange der Automobilindustrie ausgerichtetes Werk ist das Handbuch zur „Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten“ [VDA00]. Ähnlich umfassend beschreibt die VDI 4003, die sich zwar „Zuverlässigkeitsmanagement“ nennt, die Zuverlässigkeitsaufgaben im Sinne eines Prozesses [VDI07]. Weitere, nicht ganz so umfassende Arbeiten sind in O'Connor [O'Ne03], Meyna [MePa10] oder Isermann [Ise06] vorgestellt. Für den Luftfahrtbereich bekannt ist die Publikation von Knepper [Kne01]. Ein sogenanntes „Verlässlichkeitsframework“, das sich nicht als eigener Prozess darstellt, sondern das Wissen aus den Zuverlässigkeitstätigkeiten direkt in den Entwicklungsprozess einzubringen versucht, stellt Kochs in [KoPe04] vor.

3.4.4 Zuverlässigkeitstechnische Informationsmodellierung

Aus Sicht der Modellierung zuverlässigkeitstechnisch relevanter Informationen im Sinne von Modellen gibt es aktuell nur erste Ansätze, die über die etablierten Modelle zur Analyse und Prognose der Zuverlässigkeit hinausgehen und domänenübergreifend mechatronische Systeme oder Informationsflüsse abbilden [HoBe10]. So gibt es zahlreiche Ansätze, zuverlässigkeitsrelevante Informationen im Sinne einer funktions- oder fehlfunktionsorientierten Systemstruktur wie der Ereignisbaum- oder Fehlerbaumanalyse abzubilden.

Weitere Ansätze zielen darauf ab, zuverlässigkeitstechnische Informationen direkt an die jeweiligen Komponenten, denen die zuverlässigkeitstechnischen Eigenschaften zuzuordnen sind, zu knüpfen. Ein Beispiel hierfür ist die Situationsbasierte Qualitative Modellbildung und Analyse (SQMA), die in [Ber et al.09] auch für mechatronische Systeme vorgestellt wird. Dieser Ansatz bietet die Möglichkeit, zuverlässigkeitstechnische Komponenteninformationen in die bereits etablierten PDM- und EDM-Systeme zu integrieren, da dort die relevanten Daten auch bezogen auf Komponenten abgelegt sind [Bul99].

Insbesondere aus den Erfahrungen der Softwaretechnik heraus wurden zahlreiche Modelle entwickelt, die Informationen und informationsbasierte Verknüpfungen zwischen Komponenten abzubilden imstande sind, zum Beispiel graphische Modellierungen mit Hilfe der Entity Relationship (ER) Diagramme [Che76], oder mit der Unified Modeling Language (UML) [Boo et al.05].

3.5 Prozessverknüpfung und Informationsflüsse

Eine strukturierte, systematische Verknüpfung von Entwicklungs- und Zuverlässigkeitsprozess sowie eine nachvollziehbare und belastbare Analyse und Darstellung der auftretenden Informationsflüsse existiert für die Entwicklung mechatronischer Systeme aktuell nicht [Ber et al.09], [HoBe10].

Prinzipielle Ansätze zur Prozessverknüpfung und zur Darstellung von Informationsflüssen wurden jedoch beispielsweise mit den Methoden der Design Structure Matrix (DSM) [Ste81], der Domain Mapping Matrix (DMM) [DaBr07], der Informationsflussmodellierung in der Unified Modeling Language (UML) [Boo et al.05], oder in weiteren Graphendarstellungen entwickelt.

Dennoch zeigt sich in [Hof et al.10], dass die Verbindung zwischen Zuverlässigkeits- und Entwicklungsprozess auf Informationsebene meist mittels Zuverlässigkeitsmethoden erfolgt und Informationen dabei lediglich in geringer Intensität in die jeweiligen Prozesse zurückfließen. Abbildung 14 zeigt dies veranschaulicht anhand der Stärke der jeweiligen verbindenden Pfeile.

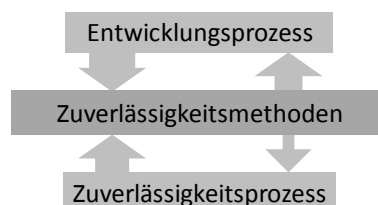


Abbildung 14: Intensität der Verknüpfung von Zuverlässigkeits- und Entwicklungsprozess auf Basis des Informationsflusses durch Zuverlässigkeitsmethoden in Anlehnung an [Hof et al.10]

Zudem zeigte [HoBe10], dass der Informationsfluss vom Entwicklungsprozess in die Zuverlässigkeitsmethoden anforderungsgetrieben, das heißt von den Zuverlässigkeitsmethoden heraus, erfolgt. Dies wird als sogenannter pull-getriebener Informationsfluss bezeichnet. Umgekehrt jedoch hat sich bislang

nur sehr eingeschränkt ein sogenannter push-getriebener Informationsfluss ausgeprägt, da die Informationen nicht aktiv nachgefragt werden. Somit besteht die Gefahr, dass die um die Zuverlässigkeitsaspekte angereicherten Informationen nicht oder falsch in den Entwicklungsprozess zurückgespielt werden.

Insbesondere aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht ist jedoch die enge informationstechnische Einbindung des Zuverlässigkeitsprozesses und der angewandten Methoden unerlässlich, um beispielsweise unterschiedliche Spezifikationsstände zu vermeiden.

In [HoBe10] wurde daher aufbauend auf dem aktuellen Stand des Informationsflusses bei methodengetriebenen Zuverlässigkeitsaktivitäten, Abbildung 15, der Einsatz eines sogenannten Zuverlässigkeitsinformationsmodells vorgeschlagen und beschrieben, Abbildung 16. In [Hof et al.10] wurde dies weiter detailliert.

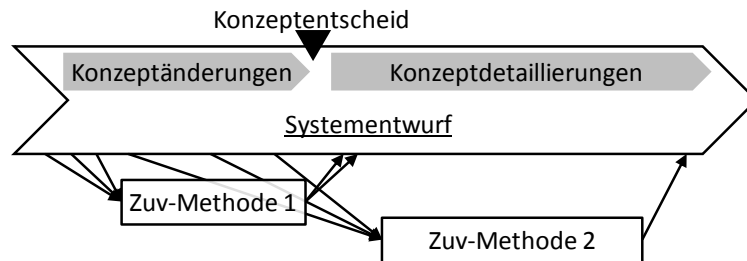


Abbildung 15: Aktueller Stand des Informationsflusses bei methodengetriebenen Zuverlässigkeitsaktivitäten

Dies geht über den bisherigen aktuellen Stand hinaus, der sich im Sinne der in Abschnitt 3.4.3 vorgestellten Zuverlässigkeitsprozesse oder zitierter einschlägiger Normen auf die zeitliche Zuordnung zuverlässigkeitstechnischer Methoden im Entwicklungsprozess konzentriert.

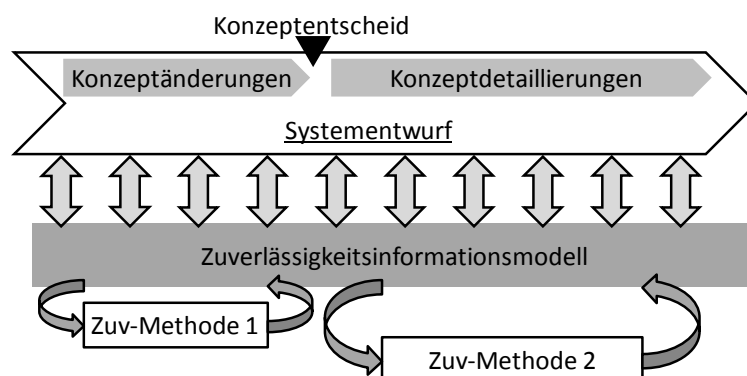


Abbildung 16: Idealisierter Informationsfluss unter Berücksichtigung eines Zuverlässigkeitsinformationsmodells

4 Basiselemente zur Gestaltung eines Informationsmodells

Das folgende Kapitel zielt darauf ab, die grundlegenden Elemente zur Gestaltung eines zuverlässigkeitsorientierten Verknüpfungs- und Informationsmodells zu identifizieren. Damit soll gewährleistet sein, dass beide Modelle für jede nur denkbare mechatronische Entwicklungskonstellation anwendbar sind. Die Modelle müssen somit in der Lage sein, mit unterschiedlichen Entwicklungsprozessen, Komplexitäten des Produkts sowie individuellen Ausgestaltungen umgehen zu können. All diese Charakteristika einer individuellen Produktentwicklung werden in einer beschränkten Anzahl modellgestaltender Sichten beschrieben.

Die Individualität einer jeden Produktentwicklung ergibt sich im Verständnis von Lindemann [Lin09] und VDI 2206 [VDI04] im Wesentlichen aus dem zu entwickelnden Produkt und dem bei der Entwicklung zugrunde liegenden Prozess. Abschnitt 4.1 befasst sich mit den Basiselementen aus Prozesssicht, wohingegen sich Abschnitt 4.2 mit den Basiselementen aus Methodensicht und Abschnitt 4.3 mit den Basiselementen aus Systemsicht befassen. Abschnitt 4.4 stellt zusammenfassend die für die weitere Gestaltung des Verknüpfungsmodells sowie des Zuverlässigkeitsinformationsmodells identifizierten Basiselemente dar.

4.1 Basiselemente aus Prozesssicht

Entwicklungsprozesse bilden die Grundlage der Entwicklung technischer Systeme. Dies gilt uneingeschränkt sowohl für die mechatronische Produktentwicklung als auch für die Entwicklung in den einzelnen Domänen Mechanik, Elektronik und Software. Entwicklungsprozesse bilden hierbei die Abfolge hintereinander notwendiger Schritte, mit denen eine erfolgreiche Produktentwicklung gewährleistet wird. Allgemein in der Literatur bekannte Prozesse beschreiben diese Abfolge auf einer abstrakten beziehungsweise generischen Detaillierungsebene, auf deren Basis individuelle Ausgestaltungen und Adaptionen möglich sind.

Reine Entwicklungsprozesse decken alleine keine Zuverlässigkeitssicht in der Produktentwicklung ab, weshalb diese oftmals durch begleitende Zuverlässigkeitsprozesse unterstützt werden.

Wie schon für das System werden nachfolgend die Basiselemente für den Aufbau eines Verknüpfungs- und Zuverlässigkeitsinformationsmodells aus Prozesssicht identifiziert. Dazu wird ein siebenstufiges Vorgehen angewendet, siehe Abbildung 17.



Abbildung 17: Sieben Schritte zur Identifikation von Basiselementen für den Aufbau eines Verknüpfungs- und Zuverlässigkeitsinformationsmodells aus Prozesssicht

Schritt 1, die Sammlung der in der wissenschaftlichen Literatur bekanntesten mechatronischen Entwicklungsprozesse in Kombination mit Schritt 2, der Zuordnung der Prozesse zu den einzelnen mechatronischen Domänen, zeigt Tabelle 1. Ferner stellt diese Tabelle die wesentlichen in der Literatur bekannten Zuverlässigkeitsprozesse dar.

Der dritte Schritt befasst sich mit der Auswahl prozessbeschreibender Charakteristika sowie einer Erstauswahl möglicher Basiselemente.

Es gilt für alle Prozesse, dass sie einen klar definierten und strukturierten Ablauf von Verfahrensschritten anbieten, also eine zeitliche Abfolge. Für einen mechatronischen und zuverlässigkeitsorientierten Entwicklungsablauf hat dies zur Folge, dass die Vorgehensschritte zwischen insgesamt vier Prozessen zu verknüpfen sind. Beispielsweise wird auf mechatronischer Prozessebene die Produktentwicklung gestartet, an irgendeinem Schritt jedoch auf die Entwicklungsprozesse der einzelnen Domänen übergeben. Diese laufen nicht parallel und voneinander unabhängig, sondern eng miteinander verzahnt ab. Beispielsweise können Konzeptentscheidungen in der Domäne Mechanik Einflüsse auf die Domänen Elektronik und Software haben beziehungsweise auch umgekehrt. Ebenso laufen die Aktivitäten des Zuverlässigkeitsprozesses parallel zu all diesen Vorgehensschritten ab und sind ebenso zu verknüpfen. Je detaillierter die Prozesse beschrieben sind, desto komplexer und granularer werden auch die Verzahnungen. Aus informationstechnischer und informationsflusstechnischer Sicht bedeutet dies, dass zuverlässigkeitsrelevante Informationen, deren Änderungen und Abhängigkeiten zwischen all diesen Pro-

zessschritten und Prozessverknüpfungen erkannt und abgebildet werden müssen.

Tabelle 1: Übersicht über mechatronische Entwicklungsprozesse und Zuverlässigkeitsprozesse (Schritte 1 und 2)

Mechatronik	Mechanik	Elektronik	Software	Zuverlässigkeitsprozesse
VDI 2206, [VDI04]	VDI 2221, [VDI93], Pahl, Roth	Ehrlenspiel, [Ehr09]	Wasserfallmodell, [Boe et al.82]	Aurich, [Aur et al.07]
Watty, [Wat06]	Münchener Vorgehensmodell (MVM), [Lin09]	Glunz, [Glu94]	Spiralmodell, [Boe87]	Bertsche, [Ber04]
Lippold, [Lip01]		Benz, [Ben04]	V-Modell, [IAB05]	Birolini, [Bir07]
Isermann, [Ise06]				DIN EN 60300, [DIN04]
Kallenbach, [Kal97]		<i>Aus der Domäne Software:</i>		Isermann, [Ise06]
		<i>Wasserfallmodell</i>		Knepper, [Kne01]
		<i>Spiralmodell</i>		Kochs/Petersen, [KoPe04]
		<i>V-Modell</i>		Meyna, [MePa10]
				O'Connor, [O'Ne03]
				VDA 3.1, [VDA00]
				VDI 4003, [VDI07]
				Yang, [Yan07]

In zahlreichen der betrachteten Prozesse wird auf entwicklungsbegleitende Dokumente verwiesen, die entweder die Eingangsinformationen für Prozessschritte zur Verfügung stellen oder zum Abschluss gewisser Prozessschritte die bis dahin erarbeiteten Informationen zusammenfassen.

Alle betrachteten Prozesse sind in wenige, inhaltlich klar umgrenzte Hauptelemente oder Schritte zusammengefasst. Dies sind beispielsweise die sieben Schritte nach dem Münchener Vorgehensmodell [Lin09] oder die vier grundlegenden Schritte Systementwurf, domänenspezifischer Entwurf, Systemintegration und Eigenschaftsabsicherung nach VDI 2206 [VDI04]. Bei der DIN EN 60300 [DIN04] sowie der VDA 3.1 [VDA00] fallen die explizit beschriebenen Meilensteine auf, die das Erreichen eines gewissen Zwischenschrittes in der mechatronischen Produktentwicklung darstellen. Nach einem jeden dieser Schritte ist ein klar umgrenztes Aufgabenpaket abgearbeitet und die Produktentwicklung um einen gewissen Grad fortgeschritten. Diese Meilensteine kehren unabhängig vom System, den mechatronischen Entwürfen oder anderen Parametern in jeder Produktentwicklung wieder und stellen somit Zeitpunkte dar, zu denen über die einzelnen Produktentwicklungen hinausgehende Parameter abgeglichen werden können.

Abschließend werden für die weitere Prozessanalyse folgende möglichen Basiselemente näher betrachtet: Informationsverknüpfung der Prozessschritte, Einbindung entwicklungsbegleitender Dokumente und Vorliegen von Meilensteinen.

Für Schritt vier gilt es, je einen mechatronischen, mechanischen, elektronischen und Software-Entwicklungsprozess zu identifizieren, der wissenschaftlich etabliert ist. Ferner soll sich die Kombination aus diesen prinzipiell für eine Verknüpfung mit Zuverlässigkeitsprozessen eignen. Zur Überprüfung der Verknüpfbarkeit wurden mehrere Zuverlässigkeitsprozesse ausgewählt. Basis dieser Prozessvorauswahl war es, in den einzelnen Domänen Prozesse zu finden, die vergleichbare Beschreibungsformen und vor allem vergleichbare Beschreibungstiefen aufwiesen. Eine Übersicht über die für Schritt vier verwendeten Prozesse gibt Tabelle 2.

Tabelle 2: Übersicht über die zur Überprüfung der Erstausswahl möglicher Basiselemente verwendeten Prozesse

Prozessauswahl für Schritt 4
VDI 2206
VDI 2221, Pahl, Roth
Benz
V-Modell
VDA 3.1
VDI 4003
DIN EN 60300

Schritt fünf bildet den ersten Teil der Validierung der prinzipiellen Verwendbarkeit der in Schritt drei vorgeschlagenen Basiselemente für den Aufbau eines zuverlässigkeitsorientierten Verknüpfungs- und Zuverlässigkeitsinformationsmodells. Diese erste Validierung liefert folgendes Ergebnis:

- Prozessschrittverknüpfungen:

Die einzelnen Prozessschritte müssen klar beschrieben und eindeutig abgegrenzt sein. Unter diesen Voraussetzungen können auch verschiedene Prozessdetaillierungen beliebig miteinander verknüpft werden. Dies ist bei allen betrachteten Prozessen gegeben. Idealerweise sind aus informationstechnischer Sicht für jeden Prozessschritt die notwendigen Eingangs- und die nach Abschluss des Prozessschrittes erzielten Ausgangsinformationen beschrieben. Dies ist bei keinem der untersuchten Prozesse dargestellt. Somit ist bei der aktiven Verwendung der Ein- und Ausgangsinformationen ein Übergabe-Dokument zu entwickeln, das die jeweils notwendigen und zuverlässigkeitsrelevanten Prozessschrittinformationen abbildet.

- Dokumente:

Die Entwicklungsprozesse sowie die Zuverlässigkeitsprozesse stellen an relevanten Stellen die prinzipielle Einbindung entwicklungs- oder zuverlässigkeitsrelevanter Dokumente dar. Dies können zum Beispiel Anforderungslisten, Stücklisten, FMEA-Formblätter, Lastenhefte oder Ähnliche sein. Da zahlreiche dieser Dokumente wiederum einen strukturierten und teils genormten Aufbau besitzen (zum Beispiel FMEA-Formblatt, Lastenheft), sind sowohl das gesamte Dokument als auch die Einzelelemente mit den Prozessen verknüpfbar. Den prinzipiellen Aufbau eines Lastenheftes gemäß VDI 2519 [VDI01] stellt Tabelle 17 im Anhang dar. Die Einbindung entwicklungsbegleitender Dokumente als Basiselement aus Prozesssicht ist somit möglich.

- Meilensteine:

Alle sieben betrachteten Prozesse sind auf oberster Ebene in sehr klar abgegrenzte Prozessabschnitte untergliedert. Bei deren Erreichung wird jeweils eine weitere Entwicklungs-Hauptaufgabe angestoßen und die vorherige Aufgabe abgeschlossen. Diese Prozessabschnitte eignen sich somit hervorragend, um die bis dahin vorliegenden Erkenntnisse und Informationen sowie den aktuellen Entwicklungsstand zu beschreiben, zu beurteilen und gegenüber anderen Entwicklungen zu vergleichen. Im Rahmen dieser Arbeit liegt dabei der Fokus auf der zuverlässigkeitsrelevanten Sichtweise. Einen Überblick solcher Prozessabschnitte für die vier betrachteten Entwicklungsprozesse zeigt Abbildung 58 im Anhang.

Wenige der untersuchten Prozesse wie die VDA 3.1 oder die VDI 4003 beschreiben explizit ausgewiesene Meilensteine, siehe Abbildung 59 im Anhang. Die Einbindung der Meilensteine in das Verknüpfungs- und Zuverlässigkeitsinformationsmodell ist somit möglich.

Der Schritt fünf zeigt auf, dass alle anfänglich identifizierten möglichen Basiselemente „Prozessschrittverknüpfungen“, „Dokumente“ und „Meilensteine“ für den Aufbau eines Verknüpfungs- und Zuverlässigkeitsinformationsmodells anwendbar sind. Im Sinne einer Verifizierung werden diese Punkte anhand einer zweiten Prozessauswahl abgeglichen (Schritt sechs). Die hierfür verwendeten Entwicklungs- und Zuverlässigkeitsprozesse zeigt Tabelle 3.

Zusammenfassend gilt, dass die für die erste Prozesskombination gültigen Aussagen auch in diesem Kombinationsfall zutreffen. Die Prozessschrittverknüpfung ist möglich, wenngleich auch hier keine Kenntnisse über die zu den jeweiligen Schritten zu übergebenden Informationen vorliegen. Die Einbindung der Dokumente nach den in Schritt vier beschriebenen Rahmenbedingungen ist auch hier möglich. Die sechs in Schritt sechs untersuchten Prozesse beinhalten allesamt keine explizit ausgewiesenen Meilensteine, können

jedoch über die Prozessabschnitte auch im Sinne einer meilensteinorientierten Abbildung dargestellt werden.

Tabelle 3: Übersicht über die zur Gegenprüfung anhand einer weiteren Prozesskombination verwendeten Prozesse

Prozessauswahl für Schritt 6
Watty
MVM
Wasserfallmodell
Yang
O'Connor
Bertsche

Nach Prüfung und Gegenprüfung der vorgeschlagenen Basiselemente werden in Schritt sieben die aus Prozesssicht für die Entwicklung des Verknüpfungs- und Zuverlässigkeitsinformationsmodells notwendigen Basiselemente wie folgt festgelegt:

- Prozessschrittverknüpfungen,
- Dokumente,
- Meilensteine.

4.2 Basiselemente aus Methodensicht

Die Prozesse legen durch ihre Prozessschritte (Prozessbausteine) einen engen und unflexiblen Grundrahmen. Um jedoch gewisse, klar umgrenzte Fragestellungen in der Produktentwicklung abbilden zu können, werden die Prozesse durch die Einbindung von Entwicklungs- oder Zuverlässigkeitsmethoden ergänzt. Diese versuchen, mit Hilfe der Kombination, Interpretation und Analyse von in der Entwicklung bereits vorliegenden Informationen oder deren Neugewinnung eben diese Fragestellung beantworten zu können. Damit sind sie nicht strukturiert in den Prozessablauf eingebunden, sondern greifen über beliebig viele Schritte und Domänen in den Entwicklungsprozess ein. Dies gilt sowohl bei der Verknüpfung der für die Methode notwendigen Informationen als auch für die Verknüpfung der nach Abschluss der Methode vorliegenden Ergebnisse. Methoden stellen somit eine Flexibilisierungsmöglichkeit der Prozesse dar.

Anhand der in Abschnitt 4.1 ausgewählten Prozesse wurde daher die Einbindung von Methoden (konkret: Entwicklungsmethoden und Zuverlässigkeitsmethoden) in die Prozesse mit folgender Erkenntnis untersucht.

Eine explizite Beschreibung zur Einbindung von Methoden existiert in keinem der untersuchten Prozesse. Methoden folgen jedoch von ihrem Aufbau her einer sehr strukturierten Abfolge, so dass sich die einzelnen Methodenschritte mit den Prozessschritten verknüpfen lassen. Die mittels Methoden gewonnene

Erkenntnis beruht indes auf den Eingangs- und Ausgangsinformationen der Methodenschritte, die sich wiederum als Information auch mit den Prozessschritten verbinden lassen, sofern die zwischen den Prozessschritten übergebenen Informationen bekannt und notiert sind. Diese Notwendigkeit ist bereits im Punkt „Prozessschrittverknüpfung“ beschrieben und wird somit bei der Erstellung des Verknüpfungs- und Zuverlässigkeitsinformationsmodells berücksichtigt. Insofern werden sich auch Methoden in diese Modelle einbinden lassen.

Somit ist eine Methodeneinbindung in einer separaten Darstellung sinnvoll durch die jeweils vorliegende klare Strukturierung der Prozesse in Verbindung mit einem Informations-Übergabe-Dokument möglich. Die für diese Arbeit relevanten Basiselemente aus Methodensicht werden wie folgt festgelegt:

- Entwicklungsmethoden,
- Zuverlässigkeitsmethoden.

4.3 Basiselemente aus Systemsicht

Zur Identifikation von Basiselementen aus Systemsicht wird der Ansatz verfolgt, allgemeingültige Vorgehensweisen zu betrachten, die sich mit unterschiedlichen Systemen befassen. In der aktuellen Entwicklungslandschaft wird diese Anforderung durch Methoden erfüllt, da sie sich im Rahmen des Verständnisses dieser Arbeit damit befassen, systematisch neue Erkenntnisse zu erlangen, indem sie die Ableitung einer Handlungsanweisung darstellen, welche ein gegebenes Problem lösen soll. Eine Auswahl der aktuell in Wissenschaft und Industrie häufig zitierten und angewendeten zuverlässigkeitsnahen Methoden zeigt Tabelle 4.

Tabelle 4: Auswahl der in Wissenschaft und Industrie häufig zitierten und angewendeten zuverlässigkeitsnahen Methoden

Bezeichnung	Abkürzung
Design Review based on Failure Mode	DRBFM
Fehlzustandsbaumanalyse	FTA
Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse	FMEA
Quality Function Deployment	QFD
Quantitative Konzeptbewertung	QNK

Design Review Based on Failure Mode (DRBFM)

Die Methode DRBFM besteht aus folgenden fünf Schritten [Suc et al.09]:

- Analyse der Veränderung
- Begutachtung der Risiken
- Bewertung der Lösung
- Festlegung der Maßnahmen
- Umsetzung der Maßnahmen

Unterstützt wird das Vorgehen durch fünf Hilfsblätter der DRBFM, mit deren Hilfe sich die einzelnen Schritte abarbeiten lassen. Die Analyse der gewollten Veränderung erfolgt im Wesentlichen aus einer Veränderung der Systemkomponenten beziehungsweise der Systemstruktur. Die Begutachtung von Risiken und ungewollten Änderungen sowie die Bewertung entsprechender Lösungen erfolgen auf Basis der Systemkomponenten, der Systemstruktur sowie der Systemfunktionen. Systemkomponenten und Systemfunktionen stellen somit die Basis der Bewertungen mit einer DRBFM dar.

Fehlzustandsbaumanalyse (FTA)

Eine Fehlzustandsbaumanalyse (FTA) dient dazu, mögliche Fehlzustände eines Systems sowie die damit einhergehenden Auswirkungen zu beschreiben und zu bewerten [DIN07]. Auf Basis eines unerwünschten Ereignisses, das als Fehlfunktion einen Systemausfall hervorruft, wird der Fehlerbaum bis auf ein dafür ausschlaggebendes Bauteilmerkmal beziehungsweise einen Entwicklungsfehler hin aufgebaut. Die dazwischen liegenden Ebenen werden durch die verschiedenen Systemdetaillierungsebenen (Teilsystemebene, Baugruppenebene, Bauteilebene, Ausfallartenebene) repräsentiert. Im Sinne des methodischen Vorgehens gesehen, bilden die Funktionen (beziehungsweise Fehlfunktionen), die Komponenten sowie deren Ausfallarten die grundlegenden Elemente einer Fehlzustandsbaumanalyse.

Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)

Die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA) unterstützt das Aufzeigen möglicher Ausfallarten, Ausfallfolgen und dafür verantwortlicher Ausfallursachen, bewertet das wahrscheinliche Risiko und legt Optimierungsmaßnahmen fest.

Das Vorgehen bei der Erstellung einer FMEA für Systeme erfolgt in fünf Schritten, die nachfolgend aufgelistet sind:

- Systemelemente und -struktur ermitteln
- Funktionen und Funktionsstruktur ermitteln
- Mögliche Fehler analysieren
- Risiko bewerten
- Optimierung durchführen

Wesentlich für die Durchführung einer FMEA für Systeme sind die Erstellung einer Systemstruktur und einer Funktionsstruktur, da sich auf deren Basis die Abhängigkeiten zwischen Ausfallursachen, -arten und -folgen ermitteln.

Quality Function Deployment (QFD)

Die Methode QFD ist ein Hilfsmittel, um Kundenanforderungen und Systemcharakteristika einander gegenüberzustellen und beide Sichten miteinander zu verbinden [Aka04]. Aus Sicht der Kunden werden im Sinne der Anforderungen

insbesondere Bedürfnisse, Zufriedenheiten oder Funktionswünsche ermittelt und diese im Sinne der Systemcharakteristika den technischen Systemfunktionen und nicht-funktionalen Systemmerkmalen gegenübergestellt. Das sogenannte House of Quality stellt hierzu die Kundensicht der Systemsicht gegenüber.

Die grundlegende Betrachtungsgröße einer QFD sind die Funktionen, da diese sowohl auf Kunden- als auch auf Systemseite eine weiterverwendbare und objektive Beschreibungsform darstellen.

Quantitative Konzeptbewertung (QNK)

Als QNK wird eine Methode bezeichnet, die auf Basis quantitativer Konzeptbewertungen eine Auswahl des zuverlässigkeitstechnisch zielführendsten Systemkonzepts ermöglicht [Hof et al.09]. Die Methode umfasst vier Basisschritte:

- Systembeschreibung und -modellierung
- Zuverlässigkeitsmodellierung
- Datensammlung und -analyse
- Zuverlässigkeitsanalyse

Wesentliche Eingangsgrößen für die vier Methodenschritte sind gemäß [Hof et al.09]:

- Systemfunktionen,
- Systemfehlfunktionen,
- Systemkomponenten,
- Systemstruktur,
- Nutzungsprofil und Lastkollektive,
- Zuverlässigkeitsziel,
- Zuverlässigkeitsdaten.

Zusammenfassende Darstellung der Methodenbetrachtung

Aus der Analyse der fünf beschriebenen zuverlässigkeitsnahen Entwicklungsmethoden haben sich die Systemkomponenten sowie die Systemfunktionen als die unverzichtbaren Basiselemente aus Systemsicht herauskristallisiert.

4.4 Übersicht: Identifizierte Basiselemente

Die System-, Prozess- und Methodensicht sowie die Basiselemente werden für die Entwicklung des Verknüpfungs- sowie des Zuverlässigkeitsinformati-
onsmodells kombiniert und finden im weiteren Verlauf der Arbeit Anwendung. Eine Übersicht zeigt die nachfolgende Abbildung 18.

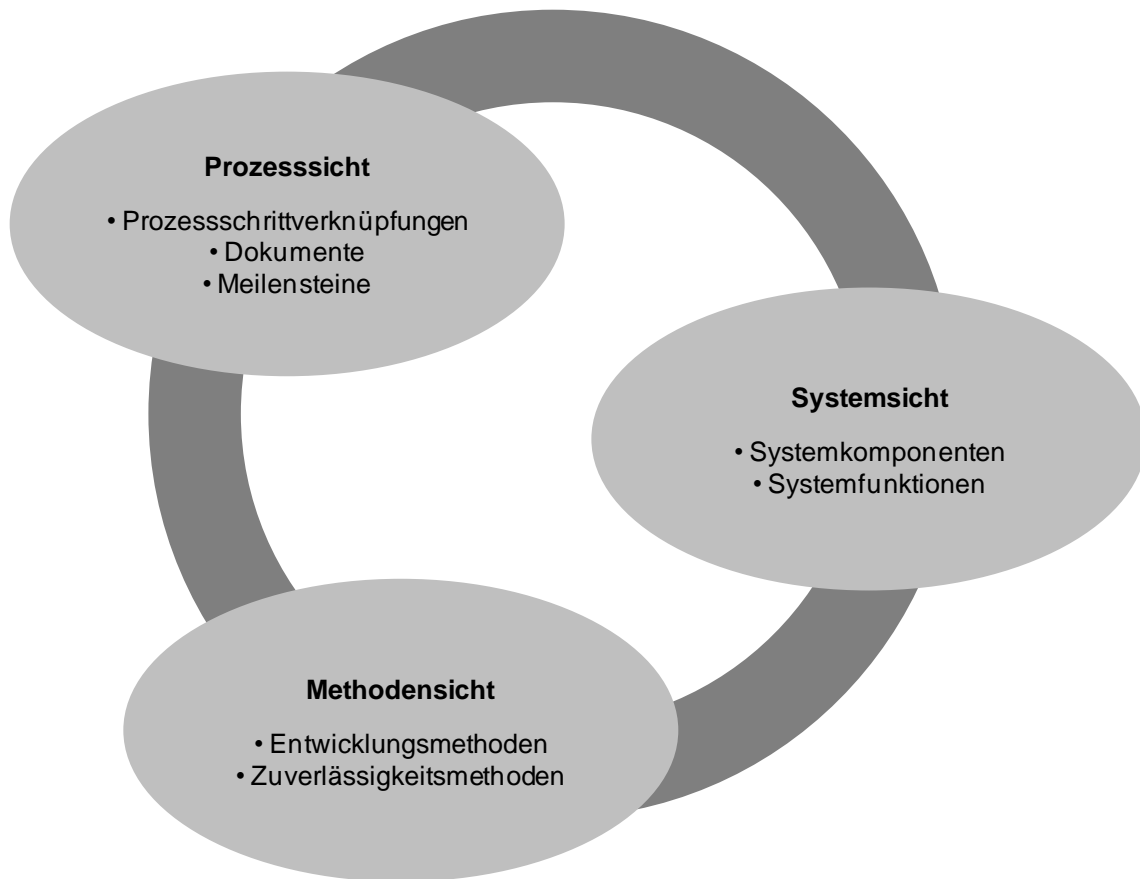


Abbildung 18: Basiselemente für das Verknüpfungs- und Zuverlässigkeitsinformationsmodell

5 Matrizenbasiertes Informationsverknüpfungsmodell

Wie bereits in Abschnitt 2.4 eingehend erläutert, eignen sich zur Darstellung von Informationsflüssen bei komplexen Sachverhalten insbesondere Graphen oder Matrizen. Aufgrund der spezifischen Anforderungen bei der Entwicklung eines Verknüpfungsmodells wie Skalierbarkeit (Anpassbarkeit bezüglich der Detaillierungsebenen), Übersichtlichkeit und beträchtlicher Gesamtumfang zu berücksichtigender Informationen sind Matrizen für diese Fragestellung geeigneter. Das Vorgehen zur Modellierung des Informationsflusses in der zuverlässigkeitsorientierten Produktentwicklung mechatronischer Systeme wird nachfolgend detailliert und anschaulich erläutert.

5.1 Modellbasierte Verknüpfung - Prozesssicht

Kern des Modells ist die Darstellung des Informationsflusses zwischen der Entwicklungsebene „Mechatronik“ und den Detaillierungen in den Prozessen der jeweiligen Domänen beziehungsweise zwischen den Entwicklungsprozessen in den Einzeldomänen. Darüber hinaus gilt es, diese vier Prozesse mit den in einem Zuverlässigkeitsprozess zusammengefassten Zuverlässigkeitstätigkeiten zu verknüpfen.

5.1.1 Entwicklungsprozesse als Teil der Prozesssicht

Die Basis hierfür bietet eine Design Structure Matrix (DSM), genannt Design Structure Matrix Mechatronik (DSM Mt), siehe Abbildung 19, links. Sowohl in den Reihen als auch in den Spalten dieser Matrix sind die jeweiligen Prozessschritte in der notwendigen Detaillierungsebene abgebildet. Zur Strukturierung der Gliederungsebenen lassen sich graphische Hilfen wie Einrückungen für Unterebenen verwenden. Auch zur Kennzeichnung der einzelnen Domänen können die jeweiligen Prozesse visuell gekennzeichnet werden, beispielsweise über Farben. Die Reihenfolge der Prozessschritte orientiert sich dabei wie in Abbildung 19, rechts, dargestellt.

Die Pfeildarstellung in der linken oberen Ecke gibt die Leserichtung der Matrixendarstellung an. Im Regelfall wird von einem pull-getriebenen Informationsfluss ausgegangen. In diesem Fall bedeutet die Darstellung, dass die Zeile von der Spalte Informationen benötigt: der Informationsfluss erfolgt somit von Spalte zu Zeile.

Im Detail betrachtet handelt es sich bei der Design Structure Matrix Mechatronik (DSM Mt) jedoch nicht nur um eine einzelne Design Structure Matrix, die die komplexen Abhängigkeiten abbildet. Sie beinhaltet außerdem in der Summe neun beliebig zu detaillierende Design Structure Matrizen und Domain Mapping Matrizen. Dies ergibt sich aus den weiteren neun Möglichkeiten, drei

beliebige Unterprozesse, nämlich die Entwicklungsprozesse der einzelnen Domänen, miteinander zu verknüpfen. Die daraus resultierenden neun Matrizen mit beispielhaften Informationsflüssen zeigt Abbildung 20, eine Detaillierung der Abhängigkeiten wird in Tabelle 5 dargestellt.

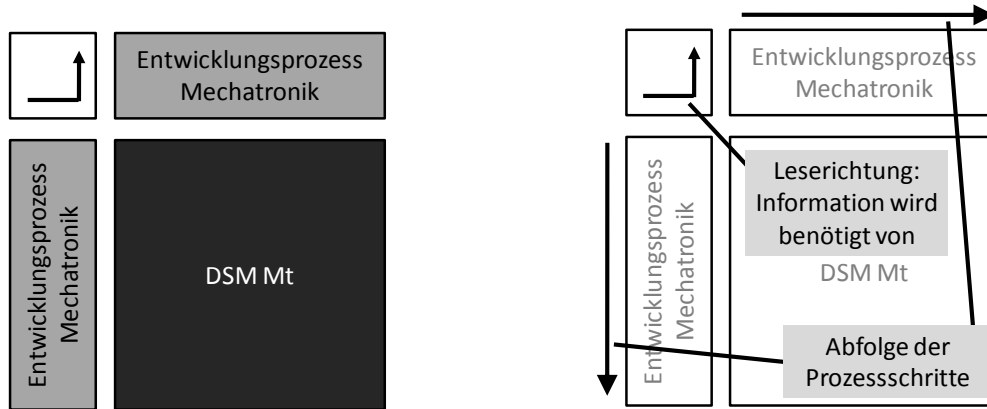


Abbildung 19: Design Structure Matrix zur Darstellung des Informationsflusses zwischen den mechatronischen Entwicklungsprozessen

Das Markieren eines Informationsflusses zwischen einzelnen Prozessschritten erfolgt durch das Setzen eines „X“ in die entsprechende Zelle der Matrix. Hierdurch wird qualitativ die Existenz eines Informationsflusses mitsamt der auftretenden Richtung gekennzeichnet.

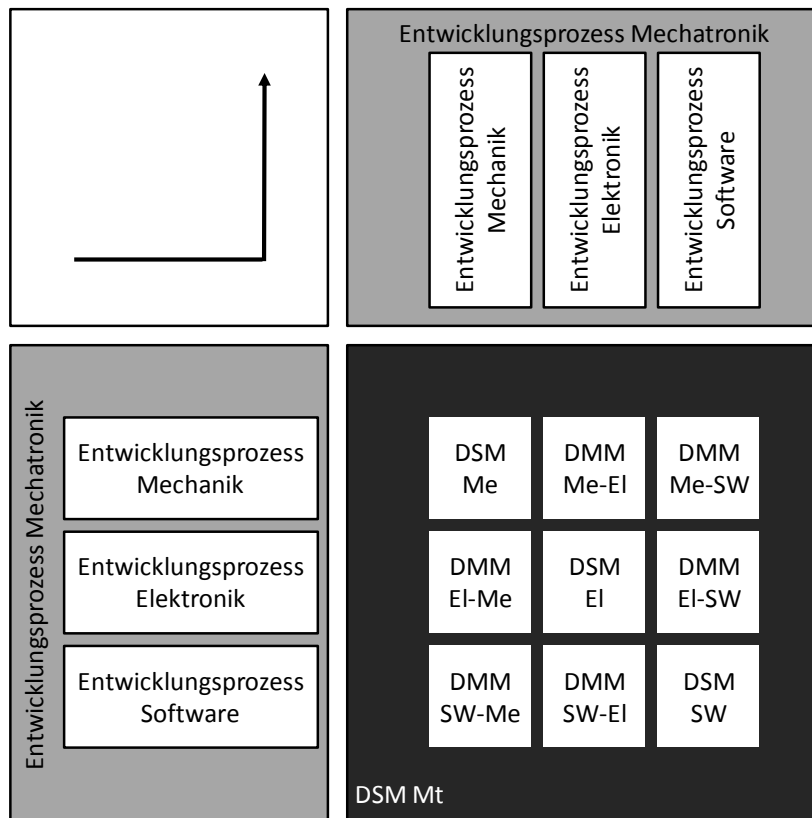


Abbildung 20: Detaillierte Betrachtung der Design Structure Matrix Mechatronik (DSM Mt), bestehend aus drei Design Structure Matrizen und sechs Domain Mapping Matrizen

Tabelle 5: Übersicht der in der Design Structure Matrix Mechatronik (DSM Mt) enthaltenen Submatrizen mit Beispielen für Informationsflüsse

Bezeichnung	Beschreibung	Beispiel
Design Structure Matrix Mechatronik (DSM Mt)	Stellt den Informationsfluss innerhalb der Domäne Mechatronik dar	Ein Prozessschritt greift auf Berechnungsergebnisse eines früheren Schrittes zurück
Domain Mapping Matrix Mechanik-Elektronik (DMM Me-EI)	Stellt den Informationsfluss von der Domäne Elektronik zur Domäne Mechanik dar	Die Anzahl der elektrischen Leitungen wird für den geometrischen Feinentwurf benötigt
Domain Mapping Matrix Mechanik-Software (DMM Me-SW)	Stellt den Informationsfluss von der Domäne Software zur Domäne Mechanik dar	Parameter (zum Beispiel verwendete Geschwindigkeitsprofile,...), die für mechanische Komponenten relevant sind
Domain Mapping Matrix Elektronik-Mechanik (DMM EI-Me)	Stellt den Informationsfluss von der Domäne Mechanik zur Domäne Elektronik dar	Geometrische Länge der Leitungen für elektronische Komponenten
Design Structure Matrix Elektronik (DSM EI)	Stellt den Informationsfluss innerhalb der Domäne Elektronik dar	Regelungstechnische Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Elektronikkomponenten
Domain Mapping Matrix Elektronik-Software (DMM EI-SW)	Stellt den Informationsfluss von der Domäne Software zur Domäne Elektronik dar	Kenngößen, die von der Softwaresteuerung eingefordert werden
Domain Mapping Matrix Software-Mechanik (DMM SW-Me)	Stellt den Informationsfluss von der Domäne Mechanik zur Domäne Software dar	Mechanisch zulässige Kennwerte für software-gesteuerte Funktionen wie zum Beispiel zulässige Geschwindigkeiten,...
Domain Mapping Matrix Software-Elektronik (DMM SW-EI)	Stellt den Informationsfluss von der Domäne Elektronik zur Domäne Software dar	Ansteuersignale und -größen für gesteuerte oder geregelte elektronische Komponenten
Design Structure Matrix Software (DSM SW)	Stellt den Informationsfluss innerhalb der Domäne Software dar	Informationsaustausch zwischen Steuerungscode X und Steuerungscode Y

Je nachdem, bis auf welche Detaillierungsebene die jeweiligen Prozesse beschrieben sind, ergibt sich hieraus auch implizit die zu verknüpfende Information, wie folgendes Beispiel zeigt.

Vom Prozessschritt „Festlegen des domänenübergreifenden Lösungskonzepts“ im Entwicklungsprozess fließen Informationen zum Prozessschritt „Erstellen und Auswahl eines Systemkonzepts“ im Entwicklungsprozess Elektronik. Die verbindenden Informationen ergeben sich hier automatisch als die

elektronikrelevanten Inhalte des systemübergreifenden Lösungskonzepts. Allerdings erscheinen diese Inhalte nur oberflächlich offensichtlich, da sie direkt in Verbindung stehende und relevante Inhalte wie die Systemgrenzen, relevante Umgebungsbedingungen und Einsatzparameter umfassen müssen.

Um die Informationsübergabe zwischen den verschiedenen Prozessen und Prozessschritten nachvollziehbar und eindeutig zu dokumentieren, wird ein standardisiertes Übergabedokument in einfacher Tabellenform vorgeschlagen, welches für alle Prozessschritte auszufüllen ist und die wesentlichen Übergabeparameter beinhaltet. Es stellt somit alle Informationsverknüpfungen zwischen einem Prozessschritt und den weiteren Basiselementen dar und könnte prinzipiell wie in Abbildung 21 dargestellt aussehen. Ein Beispiel für ein ausgefülltes Übergabedokument zeigt Abbildung 38.

Bezeichnung des Prozessschrittes					
Domäne inkl. fortlaufender Nummer					
Eingangsinformationen					
Domäne/ Methode inkl. fortl. Nr.	Bezeichnung	Beschreibung	Wert	Einheit	Anzahl Informations- verknüpfungen
Ausgangsinformationen					
Domäne/ Methode inkl. fortl. Nr.	Bezeichnung	Beschreibung	Wert	Einheit	Anzahl Informations- verknüpfungen

Abbildung 21: Beispielhaftes Übergabedokument zur detaillierten Beschreibung der Informationsverknüpfung zwischen einem Prozessschritt und den weiteren Basiselementen

Für das Ausfüllen der Design Structure Matrix Mechatronik (DSM Mt) mitsamt den entsprechend beschriebenen Untermatrizen gilt, dass sie für die abstrakten Detaillierungsebenen allgemeingültig ausgefüllt werden können, da sich die allgemein eingesetzten Prozesse nicht von Systementwicklung zu Systementwicklung verändern.

Dies führt zu einem einmaligen Basisaufwand, der dann systembezogen durch die entsprechend detaillierten Unterprozessschritte ergänzt wird.

5.1.2 Anbindung des Zuverlässigkeitsprozesses an den Entwicklungsprozess

In Abschnitt 5.1.1 wurde das Vorgehen zur Verknüpfung der Entwicklungsprozesse dargestellt. Diese Basiskonstellation mit der Design Structure Matrix Mechatronik (DSM Mt) wird nun ergänzt um die Anbindung des Zuverlässigkeitsprozesses mitsamt den notwendigen Informationsflüssen in das Entwicklungsvorgehen. Hierzu werden der Design Structure Matrix Mechatronik (DSM Mt) insgesamt drei weitere Matrizen angegliedert, zwei Domain Mapping Matrizen sowie eine Design Structure Matrix, siehe Abbildung 22.

Die Leserichtung der Matrizen verändert sich nicht. Somit bildet die Domain Mapping Matrix Zuverlässigkeitsprozess-Mechatronik (DMM Zp-Mt) die Informationen ab, die vom mechatronischen Entwicklungsprozess an den Zuverlässigkeitsprozess fließen. Die Design Structure Matrix Zuverlässigkeitsprozess (DSM Zp) stellt alle die Informationen dar, die innerhalb des Zuverlässigkeitsprozesses fließen. Beispielsweise könnte dies ein bereits sehr früh im Zuverlässigkeitsprozess festgelegtes Zuverlässigkeitsziel für das Gesamtsystem sein, das bei späterer Detaillierung auf Funktionen heruntergebrochen wird.

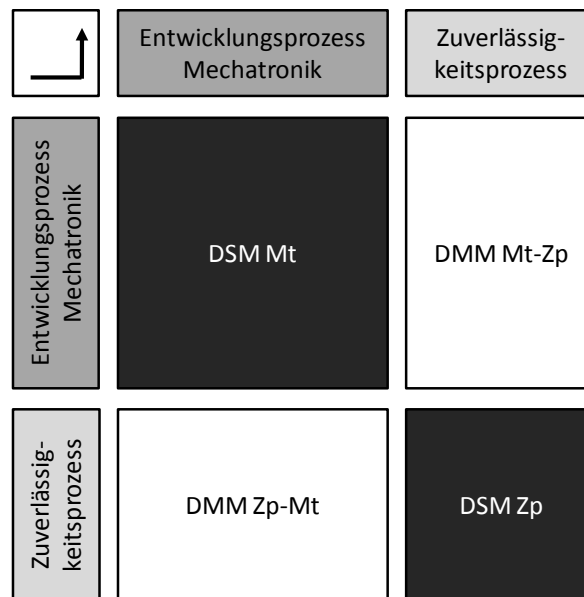


Abbildung 22: Matrixlandschaft zur Verknüpfung von mechatronischem Entwicklungs- und Zuverlässigkeitsprozess

Wie bereits in Abschnitt 5.1.1 für die Design Structure Matrix Mechatronik (DSM Mt) beschrieben gilt auch für die Domain Mapping Matrix Zuverlässigkeitsprozess-Mechatronik (DMM Zp-Mt) und die Design Structure Matrix Zuverlässigkeitsprozess (DSM Zp), dass für die abstrakten Detaillierungsebenen ein einmaliger Aufwand zum Ausfüllen der Matrizen besteht, da sich die wesentlichen Prozessschritte nicht ändern werden. Für den Zuverlässigkeitsprozess kann jedoch systemabhängig ein mehr oder weniger umfangreiches Vorgehen notwendig sein, was hier gegebenenfalls eine Erweiterung oder Anpassung notwendig macht.

Gewissermaßen eine Sonderstellung nimmt die Domain Mapping Matrix Mechatronik-Zuverlässigkeitsprozess (DMM Mt-Zp) ein, da diese den Informationsfluss aus dem Zuverlässigkeitsprozess zurück in den Entwicklungsprozess darstellt. Im Gegensatz zur Domain Mapping Matrix Zuverlässigkeitsprozess-Mechatronik (DMM Zp-Mt) ist der Informationsfluss bei der Domain Mapping Matrix Mechatronik-Zuverlässigkeitsprozess (DMM Mt-Zp) in der Regel nicht pull-getrieben. Hier handelt es sich um einen sogenannten push-getriebenen Informationsfluss, da im Entwicklungsprozess meist kein offensichtlicher Be-

darf an den neu entwickelten Informationen zu bestehen scheint - was durch den Einsatz des vorgeschlagenen Modells überwunden werden soll.

Tabelle 6: Vorgehen zur Identifikation möglicher Abnehmer zuverlässigkeitsrelevanter Informationen im Entwicklungsprozess

Schritt 1	Für Z_23 (beispielsweise das Herunterbrechen des gesamten Zuverlässigkeitsziels auf einzelne Funktionen) wird eine Information von Mt_34 aus dem Entwicklungsprozess benötigt (zum Beispiel die Funktionsliste), siehe Abbildung 23.
Schritt 2	In Z_23 wird nun mit dieser Information eine neue Information generiert, zum Beispiel die auf Haupt- und Unterfunktionen bezogenen Zuverlässigkeitsziele <i>Hinweis: Aufgrund der Verzweigung des Entwicklungsvorgehens in die einzelnen Domänen kann jedoch die Vielzahl potentieller Abnehmer dieser Funktion nicht direkt ausgemacht werden.</i>
Schritt 3	Die Information nach Ende von Z_23 wird daher im Zuverlässigkeitsinformationsmodell abgebildet.
Schritt 4	Die Information wird wieder an die Position des Entwicklungsprozesses, von der aus die Information entnommen wurde, zurückgespiegelt, in diesem Fall an Mt_34, siehe Abbildung 23. <i>Hinweis: Eine direkte zeitliche Korrelation zwischen Entwicklungs- und Zuverlässigkeitsprozess besteht nicht, daher können bis zum Abschließen von Z_23 bereits beliebig viele Schritte im Entwicklungsprozess abgeschlossen sein.</i>
Schritt 5	Von dort ausgehend wird in der Design Structure Matrix Mechanik (DSM Mt) die weitere Verwendung der Information aus Mt_34 nachverfolgt und dort die neue Information aus Z_23 eingestreut, siehe das Beispiel in Abbildung 23. Hier betrifft es die direkt verbundenen Elemente Mt_37, Me_1, Me_9, EI_13, SW_2. Zudem sind jedoch auch Verknüpfungen über mehrere Stufen (sogenannte indirekte Verbindungen) möglich. Beispielsweise ist SW_8 mit Mt_34 indirekt über EI_13 verbunden. Somit ist die Information aus Z_23 bei sechs Elementen einzupflegen.
Schritt 6	Diese Analyse ist bis zu den aktuellen Schritten des Entwicklungsvorgehens durchzuführen.

Der Hintergrund liegt darin, dass die Vielzahl potentieller Nutzer für die gewonnenen Informationen oft weder bekannt noch leicht erkennbar ist. Dies kann das Befüllen der Matrix erschweren. Um dies zu umgehen hat sich für die Domain Mapping Matrix Mechatronik-Zuverlässigkeitsprozess (DMM Mt-Zp) eine andere Herangehensweise bewährt, die auf das bisher schon abgebildete Wissen zu Informationsflüssen zurückgreift. Sollte ein potentieller Nutzer der neu gewonnenen Information (Prozessschritt im Entwicklungsprozess) bekannt sein, wird dieser Informationsfluss wie bisher auch direkt durch ein „X“ (vor)gekennzeichnet. Sollte jedoch direkt kein Abnehmer einer neuen Informa-

tion im Entwicklungsprozess identifiziert werden können, wird diese Information einerseits im Zuverlässigkeitsinformationsmodell abgebildet (siehe Kapitel 6) und andererseits durch das an folgendem Beispiel veranschaulichte Vorgehen in den Entwicklungsprozess zurückgespiegelt, siehe Tabelle 6.

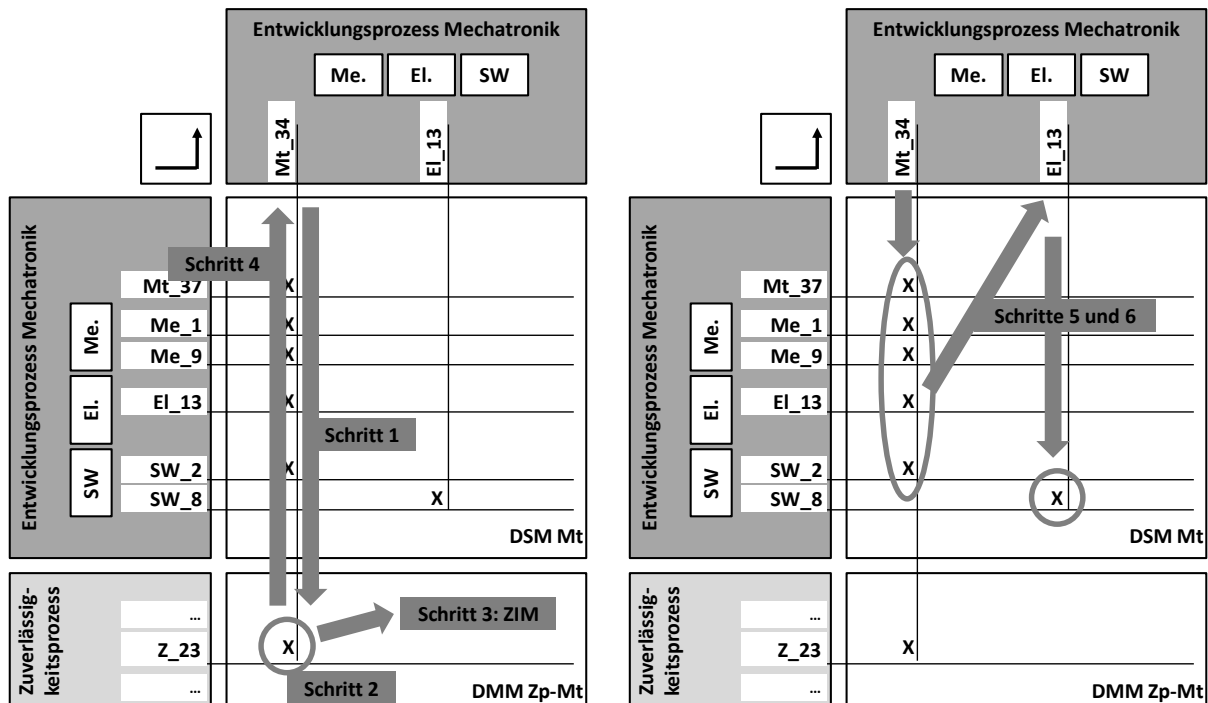


Abbildung 23: Beispiel zum Zurückspiegeln von Informationen gemäß Tabelle 6

5.1.3 Dokumente als Teil der Prozesssicht

Neben den sich ständig verändernden und verdichtenden Informationen und Informationsflüssen zwischen verschiedenen Prozessschritten bilden parallel dazu Dokumente zu einigen wesentlichen Punkten der Entwicklung die jeweils aktuellen systemspezifischen Entwicklungsstände ab. Diese Dokumente werden dann von verschiedenen Interessensgruppen beziehungsweise Entwicklern herangezogen, um darauf aufbauend weitere Entwicklungsschritte zu starten. Aus diesem Grund handelt es sich bei Dokumenten nicht um statische, sondern insbesondere bei komplexen Systemen um hochdynamische Elemente, die zu einem spezifischen Zeitpunkt relevante Informationen darstellen und abbilden können. Aufgrund der hohen Dynamik, die sich in der Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme einstellen kann, ist es notwendig, die Dokumente in die Betrachtung des Informationsflusses direkt mit einzubeziehen. Hierauf wird in den folgenden beiden Abschnitten 5.1.3.1 und 5.1.3.2 für den Entwicklungsprozess und den Zuverlässigkeitsprozess detaillierter eingegangen. In Abschnitt 5.1.4 wird die Einbindung in die bestehende Matrizenlandschaft beschrieben.

5.1.3.1 *Dokumente im Entwicklungsprozess*

Im Entwicklungsprozess haben einige wenige begleitende Dokumente einen wesentlichen Stellenwert, was die Unterstützung der Produktentwicklung angeht. Diese resultieren oftmals aus den Gepflogenheiten der jeweiligen spezifischen Domänen und finden sich auch in der mechatronischen Produktentwicklung wieder. Hierbei handelt es sich beispielsweise um die Anforderungsliste, die Stückliste, das Lasten-/Pflichtenheft, die Spezifikationen und einige weitere.

Da in der Regel auch für die zuverlässigkeitsorientierte Produktentwicklung wesentliche Kenngrößen enthalten sind, wie zum Beispiel Zuverlässigkeitsziele, ppm-Werte, Lastkollektive oder Anwendungsszenarien (zum Beispiel Use Cases) sind diese Dokumente ebenfalls in der Matrizenlandschaft zu dokumentieren. Dies ist möglich, da derartige Dokumente eine einheitliche und durchgängige Struktur aufweisen und beispielsweise anhand der jeweiligen Kapitelnummer in den Matrizen verknüpft werden können.

Bei jedem Entwicklungsschritt ist auch die Verknüpfung zu den Dokumenten zu prüfen und zu aktualisieren, um gegebenenfalls veränderte Informationsstände an die relevanten Prozessschritte weiterleiten zu können. Von dieser Möglichkeit wird beispielsweise beim Zurückspiegeln von Informationen aus dem Zuverlässigkeits- in den Entwicklungsprozess Gebrauch gemacht. Zudem dient es dazu, die Entwicklungsdokumente mit dem Zuverlässigkeitsinformationsmodell zu verknüpfen und somit beide auf einem einheitlichen Stand zu halten.

5.1.3.2 *Dokumente im Zuverlässigkeitsprozess*

Im Gegensatz zum Entwicklungsprozess haben Dokumente im Zuverlässigkeitsprozess keinen derartigen Stellenwert, da sie entweder in die Dokumente des Entwicklungsprozesses eingepflegt werden (zum Beispiel das Ergebnis einer frühzeitigen quantitativen Zuverlässigkeitsbewertung für Komponenten mittels Felddaten, wie in [Hof et al.09] vorgestellt, kann mit einem Anspannungsgrad versehen als Zuverlässigkeitszielgröße im Pflichtenheft Verwendung finden) oder als Ergebnis beispielsweise von Methoden zur Verfügung stehen. Das Ergebnis einer durchgeführten FMEA wird zum Beispiel in Gestalt eines FMEA-Formblattes dokumentiert, findet jedoch in diesem Umfang keinen Einzug in ein Lastenheft, sondern bleibt als separates Ergebnisdokument der Methode in der Regel unabhängig bestehen. Da im Rahmen einer zuverlässigkeitsorientierten Produktentwicklung für komplexe mechatronische Systeme zahlreiche auch für den Entwicklungsprozess relevante Dokumentationen erzeugt werden, sollen diese durch das in Kapitel 6 eingeführte Zuverlässigkeitsinformationsmodell ganzheitlich zusammengefasst und repräsentiert werden.

5.1.4 Anbindung der Dokumente in der Prozesssicht

Für jedes der als relevant zu identifizierenden Dokumente im Entwicklungsprozess wird eine separate Matrizeneinheit sowohl als Zeile als auch als Spalte eingeführt, siehe Abbildung 24. Gemäß den betrachteten Entwicklungsprozessen sind mindestens folgende Dokumente zu berücksichtigen:

- Anforderungsliste
- Lastenheft beziehungsweise Spezifikationen
- Pflichtenheft

Der meist strukturierte und vereinheitlichte Aufbau dieser Dokumente kann als Gliederungsebene herangezogen werden. Ein Beispiel für die Gliederung eines Lastenheftes in Anlehnung an [VDI01] ist im Anhang, Tabelle 17, dargestellt. In der Domain Mapping Matrix Mechatronik-Dokument 1 (DMM Mt-D1) sind alle Informationsflüsse verzeichnet, bei denen ein Entwicklungsprozessschritt auf Inhalte des Dokuments 1 zurückgreift, siehe Abbildung 24. Gleiches gilt für den Zuverlässigkeitsprozess und die Domain Mapping Matrix Zuverlässigkeitsprozess-Dokument 1 (DMM Zp-D1).

	Entwicklungsprozess Mechatronik	Zuverlässigkeitsprozess	Dokument 1
Entwicklungsprozess Mechatronik	DSM Mt	DMM Mt-Zp	DMM Mt-D1
Zuverlässigkeitsprozess	DMM Zp-Mt	DSM Zp	DMM Zp-D1
Dokument 1	DMM D1-Mt	DMM D1-Zp	DSM D1

Abbildung 24: Übersicht über die Berücksichtigung von Dokumenten mittels Matrizendarstellungen

Die Domain Mapping Matrix Dokument 1-Mechatronik (DMM D1-Mt) bildet ab, aus welchem Entwicklungsschritt im mechatronischen Entwicklungsprozess Informationen in Dokument 1 eingepflegt werden. Ebenso wird dies in der Domain Mapping Matrix Dokument 1-Zuverlässigkeitsprozess (DMM D1-Zp)

für Informationen verzeichnet, die in Dokument 1 abzulegen sind und aus dem Zuverlässigkeitsprozess stammen.

Die Design Structure Matrix Dokument 1 (DSM D1) stellt alle informationstechnischen Abhängigkeiten innerhalb des Dokuments 1 dar.

5.2 Modellbasierte Verknüpfung - Methodensicht

Laut der Definition dieser Arbeit bezeichnet eine Methode (siehe Abschnitt 2.1) die Art und Weise eines Vorgehens, um systematisch neue Erkenntnisse zu erlangen. Als Ableitung eines Planes beziehungsweise einer Handlungsanweisung, welcher beziehungsweise welche ein gegebenes Problem lösen soll, repräsentiert eine Methode die problemorientierte Sichtweise und somit die Freiheit, je nach Problemstellung individuell und flexibel eingesetzt werden zu können.

5.2.1 Methoden als Elemente zur Flexibilisierung individuell angepasster Zuverlässigkeitsentwicklung

In der Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme ist ein flexibler Einsatz von Zuverlässigkeitsmethoden überdies sinnvoll, da sowohl domänenübergreifend als auch domänenspezifisch beziehungsweise in den einzelnen Entwicklungsphasen sehr spezifische Herausforderungen auftreten, welche den Einsatz individuell zugeschnittener Methoden erfordern. Unterstützt wird dies durch eine vermehrte Methodenentwicklung und -verbreitung in den letzten Jahrzehnten, welche eben diese Fragestellung zu beantworten versucht und für vielfältigste Problemstellungen Lösungen bereitstellt. Über die reinen Zuverlässigkeitsmethoden (wie FMEA, FTA et cetera) hinaus hat die Methodensicht insbesondere durch die zunehmende Beachtung seitens der Qualitätsbeherrschung an Gewicht gewonnen. An dieser Stelle seien die derzeit im unternehmerischen Umfeld aktuellen Begriffe Six Sigma (6σ), Design for Six Sigma (DfSS) beziehungsweise Lean Six Sigma oder Lean Design for Six Sigma genannt.

Die Herausforderung im Rahmen dieser Arbeit bestand unter anderem darin, die teils komplexen Zusammenhänge bezüglich der Informationen und Informationsflüsse bei der Methodenanwendung zu erfassen und in dem vorgeschlagenen Vorgehen einheitlich zu berücksichtigen. Hierzu werden Methoden in einem „White-Box-Ansatz“ als in sich abgeschlossene, aber zugängliche Boxen betrachtet, die über einen Informationseingang und einen -ausgang verfügen, siehe Abbildung 25.

Unter dieser Annahme erlaubt eine Methode drei Sichten:

- Sicht auf die (notwendigen) Eingangsinformationen,
- bei Blick in die Box: Sicht auf die Methodenschritte,
- Sicht auf die gelieferten Ausgangsinformationen.

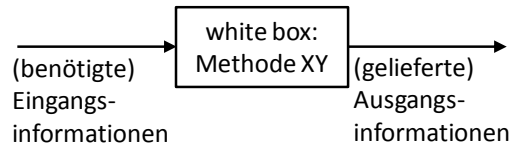


Abbildung 25: „White-Box-Ansatz“ zur Beschreibung von Zuverlässigkeitsmethoden

Unter Berücksichtigung dieser Annahme wurde ein fünfstufiges Vorgehen entwickelt, das auf dieser Basis die prinzipielle Einbindung jeder individuellen Zuverlässigkeitsmethode in das vorgeschlagene Modell ermöglicht. Die einzelnen Schritte sind in Abbildung 26 dargestellt.

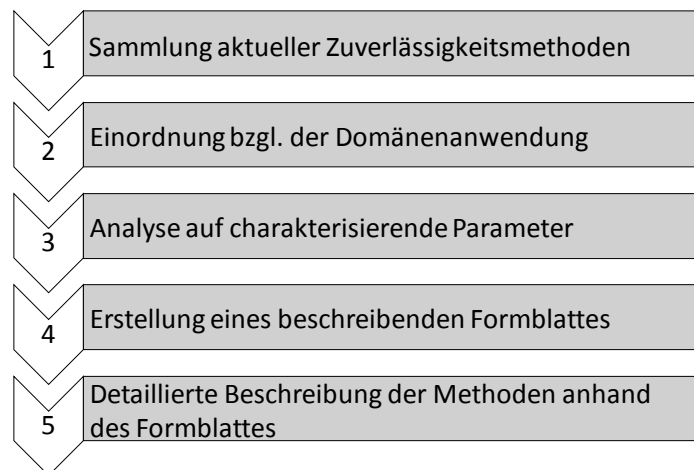


Abbildung 26: Vorgehen zur Analyse von Zuverlässigkeitsmethoden bezüglich deren Einbindung in vorgestelltes Vorgehen

In einem ersten Schritt wurde eine umfassende Sammlung von Zuverlässigkeitsmethoden durchgeführt, die im nächsten Schritt den Domänen, in denen sie Anwendung finden können, zugeordnet wurden. In Schritt drei erfolgte eine umfangreiche Untersuchung der gesammelten Methoden hin auf verbindende, einheitliche Größen und Parameter, die sich dazu eignen, für eine einheitliche, strukturierte und offene Methodenbeschreibung herangezogen zu werden. Ziel war es, Parameter zu finden, die Methoden unabhängig von Domänen und Einsatzphasen allgemein beschreiben können und mit denen eine Einbindung in das vorgestellte Modell zur Beschreibung und Analyse von Informationen und Informationsflüssen in der mechatronischen Produktentwicklung möglich ist.

Insgesamt sieben Parameter konnten ausgemacht werden, mit denen sich eine Methode unter den Zielforderungen beschreiben lässt:

- Methodenbezeichnung
- Anwendbarkeit (Phase)
- Funktions-/Komponentenorientiertheit
- Methodenbeschreibung und -schritte
- Eingangsinformationen (benötigt)
- Ausgangsinformationen (geliefert)
- Ressourcen/Aufwand.

Auf Basis dieser Parameter wurde ein allgemeines Formblatt (siehe beispielhaft Abbildung 27 für die Methode QNK) entwickelt, welches als Übersicht für die jeweilige Methode dient.

Methodenbezeichnung: Quantitative Konzeptbewertung (QNK)
Anwendbarkeit (Phase): VDI 2206: Systementwurf - Bewerten und Auswählen (von Lösungsvarianten) VDI 2221: Konzipieren - Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen - Benz: System-Entwurf - Erstellen und Auswahl eines Systemkonzepts
funktions-/komponentenorientiert: funktions- und komponentenorientiert
Methodenbeschreibung und -schritte: Methodenbeschreibung: QNK ist eine Methode zur quantitativen zuverlässigkeitstechnischen Konzeptauswahl von Systemen in frühen Phasen der Produktentwicklung. Mit QNK können auch komplexe mechatronische und innovative Systeme behandelt werden. Schritte: Systembeschreibung und -modellierung; Zuverlässigkeitsmodellierung; Datensammlung und -analyse; Zuverlässigkeitsanalyse
Eingangsinformationen (benötigt): Systemkomponenten physikalische Systemstruktur Funktionen Benutzungsprofil
Ausgangsinformationen (geliefert): Zuverlässigkeitsstruktur Fehlfunktionen und Fehlerbaum Zuverlässigkeitsziel Komponenten-/Fehlfunktionsmatrix Felddaten-/ (quantitativ) oder Expertenanalyse (qualitativ) auf Komponenten- und Zuverlässigkeitsprognose Abgleich Zuverlässigkeitsziele und /-prognose Zuverlässigkeitsentwicklungsspielraum Hauptinflussfaktoren bzgl. Zuverlässigkeit (auf Komponentenbasis)
Ressourcen/Aufwand: Ressourcen: Systemexperten, Workshops, Tabellenkalkulation; Aufwand: ca. 15h bei mittelkomplexen Systemen

Abbildung 27: Entwickeltes Standard-Beschreibungsblatt für Methoden am Beispiel der Methode Quantitative Konzeptbewertung (QNK) [Man et al.09], [Hof et al.09]

Hierin sind jeweils alle sieben beschriebenen Größen notiert. Für die Anwendung im Sinne einer Informationsbetrachtung dienen insbesondere die Para-

meter „Anwendbarkeit (Phase)“ als Unterstützung zur Einordnung in die jeweilige Entwicklungsphase, „Methodenschritte“ als Unterstützung einer Gliederung, „Eingangsinformationen (benötigt)“ als minimal notwendige Informationen, die zur Durchführung der Methode notwendig sind, sowie „Ausgangsinformationen (geliefert)“ als Menge der Informationen, die durch Anwendung der Methode neu gewonnen werden.

Die „Methodenbezeichnung“ dient einer eindeutigen Bezeichnung der Methode. Es hat sich gezeigt, dass die Methoden - sofern sie einen direkten Systembezug haben - entweder auf Basis der Systemfunktionen oder auf Basis der Systemkomponenten arbeiten. Dies wird mit dem Parameter „Komponenten-/Systemorientiertheit“ erfasst. Der Parameter „Ressourcen/Aufwand“ ermöglicht es, den für die Methode notwendigen beziehungsweise eingesetzten Aufwand darzulegen.

Auf Basis dieses Standard-Beschreibungsblattes können somit prinzipiell alle - bewährte ebenso wie neu entwickelte - Methoden beschrieben und auf einheitliche Weise mit dem Zuverlässigkeitsinformationsmodell verknüpft werden.

Durch die einheitliche Beschreibung von benötigten Eingangs- und gelieferten Ausgangsinformationen sowie eine erste Einordnung in die Entwicklungsphasen wird die Einbindung in das beschriebene Vorgehen zur Darstellung der Informationsflüsse bestmöglich unterstützt. Das Zuverlässigkeitsinformationsmodell eignet sich mit den vorliegenden Informationen somit auch dazu, Methoden auf Basis vorliegender Informationen auszuwählen beziehungsweise das Informationsdelta zwischen vorhandenen und notwendigen Informationen zu beleuchten.

Im nachfolgenden Abschnitt 5.2.2 wird die Verknüpfung der Methodensicht mit der Prozesssicht auf Basis der bekannten Matrizennotation dargelegt.

5.2.2 Anbindung der Methodensicht an die Prozesssicht

Aufbauend auf der in Abbildung 24 dargestellten Berücksichtigung von Dokumenten in der Prozesssicht stellt nachfolgende Abbildung 28 die zusätzliche Verknüpfung der Methodensicht in Matrizendarstellung dar.

Wie bei den bisherigen Darstellungen bleibt auch in dieser Sicht die Betrachtungsrichtung zwischen den Domänen identisch. Für alle über die reine qualitative Darstellung einer Verbindung hinausgehenden Dokumentationen kann auch an dieser Stelle das vorgestellte „Übergabedokument zur detaillierten Beschreibung der übergebenen Informationen“ herangezogen werden, siehe auch Abbildung 21.

Wie in Abbildung 28 dargestellt repräsentiert die Domain Mapping Matrix Methode 1-Mechatronik (DMM M1-Mt) demnach die Informationsflüsse, auf die die beispielhafte Methode 1 aus dem mechatronischen Entwicklungsprozess

angewiesen ist. Informationen, die der Methode 1 aus dem Zuverlässigkeitsprozess benötigterweise zugehen, werden in der Domain Mapping Matrix Methode 1-Zuverlässigkeitsprozess (DMM M1-Zp) gekennzeichnet. Sollten Eingangsinformationen für die Methode, beispielsweise konkrete Größen, wie Zuverlässigkeitsziele, Belastungsprofile, Lastkollektive et cetera, aus einem Dokument stammen, ist dies in der Domain Mapping Matrix Methode 1-Dokument 1 (DMM M1-D1) zu kennzeichnen. Dies stellt sicher, dass bei Anpassungen im entsprechenden Dokument 1 die Auswirkungen auf die weitere Entwicklung und somit auch auf die Methode 1 und deren Ergebnisse nachvollzogen werden können.

Ein Informationsfluss innerhalb der Methode 1 wird durch Design Structure Matrix Methode 1 (DSM M1) berücksichtigt. Allerdings gilt hier, dass diese Design Structure Matrix nur unter der Hauptdiagonalen auszufüllen ist, da eine eindeutige zeitliche Zuordnung existiert und damit die Informationen eines Methodenschritts nur für folgende Methodenschritte zur Verfügung stehen können. Detailliert wird das Gesamtverfahren innerhalb der Methode auch im Zuverlässigkeitsinformationsmodell dokumentiert.

	Entwicklungsprozess Mechatronik	Zuverlässigkeitsprozess	Dokument 1	Methode 1
Entwicklungsprozess Mechatronik	DSM Mt	DMM Mt-Zp	DMM Mt-D1	DMM Mt-M1
Zuverlässigkeitsprozess	DMM Zp-Mt	DSM Zp	DMM Zp-D1	DMM Zp-M1
Dokument 1	DMM D1-Mt	DMM D1-Zp	DSM D1	DMM D1-M1
Methode 1	DMM M1-Mt	DMM M1-Zp	DMM M1-D1	DSM M1

Abbildung 28: Übersicht über die Verknüpfung von Methodensicht und Prozesssicht mittels Matrizendarstellungen

Um Ergebnisse der Methode 1 wieder zurückzuspiegeln, stehen die Domain Mapping Matrix Mechatronik-Methode 1 (DMM Mt-M1), Zuverlässigkeitsprozess-Methode 1 (DMM Zp-M1) und Dokument 1-Methode 1 (DMM D1-M1) zur Verfügung. Ergebnisse, die für die weitere Bearbeitung im Entwicklungsprozess vorgesehen sind, werden in der Domain Mapping Matrix Mechatronik-Methode 1 (DMM Mt-M1) mit dem entsprechenden Entwicklungsschritt der jeweiligen Domäne verknüpft. Sollte hier keine offensichtliche Verwendung des Methodenergebnisses identifiziert werden können und die Domain Mapping Matrix Mechatronik-Methode 1 (DMM Mt-M1) in einem ersten Ansatz wider Erwarten unverknüpft bleiben, wird dasselbe Vorgehen wie in Tabelle 6 dargestellt ab Schritt vier angewendet.

Die Domain Mapping Matrix Zuverlässigkeitsprozess-Methode 1 (DMM Zp-M1) stellt all jene Informationsflüsse dar, bei denen Ergebnisse der Methode 1 direkt in den Zuverlässigkeitsprozess weitergegeben und dort in einem entsprechenden Prozessschritt weiterverarbeitet werden. Sollten mit Methode 1 Informationen gewonnen werden, die in einem Dokument (beispielsweise dem Lastenheft) abzulegen sind, so sind die relevanten Informationsflüsse in der Domain Mapping Matrix Dokument 1-Methode 1 (DMM D1-M1) festzuhalten. Insbesondere gilt dieser Matrix dann Beachtung, wenn aus demselben Dokument Informationen als Eingang für die Methode 1 herangezogen (Domain Mapping Matrix Methode 1-Dokument 1, DMM M1-D1) und unter Umständen verändert wurden. In diesem Fall sind all jene Verknüpfungen zwischen diesem Element in Dokument 1 und dem Entwicklungs- (Domain Mapping Matrix Mechatronik-Dokument 1, DMM Mt-D1) sowie dem Zuverlässigkeitsprozess (Domain Mapping Matrix Zuverlässigkeitsprozess-Dokument 1, DMM Zp-D1) auch zu aktualisieren beziehungsweise die neue Information ist weiterzugeben.

Bei der Produktentwicklung mechatronischer Systeme finden typischerweise mehr als eine Methode Anwendung. Dies führt im matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell zu beliebig vielen Zeilen und Spalten, die die angewendeten Methoden repräsentieren. Oft bauen Methoden auf Erkenntnissen vorangegangener Methoden auf, so dass auch die untereinander existierenden Verknüpfungen von großem Interesse sein können, da entsprechende Informationsänderungen unter Umständen mehrere Methodenresultate beeinflussen können.

5.3 Modellbasierte Verknüpfung - Systemsicht

Aus Systemsicht wurden „Funktionen“ und „Komponenten“ als Elemente identifiziert, die bei der Integration in die ganzheitliche Modellierung des Informationsflusses in der mechatronischen Produktentwicklung zu berücksichtigen sind.

Die Produktentwicklung erfolgt üblicherweise ausgehend von einer abstrakten - idealerweise von Kundenwünschen abgeleiteten - Systembeschreibung im Sinne umzusetzender Funktionsanforderungen und -wünsche. Auf dieser Basis werden dann die identifizierten Funktionen detailliert, analysiert und im Sinne einer wirtschaftlichen Umsetzung in die Domänen weitergeführt, bis den einzelnen Funktionen entsprechende Komponenten im Sinne von Bauteilen, Baugruppen oder Codeumfängen zugeordnet werden.

5.3.1 Systemkomponenten und Systemfunktionen als Teil der System-sicht

Zur Darstellung der Verknüpfung von Funktionen und Komponenten sind mindestens zwei Matrizen notwendig: eine Design Structure Matrix und eine Domain Mapping Matrix. Dieses Mindestmaß genügt, um die ungerichtete Verbindung von Komponente und Funktion sowie zwischen verschiedenen Komponenten abzubilden. Eine prinzipielle Abbildung zur Analyse dieser Strukturen bietet Abbildung 29.

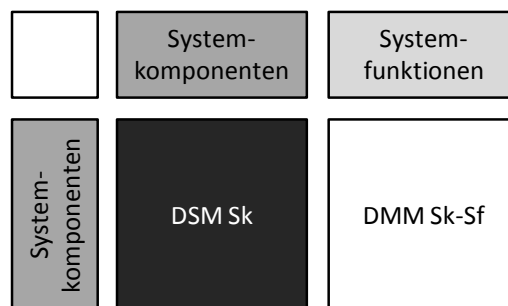


Abbildung 29: Verknüpfung von Systemkomponenten und -funktionen

Es ist wichtig anzumerken, dass bei diesen minimal notwendigen zwei Matrizen Design Structure Matrix Systemkomponenten (DSM Sk) und Domain Mapping Matrix Systemkomponenten-Systemfunktionen (DMM Sk-Sf) gerichtete Abhängigkeiten nur mit zusätzlichem Aufwand abgebildet werden können. Dies ist für die hier vorgesehene Anwendung jedoch nicht notwendig und daher wird auf diese Möglichkeit verzichtet, weshalb auch in dem Quadrat oben links in Abbildung 29 keine Richtung angezeigt wird. Dies führt zur Symmetrie der Design Structure Matrix Systemkomponenten (DSM Sk) und somit aus Gründen der Aufwandsreduzierung zu einer Dreiecksmatrix.

Eine beispielhaft ausgefüllte Version von Design Structure Matrix Systemkomponenten (DSM Sk) und Domain Mapping Matrix Systemkomponenten-Systemfunktionen (DMM Sk-Sf) zeigt Abbildung 30, an der die wesentlichen Zusammenhänge kurz erläutert werden.

Die Systemkomponente 5 ist direkt mit den Komponenten 6, 7, 8, 13 und 28 verknüpft. Wie aus der Design Structure Matrix Systemkomponenten (DSM Sk) ersichtlich ist, ist Systemkomponente 28 mit der Komponente 30 direkt verknüpft. Dadurch ergibt sich jedoch auch, dass Komponente 5 über die

Komponente 28 indirekt mit Komponente 30 verknüpft ist. Hierdurch lassen sich Ketten von verknüpften Elementen erstellen, die es prinzipiell ermöglichen, selbst auf den ersten Blick nicht offensichtliche Abhängigkeiten umfassend zu analysieren. Aus der Domain Mapping Matrix Systemkomponenten-Systemfunktionen (DMM Sk-Sf) lässt sich ablesen, dass zur Erfüllung der Systemfunktion 5 die Komponenten 7 und 13, für die Umsetzung der Funktion 98 die Komponenten 6, 7, 8, 28 und 30 benötigt werden. Umgekehrt kann aus der Domain Mapping Matrix Systemkomponenten-Systemfunktionen (DMM Sk-Sf) auch abgelesen werden, dass Komponente 7 sowohl an Funktion 5 als auch an Funktion 98 beteiligt ist.

		Systemkomponenten		Systemfunktionen	
		Komponente 5	Komponente 28	Systemfunktion 5	Systemfunktion 98
Systemkomponenten	Komponente 6	X			X
	Komponente 7	X		X	X
	Komponente 8	X			X
	Komponente 13	X		X	
	Komponente 28	X			X
	Komponente 30		X		X
		DSM Sk		DMM Sk-Sf	

Abbildung 30: Beispiel für die Verknüpfung von Systemkomponenten und -funktionen

Als Eingangsinformationen für diese Verknüpfung wird einerseits eine Liste der vom System umzusetzenden Funktionen - idealerweise gegliedert von der Ebene der Hauptfunktionen bis auf Unterfunktionen - sowie andererseits eine Liste der beteiligten Komponenten benötigt. Dabei ist durch die funktionsorientierte Herangehensweise in allen betrachteten Entwicklungsprozessen gewährleistet, dass die funktionale Sicht sowohl bei der Domäne „Mechatronik“ als auch bei den Einzeldomänen „Mechanik“, „Elektronik“ und „Software“ weiterverfolgt und soweit notwendig detailliert wird. Zudem ist durch das Herunterbrechen von wenigen globalen Systemfunktionen auf detailliertere Funktionen und Unterfunktionen über den Systementwurf bis zum domänenspezifischen Entwurf hin sichergestellt, dass die Funktionen einheitlich beschrieben sind.

Grundsätzlich gilt, dass eine geeignete Detaillierungsebene gewählt werden muss, die der entsprechenden Analyse zuträglich ist. Das bedeutet, dass es

teilweise auch sinnvoll sein kann, ein Steuergerät nicht in einzelne Platinen und die Software aufzuteilen, sondern als Ganzes zu betrachten, da es beispielsweise auch als solches von einem Zulieferer hinzugekauft wird. Erfolgt die Entwicklung jedoch intern im Unternehmen, sollte eine Analyse auf einer möglichst detaillierten Ebene erfolgen.

Die notwendigen Informationen über verwendete Bauteile und Komponenten sind dabei für die Domänen Mechanik und Elektronik aus Stücklisten, Schaltbildern oder beispielsweise physikalischen Modellen zu entnehmen. Bei der Domäne Software haben Komponenten keine physikalischen Ausprägungen - somit sind Komponenten für diese Domäne aus Logikstrukturen et cetera abzuleiten.

5.3.2 Anbindung der Systemsicht an die Prozess- und Methodensicht

Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben die Verknüpfungen der Prozesssicht mit der Methoden- und Systemsicht und erweitern die Informationsbetrachtung um entwicklungsbegleitende Dokumente.

5.3.2.1 Anbindung der Systemsicht an die Prozesssicht

Im Hinblick auf Informationen und Informationsflüsse gibt es aus Systemsicht zwei Betrachtungsweisen:

- Informationen und Informationsflüsse vom Entwicklungs- beziehungsweise Zuverlässigkeitsprozess in die Entwicklung einzelner Komponenten
- Informationsflüsse zwischen verschiedenen Komponenten

Für den ersten Punkt gilt, dass sich hierbei ergebende Informationsflüsse nicht auf die Komponente als solche, sondern vielmehr auf die Entwicklung der Komponente beziehen und somit in den entsprechenden Matrizen beziehungsweise Untermatrizen der Entwicklungsprozesse abzubilden sind. Der zweite Punkt bezieht sich auf die in vielen Entwicklungsprozessen, zum Beispiel [VDI04], beschriebenen drei Flussarten. Diese sind zwischen verschiedenen Bauteilen, Komponenten und Modulen zu betrachten:

- Stofffluss,
- Energiefluss und
- Informationsfluss.

Als Informationsfluss wird dabei eine Verknüpfung von Komponenten durch beispielsweise im Betrieb zu übertragende Informationen, wie Parameter (zum Beispiel zwischen Steuergeräten), Messgrößen (zum Beispiel zwischen Sensor und auswertender Komponente) oder Ähnliches betrachtet. Diese Analyse ist mittels Design Structure Matrix prinzipiell auch möglich, wird jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

Die Ableitung der Systemfunktionen sowie der Systemkomponenten ergibt sich durch das strukturierte Vorgehen im Entwicklungsprozess und wird in diesem Sinne mit jeweils einer Domain Mapping Matrix (Domain Mapping Matrix Mechatronik-Systemkomponenten, DMM Mt-Sk und Domain Mapping Matrix Mechatronik-Systemfunktionen, DMM Mt-Sf) verknüpft, siehe Abbildung 31. Mit dem Zuverlässigkeitsprozess sind diese über die Domain Mapping Matrix Zuverlässigkeitsprozess-Systemkomponenten (DMM Zp-Sk) und Domain Mapping Matrix Zuverlässigkeitsprozess-Systemfunktionen (DMM Zp-Sf) verbunden. Somit ist eine Verknüpfung der Prozessebene und damit auch der Informationsflüsse auf Prozessebene mit Funktionen und Komponenten sichergestellt.

	Entwicklungsprozess Mechatronik	Zuverlässig- keitsprozess	Dokument 1	System- komponenten	System- funktionen
Entwicklungsprozess Mechatronik	DSM Mt	DMM Mt-Zp	DMM Mt-D1	DMM Mt-Sk	DMM Mt-Sf
Zuverlässig- keitsprozess	DMM Zp-Mt	DSM Zp	DMM Zp-D1	DMM Zp-Sk	DMM Zp-Sf
Dokument 1	DMM D1-Mt	DMM D1-Zp	DSM D1	DMM D1-Sk	DMM D1-Sf

Abbildung 31: Übersicht über die Verknüpfung von Systemsicht und Prozesssicht mittels Matrizendarstellungen

Durch die Einbettung von Systemkomponenten und -funktionen als Matrizen-spalten ist zudem eine Verknüpfung mit allen weiteren identifizierten zuverlässigkeitsrelevanten Elementen sichergestellt (siehe Abbildung 32 in Abschnitt 5.3.2.2).

5.3.2.2 Anbindung der Systemsicht an die Methodensicht

Wie bereits dargestellt, dienen Methoden auch zur Flexibilisierung der Entwicklungs- und Zuverlässigkeitsprozesse und unterstützen problemorientiert bei der Lösung gegebener Herausforderungen. Systemorientierte Methoden arbeiten grundsätzlich funktions- oder komponentenorientiert und ermöglichen somit eine direkte Verknüpfung mit der Systemsicht.

5.4 Verknüpfung von Prozess-, Methoden- und Systemsicht

Nachfolgend werden Prozess-, Methoden- und Systemsicht zu einer umfassenden Sichtweise, dem matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell für zuverlässigkeitsrelevante Informationen, verbunden. Abbildung 32 zeigt die Zusammenhänge: Die Prozesse bilden den Kern der Darstellung, die weiteren Sichten gliedern sich daran angrenzend an.

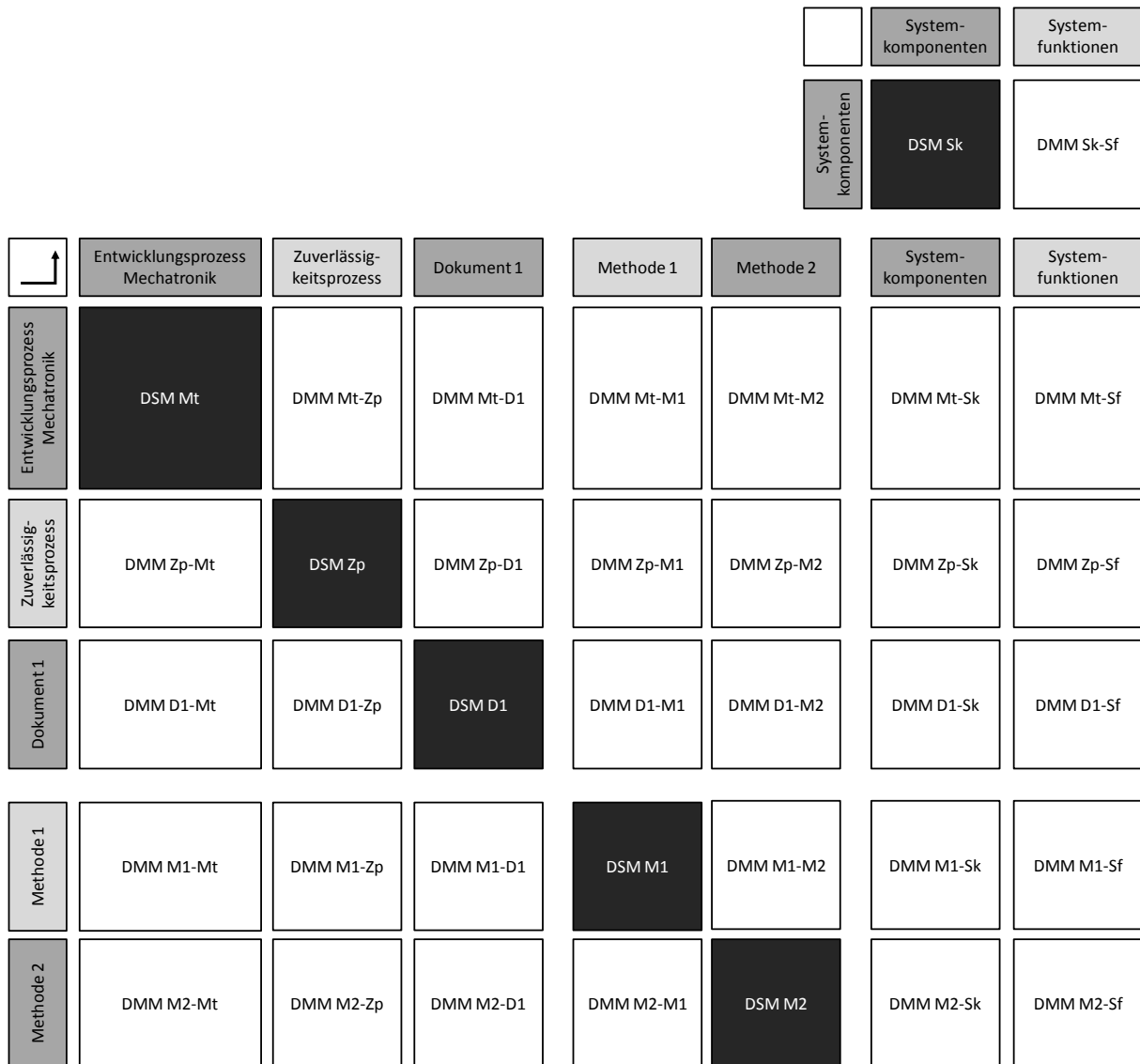


Abbildung 32: Verknüpfte Prozess-, System- und Methodensicht zur ganzheitlichen Betrachtung zuverlässigkeitsrelevanter Informationen im Sinne einer Multiple Domain Matrix (MDM)

Die Zusammensetzung dieser Verknüpfung aus den Einzelsichten ergibt sich dabei wie folgt:

- Den Kern bilden der mechatronische Entwicklungs- und Zuverlässigkeitsprozess und die bestehenden Verbindungen. Dies umfasst die Design Structure Matrix Mechatronik (DSM Mt), Domain Mapping Matrix Mechatronik-Zuverlässigkeitsprozess (DMM Mt-Zp), Domain Mapping Matrix Zuverlässigkeitsprozess-Mechatronik (DMM Zp-Mt) und Design

Structure Matrix Zuverlässigkeitsprozess (DSM Zp). Die erste Erweiterung ergibt sich durch die Einbindung beliebiger entwicklungsrelevanter Dokumente. Für ein Dokument umfasst dies die Domain Mapping Matrix Mechatronik-Dokument 1 (DMM Mt-D1), Domain Mapping Matrix Zuverlässigkeitsprozess-Dokument 1 (DMM Zp-D1), Domain Mapping Matrix Dokument 1-Mechatronik (DMM D1-Mt) und Domain Mapping Matrix Dokument 1-Zuverlässigkeitsprozess (DMM D1-Zp). Gemeinsam stellt dies die komplette Prozesssicht dar, siehe Abbildung 32 und Abbildung 33.

- Die Verbindung zwischen der Prozess- und der Systemsicht stellt im matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell die Methodensicht dar. Für beispielhaft zwei Methoden kommen hiermit die Matrizen Domain Mapping Matrix Mechatronik-Methode 1 (DMM Mt-M1), Domain Mapping Matrix Mechatronik-Methode 2 (DMM Mt-M2), Domain Mapping Matrix Zuverlässigkeitsprozess-Methode 1 (DMM Zp-M1), Domain Mapping Matrix Zuverlässigkeitsprozess-Methode 2 (DMM Zp-M2), Domain Mapping Matrix Dokument 1-Methode 1 (DMM D1-M1), Domain Mapping Matrix Dokument 1-Methode 2 (DMM D1-M2) sowie die Domain Mapping Matrizen Methode 1-Mechatronik (DMM M1-Mt) bis Methode 1-Dokument 1 (DMM M1-D1), Design Structure Matrix Methode 1 (DSM M1), Domain Mapping Matrix Methode 1-Methode 2 (DMM M1-M2) und die Domain Mapping Matrizen Methode 2-Mechatronik (DMM M2-Mt) bis Methode 2-Methode 1 (DMM M2-M1) und Design Structure Matrix Methode 2 (DSM M2) hinzu, siehe Abbildung 32 und Abbildung 33.
- Die Systemsicht besteht aus zwei Teilen: Einerseits der „internen“ Verknüpfung zwischen Systemkomponenten und -funktionen mit den Matrizen Design Structure Matrix Systemkomponenten (DSM Sk) und Domain Mapping Matrix Systemkomponenten-Systemfunktionen (DMM Sk-Sf), welche nur indirekt mit dem restlichen matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell verbunden sind, sowie den Domain Mapping Matrizen Mechatronik-Systemkomponenten (DMM Mt-Sk) bis Methode 2-Systemkomponenten (DMM M2-Sk) und Domain Mapping Matrizen Mechatronik-Systemfunktionen (DMM Mt-Sf) bis Methode 2-Systemfunktionen (DMM M2-Sf), die die Verknüpfung zum restlichen matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell darstellen, siehe Abbildung 32 und Abbildung 33.

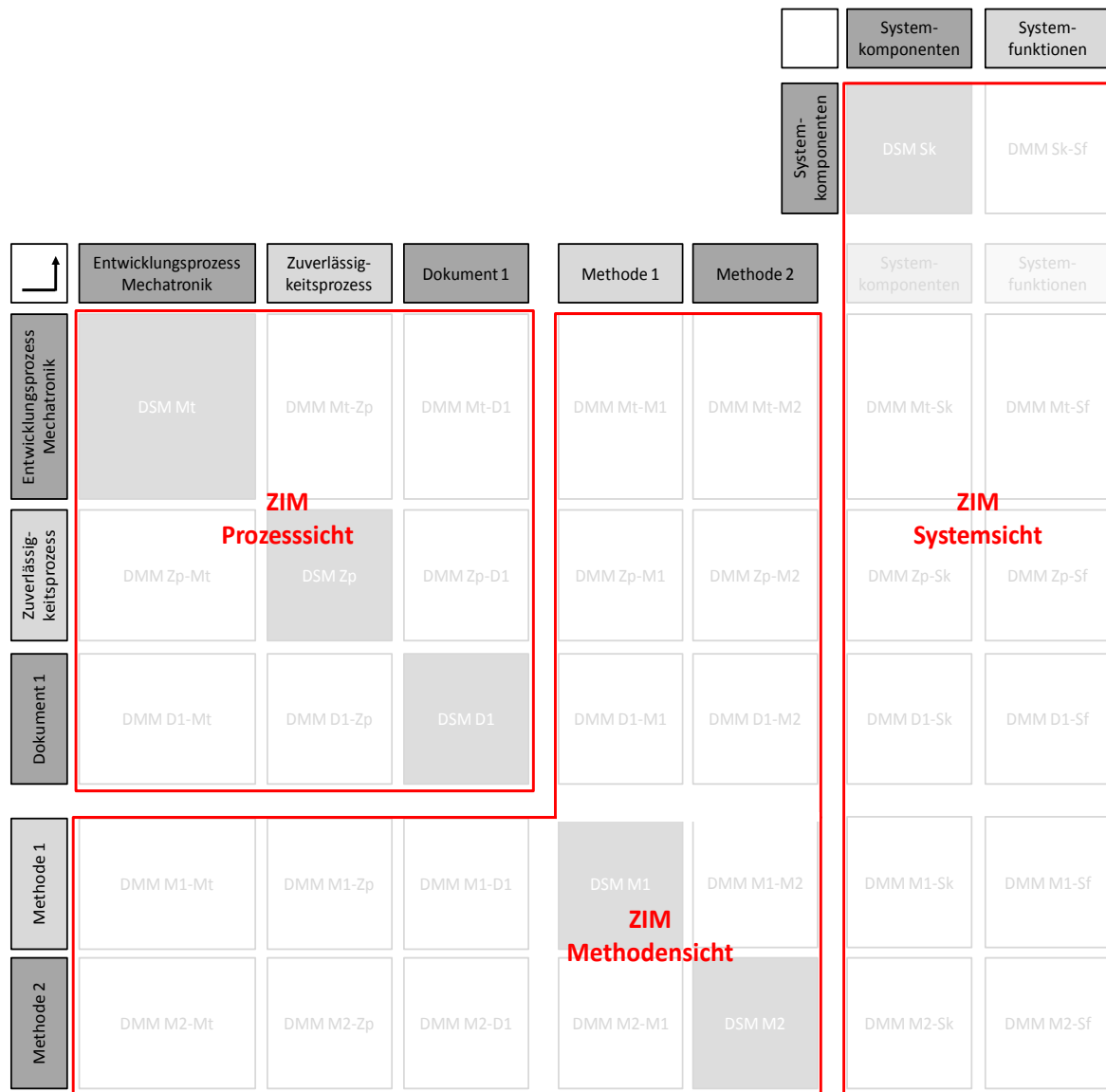


Abbildung 33: Matrizenbasiertes Informationsverknüpfungsmodell - Aufbau aus den Elementen „Prozesssicht“, „Methodensicht“ und „Systemsicht“

Tabelle 7 stellt in einer Übersicht alle Design Structure Matrizen und Domain Mapping Matrizen des matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodells mitsamt einer knappen Beschreibung der in der jeweiligen Matrix abgebildeten Verknüpfungen dar.

Tabelle 7: Gesamtübersicht über die Design Structure Matrizen und Domain Mapping Matrizen im matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell

DSM/DMM	Beschreibung der Verknüpfungen (Informationsflüsse)...
DSM Mt	...innerhalb des mechatronischen Entwicklungsprozesses und zwischen den Domänen, siehe auch Tabelle 8
DMM Mt-Zp	...vom Zuverlässigkeitsprozess in den mechatronischen Entwicklungsprozess
DMM Mt-D1	...von Dokument 1 in den mechatronischen Entwicklungsprozess
DMM Mt-M1/Mt-M2	...von Methode 1 beziehungsweise 2 in den mechatronischen Entwicklungsprozess

DSM/DMM	Beschreibung der Verknüpfungen (Informationsflüsse)...
DMM Mt-Sk	...zwischen Systemkomponenten und mechatronischem Entwicklungsprozess
DMM Mt-Sf	...zwischen Systemfunktionen und mechatronischem Entwicklungsprozess
DMM Zp-Mt	...vom mechatronischen Entwicklungsprozess in den Zuverlässigkeitsprozess
DSM Zp	...innerhalb des Zuverlässigkeitsprozesses
DMM Zp-D1	...von Dokument 1 in den Zuverlässigkeitsprozess
DMM Zp-M1/Zp-M2	...von Methode 1 beziehungsweise 2 in den Zuverlässigkeitsprozess
DMM Zp-Sk	...zwischen Systemkomponenten und Zuverlässigkeitsprozess
DMM Zp-Sf	...zwischen Systemfunktionen und Zuverlässigkeitsprozess
DMM D1-Mt	...vom mechatronischen Entwicklungsprozess in Dokument 1
DMM D1-Zp	...vom Zuverlässigkeitsprozess in Dokument 1
DMM D1-M1/D1-M2	...von Methode 1 beziehungsweise 2 in Dokument 1
DMM D1-Sk	...zwischen Systemkomponenten und Dokument 1
DMM D1-Sf	...zwischen Systemfunktionen und Dokument 1
DMM M1-Mt/M2-Mt	...vom mechatronischen Entwicklungsprozess in Methode 1 beziehungsweise 2
DMM M1-Zp/M2-Zp	...vom Zuverlässigkeitsprozess in Methode 1 beziehungsweise 2
DMM M1-D1/M2-D1	...von Dokument 1 in Methode 1 beziehungsweise 2
DSM M1/M2	...innerhalb Methode 1 beziehungsweise Methode 2
DMM M1-M2/M2-M1	...von Methode 2 zu Methode 1 beziehungsweise von Methode 1 zu Methode 2
DMM M1-Sk/M2-Sk	...zwischen Systemkomponenten und Methode 1 beziehungsweise 2
DMM M1-Sf/M2-Sf	...zwischen Systemfunktionen und Methode 1 beziehungsweise 2
DSM Sk	...zwischen verschiedenen Systemkomponenten
DMM Sk-Sf	...zwischen Systemkomponenten und -funktionen

Die Matrizen, die innerhalb des mechatronischen Entwicklungsprozesses (Design Structure Matrix Mechatronik, DSM Mt) die Verknüpfungsinformationen zwischen den Entwicklungsprozessen der einzelnen Domänen repräsentieren, sind in einer Übersicht in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Übersicht über die Design Structure Matrizen und Domain Mapping Matrizen innerhalb der Design Structure Matrix Mechatronik (DSM Mt) im matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell

DSM/DMM	Beschreibung der Verknüpfungen (Informationsflüsse)...
DSM Me	...innerhalb des Entwicklungsprozesses der Domäne Mechanik
DMM Me-EI	...vom Entwicklungsprozess der Domäne Elektronik in den Entwicklungsprozess der Domäne Mechanik
DMM Me-SW	...vom Entwicklungsprozess der Domäne Software in den Entwicklungsprozess der Domäne Mechanik
DMM EI-Me	...vom Entwicklungsprozess der Domäne Mechanik in den Entwicklungsprozess der Domäne Elektronik
DSM EI	...innerhalb des Entwicklungsprozesses der Domäne Elektronik
DMM EI-SW	...vom Entwicklungsprozess der Domäne Software in den Entwicklungsprozess der Domäne Elektronik
DMM SW-Me	...vom Entwicklungsprozess der Domäne Mechanik in den Entwicklungsprozess der Domäne Software
DSM SW-EI	...vom Entwicklungsprozess der Domäne Elektronik in den Entwicklungsprozess der Domäne Software
DSM SW	...innerhalb des Entwicklungsprozesses der Domäne Software

Alle Verknüpfungen, die innerhalb dieser Matrizen abgebildet werden, werden mittels binärer 0/1-Eintragungen vorgenommen. Eine Detaillierung der Verknüpfungen bezüglich des übertragenen Inhalts ist in der Matrizendarstellung nicht vorgesehen und aufgrund des Umfangs auch nicht zielführend. Hierzu wurde das standardisierte Übergabedokument entwickelt, das in Abbildung 21 vorgestellt wurde. Dieses erfüllt die Anforderungen der Informationsdetaillierung und dient als Verknüpfung zum Zuverlässigkeitsinformationsmodell (ZIM).

Der Vielfalt der Möglichkeiten, die das matrizenbasierte Informationsverknüpfungsmodell bietet, steht auf der anderen Seite jedoch auch ein entsprechender Aufwand zur Abbildung der jeweiligen Informationsflüsse und Verknüpfungen gegenüber. Auf Möglichkeiten zur Optimierung und Reduktion des Aufwandes wird daher in Abschnitt 5.5 im Detail eingegangen.

5.5 Aufwandsoptimierte Verknüpfung der Sichten

Das matrizenbasierte Informationsverknüpfungsmodell besteht aus Elementen, die relativ starr sind und sich auch über mehrere Entwicklungsprozesszyklen hinweg nicht verändern, beispielsweise die in einem Unternehmen aufgebauten und etablierten Entwicklungsprozesse oder fest definierte Dokumente. Andere Elemente des Modells sind flexibel und können bei Bedarf ganz gezielt eingesetzt oder bewusst ausgelassen werden, wie zum Beispiel Zuverlässigkeitsmethoden. Weitere Elemente des matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodells variieren von Produktentwicklung zu Produktentwicklung und spiegeln so die spezifischen Anforderungen jeder einzelnen Entwicklung be-

ziehungsweise jedes einzelnen Produkts wieder, beispielsweise die Systemfunktionen und -komponenten.

Um für die jeweilige Beschreibung des matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodells nicht mehr Arbeitsschritte als zwingend notwendig zu generieren, wird der Fokus in diesem Abschnitt auf die Aufwandsoptimierung gelegt. Diese umfasst sieben Elemente, auf die nachfolgend kurz eingegangen wird:

- Binäre 0/1-Beschreibung im matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell:

Durch die gerichtete, aber lediglich binäre Eintragung von Informationsflüssen ist die Abbildung der Verknüpfungen und Informationsflüsse auch trotz der hohen Komplexität in der zuverlässigkeitsorientierten mechatronischen Produktentwicklung möglich. Somit bietet das matrizenbasierte Informationsverknüpfungsmodell eine komplette Übersicht aller vorhandenen Verknüpfungen. Für die detaillierte Beschreibung jeder einzelnen Verknüpfung bezüglich übergebener Informationen dient das standardisierte Übergabedokument (siehe Abbildung 21), aus dem die jeweiligen Informationen direkt in das Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM übernommen werden können.

- Sonderstellung der Design Structure Matrix Systemkomponenten (DSM Sk) und Domain Mapping Matrix Systemkomponenten-Systemfunktionen (DMM Sk-Sf)

Die Design Structure Matrix Systemkomponenten (DSM Sk) und Domain Mapping Matrix Systemkomponenten-Systemfunktionen (DMM Sk-Sf) nehmen im matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell eine Sonderstellung ein. Der Grund dieser gesonderten Behandlung liegt darin, dass diesen beiden Matrizen eine wesentliche Bedeutung bei der Charakterisierung des zu entwickelnden mechatronischen Systems zukommt und die Verknüpfungsergebnisse auch für vielfältige andere Modelle und Aufgaben herangezogen werden. Beispielsweise ist der Gesamtzusammenhang zwischen Systemfunktionen und Systemkomponenten für zahlreiche allgemeine Methoden relevant und kann direkt weiterverwendet werden. Diese beiden Matrizen lassen es auch zu, Übertragungen vorzunehmen und somit indirekt und automatisch weitere Matrizen zu füllen wie dies bei den Methoden 1 und 2 in Abbildung 34 dargestellt ist. Hier stellt „Methode 1“ beispielsweise die FMEA dar, die auf Basis der Systemkomponenten durchgeführt wird. Durch die Kenntnis der Domain Mapping Matrix Systemkomponenten-Systemfunktionen (DMM Sk-Sf) kann jedoch automatisiert die Domain Mapping Matrix Methode 1-Systemfunktionen (DMM M1-Sf) über die Domain Mapping Matrix Methode 1-Systemkomponenten (DMM M1-Sk) und Domain Mapping

Matrix Systemkomponenten-Systemfunktionen (DMM Sk-Sf) erstellt und so der Zusammenhang zwischen FMEA und Systemfunktionen erschlossen werden. Bei einer systemfunktionsorientierten Methode könnte dies umgekehrt der Fall sein, wie an „Methode 2“ beispielhaft dargestellt: eine FTA wird auf Basis von Funktionen und Fehlfunktionen durchgeführt (Domain Mapping Matrix Methode 2-Systemkomponenten, DMM M2-Sk). Durch Kenntnis der Domain Mapping Matrix Systemkomponente-Systemfunktionen (DMM Sk-Sf) kann jedoch die Domain Mapping Matrix Methode 2-Systemfunktionen (DMM M2-Sf) automatisiert erstellt werden. Dies kann den Aufwand erheblich reduzieren. Allerdings hängt der Grad einer möglichen Aufwandsreduzierung von den jeweiligen Methoden ab.

- Einfache Einbindung von Systemkomponenten und Systemfunktionen in das matrizenbasierte Informationsverknüpfungsmodell

Die Einbindung der Systemkomponenten und -funktionen lediglich in Spaltenform reduziert den Gesamtaufwand für das Verknüpfungsmodell beträchtlich. Diese Anordnung verhindert zwar bei rein binären Eintragungen eine richtungsabhängige Eintragung, aber sowohl bei Systemkomponenten als auch bei Systemfunktionen ist dies nicht gefordert - hier genügt die Kenntnis, dass eine Verknüpfung vorliegt. Da die mit Systemkomponenten und -funktionen verbundenen Matrizen mit jeder Systementwicklung neu ausgefüllt werden müssen, ergeben sich hierdurch Einsparungen von über 37% bei zwei Methoden wie in Abbildung 34. Mit jeder weiteren betrachteten Methode erhöht sich der Grad der Einsparung.

- Vorgehen zur Identifikation möglicher Abnehmer zuverlässigkeitsrelevanter Informationen im Entwicklungsprozess

Mithilfe dieses Vorgehens können - ohne dass die entsprechenden eventuellen Abnehmer von Informationen bekannt sind - neue Ergebnisse über die Verknüpfungen innerhalb des Entwicklungsprozesses weitergereicht werden. Dies ermöglicht die Versorgung eventueller Nutznießer neuer zuverlässigkeitsrelevanter Ergebnisse, ohne aufwändig die jeweiligen Verknüpfungen zu identifizieren. Das dazugehörige Vorgehen umfasst sechs Schritte und ist in Tabelle 6 beschrieben. Für das Beispiel in Abbildung 34 bedeutet dies, dass die Domain Mapping Matrizen Mechatronik-Zuverlässigkeitsprozess (DMM Mt-Zp) bis Mechatronik-Methode 2 (DMM Mt-M2) auf diese Weise automatisiert ausgefüllt werden können.

- Standard-Beschreibungsblatt für Methoden

Die Eigenschaft, dass eine Methode in der Regel ein standardisiertes oder gar genormtes Element darstellt, ermöglicht es, für Zuverlässigkeitsmethoden ein „Standard-Beschreibungsblatt“ zu entwickeln (siehe Abbildung 27). Hierdurch sind sowohl die notwendigen Eingangsinformationen mit den entsprechenden Schritten, aus denen sie stammen, als auch die gelieferten Ausgangsinformationen bekannt. Dies ermöglicht es, das eben beschriebene Vorgehen (siehe Tabelle 6) ab Schritt vier in diesem Fall nicht nur auf den Entwicklungsprozess, sondern auch auf die weiteren Elemente der Prozesssicht (Zuverlässigkeitsprozess und Dokumente) anzuwenden. In dem in Abbildung 34 dargestellten Beispiel führt das dazu, dass nicht nur die Domain Mapping Matrix Mechatronik-Methode 1 (DMM Mt-M1) und Domain Mapping Matrix Mechatronik-Methode 2 (DMM Mt-M2), sondern auch die Domain Mapping Matrix Zuverlässigkeitsprozess-Methode 1 (DMM Zp-M1) beziehungsweise die Domain Mapping Matrix Zuverlässigkeitsprozess-Methode 2 (DMM Zp-M2) und die Domain Mapping Matrix Dokument 1-Methode 1 (DMM D1-M1) sowie die Domain Mapping Matrix Dokument 1-Methode 2 (DMM D1-M2) automatisiert ausgefüllt werden können.

- Robustheit der grundlegenden Prozesslandschaft

Die komplexen Zusammenhänge mechatronischer Systeme führen im Umfeld der Prozesslandschaft zunehmend zu robusten und statischen Grundprozessen, die durch Flexibilisierungselemente, wie beispielsweise Methoden, adaptiv erweitert werden. Diese Robustheit macht es möglich, die grundlegenden Prozesse einmalig im Hinblick auf immerwährende Zusammenhänge und Abhängigkeiten zu modellieren. Dies wird durch das vorgeschlagene standardisierte Übergabedokument (siehe Abbildung 21) unterstützt. Die grundsätzliche Modellierung der Informationsflüsse und Abhängigkeiten kann somit bis zu einer gewissen Detaillierungsebene einmalig erfolgen; von System zu System sind hierzu lediglich die entsprechenden „Übergabedokumente“ anzupassen. Für das in Abbildung 34 vorgestellte Beispiel bedeutet dies, dass die Domain Mapping Matrizen Zuverlässigkeitsprozess-Mechatronik (DMM Zp-Mt) bis Zuverlässigkeitsprozess-Dokument 1 (DMM Zp-D1) und die Domain Mapping Matrix Dokument 1-Mechatronik (DMM D1-Mt) sowie die Domain Mapping Matrix Dokument 1-Zuverlässigkeitsprozess (DMM D1-Zp) für den grundlegenden Prozess nur einmalig zu verknüpfen sind. Ferner führt dies hierzu, dass bei einer neuen Systementwicklung zwar die Design Structure Matrix Mechatronik (DSM Mt) für den „Entwicklungsprozess Mechatronik“ jedes Mal neu verknüpft werden muss (um beispielsweise individuelle funktionale Aufteilungen et cetera zu berücksichtigen), nicht jedoch die Untermatrizen, wie Abbildung 35 zeigt.

- Adaptierbare Prozessgranularität durch Detaillierungsebenen

Die über die grundlegende Prozesslandschaft hinaus nahezu beliebige Anpassbarkeit bezüglich der Prozessbeschreibungstiefe durch die Detaillierungsebenen macht eine individuelle Aufwandsgestaltung möglich. Während bei reinem Betrachten der Grundprozesse auf systemabhängige Anpassungen in der Verknüpfungsbeschreibung nahezu verzichtet werden kann, erfordert eine zunehmende Detaillierung einen steigenden Aufwand. Über das matrizenbasierte Informationsverknüpfungsmodell bietet es jedoch auch äußerst individuelle Analysemöglichkeiten bezüglich des betrachteten Systems.

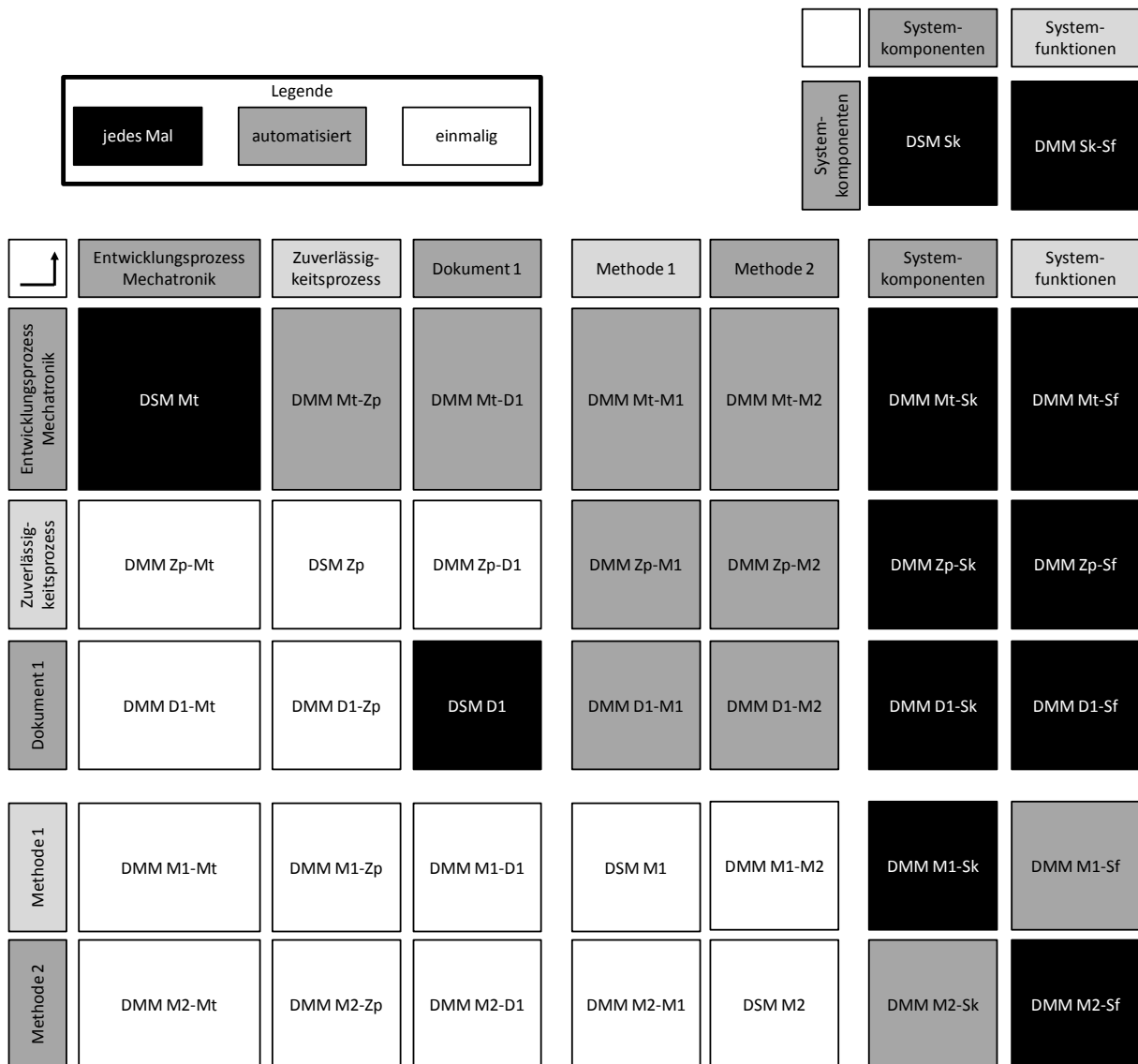


Abbildung 34: Aufwandsoptimierte Darstellung des matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodells

Abbildung 35 zeigt die aufwandsoptimierte Darstellung der Design Structure Matrix Mechatronik (DSM Mt).

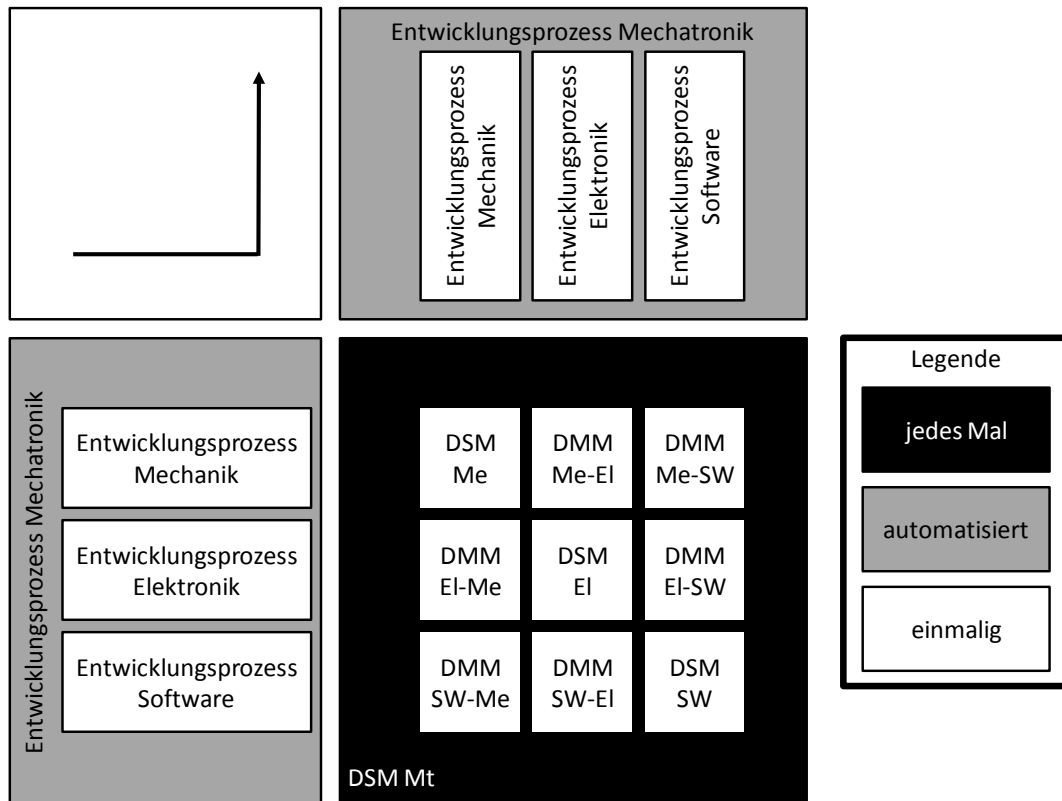


Abbildung 35: Aufwandsoptimierte Darstellung der Design Structure Matrix Mechatronik (DSM Mt)-Untermatrizen des matrixbasierten Informationsverknüpfungsmodells

6 Zuverlässigkeitsinformationsmodell und Wissensentwicklung

Nachfolgend wird in Abschnitt 6.1 ein Zuverlässigkeitsinformationsmodell (ZIM) eingeführt, das auf dem vorgestellten matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell für die Produktentwicklung mechatronischer Systeme basiert. Insbesondere ist es in der Lage, die bezüglich einer zuverlässigkeitsorientierten Entwicklung mechatronischer Systeme wichtigen beziehungsweise kritischen Prozessschritte (ZIM Prozesssicht), Methoden und Methodenschritte (ZIM Methodensicht) sowie Systemkomponenten und Systemfunktionen (ZIM Systemsicht) aufzuzeigen. Dies erfolgt mittels Kennzahlen, die eine frühzeitige Priorisierung von Ressourcen für zukünftige Systementwicklungen erlauben und somit zu einem nachhaltigen Wissensaufbau auf Basis zuverlässigkeitstechnischer Informationsflüsse führen können.

Darüber hinaus wurde das Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM weiterentwickelt, um die Verknüpfung der Ebenen „Daten“ und „Wissen“ zu ermöglichen. Ansätze und Vorgehensweisen, die dies unterstützen und auf dem matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell sowie auf dem Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM aufbauen, beschreibt das Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung (ZIM-We), welches in Abschnitt 6.2 näher erläutert wird.

Abschließend erfolgt eine Einordnung in die bestehende Prozesslandschaft der Produktentwicklung (Abschnitt 6.3) und ein Ausblick auf mögliche technische Umsetzungen (Abschnitt 6.4).

6.1 Zuverlässigkeitsinformationsmodell

Im Wesentlichen repräsentiert das Zuverlässigkeitsinformationsmodell (ZIM) als umfassendes entwicklungsbegleitendes Modell die während der Systementwicklung relevanten Sichten Prozesssicht (Abschnitt 6.1.1), Methodensicht (Abschnitt 6.1.2) und Systemsicht (Abschnitt 6.1.3) und stellt die Zusammenhänge und Abhängigkeiten dar, siehe auch Abbildung 36.

Somit existiert für jede Produktentwicklung ein Zuverlässigkeitsinformationsmodell, bestehend aus den drei Sichten Prozesssicht, Methodensicht und Systemsicht. Die mit Hilfe des matrizenbasierten Verknüpfungsmodells identifizierten Informationsflüsse werden im Zuverlässigkeitsinformationsmodell bezüglich der übergebenen Informationen detailliert und mit Hilfe von Kennzahlen bezüglich zuverlässigkeitstechnischer Kritikalität bewertet. Dies erfolgt für jede der drei Sichten in einer eigenen, die jeweilige Sicht charakterisierenden Weise. Diese Systematik erlaubt es einerseits, einzelne Elemente (wie beispielsweise Prozessschritte oder Dokumente) zu bewerten oder den Verlauf der Zuverlässigkeitskritikalität über den kompletten Entwicklungsprozess hinweg.

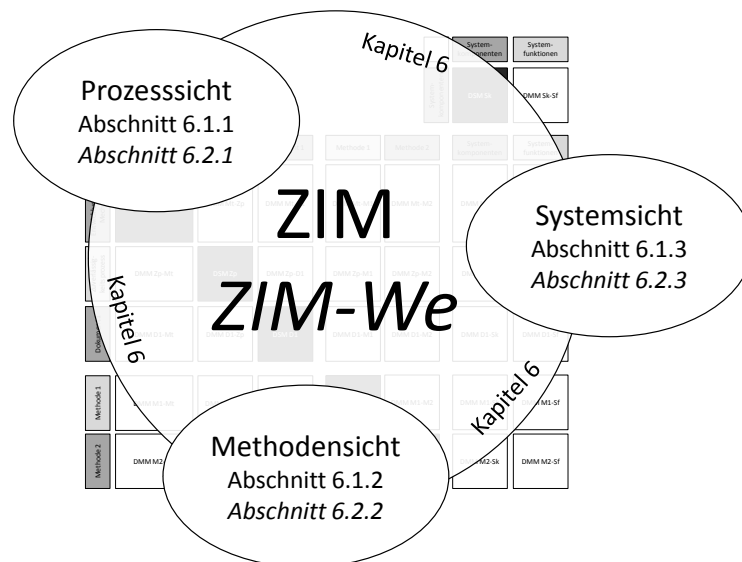


Abbildung 36: Schematischer Aufbau des Zuverlässigkeitsinformationsmodells (ZIM) sowie des Zuverlässigkeitsinformationsmodells zur Wissensentwicklung (ZIM-We) und Aufteilung auf nachfolgende Abschnitte

Weitere, über die einzelnen Sichten des Zuverlässigkeitsinformationsmodells ZIM hinausgehende Darstellungen und Analysen, die auf dem matrixbasierten Verknüpfungsmodell beruhen und die Basis für das Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung (ZIM-We) darstellen, werden im Abschnitt 6.1.4 beschrieben.

6.1.1 Zuverlässigkeitsinformationsmodell - Prozesssicht

Die Prozesssicht bildet das Rückgrat des Zuverlässigkeitsinformationsmodells ZIM. Dies ist auch durch die zentrale Stellung des ZIM - Prozesssicht im matrixbasierten Informationsverknüpfungsmodell, siehe Abbildung 37, ersichtlich. Es bildet die Basis, um zuverlässigkeitsrelevante Analysen und Auswertungen bezüglich Informationen und Informationsflüssen für die Entwicklungsprozessschritte, die Zuverlässigkeitsprozessschritte sowie die Dokumente zu ermöglichen.

Das Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM - Prozesssicht bietet eine Repräsentation der Prozesslandschaft durch eine erste allgemeingültige, qualitative Darstellung der Verknüpfungen und Informationsflüsse (gekennzeichnet durch ein „X“ im matrixbasierten Informationsverknüpfungsmodell), die nach und nach durch eine detaillierte, systemspezifische und quantitative Darstellung der Verknüpfungen mitsamt den übergebenen Informationen ergänzt wird.

Dem strukturellen Aufbau der qualitativen Repräsentation wurden mit der Beschreibung des matrixbasierten Informationsverknüpfungsmodells bereits mehrere Abschnitte gewidmet, weshalb darauf nicht mehr eingegangen wird. Wie in Kapitel 3 beschrieben, ist die qualitative Repräsentation darauf ausgelegt, allgemeingültige Prozessverknüpfungen ohne nähere Detaillierung der übergebenen Informationen abzubilden. Dies ist auf die Tatsache zurückzu-

führen, dass durch den Einsatz statischer Prozesse hier keine systemspezifischen Änderungen auftreten und der Einsatz des Zuverlässigkeitsinformationsmodells somit auf einem Basisniveau auch dann möglich ist, wenn die entsprechenden übergebenen Informationen nicht detailliert beschrieben werden. Dieser Fall ist jedoch für den Aufbau eines Wissensmodells nicht hilfreich und wird daher nicht näher betrachtet.

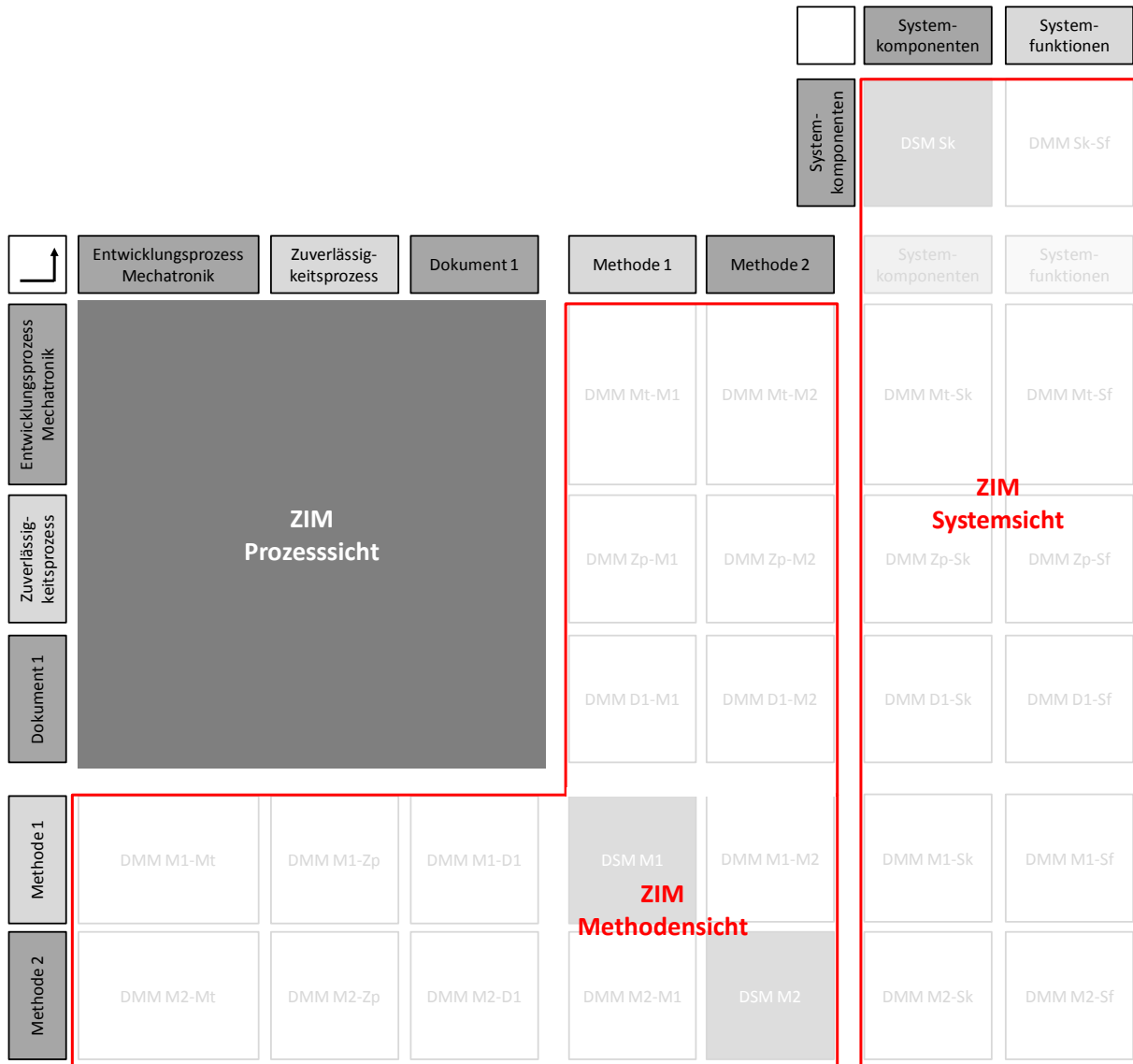


Abbildung 37: Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM - Prozesssicht im matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell

Beginnend mit dem allerersten Prozessschritt werden für diesen sowie für alle weiteren folgenden Prozessschritte - sowohl im Entwicklungs- als auch im Zuverlässigkeitsprozess - Informationen als Eingangsgrößen benötigt. Diese Informationen sind aus entsprechenden Quellen heranzuziehen, die in Tabelle 9 auszugsweise aufgezeigt sind.

Tabelle 9: Übersicht möglicher Informationsquellen für Eingangsinformationen für den Entwicklungs- sowie den Zuverlässigkeitsprozess

zeitlich vorhergehende Entwicklungsprozessschritte
zeitlich vorhergehende Zuverlässigkeitsprozessschritte
das Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM - Systemsicht (für Komponenten/Funktionen)
Dokumente des aktuellen Entwicklungsprozesses
Methoden des aktuellen Entwicklungsprozesses
Informationsquellen außerhalb des aktuellen Entwicklungsprozesses

Zur genauen Beschreibung der Eingangsinformation wurde daher das bereits in Abbildung 21 dargestellte Übergabedokument entwickelt, in dem sowohl die Herkunft als auch die quantitativen Eigenschaften der Informationen beschrieben werden. Dies erfolgt in gleicher Weise auch für die vom jeweiligen Prozessschritt gelieferten Ausgangsinformationen. Wenn die detaillierten Prozessschritte, die die Ausgangsinformationen weiterverwenden, nicht offensichtlich und somit vorab verknüpft sind, werden die Informationen im Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM zum entsprechenden Element abgelegt und mögliche „Verwender“ der Information später ergänzt.

Jeder Prozessschritt hat folgende, ihn eindeutig charakterisierenden Eigenschaften, die für den Aufbau eines Zuverlässigkeitsinformationsmodells notwendig sind:

- Bezeichnung des Prozessschrittes
- Domäne (Me; El; SW beziehungsweise Mt oder Zuv) inkl. fortlaufender Nummer (des Prozessschrittes)
- Eingangsinformationen:
 - Domäne/Methode inkl. fortlaufender Nummer
 - Beschreibung der Information
 - Wert
 - Einheit
 - Anzahl Informationsverknüpfungen
- Ausgangsinformationen:
 - Domäne/Methode inkl. fortlaufender Nummer
 - Beschreibung der Information
 - Wert
 - Einheit
 - Anzahl Informationsverknüpfungen

Für die detaillierte Beschreibung der Ausgangsinformationen ist dabei wie folgt vorzugehen:

- Auf Basis der vorhandenen qualitativen und allgemeingültigen Verknüpfung aus dem matrizenbasierten Verknüpfungsmodell sind Domäne, lau-

fende Nummer und Beschreibung der Prozessschritte zu ermitteln, für die die neue Information von Belange ist.

- Eventuelle weitere Prozessschritte, die zu einem späteren Zeitpunkt auf diese Information Bezug nehmen und sie als Eingangsinformation verwenden, sind ferner aufzunehmen.
- Auf Basis des Zuverlässigkeitsinformationsmodells ZIM - Systemsicht ist für alle existierenden Komponenten und Funktionen zu prüfen, ob die ermittelte Information von zuverlässigkeitstechnischer Relevanz ist.

Bezeichnung des Prozessschrittes		Festlegen des domänenübergreifenden Lösungskonzepts			
Domäne inkl. fortlaufender Nummer		Mt_15			
Eingangsinformationen					
Domäne/ Methode inkl. fortl. Nr.	Bezeichnung	Beschreibung	Wert	Einheit	Anzahl Informations- verknüpfungen
Mt_14	Erstellen versch. Lösungskonzepte	Lösungskonzept 1: elektrisch mit Universalmotor und Scherenmechanismus	12	Volt	7
Mt_14	Erstellen versch. Lösungskonzepte	Lösungskonzept 2: elektrisch mit Universalmotor und Seilzugmechanismus	12	Volt	7
Mt_14	Erstellen versch. Lösungskonzepte	Lösungskonzept 3: hydraulisch	<=3	bar	7
Mt_14	Erstellen versch. Lösungskonzepte	Lösungskonzept 4: pneumatisch	<=5	bar	7
QLK_25	Bestes Konzept bzgl. Entwicklungsfähigkeit	Lösungskonzept 2: elektrisch mit Universalmotor und Seilzugmechanismus			32
QNK_38	Bestes Konzept bzgl. Zuverlässigkeit	Lösungskonzept 2: elektrisch mit Universalmotor und Seilzugmechanismus	<=223	ppm/a	45
Ausgangsinformationen					
Domäne/ Methode inkl. fortl. Nr.	Bezeichnung	Beschreibung	Wert	Einheit	Anzahl Informations- verknüpfungen
Me_3	Detaillierung des mechanischen Lösungskonzeptes	Lösungskonzept 2: elektrisch mit Universalmotor und Seilzugmechanismus	12	Volt	
El_2	Detaillierung des elektronischen Lösungskonzeptes	Lösungskonzept 2: elektrisch mit Universalmotor und Seilzugmechanismus	12	Volt	
SW_3	Erstellung eines Lösungskonzeptes für Softwareanteile	Lösungskonzept 2: elektrisch mit Universalmotor und Seilzugmechanismus	12	Volt	
ZIM_Komp_1	mechatronisches Lösungskonzept	Lösungskonzept 2: elektrisch mit Universalmotor und Seilzugmechanismus	12	Volt	7;32;45
KLH_Komp_1	mechatronisches Lösungskonzept	Lösungskonzept 2: elektrisch mit Universalmotor und Seilzugmechanismus	12	Volt	7;32;45

Abbildung 38: Übergabedokument zur detaillierten Beschreibung übergebener Informationen am Beispiel des Prozessschrittes „Festlegen des domänenübergreifenden Lösungskonzepts“

Bei jeder aufzunehmenden Eingangsinformation ist für spätere Analysezwecke die „Anzahl Informationsverknüpfungen“, das heißt die Anzahl der Verknüpfungen im matrizenbasierten Verknüpfungsmodell zu ermitteln, die bis zu dem bezeichneten Schritt notwendig waren. Im Beispiel der Abbildung 38 waren dies jeweils sieben Schritte und es werden vom Schritt „Mechatronik 14“ (Mt_14) insgesamt vier Informationen als Eingangsinformationen für Schritt Mt_15 benötigt. Zwei weitere stammen aus den Methodenschritten „QLK_25“ (Qualitative Konzeptbewertung) und „QNK_38“ (Quantitative Konzeptbewertung). Durch die in den jeweiligen Methoden durchgeführten Schritte erhöht sich die „Anzahl Informationsverknüpfungen“ im einen Fall auf 32, im anderen auf 45. Das bedeutet, je nach eingesetzten Methoden oder der Komplexität der Prozesse kann sich die „Anzahl Informationsverknüpfungen“ für ein und dieselbe Information von Mal zu Mal deutlich unterscheiden. Die entsprechen-

de Ausgangsinformation wird an die Schritte Me_3, EI_2 und SW_3 weitergegeben, ebenso an das ZIM_Komp_1, (Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM der Komponente 1) und das Dokument KLH_Komp_1 (Komponentenlastenheft der Komponente 1). Die „Komponente 1“ repräsentiert in diesem Beispiel das Gesamtsystem.

Mit der Ablage der Information im ZIM_Komp_1 und dem Dokument KLH_Komp_1 ist diese Information mit Wert eindeutig festgehalten, somit vergrößert sich „Anzahl Informationsverknüpfungen“ nicht weiter. Wird diese Information für spätere Schritte weiterverwendet, startet eine neue Zählung der „Anzahl Informationsverknüpfungen“. Die „Anzahl Informationsverknüpfungen“ ist eine Eigenschaft der Information, nicht der jeweiligen Prozessschritte.

Für die einzelnen Prozessschritte gibt es folgende charakterisierende Eigenschaften:

- den Mechatronisierungsgrad (E/A): MG (E/A),
- den Methodenverknüpfungsgrad (E/A): MKG (E/A),
- den Informationsverdichtungsgrad: IDG,
- den Diskrepanzgrad: DPG,
- den Beeinflussungsgrad: BEG.

Der Mechatronisierungsgrad (MG) gibt dabei an, wie sehr der betrachtete Prozessschritt (PS) mit den unterschiedlichen mechatronischen Domänen verknüpft ist. Dieser Wert ergibt sich für Ein- und Ausgang (E/A) getrennt und ermittelt sich als Quotient der Anzahl direkt verknüpfter Domänen (Entwicklungsprozesse Mechanik, Elektronik, Software) zur maximalen Anzahl Domänen. Der Wert liegt somit zwischen 1/3 und 1 bei einer maximalen Anzahl von drei mechatronischen Domänen (Mechanik, Elektronik und Software) und ermittelt sich nach Gl. 6.1.

$$\text{Gl. 6.1: } MG_{PS_{E/A}} = \frac{\sum D_{verkn}}{3} \text{ mit}$$

D_{verkn} = verknüpfte mechatronische Domänen,

$$1/3 \leq MG_{PS_{E/A}} \leq 1$$

Der Methodenverknüpfungsgrad (MKG) gibt Aufschluss, wie intensiv der betrachtete Prozessschritt (PS) mit zuverlässigkeitsrelevanten Methoden verknüpft ist. Der Methodenverknüpfungsgrad MKG ergibt sich für den Eingang (MKG_{PS_E}) als Quotient der Anzahl von Methoden eingehenden Informationen zur Gesamtanzahl eingehender Informationen und ermittelt sich nach Gl. 6.2.

$$\text{Gl. 6.2: } MKG_{PS_E} = \frac{\sum I_{M_ein}}{\sum I_{ein}} \text{ mit}$$

I_{M_ein} = von Methoden eingehende Informationen,

I_{ein} = eingehende Informationen,

$$0 \leq MKG_{PS_E} \leq 1$$

Für den Ausgang eines Prozessschrittes (MKG_{PS_A}) stellt er sich als Quotient der Anzahl zu Methoden ausgehenden Informationen zur Gesamtzahl ausgehender Informationen dar und ermittelt sich gemäß Gl. 6.3.

Gl. 6.3: $MKG_{PS_A} = \frac{\sum I_{M_aus}}{\sum I_{aus}}$ mit

I_{M_aus} = zu Methoden ausgehende Informationen,

I_{aus} = ausgehende Informationen,

$$0 \leq MKG_{PS_A} \leq 1$$

Der Informationsverdichtungsgrad (IDG) zeigt an, wie sehr die Informationen im entsprechenden Prozessschritt (PS) verdichtet werden. Er ergibt sich als Quotient der Summe eingehender zur Summe ausgehender Informationen und lässt sich gemäß Gl. 6.4 ermitteln.

Gl. 6.4: $IDG_{PS} = \frac{\sum I_{ein}}{\sum I_{aus}}$ mit

I_{ein} = eingehende Informationen,

I_{aus} = ausgehende Informationen,

$$0 \leq IDG_{PS} \leq \infty$$

Ist der $IDG_{PS} > 1$, so fließen mehr Informationen zu diesem Prozessschritt hin als weg und man spricht von einer Informationsverdichtung. Ergibt sich ein $IDG_{PS} < 1$, so fließen mehr Informationen von diesem Prozessschritt weg als hin und man spricht von einer Informationsentdichtung.

Sobald eine Information mit einem Zuverlässigkeitsinformationsmodell verknüpft und die Information entsprechend dort abgelegt wird, sind zwei Analysen durchzuführen, von denen sich die eine mit der Diskrepanz von Informationen, die andere mit der Beeinflussung von Informationen befasst:

1. Überprüfen auf bestehende Diskrepanz: Eine neu hinzugefügte Information kann im schlimmsten Fall einer anderen, bereits abgelegten Information widersprechen. Die Beherrschung dieses Umstandes ist eine wesentliche Herausforderung bei der Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme, da andernfalls ein nicht spezifizierter Zustand des Systems oder einer Funktion die Folge ist.

Zur Ermittlung der Diskrepanz ist wie folgt vorzugehen:

- Die neu hinzugefügte Information ist mit allen weiteren abgelegten Informationen abzugleichen.
- Im Falle einer Abweichung zu einer bereits abgelegten Information sind deren „fortl. Nr.“ und „Bezeichnung“ bei Diskrepanzgrad „DPG“ der neu hinzugefügten Information zu vermerken.
- Mit allen Informationen, die bei verknüpften Elementen abgelegt sind, wird ebenso verfahren. Hierzu sind die Verknüpfungen in den entsprechenden Matrizen des Verknüpfungsmodells heranzuziehen.
- Sollten sich hier Diskrepanzen zeigen, sind ebenfalls „Kurzbezeichnung der Komponente“, „fortl. Nr.“ und „Bezeichnung“ bei Diskrepanzgrad „DPG“ der neu hinzugefügten Information abzulegen.

Zur Beurteilung der Diskrepanz wird der sogenannte Diskrepanzgrad (DPG) verwendet. Er lässt sich für eine neue Information nach Gl. 6.5 bestimmen:

$$\text{Gl. 6.5: } DPG = \frac{\sum I_{mD}}{\sum I} \text{ mit}$$

I_{mD} = Informationen mit Diskrepanzen zur neuen Information,

I = verknüpfte Informationen,

$$0 \leq DPG \leq 1$$

Für den entsprechenden Prozessschritt ergibt sich der DPG wie folgt:

$$\text{Gl. 6.6: } DPG_i = \sum DPG \text{ mit}$$

$$0 \leq DPG_i < \infty$$

2. Überprüfen auf bestehende oder vermutete Beeinflussung: Eine neu hinzugefügte Information kann auf eine andere, bereits abgelegte Information Einfluss haben. Der Umgang mit solchen gegenseitigen Beeinflussungen stellt eine Herausforderung bei der mechatronischen Systementwicklung dar, da die spätere Änderung einer Information Auswirkungen auf andere Informationen haben kann. Die Ermittlung der Beeinflussung erfolgt analog zur Ermittlung der Diskrepanz. Gl. 6.7 beschreibt den mathematischen Zusammenhang für den Beeinflussungsgrad einer Information.

$$\text{Gl. 6.7: } BEG = \frac{\sum I_{mB}}{\sum I} \text{ mit}$$

I_{mB} = Informationen mit Beeinflussung durch neue Info.,

I = Informationen über eine Komponente oder Funktion,

$$0 \leq BEG \leq 1$$

Für den entsprechenden Prozessschritt ergibt sich der BEG wie folgt:

$$\text{Gl. 6.8: } BEG_i = \sum BEG \text{ mit}$$

$$0 \leq BEG_{K_i/F_i} < \infty$$

Durch die übliche Strukturierung entwicklungsbegleitender Dokumente in nummerierter Kapitelstruktur lässt sich das für Prozessschritte beschriebene Vorgehen auch auf die Kapitelstruktur des Dokuments übertragen.

Somit ist jeder Prozessschritt und jedes Dokumentenkapitel durch neun charakterisierende Eigenschaften gekennzeichnet, siehe Tabelle 10. Durch die rein binäre Verknüpfung im matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell können alle drei Quotienten Mechatronisierungsgrad MG, Methodenverknüpfungsgrad MKG und Informationsverdichtungsgrad IDG mit Hilfe eines Tools automatisch bestimmt werden.

Tabelle 10: Charakterisierende Eigenschaften eines Prozessschrittes beziehungsweise Dokumentenkapitels

Bezeichnung des Prozessschrittes
Domäne inkl. fortlaufender Nummer
Eingangsinformationen
Domäne/ Methode inkl. fortl. Nr.; Bezeichnung; Beschreibung; Wert; Einheit; Anzahl Informationsverknüpfungen
Ausgangsinformationen
Domäne/ Methode inkl. fortl. Nr.; Bezeichnung; Beschreibung; Wert; Einheit; Anzahl Informationsverknüpfungen
Mechatronisierungsgrad MG
Methodenverknüpfungsgrad MKG
Informationsverdichtungsgrad IDG
Diskrepanzgrad DPG
Beeinflussungsgrad BEG

6.1.2 Zuverlässigkeitsinformationsmodell - Methodensicht

Das Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM - Methodensicht beschreibt die systembezogene, problemspezifische Sicht auf Methoden im Entwicklungsprozess, siehe Abbildung 39. Es bildet somit die Basis, um zuverlässigkeitsrelevante Analysen und Auswertungen bezüglich Informationen und Informationsflüssen für die Methoden und Methodenschritte zu ermöglichen.

In Abbildung 27 wurde das Standard-Beschreibungsblatt für Methoden bereits vorgestellt, welches die problemspezifische Einordnung der Methoden erleichtert und die Eingangs- und Ausgangsinformationen transparent darstellt.

Vertiefend hierzu muss für jede Methode eine detaillierte Schritt-für-Schritt-Vorgehensbeschreibung existieren, die in das matrizenbasierte Informationsverknüpfungsmodell eingebunden ist und somit die Verknüpfung zur Prozess- und Systemsicht herstellt. Dies erfolgt im sogenannten „Detail-Beschreibungsblatt für Methoden“, welches nachfolgend vorgestellt und detaillierter beschrieben wird, siehe Abbildung 40. Die Spaltenüberschriften für Ein- und Aus-

gangsinformationen sind hierbei identisch mit den in Abbildung 38 vorgestellten Bezeichnungen.

Eine zuverlässigkeitsrelevante Methode wird durch folgende charakterisierende Merkmale bestimmt:

- Methodenbezeichnung,
- Methodenkurzbezeichnung,
- funktions-/komponentenorientiert,
- Detaillierte Methodenschritte mit Ein- und Ausgangsinformationen,
- Mechatronisierungsgrad MG,
- Dokumentenverknüpfungsgrad DKG,
- Informationsverdichtungsgrad IDG,
- Diskrepanzgrad DPG,
- Beeinflussungsgrad BEG.

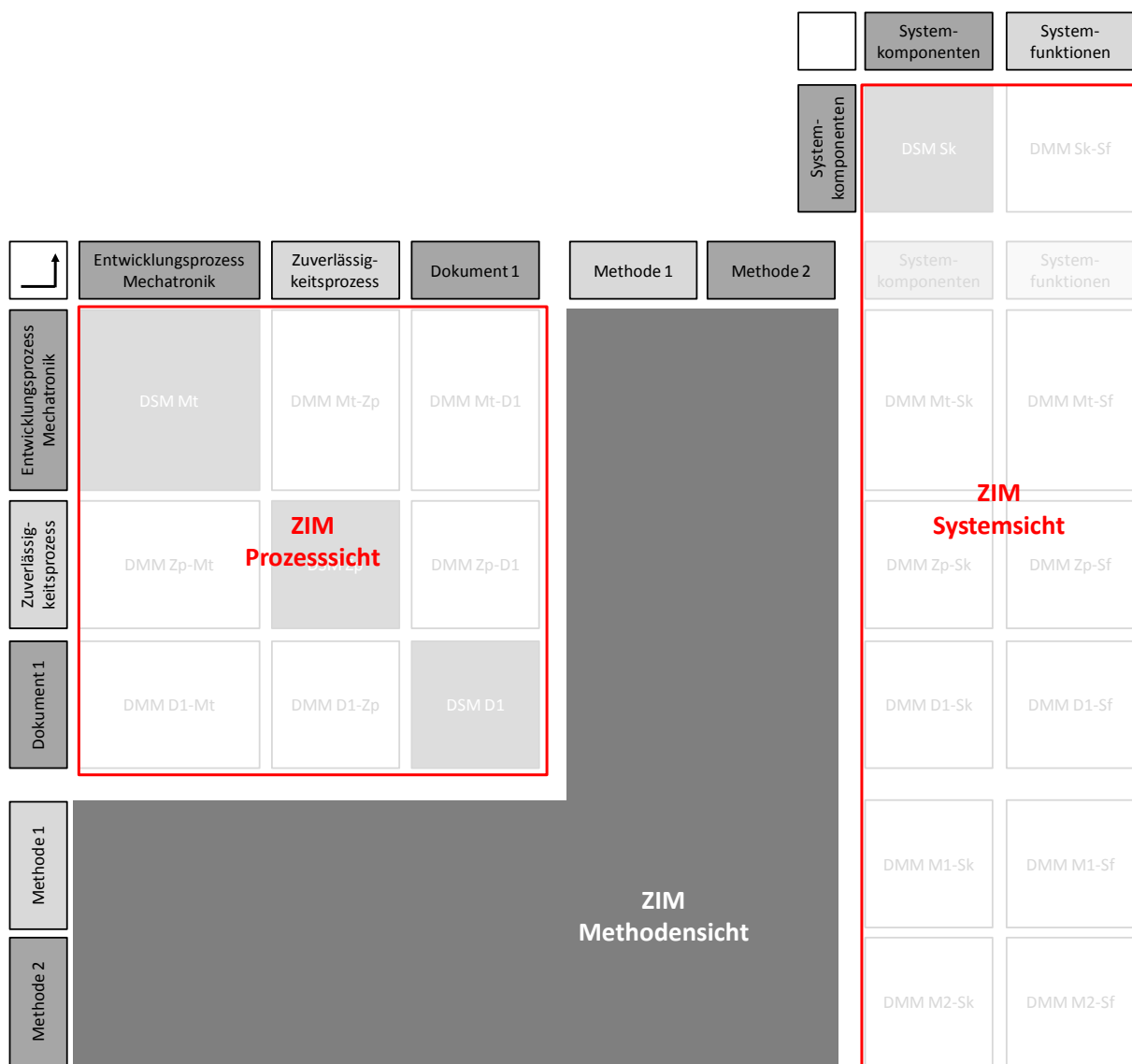


Abbildung 39: Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM - Methodensicht im matrixbasierten Informationsverknüpfungsmodell

Die Methodenbezeichnung wird im matrizenbasierten Informationsverknüpfungmodell zusätzlich mit einer Methodenkurzbezeichnung abgekürzt. Unter „funktions-/komponentenorientiert“ wird abgelegt, ob die Methode mit allen Systemfunktionen verknüpft ist oder mit allen Komponenten.

Methodenbezeichnung													
Methodenkurzbezeichnung													
funktions-/komponentenorientiert													
Eingangsinformationen						detaillierte Methodenschritte		Ausgangsinformationen					
Domäne/Methode	Bezeichnung	Beschreibung	Wert	Einheit	Anzahl Informationsverknüpfungen	fortl. Nr.	Bezeichnung	Domäne/Methode	Bezeichnung	Beschreibung	Wert	Einheit	Anzahl Informationsverknüpfungen

Abbildung 40: Detail-Beschreibungsblatt für Methoden

Der Mechatronisierungsgrad MG und der Informationsverdichtungsgrad IDG lassen sich für eine Methode mit den bekannten Gleichungen Gl. 6.1 und Gl. 6.4, der Diskrepanzgrad DPG und der Beeinflussungsgrad BEG mit den Gleichungen Gl. 6.6 und Gl. 6.8 bestimmen.

Der Dokumentenverknüpfungsgrad DKG ist das Äquivalent zum Methodenverknüpfungsgrad MKG und ergibt sich für den Eingang eines Prozessschrittes gemäß Gl. 6.9. Er gibt damit Aufschluss, wie die Methode mit Entwicklungsdokumenten verknüpft ist.

$$\text{Gl. 6.9: } DKG_{PS_E} = \frac{\sum I_{D_ein}}{\sum I_{ein}} \text{ mit}$$

I_{D_ein} = von Dokumenten eingehende Informationen,

I_{ein} = eingehende Informationen,

$$0 \leq DKG_{PS_E} \leq 1$$

Für den Ausgang eines Prozessschrittes der Methode ergibt er sich wie folgt:

$$\text{Gl. 6.10: } DKG_{PS_A} = \frac{\sum I_{D_aus}}{\sum I_{aus}} \text{ mit}$$

I_{D_aus} = zu Dokumenten ausgehende Informationen,

I_{aus} = ausgehende Informationen,

$$0 \leq DKG_{PS_A} \leq 1$$

Die Beschreibung der Ein- und Ausgangsinformationen der einzelnen Prozessschritte orientiert sich an dem in Abbildung 40 dargestellten Beschreibungsblatt. Für die Eingangsinformationen kommen wiederum die in Tabelle 9 genannten Quellen in Frage. Jede Methode ist somit durch neun charakterisierende Eigenschaften gekennzeichnet, siehe Tabelle 11.

Durch die rein binäre Verknüpfung im matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmo-
dell können alle drei Quotienten Mechatronisierungsgrad MG, Doku-
mentenverknüpfungsgrad DKG und Informationsverdichtungsgrad IDG auto-
matisch bestimmt werden.

Tabelle 11: Charakterisierende Eigenschaften einer Methode

Methodenbezeichnung
Methodenkurzbezeichnung
funktions-/komponentenorientiert
detaillierte Methodenschritte
fortlaufende Nummer; Bezeichnung
Eingangsinformationen
Domäne/ Methode inkl. fortl. Nr.; Bezeichnung; Beschreibung; Wert; Einheit;
Anzahl Informationsverknüpfungen
Ausgangsinformationen
Domäne/ Methode inkl. fortl. Nr.; Bezeichnung; Beschreibung; Wert; Einheit;
Anzahl Informationsverknüpfungen
Mechatronisierungsgrad MG
Dokumentenverknüpfungsgrad DKG
Informationsverdichtungsgrad IDG
Diskrepanzgrad DPG
Beeinflussungsgrad BEG

6.1.3 Zuverlässigkeitsinformationsmodell - Systemsicht

Das Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM - Systemsicht bildet die Basis, um zuverlässigkeitsrelevante Analysen und Auswertungen bezüglich Informatio-
nen und Informationsflüssen für die Systemkomponenten und die Systemfunk-
tionen zu ermöglichen. Funktionale und mit zunehmender Detaillierung insbe-
sondere komponentenorientierte Betrachtungen sind in der Produktentwick-
lung heute alltäglich, was die hohe Relevanz dieser Sicht im Zuverlässig-
keitsinformationsmodell ZIM nach sich zieht.

Die Einordnung des Zuverlässigkeitsinformationsmodells ZIM - Systemsicht im
matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmo- zeigt Abbildung 41.

Für die Abbildung der Informationen im Zuverlässigkeitsinformationsmodell
ZIM - Systemsicht wurde ein „Detail-Beschreibungsblatt für Kompo-
nenten/Funktionen“ entwickelt, das mit leichten Anpassungen sowohl für Kompo-
nenten als auch für Funktionen Anwendung findet und dessen Aufbau für
Komponenten in Abbildung 42 und für Funktionen in Abbildung 60 im Anhang
dargestellt ist. Das Beschreibungsblatt für Funktionen unterscheidet sich ledig-
lich dadurch von dem für Komponenten, dass nachfolgende Kategorien nicht
berücksichtigt werden:

- „Domänenzuordnung“,
- „direkte (physikalische) Verknüpfungen zu Komponenten gemäß Design
Structure Matrix Systemkomponenten (DSM Sk)“ und „Anzahl an Do-
mänen, mit denen eine direkte (physikalische) Verknüpfung besteht“,
- „Redundanzen (redundante Komponente, bezüglich welcher Funktion,
welcher Art von Redundanz)“.

Die in Abbildung 42 dunkelgrau markierten Spalten „Informationen mit Zuverlässigkeitsrelevanz“ tragen dabei dieselben bereits aus Abbildung 38 bekannten Bezeichnungen „fortl. Nr.“, „Bezeichnung“, „Beschreibung“, „Wert“, „Einheit“ und „Anzahl Informationsverknüpfungen“.

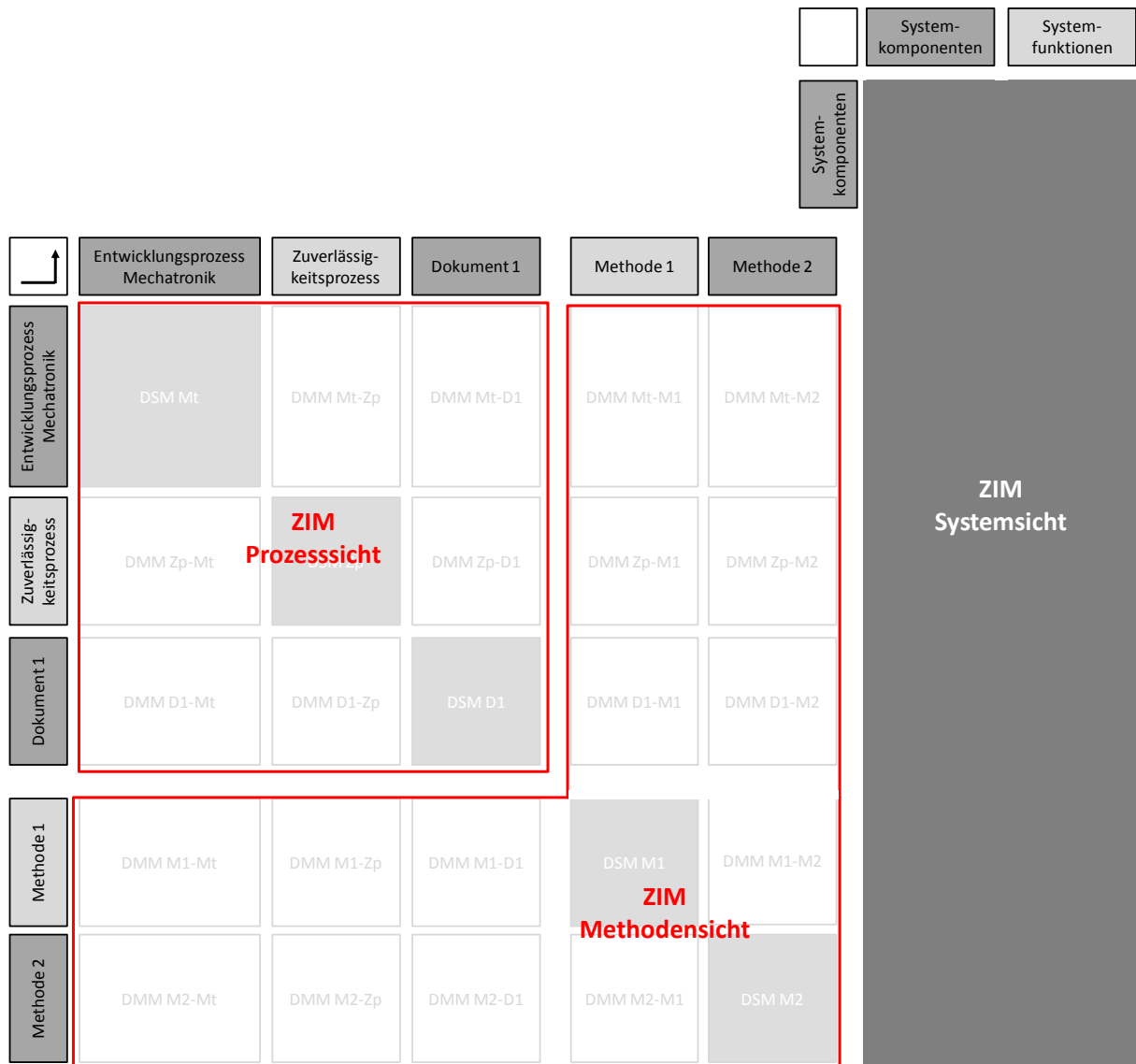


Abbildung 41: Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM - Systemsicht im matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell

Das Detail-Beschreibungsblatt für Komponenten (beziehungsweise analog für Funktionen) umfasst neben der Bezeichnung der Komponente (Funktion) eine Kurzbezeichnung, welche im einfachsten Fall aus einer fortlaufenden Nummerierung bestehen kann und so die Verbindung zum matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell herstellt. Unter „Domänenzuordnung“ ist zu verzeichnen, ob es sich bei der betrachteten Komponente um eine domänenübergreifende Komponente (zum Beispiel das Gesamtsystem) oder um eine mechanische, elektronische oder Software-Komponente handelt. Dies entfällt für Funktionen. In der Kategorie „direkte (physikalische) Verknüpfung zu Komponenten gemäß Design Structure Matrix Systemkomponenten (DSM Sk)“

Bezeichnung der Komponente									
Domänenzuordnung									
Kurzbezeichnung der Komponente									
direkte (physikalische) Verknüpfung zu Komponenten gemäß DSM SK									
Anzahl an Domänen, mit denen eine direkte (physikalische) Verknüpfung besteht									
indirekte (funktionale) Verknüpfung zu Komponenten gemäß DMM SK-SF									
Anzahl an Domänen, mit denen eine indirekte (funktionale) Verknüpfung zu Komponenten besteht									
Redundanzen (redundante Komponente, bzgl. welcher Fkt., welche Art von Redundanz)									
Zuverlässigkeitsmodelle									
Informationen mit Zuverlässigkeitsrelevanz									
Entwicklungsprozess Mechatronik									
Eingang			Info. m. Zuv-Relevanz				Ausgang		
Mt_+fortl. Nr.	BEG _I	DPG _I							Domäne/Methode inkl. fortl. Nr.
Entwicklungsprozess Mechanik									
Eingang			Info. m. Zuv-Relevanz				Ausgang		
Me_+fortl. Nr.	BEG _I	DPG _I							Domäne/Methode inkl. fortl. Nr.
Entwicklungsprozess Elektronik									
Eingang			Info. m. Zuv-Relevanz				Ausgang		
El_+fortl. Nr.	BEG _I	DPG _I							Domäne/Methode inkl. fortl. Nr.
Entwicklungsprozess Software									
Eingang			Info. m. Zuv-Relevanz				Ausgang		
SW_+fortl. Nr.	BEG _I	DPG _I							Domäne/Methode inkl. fortl. Nr.
Dokumente									
Eingang			Info. m. Zuv-Relevanz				Ausgang		
Dokument_+fortl. Nr.	BEG _I	DPG _I							Domäne/Methode inkl. fortl. Nr.
Zuverlässigkeitsprozess									
Eingang			Info. m. Zuv-Relevanz				Ausgang		
Zuv_+fortl. Nr.	BEG _I	DPG _I							Domäne/Methode inkl. fortl. Nr.
Methodenergebnisse									
Eingang			Info. m. Zuv-Relevanz				Ausgang		
Methode_+fortl. Nr.	BEG _I	DPG _I							Domäne/Methode inkl. fortl. Nr.
weitere Informationen									
Eingang			Info. m. Zuv-Relevanz				Ausgang		
	BEG _I	DPG _I							Domäne/Methode inkl. fortl. Nr.

Abbildung 42: Detail-Beschreibungsblatt für Komponenten

sind alle nach Design Structure Matrix Systemkomponenten (DSM Sk) direkt, das heißt physikalisch verknüpften Komponenten abzubilden. Durch diese Verknüpfung kann für Analysezwecke auf die jeweiligen Komponenten zurückgegriffen werden. Auch dies entfällt für Funktionen. Für die Domäne

„Software“ ist als direkte Verknüpfung die Verknüpfung zur Domäne „Elektronik“ zu sehen, auch wenn diese streng genommen nicht „physikalisch“ ist. Gemäß dem vereinfachten sogenannten Schichtenmodell, siehe [Ber et al.09], kann nur für die Domäne Elektronik eine Verknüpfung mit zwei Domänen existieren, siehe Abbildung 43.

In der Kategorie „indirekte (funktionale) Verknüpfung zu Komponenten gemäß Domain Mapping Matrix Systemkomponenten-Systemfunktionen (DMM Sk-Sf)“ werden alle die Komponenten abgebildet, welche gemeinsam mit der betrachteten Komponente an der Ausführung einer Funktion beteiligt sind. Dies können im Gegensatz zu direkten Verknüpfungen Komponenten von bis zu drei Domänen sein. Analytisch ist wie folgt vorzugehen: es sind mithilfe der Domain Mapping Matrix Systemkomponenten-Systemfunktionen (DMM Sk-Sf) die Funktionen zu ermitteln, an denen die betrachtete Komponente beteiligt ist. Für jede dieser Funktionen sind nun in derselben Domain Mapping Matrix Systemkomponenten-Systemfunktionen (DMM Sk-Sf) wiederum alle die Komponenten zu ermitteln, die für die Umsetzung der Funktion notwendig sind. Hierdurch lassen sich alle indirekt verknüpften Komponenten ermitteln. Beispielhaft soll dies an der Domain Mapping Matrix Systemkomponenten-Systemfunktionen (DMM Sk-Sf) in Abbildung 44 erläutert werden:

Komponente 2 ist an den Funktionen 1, 3 und 5 beteiligt und somit indirekt mit den Komponenten 5 (über Funktion 1, 3 und 5), 3 (über Funktion 3) sowie 4 und 6 (über die Funktion 5) verbunden.

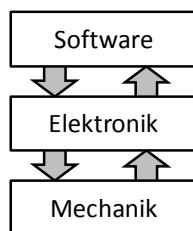


Abbildung 43: Mechatronisches Schichtenmodell in Anlehnung an [Ber et al.09]

	Funktion 1	Funktion 2	Funktion 3	Funktion 4	Funktion 5	Funktion 6
Komponente 1				X		X
Komponente 2	X		X		X	
Komponente 3			X	X		
Komponente 4		X			X	X
Komponente 5	X		X		X	X
Komponente 6		X			X	
Komponente 7		X				X

Abbildung 44: Beispielhafte Domain Mapping Matrix Systemkomponenten-Systemfunktionen (DMM Sk-Sf) zur Erläuterung indirekter (funktionaler) Verknüpfungen

Somit kann direkt auf die Informationen der betreffenden indirekt verknüpften Komponenten über deren Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM - System-sicht (Komponenten) sowie auf die der Funktionen über deren Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM - Systemsicht (Funktionen) zugegriffen werden.

Die Kategorien „Redundanzen“ und „Zuverlässigkeitsmodelle“ sind an exponierter Stelle des „Detail-Beschreibungsblattes für Komponenten“ dazu vorge-

sehen, einen Überblick über die wesentlichsten zuverlässigkeitsrelevanten Charakterisierungen von Komponenten zu vermitteln.

In der Kategorie „Redundanzen“ werden alle mit der entsprechenden Komponente (gilt nicht für Funktion) redundante Komponenten aufgelistet. Dies können prinzipiell alle Komponenten sein, mit denen die entsprechende Komponente funktional verknüpft ist. Um die Art der Redundanz detailliert beschreiben zu können, sind ferner Angaben über die Bezeichnung der redundanten Komponente notwendig, die beschreiben, bezüglich welcher Funktion diese Redundanz besteht und welcher Art diese Redundanz ist (2 aus 3-Redundanz, kalte/warme Redundanz et cetera). Die Ermittlung von Redundanzen erfolgt innerhalb des Zuverlässigkeitsprozesses beziehungsweise in entsprechenden Zuverlässigkeitsmethoden. Die Kategorie „Zuverlässigkeitsmodelle“ stellt verschiedene, für diese Komponente (Funktion) verfügbare Zuverlässigkeitsmodellierungen, zum Beispiel ein Zuverlässigkeitsblockschaltbild, einen Fehler- oder Ereignisbaum, Markov-Modellierungen u.v.m. dar.

So folgt anschließend an die „Zuverlässigkeitsmodelle“ eine „lose“ Informationssammlung zuverlässigkeitsrelevanter Erkenntnisse über die Komponente (Funktion), für die jedoch zur Wahrung der Übersichtlichkeit eine entsprechende inhaltliche oder alternativ zu entwickelnde Kategorisierung einzuführen ist.

Beispielhaft wurde hierzu eine entwicklungsabhängige Kategorisierung entwickelt, die den Aufbau des matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodells als Basis heranzieht. Somit ergeben sich (siehe Abbildung 42) folgende Kategorien, die die Herkunft der abgelegten Informationen widerspiegeln:

- Entwicklungsprozess Mechatronik,
- Entwicklungsprozess Mechanik,
- Entwicklungsprozess Elektronik,
- Entwicklungsprozess Software,
- Dokumente,
- Zuverlässigkeitsprozess,
- Methodenergebnisse,
- weitere Informationen.

Hierin werden die eingehenden Informationen (mit Kurzbezeichnung und fortlaufender Nummer des Herkunftsschrittes) in den Spalten zu „Informationen mit Zuverlässigkeitsrelevanz“ mit „fortl. Nr.“, „Bezeichnung“, „Beschreibung“, „Wert“, „Einheit“ und „Anzahl Informationsverknüpfungen“ abgelegt. Für den Fall, dass diese Information weiterverwendet werden sollte, ist diese auch als „Ausgangsinformation“ zu führen und die annehmende Quelle (Methoden-/ Prozessschritt, Dokument et cetera) mit fortlaufender Nummer zu verzeichnen. Nur so kann eine Transparenz und Nachvollziehbarkeit des Informationsflusses ermöglicht werden. Der Abschnitt „weitere Informationen“ steht als offenes Element zur Verfügung, um auch wesentliche zuverlässigkeitsrelevante Daten,

wie beispielsweise geometrische Daten aus EDM- oder PDM-Systemen, einzubinden. Ferner können hier Größen abgelegt werden, die mit der eigentlichen Komponentenentwicklung direkt nichts zu tun haben, die Zuverlässigkeit einer Komponente (Funktion) dennoch beeinflussen, zum Beispiel Informationen über Fertigung und Montage.

Folgende Faktoren charakterisieren die informationstechnische Einbindung und Stellung der Komponente (Funktion) in der mechatronischen Produktentwicklung:

- Mechatronisierungsgrad (MG) für den „Eingang“: Dieser ergibt sich gemäß Gl. 6.1 und lässt sich beim Aufbau des Detail-Beschreibungsblattes aus Abbildung 42 sehr einfach ermitteln, da die Informationen entsprechend ihrer Herkunft abgelegt sind.
- Dokumentenverknüpfungsgrad (DKG) für den „Eingang“: Ermittelt sich nach Gl. 6.9 und stellt dar, wie stark die Komponente (Funktion) mit entwicklungsbegleitenden Informationen verknüpft ist. Zudem zeigt der Dokumentenverknüpfungsgrad DKG in Bezug zur gesamten Anzahl für diese Komponente (Funktion) vorhandener zuverlässigkeitsrelevanter Informationen auf, wie hoch der Anteil zuverlässigkeitsrelevanter Informationen für diese Komponente (Funktion) ist, der in begleitenden Dokumenten abgelegt ist.
- Methodenverknüpfungsgrad (MKG) für den „Eingang“: dieser zeigt an, welchen Anteil die Informationen, die aus Zuverlässigkeitsinformationen stammen, im Verhältnis zu allen Informationen der Komponente (Funktion) haben. Aufgrund der Tatsache, dass Zuverlässigkeitsmethoden zur Lösung spezifischer Probleme eingesetzt werden, kann der Methodenverknüpfungsgrad MKG auch ein Indiz für die Kritikalität einer Komponente (Funktion) sein.
- Diskrepanzgrad (DPG_i): Der Diskrepanzgrad der Komponente (Funktion) i ermittelt sich nach Gl. 6.6 und gibt Aufschluss über den Anteil der zuverlässigkeitsrelevanten Informationen der Komponente (Funktion) i , die inhaltlich von anderen Informationen (derselben Komponente/Funktion oder direkt/indirekt verknüpfter Komponenten/Funktionen) abweichen und somit ein Entwicklungsrisiko aus Sicht der Zuverlässigkeit darstellen, da sich eine Diskrepanz und somit eine Zweideutigkeit im Laufe der Entwicklung ergeben hat. Solche Diskrepanzen können einen wesentlichen Anteil am zuverlässigkeitskritischen Verhalten mechatronischer Systeme haben und sind somit unverzüglich zu beheben.
- Beeinflussungsgrad (BEG_i): Der Beeinflussungsgrad der Komponente (Funktion) i ermittelt sich nach Gl. 6.8 und ermöglicht eine Aussage über den Anteil der zuverlässigkeitsrelevanten Informationen der Komponente (Funktion) i , die mit anderen Informationen (derselben Komponente/Funktion oder direkt/indirekt verknüpfter Komponenten/Funktionen) zusammen- beziehungsweise von diesen abhängen und gibt somit Auf-

schluss über die Intensität, mit der zuverlässigkeitsrelevante Änderungen tendenziell verbunden sind - insbesondere in Bezug zu anderen Komponenten (Funktionen). Dieser Wert ist eine relevante Größe, um die Einflüsse auf die anderen Informationen nachzuvollziehen, wenn sich die betreffende Information ändern sollte.

Die Einführung der verschiedenen Faktoren ermöglicht zahlreiche Analysen und Indikationen, die zur Erreichung einer hohen Systemzuverlässigkeit bei komplexen mechatronischen Systemen verhelfen können und ferner den Aufbau eines Zuverlässigkeitsinformationsmodells zur Wissensentwicklung (ZIM-We) unterstützen. Diese Indikatoren werden nachfolgend kurz erläutert.

Ein Indiz für eine unausgewogene Einbindung der Komponentenentwicklung aus mechatronischer Sicht kann bestehen, wenn der Mechatronisierungsgrad MG geringer als die Anzahl der Domänen indirekt verknüpfter Komponenten ist. Hier muss überprüft werden, ob nicht aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht Informationen von indirekt verknüpften Komponenten in das Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM der betroffenen Komponente (Funktion) einfließen müssen, um die bestehende Verknüpfung zu berücksichtigen. Diese Situation kann somit ein Indiz sein, dass bisher die Notwendigkeit zur Berücksichtigung bestimmter Komponenten aufgrund mangelnder Betrachtung der funktionalen Verknüpfung vernachlässigt wurde.

Der Dokumentenverknüpfungsgrad DKG dient im relativen Vergleich mit allen anderen Systemkomponenten (Systemfunktionen) dazu, einen Eindruck zu gewinnen, inwiefern die zuverlässigkeitsrelevanten Komponenteninformationen mit entwicklungsbegleitenden Dokumenten verknüpft sind. Ein hoher Dokumentenverknüpfungsgrad DKG kann somit sicherstellen, dass ein geeignetes Maß an zuverlässigkeitsrelevanten Informationen auch in Dokumenten repräsentiert ist, die beispielsweise zur Auftragsvergabe an Lieferanten verwendet werden (zum Beispiel Lastenhefte et cetera). Im relativen Vergleich zueinander stechen zudem Komponenten (Funktionen) mit einem über- oder unterdurchschnittlich hohen Dokumentenverknüpfungsgrad DKG heraus. In diesen Fällen ist zu überprüfen, ob die entsprechenden Abweichungen zwingend und nachvollziehbar sind. Auf Dauer kann das Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM die bestehenden Dokumente in zuverlässigkeitstechnischer Hinsicht ergänzen, so dass die Aussagekraft des Dokumentenverknüpfungsgrades DKG zurückgehen wird.

Der Methodenverknüpfungsgrad MKG ist ein Indiz für die Kritikalität einer Komponente unter Berücksichtigung der Tatsache, dass Methoden üblicherweise zur gezielten Problemlösung eingesetzt werden. Ein hoher Methodenverknüpfungsgrad MKG lässt den Schluss zu, dass die Komponente tendenziell zuverlässigkeitskritisch ist (entweder aufgrund ihrer Eigenschaften oder ihres Einsatzes im System im Hinblick auf ein Zuverlässigkeitsmodell). In einem solchen Fall ist zu überprüfen, ob die Qualität der entsprechenden Informatio-

nen der vermeintlichen Kritikalität der Komponente (Funktion) gewachsen ist. Generell dient der Methodenverknüpfungsgrad MKG als relatives Vergleichskriterium aller Komponenten (Funktionen) zueinander. Bei diesem Vergleich auffällige Komponenten (Funktionen) mit stark vom Durchschnitt abweichendem Methodenverknüpfungsgrad MKG sind detaillierter zu analysieren.

Der Diskrepanzgrad (DPG_i) wird ungleich null, sobald der Diskrepanzgrad DPG einer neu hinzugefügten Information ungleich null ist. Im Fall, dass der Diskrepanzgrad DPG ungleich null wird, ist dies umgehend zu beheben und bei den betreffenden Informationen zu analysieren, wie dies erfolgen kann. Hierzu kann auch die Metainformation „Anzahl Informationsverknüpfungen“ Aufschluss geben, da zur Behebung der Diskrepanz entlang der bisherigen Informationskette gesucht und analysiert werden muss.

Der Beeinflussungsgrad (BEG_i) gibt Aufschluss über die Tatsache, ob beziehungsweise wie sehr die über diese Komponente (Funktion) vorliegenden Informationen mit anderen Informationen in Abhängigkeit stehen. Insofern ist der Beeinflussungsgrad BEG ein Indiz dafür, wie stark die Auswirkungen auf andere Komponenten (Funktionen) sein könnten, wenn sich Informationen der Komponente (Funktion) ändern. Insbesondere in Verbindung mit einem hohen Mechatronisierungsgrad MG steigt das Aufwandsrisiko bei Informationsänderungen weiter an.

Jede Komponente ist durch eine Vielzahl charakterisierender Eigenschaften gekennzeichnet, siehe Tabelle 12. Die charakterisierenden Eigenschaften einer Funktion finden sich im Anhang in Tabelle 18.

Tabelle 12: Charakterisierende Eigenschaften einer Komponente

Bezeichnung der Komponente
Domänenzuordnung
Kurzbezeichnung der Komponente
direkte (physikalische) Verknüpfung zu Komponenten gemäß DSM Sk Anzahl an Domänen, mit denen eine direkte (physikalische) Verknüpfung besteht
indirekte (funktionale) Verknüpfung zu Komponenten gemäß DMM Sk-Sf Anzahl an Domänen, mit denen eine indirekte (funktionale) Verknüpfung zu Komponenten besteht
Redundanzen (redundante Komponente, bezüglich welcher Funktion, welche Art von Redundanz)
Zuverlässigkeitsmodelle
Informationen mit Zuverlässigkeitsrelevanz
Eingang Domäne/ Methode inkl. fortl. Nr.; BEG_i ; DPG_i
Informationen mit Zuverlässigkeitsrelevanz fortl. Nr.; Bezeichnung; Beschreibung; Wert; Einheit; Anzahl Informationsverknüpfungen
Ausgang Domäne/ Methode inkl. fortl. Nr.
Mechatronisierungsgrad MG
Dokumentenverknüpfungsgrad DKG
Methodenverknüpfungsgrad MKG
Diskrepanzgrad DPG_{ki}
Beeinflussungsgrad BEG_{ki}

Die verschiedenen eingeführten Faktoren finden Anwendung im Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We, weshalb an dieser Stelle insbesondere noch auf die Abschnitte 6.2.1 bis 6.2.3 verwiesen wird.

6.1.4 Zuverlässigkeitsinformationsmodell und matrizenbasiertes Informationsverknüpfungsmodell

Wie in Abschnitt 6.1 beschrieben existieren enge Verbindungen zwischen den verschiedenen Sichten des ZIM. Durch die aktive Einbindung des matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodells über die Ein- und Ausgänge der jeweiligen Zuverlässigkeitsinformationsmodelle ZIM ist auch eine Nachvollziehbarkeit des Informationsflusses jederzeit gewährleistet.

Das matrizenbasierte Informationsverknüpfungsmodell wird aktiv dazu verwendet, die neu erzeugten, veränderten oder angepassten Informationen auch an die Stellen der Prozesse zurückzuspiegeln, von denen sie entnommen wurden. Das Vorgehen hierzu ist detailliert in Abschnitt 5.1.2 sowie in Tabelle 6 beschrieben. Nur auf diese Weise lässt sich erreichen, dass von dieser Stelle jede weitere Verzweigung des Informationsflusses aufgespürt und somit die unter Umständen aus Sicht der Systemzuverlässigkeit äußerst wichtige Änderung nachvollzogen werden kann. Dies ist ein weiterer Schritt von einem reinen „pull-orientierten“ hin zu einem „push-orientierten“ Informationsfluss.

Im Wesentlichen sind drei verschiedene Fälle zu unterscheiden, bei denen dieses Vorgehen Anwendung finden sollte:

- nach jedem Prozessschritt,
- beim Abschluss einer angewendeten Zuverlässigkeitsmethode,
- beim Auftreten von Diskrepanzen im Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM - Systemsicht.

Nach dem Abschluss einer Zuverlässigkeitsmethode wie auch nach jedem Schritt des Zuverlässigkeitsprozesses liegt ein veränderter oder angereicherter Informationsstand vor, der auf den bisherigen Informationen aufbaut. Beim Auftreten von Diskrepanzen im Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM ist zu deren Behebung eine Änderung (Anpassung) mindestens einer der diskrepanzhaften Informationen zwingend.

Das notwendige Vorgehen ist dabei in allen drei Fällen identisch: Ausgehend von den verzeichneten Eingangsinformationen lassen sich die jeweiligen Prozessschritte ermitteln. An diesen Punkt wird zurückgesprungen, um von dort aus unter Zuhilfenahme des matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodells die von diesem Punkt ausgehenden weiteren Verzweigungen zu finden, an welche die entsprechende Information weitergeleitet wurde. Diesen verschiedenen Pfaden ist zu folgen, um dort jeweils zu überprüfen, ob und inwie-

fern die geänderte beziehungsweise angereicherte Information Berücksichtigung finden muss.

Sollte keine Berücksichtigung zwingend sein, wird so lange weiterverfahren bis das aktuelle Ende des jeweiligen Informationsflusspfades erreicht ist. Sollte hingegen an einem Prozessschritt eine Berücksichtigung der neuen beziehungsweise angereicherten Information notwendig sein, ist von diesem Punkt aus entsprechend auf gleiche Weise weiter zu verfahren, das heißt an allen Prozessschritten der Eingangsinformationen. Das Vorgehen ist so lange zu wiederholen, bis alle relevanten Prozessschritte identifiziert wurden und somit sichergestellt ist, dass an allen Prozessschritten nun wieder von gleichen Voraussetzungen bezüglich Informationsaktualität ausgegangen werden kann. Bei diesem Vorgehen ist Dokumenten eine besondere Aufmerksamkeit zu schenken, da Dokumente aktuell vielfältig verteilt und somit gegebenenfalls falsche Informationen weiterverbreitet werden, wodurch sich zuverlässigkeitskritische Systemzustände ergeben können, die unter Umständen erst deutlich später in der Entwicklung zu Tage treten.

6.2 Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung

Eine Herausforderung besteht darin, die gesammelten Informationen und Erkenntnisse so aufzubereiten und darzustellen, dass zuverlässigkeitsrelevantes Wissen für zukünftige Systementwicklungen und Entscheidungen entwickelt werden kann. Hierzu soll das in den folgenden Abschnitten vorgestellte Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung (ZIM-We) dienen. Es stellt Ansätze dar, die verschiedenen Zuverlässigkeitsinformationsmodelle ZIM zum Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We weiterzuentwickeln. Abbildung 45 verdeutlicht die Zusammenhänge zwischen Daten, Zuverlässigkeitsinformationsmodell (ZIM) und Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung (ZIM-We).

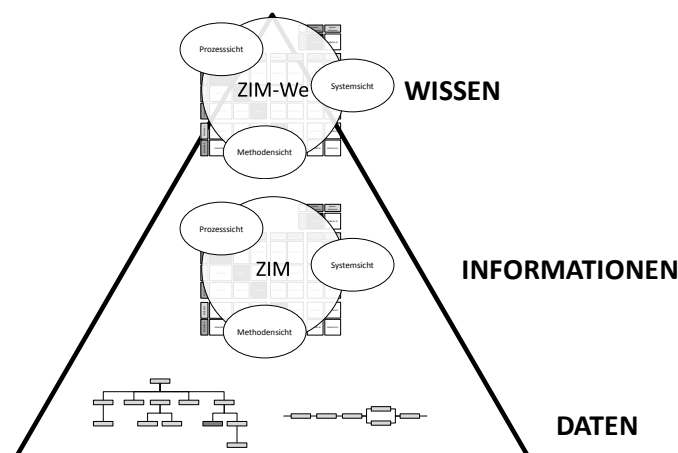


Abbildung 45: Zuverlässigkeitsinformationsmodell als Bindeglied zwischen Daten und Wissen (Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung, ZIM-We)

Das Ziel ist hierbei weniger, ein vollständig anwendbares Wissensmodell darzustellen als vielmehr Möglichkeiten aufzuzeigen, wie, ausgehend von dem Zuverlässigkeitsinformationsmodell (ZIM), Wissen generiert werden kann. Beispielsweise kann so die Erstellung von Entwicklungs- oder Zuverlässigkeitsmustern unterstützt werden. Als Muster werden dabei wiederverwendbare Vorgehensweisen in der Entwicklung und Systemkonzepte verstanden, durch deren Anwendung üblicherweise eine bestimmte Zielzuverlässigkeit des Systems erreicht werden kann. Durch die Weiterführung der drei Sichten Prozess-, Methoden- und Systemsicht bieten Muster oder Wissensmodelle die Möglichkeit, sowohl über immer wieder angewendete Prozesse als auch verschiedene System(entwicklungen) detailliertere Zusammenhänge abzuleiten beziehungsweise den Einsatz von Methoden im Entwicklungsprozess zu optimieren. Somit zielt das Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We in erster Linie darauf ab, Tendenzen durch das Sammeln und Auswerten über verschiedene Entwicklungszyklen hinweg aufzuzeigen und so im Sinne einer Prognose Zusammenhänge ableiten zu können. Zur konkreten Zuverlässigkeitssteigerung einer Entwicklung bezüglich Prozess, Methodeneinsatz oder System kann ein entwickeltes und über mehrere Entwicklungszyklen gefülltes Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We in Verbindung mit dem Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM des zu verbessernden Systems herangezogen werden.

6.2.1 Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung - Prozesssicht

Wesentliche Größen, die zur Wissensentwicklung in Bezug auf den Entwicklungs- und Zuverlässigkeitsprozess mechatronischer Systeme sowie die entwicklungsbegleitenden Dokumente herangezogen werden können, wurden bereits in Abschnitt 6.1.1 im Rahmen des Zuverlässigkeitsinformationsmodells ZIM - Prozesssicht dargestellt.

Nachfolgend werden die Aussagen der einzelnen Größen aus der Perspektive zukünftiger Wissensmodelle kurz beleuchtet:

- Die Anzahl der Verknüpfungen eines Prozessschrittes (Dokumentenabschnittes) im matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell kann eine Aussage über dessen Relevanz in der zuverlässigkeitsorientierten Entwicklung bieten. Hierdurch lassen sich stark verknüpfte Prozessschritte mehr fokussieren.
- Prozessschritte (Dokumentenabschnitte), die stark in verschiedene mechatronische Domänen verbunden sind, zeichnen sich durch einen hohen Mechatronisierungsgrad MG aus. Gegebenenfalls kann diesen Schritten besondere Aufmerksamkeit zuteilwerden.
- Hat ein Prozessschritt einen hohen Methodenverknüpfungsgrad MKG und ist daher gegebenenfalls von oftmaligen Rückspiegelungen verän-

derter Informationen betroffen, was zu Iterationszyklen und neuen Herausforderungen im Entwicklungsablauf führt?

- Sind Prozessschritte stark informationsver- oder -entdichtend (Informationsverdichtungsgrad IDG) und ergeben sich dadurch Herausforderungen bezüglich Zuverlässigkeit?
- Haben Ausgangsinformationen eines bestimmten Prozessschrittes (Dokumentenabschnittes) einmal/häufig Diskrepanzgrade DPG ungleich Null hervorgerufen und bei welchen Komponenten, Funktionen oder Methoden?
- Sind Ausgangsinformationen eines Prozessschrittes (Dokumentenabschnittes) überdurchschnittlich häufig kritisch bezüglich weiterer Beeinflussungen (Beeinflussungsgrad BEG hoch)? Falls ja, bezüglich welcher Informationen tritt dieses Verhalten auf?

Die Auswertung der detaillierten Verknüpfungen im matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell erfolgt in Abhängigkeit des jeweiligen Systems und somit des entsprechenden Entwicklungsprozesses. Eine Übersicht der für jeden Prozessschritt dargestellten Größen für das Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We - Prozesssicht zeigt Abbildung 46.

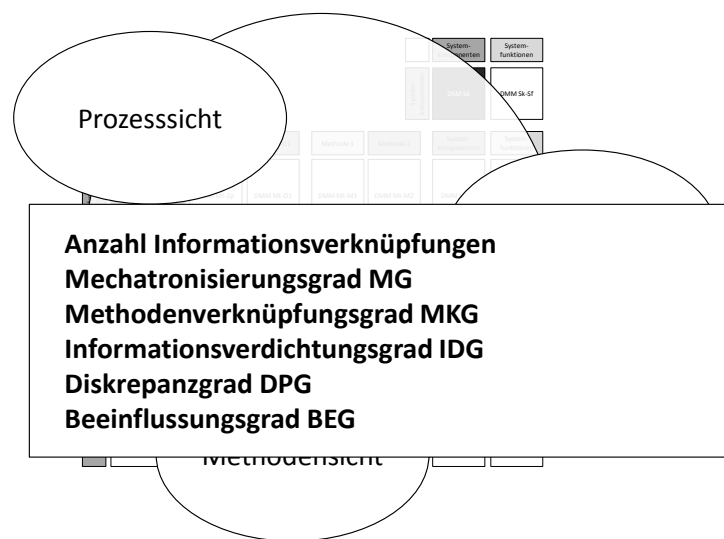


Abbildung 46: Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We - Prozesssicht

6.2.2 Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung - Methodensicht

Ein Wissensmodell zur Methodensicht kann den gezielten Einsatz und die Effizienz von Methoden in der Produktentwicklung verbessern helfen, um eventuell Zusammenhänge zwischen Methodeneinsatz sowie tatsächlich erreichter Systemzuverlässigkeit zu ermitteln.

Ein erster Schritt zum Aufbau eines solchen umfassenden Wissensmodells für Zuverlässigkeitsmethoden muss in der Berücksichtigung folgender Aspekte

liegen, die mittels des Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We - Methodensicht gesammelt werden können:

- Methodenergebnisse sind nach dem Durchführen von Zuverlässigkeitsmethoden in Abhängigkeit der Randbedingungen und der betrachteten Komponenten, Funktionen und Systeme (auch: Metainformationen) abzulegen und insbesondere in Abhängigkeit der tatsächlich erreichten Zuverlässigkeit zu bewerten. Hierdurch lassen sich gegebenenfalls Aussagen über die Effizienz der Methode ableiten.
- Für den Einsatz der Zuverlässigkeitsmethoden in zukünftigen Entwicklungsprozessen kann eine Sammlung von Informationen aufgebaut werden, die den Einsatz der Methode unterstützt und so das Erzielen möglichst vollständiger Methodenbetrachtungen erreichen kann. Als Beispiel sei hier genannt, aus einer bereits durchgeführten Quantitativen Konzeptbewertung QNK mögliche Fehler, deren Auftretenswahrscheinlichkeit und Ursachen in Abhängigkeit der Komponente, Funktion beziehungsweise des Systems abzulegen und für spätere Methodenanwendungen verfügbar zu halten.
- Durch die Analyse von Eingangs- und Ausgangsinformationen der verschiedenen Zuverlässigkeitsmethoden lassen sich eventuell auftretende Überschneidungen mit anderen Methoden aufdecken, die zu optimierter Abstimmung oder einer eventuellen Kombination von Methoden beziehungsweise einer Methodenneuentwicklung führen können. Entsprechende Analysen können durch die Betrachtung der zeitlichen und organisatorischen Abhängigkeiten im matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell unterstützt werden.
- Ein hoher Mechatronisierungsgrad MG kann eine erste Aussage über die Einbindung der verschiedenen mechatronischen Domänen in den einzelnen Methoden sein. Detailliertere Analysen sind jedoch bei Notwendigkeit angebracht.
- Der Dokumentenverknüpfungsgrad DKG ist ein Anzeichen für die Einbindung der Entwicklungsdokumente, welche im Entwicklungsprozess einen hohen Stellenwert besitzen. Ein hoher Dokumentenverknüpfungsgrad DKG stellt hierbei sicher, dass die Methode auf bekannte und abgesicherte Informationen zugreift und erhöht ihre Effizienz.
- Der Informationsverdichtungsgrad IDG lässt Aussagen über die Methode selbst zu. Ein geringer Informationsverdichtungsgrad IDG bedeutet eine Anreicherung beziehungsweise einen Aufbau zuverlässigkeitsrelevanter Information außerhalb der Methode, was üblicherweise zu einem besseren Verständnis der Komponente (Funktion) beziehungsweise des Systems führt. Ein hoher Informationsverdichtungsgrad IDG hingegen kennzeichnet Methodenschritte, welche bestehende Erkenntnisse verdichten und somit Entscheidungsfindungen aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht unterstützen können. Für die Optimierung der Methoden beziehungsweise des Methodeneinsatzes ist zudem eine kombinierte Be-

trachtung des Informationsverdichtungsgrades IDG mit Diskrepanzgrad DPG und Beeinflussungsgrad BEG in Erwägung zu ziehen.

- Die Höhe des Diskrepanzgrades DPG kann ein charakterisierendes Merkmal für die Qualität der Methodenergebnisse im Hinblick auf die Aufdeckung zuverlässigkeitskritischer Zusammenhänge darstellen.
- Der Zusammenhang zwischen Methodenergebnissen und Beeinflussungsgrad BEG kann als abgestufte Aussage des Diskrepanzgrades DPG betrachtet werden.

Neben dem Aufbau eines Wissenspools für die einzelnen Methoden eröffnet das Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We - Methodensicht Hilfsmittel, die eine Optimierung der Methoden oder deren Einsatzes zulassen können. Eine Übersicht der wesentlichen Größen des Zuverlässigkeitsinformationsmodells zur Wissensentwicklung ZIM-We - Methodensicht bietet Abbildung 47.

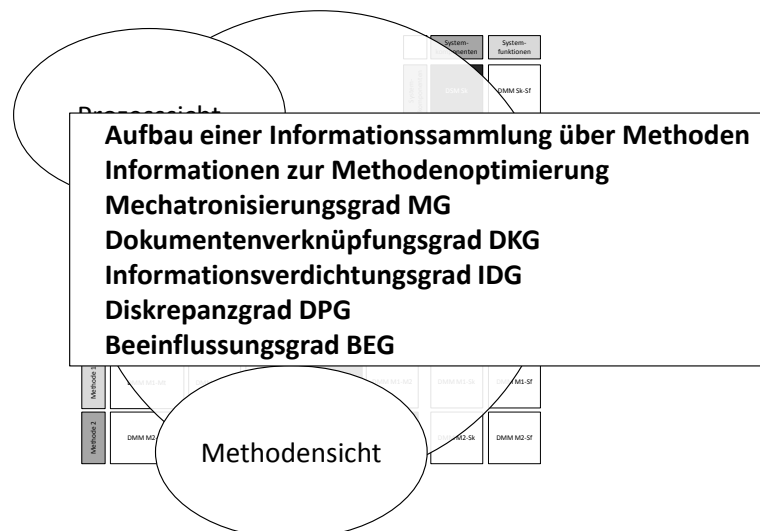


Abbildung 47: Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We - Methodensicht

6.2.3 Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung - Systemsicht

Zur Wissensentwicklung aus Systemsicht können mit dem Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM - Systemsicht in Verbindung mit dem matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell zwei unterschiedliche Schwerpunkte für Komponenten und Funktionen fokussiert werden:

- Einerseits wird die entwicklungsbegleitende Nachvollziehbarkeit der Zunahme von Informationen und somit der Aufbau von Wissen über einzelne Entwicklungsschritte - insbesondere in Verbindung mit den tatsächlich erreichten Systemzuverlässigkeiten - sichergestellt.
- Andererseits kann bei abgeschlossener Systementwicklung mithilfe des Zuverlässigkeitsinformationsmodells zur Wissensentwicklung ZIM-We -

Systemsicht ein Aufbau von Wissen über mehrere Entwicklungsprozesse hinweg erreicht und abgebildet werden.

Für den ersten Schwerpunkt wird ein sogenanntes Schritt-für-Schritt-Modell vorgeschlagen, das den aktuellen Stand der Zuverlässigkeitsinformationen einer Komponente (Funktion) in Abhängigkeit verschiedener Entwicklungsschritte und im relativen Vergleich mit anderen Komponenten (Funktionen) aufzeigt. Durch diese Sicht lässt sich einerseits die Zunahme der zuverlässigkeitsrelevanten Informationen über die einzelnen Phasen der Systementwicklung beziehungsweise unter Berücksichtigung der entsprechenden Faktoren auch deren Relevanz beurteilen. Andererseits lassen sich - wie bereits erwähnt - relative Vergleiche zu anderen Komponenten (Funktionen) anstellen. Als Basis eines solchen Schritt-für-Schritt-Modells dienen die in allen vorgestellten Zuverlässigkeitsprozessen beinhalteten Meilensteine (MS). Zu diesen Punkten werden die in den jeweiligen Entwicklungsschritten erzeugten Informationen „eingefroren“, die entsprechenden Faktoren ermittelt und ein Vergleich durchgeführt. Den prinzipiellen Aufbau eines solchen Schritt-für-Schritt-Modells stellt Abbildung 48 dar.

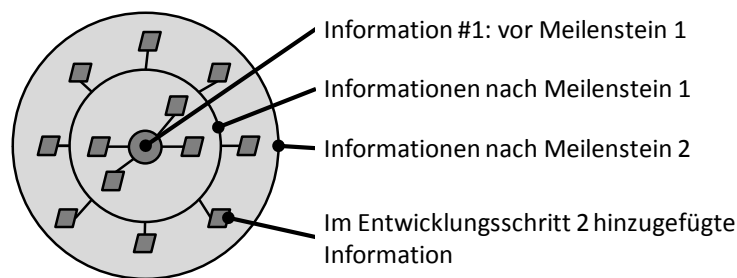


Abbildung 48: Prinzipieller Aufbau des Schritt-für-Schritt-Modells für Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We - Systemsicht nach zwei erreichten Meilensteinen

Folgende Analysen und Betrachtungen können an den jeweiligen Meilensteinen durchgeführt werden:

- Feststellen der Anzahl Informationsverknüpfungen, von Beeinflussungsgrad BEG und Diskrepanzgrad DPG sowie Analyse der Entwicklung über die Meilensteine hinweg.
- Abgleich von Dokumentenverknüpfungsgrad DKG, Methodenverknüpfungsgrad MKG und Vollständigkeit der Informationen in Relation zu anderen Komponenten oder Funktionen.

Im zweiten Schwerpunkt steht der Aufbau eines Wissenspools zuverlässigkeitsrelevanter Informationen für verschiedene Komponenten und Funktionen über mehrere Produktentwicklungen hinweg im Fokus. Die Aspekte, welche hierzu beitragen können, werden nachfolgend kurz dargestellt. Allgemein gilt, dass diese erst in Zusammenhang mit der tatsächlich erreichten Zuverlässig-

keit, den im Feld aufgetretenen Problemen et cetera ihre umfassende Aussagekraft erreichen.

- Über die reinen Informationen während der Entwicklung der Komponenten (Funktionen) hinaus sind vor allem die tatsächlich erreichte Zuverlässigkeit sowie die Kombination beider Aspekte für ein Modell zur Wissensentwicklung wesentlich (zum Beispiel tatsächlich erreichte Zuverlässigkeit in Verbindung mit eingebauter Redundanz et cetera). Zudem ist die tatsächlich erreichte Zuverlässigkeit kombiniert mit weiteren Informationen, die über die Informationen während der Entwicklung hinausgehen, für das Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We - Systemsicht relevant. Das können beispielsweise Informationen über die Fertigung, Montage sowie detaillierte Zuverlässigkeitsinformationen aus dem Feldeinsatz (zum Beispiel welche Fehler tatsächlich wie oft aufgetreten sind) sein. Diese sind entsprechend ins Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We - Systemsicht einzupflegen (beziehungsweise eine Schnittstelle zu entsprechenden Datenbanken oder Werkzeugen wie FRACAS bereitzustellen). Nur in Kombination von zuverlässigkeitsrelevantem Entwicklungswissen aus dem Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We - Systemsicht mit eben beschriebenen Informationen und Daten lässt sich eine zusammenhängende und umfassende Wissensentwicklung vorantreiben, wie sie zum Aufbau von Zuverlässigkeitsmustern benötigt wird.
- Der Mechatronisierungsgrad MG kann insbesondere in Verbindung mit einem Abgleich der direkten (indirekten) Verknüpfungen, der tatsächlich erreichten Zuverlässigkeit und den im Feld aufgetretenen, auf mechatronischen Zusammenhängen beruhenden Fehlern und Zuverlässigkeitsproblemen eine Aussage über den Einfluss der domänenübergreifenden Verknüpfungen einzelner Komponenten (Funktionen) leisten.
- Der Dokumentenverknüpfungsgrad DKG lässt abschließende relative Aussagen im Vergleich mit anderen Komponenten (Funktionen) zu. In Verbindung mit relativen Vergleichen der tatsächlich erreichten Zuverlässigkeiten können gegebenenfalls Aussagen über die Relevanz von Dokumenten, über eine Optimierung des Dokumentenumfanges beziehungsweise die Dokumentendetaillierung in der Entwicklung getroffen werden.
- Der Methodenverknüpfungsgrad MKG lässt Aussagen über die Möglichkeit zur Beeinflussung der Zuverlässigkeit von Komponenten (Funktionen) durch Methoden zu - insbesondere wenn die tatsächlich erreichten Zuverlässigkeiten zwischen den Entwicklungsprozessen gleicher Komponenten (Funktionen) mit unterschiedlichem Methodeneinsatz verglichen werden können. Durch eine umfassende Anwendung von Zuverlässigkeitsmustern könnte langfristig der Methodeneinsatz optimiert (zum Beispiel punktuell oder flächendeckend reduziert) werden.

- Neben der reinen Höhe des Diskrepanzgrades DPG in Zusammenhang mit der tatsächlich erreichten Zuverlässigkeit können Analysen bezüglich inhaltlicher Abhängigkeiten zwischen den entdeckten Diskrepanzen und aufgetretenen Fehlern durchgeführt werden.
- Der Beeinflussungsgrad BEG bietet eine Aussage über die Intensität der gegenseitigen Beeinflussung komponenten-/funktionsspezifischer Informationen sowie in einer zusammenhängenden Analyse mit der erreichten Zuverlässigkeit über prinzipielle Abhängigkeiten.

Generell sollte eine Wissensdatenbank aus Zuverlässigkeitssicht Aussagen über die erreichbaren Zuverlässigkeiten von Komponenten (Funktionen) in Abhängigkeit der verschiedenen (prozess)technischen Umsetzungen sowie des dafür notwendigen Aufwandes zulassen können. Eine Übersicht der wesentlichen Größen für das Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We - Systemsicht bietet Abbildung 49.

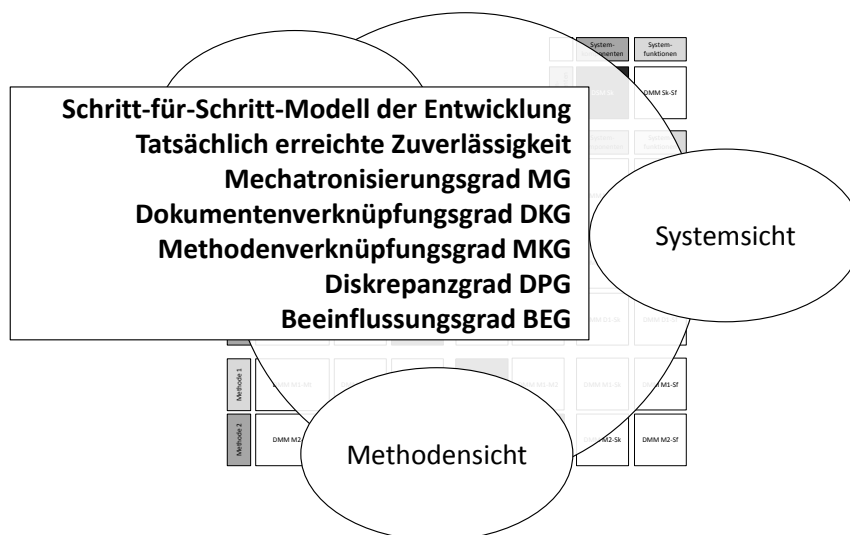


Abbildung 49: Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We - Systemsicht

6.3 Zuverlässigkeitsinformationsmodelle und Systemlandschaft

Wie in den einzelnen Abschnitten des Kapitels 6 bereits dargestellt, sind Anbindungen des Zuverlässigkeitsinformationsmodells ZIM an verschiedene Systeme der bestehenden Systemlandschaft notwendig und sinnvoll.

Aufgrund der Zuverlässigkeitsrelevanz einzelner komponentenspezifischer Aspekte ist die Einbindung von Entwicklungsdaten- oder Produktdatenmanagement-Systemen (EDM-/PDM-Systeme) sinnvoll. So kann es beispielsweise der Fall sein, dass dort abgelegte geometrische Größen, wie Materialstärke, Fläche et cetera als relevant im Sinne der Zuverlässigkeit anzusehen sind und somit die Auswirkungen etwaiger Änderungen über das Zuverlässig-

keitsinformationsmodell ZIM - Systemsicht auch auf andere direkt oder indirekt verknüpfte Komponenten überprüft werden müssen.

Zur Einbindung tatsächlich aufgetretener Ausfälle und Fehler sollte ein eventuell eingesetztes „Failure Reporting, Analysis and Corrective Action System“ (FRACAS) mit dem Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM - Systemsicht und insbesondere auch mit dem Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We - Systemsicht verknüpft werden.

Inhaltliche und systematische Schnittstellen wurden in den vorherigen Kapiteln aufgezeigt, eine technische Umsetzung hingegen ist abhängig vom technischen Aufbau eines Zuverlässigkeitsinformationsmodells ZIM. Durch den Zugriff auf standardisierte Schnittstellen sind hieraus jedoch keine Einschränkungen zu erwarten.

Auf Ansätze zur technischen Umsetzung eines Zuverlässigkeitsinformationsmodells ZIM wird in nachfolgendem Abschnitt 6.4 eingegangen.

6.4 Technische Umsetzung des Zuverlässigkeitsinformationsmodells

Der Grundaufbau einer technischen Umsetzung des matrizenbasierten Informationsverknüpfungs- und Zuverlässigkeitsinformationsmodells erfolgt idealerweise im Rahmen einer Drei-Ebenen-Architektur, bestehend aus externer, konzeptueller und interner Ebene. Diese wurde von ANSI/SPARC vorgeschlagen und ist in [Krc10] beschrieben.

Dabei beschreibt die externe Ebene die anwendungsspezifische Sicht auf die Struktur des Informationsbestandes. Das bedeutet, dass lediglich mit einem spezifischen Teilausschnitt des Informationsbestandes gearbeitet wird. In der konzeptuellen Ebene werden Informationen (als Objekte oder Entitäten) und deren Beziehungen und Abhängigkeiten (als relationships) beschrieben, zum Beispiel durch eine objektorientierte (OO) oder eine Entity-Relationship-Modellierung (ERM). Auf der internen Ebene hingegen wird beschrieben, wie die Informationen physisch zu behandeln oder abzuspeichern sind, beziehungsweise wie wieder auf sie zugegriffen werden kann.

In der externen Ebene sind anwendungsspezifische Sichten auf die Informationen im Rahmen der bereits vorgestellten Modellsichten (Prozess-, Methoden- und Systemsicht) vorstellbar. Dies gilt sowohl für das matrizenbasierte Informationsverknüpfungsmodell als auch für das Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM und das Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We. Eventuelle Erweiterungen des matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodells beziehungsweise der entsprechenden Sichten sollten jedoch jederzeit ergänzt werden können.

Die konzeptuelle Ebene, in der die Informationen und ihre Beziehungen oder Abhängigkeiten dargestellt werden, wird bereits durch die Modellierung der Verknüpfungen im matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell beziehungsweise in der äquivalenten Graphenmodellierung aufgespannt. Somit sind die Verbindungen zwischen den jeweiligen Elementen bekannt und abgebildet. Die Beschreibung der Elemente selbst beziehungsweise eine detailliertere Beschreibung der Verknüpfung ist zu ergänzen, da bisher lediglich „eine Verknüpfung zwischen [...] und [...] existiert“ modelliert ist. Für diese ausstehenden Beschreibungen werden die Informationen des matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodells um die des Zuverlässigkeitsinformationsmodells ZIM ergänzt. Umgesetzt werden kann dies beispielsweise durch die heute weit verbreitete Entity-Relationship-Modellierung (ERM) beziehungsweise durch die objektorientierte (OO) Modellierung. In der ERM werden die Elemente des matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodells (zum Beispiel Komponenten,...) als Entitäten gesehen, die gewisse Attribute (kennzeichnende Eigenschaften/Parameter) besitzen und durch Beziehungen (Relationen) miteinander verbunden sind. Da jedoch lediglich zwischen Entitäten Beziehungen auftreten können, nicht jedoch zwischen deren Attributen, würde sich eine ERM entsprechend umfangreich gestalten.

Dies gilt in gewisser Weise auch für die zweite Art der Modellierung, die objektorientierte Modellierung (OO). Entitäten entsprechen in dieser Sicht Objekten, die ebenfalls Attribute und Methoden besitzen können. Objektorientierung bietet zudem die Möglichkeit zur Vereinfachung komplexer Zusammenhänge durch das Zusammenfassen ähnlicher Objekte zu Klassen. Klassen können ferner ihre Attribute und Methoden an andere Klassen weitervererben. Dies macht eine deutliche Reduktion der komplexen Abhängigkeiten möglich und kommt einer kompakten Modellierung zugute. Allerdings kann durch die kompakte Form die Übersichtlichkeit der Beziehungen verlorengehen.

Beim Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM - Systemsicht und insbesondere beim Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We - Systemsicht können weitere Herausforderungen durch die Einbindung von Informationen über Informationen, sogenannte Meta-Informationen entstehen. Dies kann der Fall sein, wenn zu der Sammlung von Informationen zu Systemen/Komponenten (Funktionen) durch die Einbindung und Verknüpfung zum Beispiel mit zuverlässigkeitsrelevanten Erfahrungen von Experten eine Meta-Informationsebene hinzustößt. Deren Sinn kann beispielsweise darin bestehen, dass bisher nicht gewertete Informationen auf der Meta-Ebene durch Erfahrungswissen von Experten bewertet, relativiert oder gewichtet werden können. Für nähere Hinweise zu solchen Umsetzungen wird auf die einschlägige Literatur zu den Themengebieten Informations- und Datenmanagement beziehungsweise Datenbanksysteme verwiesen, zum Beispiel [Krc10].

7 Anwendungsbeispiel

Anhand eines Anwendungsbeispiels aus dem Automobilbereich wird nachfolgend die Umsetzbarkeit und Anwendung des Vorgehens dargestellt. Als synthetisches Anwendungsbeispiel wurde ein überschaubares und dennoch ausreichend komplexes mechatronisches System, ein elektrischer Fensterheber, ausgewählt, siehe [Hof et al.09].

Das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Vorgehen baut auf umfassenden Prozessen, Dokumenten und theoretisch einer Vielzahl an zuverlässigkeitstechnischen Methoden auf, weshalb sich eine über den Entwicklungsprozess durchgängige Validierung der Vorgehensweise innerhalb dieser Abhandlung nicht darstellen lässt.

Aus diesem Grund beschränkt sich diese Arbeit darauf, den wesentlichsten Teil des Entwicklungsprozesses komplexer mechatronischer Systeme, nämlich die Auswahl des domänenübergreifenden Konzepts, die entwicklungs- und zuverlässigkeitsprozesstechnische Hinführung dazu, sowie einen Ansatz zur domänenspezifischen Konzeptentwicklung methodenunterstützt darzustellen.

7.1 Vorstellung

Im Rahmen der Entwicklung eines neuen Fahrzeuges als komplexes mechatronisches Gesamtsystem soll auch ein neuer elektrischer Fensterheber entwickelt werden. Dieser soll die im Rahmen von Kundenbefragungen gemäß der Marktpositionierung identifizierten und in Tabelle 13 dargestellten Funktionen ermöglichen.

Tabelle 13: Ermittelte Funktionen und Unterfunktionen des Anwendungsbeispiels „elektrischer Fensterheber“ vor Durchführung der Methode „Qualitative Konzeptbewertung“

Fenster automatisch öffnen	Fenster automatisch schließen	Fenster in jeder Position anhalten
- Öffnungswunsch erkennen	- Schließwunsch erkennen	- Haltewunsch erkennen
- Öffnungswunsch prüfen	- Schließsituation prüfen	- Antrieb abschalten
- Antrieb anfahren (Scheibe ab)	- Antrieb anfahren (Scheibe auf)	- Position halten
- Endposition erkennen	- Endposition erkennen	
- Antrieb abschalten	- Antrieb abschalten	

Zur Umsetzung der ermittelten Funktionen stehen zwei unterschiedliche mechatronische Konzepte zur Verfügung: ein elektrisch betriebener Kurbelfensterheber (Konzept 1, siehe Abbildung 50 links), wie er schon im Vorgängersystem verbaut wurde sowie ein elektrisch betriebener Seilzugfensterheber (Konzept 2, siehe Abbildung 50 rechts). Dieser stellt ein neues, noch nicht umgesetztes Konzept dar, verspricht aber gegenüber Konzept 1 Vorteile wie höheren Komfort durch geringere Öffnungs- und Schließdauer, sowie geringeren

Bauraumbedarf und niedrigeres Gewicht. Die Prinzipdarstellungen beider Konzepte mit den wesentlichen Komponenten zeigt Abbildung 50.

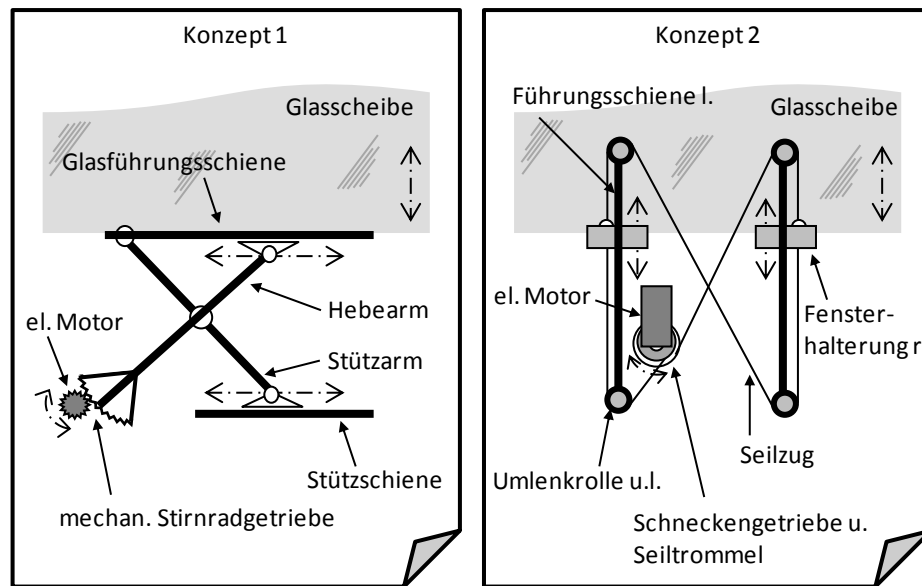


Abbildung 50: Prinzipdarstellung der beiden Konzepte eines elektrischen Fensterhebers: Kurbelfensterheber (Konzept 1, links), Seilzugfensterheber (Konzept 2, rechts)

Bei Konzept 1 wird das Anheben (Absenken) des Fensters durch den elektrischen Motor und dessen mechanische Kopplung an den Stützarm, die Glasführungs- und die Stützschiene gewährleistet. Die Antriebsenergie des Motors wird über ein mechanisches Stirnradgetriebe auf den Hebearm übertragen. Konzept 2 hebt (senkt) die Glasscheibe durch einen an den Fensterhalterungen gekoppelten Seilzug. Der Motor selbst treibt über ein Schneckengetriebe eine Seiltrommel an, auf der der Seilzug auf- und abgewickelt wird. Über diverse Umlenkrollen und zwei Führungsschienen wird das gleichmäßige vertikale Verfahren der Glasscheibe sichergestellt.

7.2 Prozesse, Dokumente und Methoden

Die Entwicklung des Gesamtsystems und aller Teilsysteme erfolgt gemäß der in Abschnitt 3.3.1 bereits vorgestellten VDI 2206 sowie einem an die VDA 3.1 angelehnten Zuverlässigkeitsprozess. Einen Überblick über die einzelnen Projektphasen gemäß VDA 3.1 und die damit verbundenen Meilensteine im Projekt zeigt Abbildung 51.

Aufgrund der Tatsache, dass Konzept 1 bereits im Vorgängersystem umgesetzt wurde, steht hierfür das entsprechende Lastenheft („Lastenheft_Vorgänger“) zur Verfügung und wird im matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell berücksichtigt. Weiterhin findet das aktuelle Lastenheft („Lastenheft_neu“) im matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell Berücksichtigung. Aus Methodensicht existiert eine FMEA des Vorgängersystems, welche für die Methode „Qualitative Konzeptbewertung“ herangezogen werden kann. Bei dieser Methode handelt es sich um eine frühzeitig einsetz-

bare Entwicklungsmethode, die anhand von Funktionen und Kriterien sowie deren technischer Umsetzbarkeit eine sogenannte Entwicklungsfähigkeit errechnet, auf deren Basis eine objektive Konzeptentscheidung gefällt werden kann. Diese Methode wird in der beschriebenen Systementwicklung zur Herbeiführung einer Konzeptentscheidung angewendet. Nähere Details zur Methode wurden beispielsweise in [Man et al.07b] oder [Man et al.09] veröffentlicht. Für das mit Hilfe der „Qualitativen Konzeptbewertung“ ausgewählte Konzept 2 wird mittels der „Quantitativen Konzeptbewertung“ eine weitergehende entwicklungsbegleitende detaillierte Analyse der erreichbaren Zuverlässigkeit des Konzepts durchgeführt. Basis ist ein Zuverlässigkeitsziel für das System. In der Methode werden mittels eines Systemmodells (basierend auf Funktionen und Komponenten) sowie eines Zuverlässigkeitsmodells das Zuverlässigkeitsziel auf Funktionen und Komponenten heruntergebrochen und mit Hilfe von Ausfalldaten ähnlicher beziehungsweise vergleichbarer Komponenten Analysen über die Zielerreichbarkeit und die Kritikalität vorgenommen. Weiterführende Details zur Methode finden sich beispielsweise in [Man et al.09] oder [Hof et al.09].

Projektunabhängige Vorentwicklung
Meilenstein 0 Zuverlässigkeitsziele Zuverlässigkeitsrisiken
Konzeption
Meilenstein A: Projektanfrage, -auftrag ZUV-relevante Unterstützung Konzeptentwicklung Konzeptentscheidung: QLK Meilenstein B: Freigabe zur Grobentwicklung ZUV-Konzeptanalyse: QUARTZ Systemmodell Zuverlässigkeit aufstellen Fehlerbaum erstellen Blockschaltbild erstellen Zuverlässigkeits(test)planung mit Lieferanten durchführen
Produktentwicklung und Verifizierung
Meilenstein C: Freigabe zur Detailentwicklung FMEA starten Meilenstein D: Freigabe zur Detailplanung Produktionsprozess Meilenstein E: Freigabe Anlagenbeschaffung Meilenstein F: Freigabe Serienproduktion
Fertigung und Nutzung
Meilenstein G: Produkt-Review Meilenstein H: Modellauslauf/Entsorgung

Abbildung 51: Projektphasen gemäß VDA 3.1 und damit verbundene Meilensteine in der Produktentwicklung

Mit Beginn des Einsatzes der Methode „Quantitative Zuverlässigkeitsbewertung“ startet auch die Erarbeitung der entsprechenden FMEA, die im matrixbasierten Informationsverknüpfungsmodell angedeutet wird. Die beiden Methoden „Qualitative Konzeptbewertung“ und „Quantitative Konzeptbewertung“ sind im matrixbasierten Informationsverknüpfungsmodell auf oberster

Ebene umfassend verknüpft dargestellt. Einen Überblick über die komplexen informationstechnischen Verknüpfungen zwischen den verschiedenen Prozessen, Domänen, Dokumenten und Methoden sowie die Möglichkeiten zur Informationsflussanalyse anhand des matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodells werden in nachfolgendem Abschnitt 7.3 aufgezeigt.

7.3 Das matrizenbasierte Informationsverknüpfungsmodell

Aufgrund der Tatsache, dass zumindest bis zur endgültigen Konzeptentscheidung in der Methode „Qualitative Konzeptbewertung“ zwei Konzepte betrachtet werden, wurden zwei matrizenbasierte Informationsverknüpfungsmodelle erstellt. Die Vielzahl betrachteter Prozesse, Dokumente und Methoden lässt den Umfang und die Komplexität in der Multiple Domain Matrix-Modell-erstellung stark ansteigen, was jedoch in jeder Systementwicklung für eine umfassende entwicklungsbegleitende Analyse unabdingbar ist. Einen Überblick über die entsprechende Matrix für das Konzept 2 zeigt Abbildung 52. Detaillierte Auszüge der Matrix für das Konzept 1 finden sich im Anhang (Abbildung 62 bis Abbildung 81).

Abbildung 52: Gesamtdarstellung des matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodells für das Beispielkonzept 2 (Seilzugfensterheber) als Übersicht

Die Notwendigkeit und Nützlichkeit des matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodells aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht soll anhand nachfolgend beschriebener Geschehnisse veranschaulicht werden:

- Zur Beschreibung der Anforderungen für den elektrischen Fensterheber wurden sowohl das unternehmerische Management befragt als auch Kundenbedarfe in Umfragen ermittelt.
- Die festgelegten Anforderungen wurden in einer losen Anforderungssammlung zusammengetragen, die für die weitere Entwicklung herangezogen wird und schnellstmöglich nach einer Konzeptentscheidung in ein Lastenheft überführt werden soll.
- Bei Durchführung der Methode „Qualitative Konzeptbewertung“ wird im Methodenschritt „Funktionen ermitteln“ eine weitere, bisher nicht festgelegte Funktion gefunden: „Fenster bei Blockade zurückfahren“, siehe Tabelle 14.
- Im Methodenschritt „Einzelentwicklungsfähigkeit je Funktion und Konzept ermitteln“ der Methode „Qualitative Konzeptbewertung“ stellten die beteiligten Entwicklungsexperten zudem fest, dass die bisher festgelegte Anforderung „Schließdauer <3 Sek.“ bei beiden untersuchten Konzepten lediglich sehr schlechte Entwicklungsfähigkeitswerte erhalten hat ($E_{\text{Konzept1}}=0,22$; $E_{\text{Konzept2}}=0,31$). Da sich die Einhaltung dieser Anforderung nach Meinung der Experten aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht als kritisch herausstellen könnte, wird diese Anforderung auf „Schließdauer <4,5 Sek.“ geändert, siehe Tabelle 15.

Tabelle 14: Ermittelte Funktionen und Unterfunktionen des Anwendungsbeispiels „elektrischer Fensterheber“ nach Durchführung der Methode „Qualitative Konzeptbewertung“

Fenster automatisch öffnen	Fenster automatisch schließen	Fenster in jeder Position anhalten	Fenster bei Blockade zurückfahren
- Öffnungswunsch erkennen	- Schließwunsch erkennen	- Haltewunsch erkennen	- Blockade erkennen
- Öffnungswunsch prüfen	- Schließsituation prüfen	- Antrieb abschalten	- Antrieb abschalten
- Antrieb anfahren (Scheibe ab)	- Antrieb anfahren (Scheibe auf)	- Position halten	- Antrieb anfahren (Scheibe ab)
- Endposition erkennen	- Endposition erkennen		- Endposition erkennen
- Antrieb abschalten	- Antrieb abschalten		- Antrieb abschalten

Parallel zur Methodendurchführung wurden und werden in anderen Entwicklungsschritten die bisherigen „Anforderungen“ jedoch weiterverwendet, weshalb sowohl die Ergänzung der Funktion „bei Blockade zurückfahren“ als auch die Änderung der Schließdauer gemäß des in Tabelle 6 beschriebenen Ablaufs dorthin gespiegelt werden muss, um zuverlässigkeitskritische Auswirkungen zu vermeiden. Am Beispiel der Schließdauer wird dies nachfolgend unter Zuhilfenahme des matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodells beschrieben.

Im vorliegenden Produktentstehungsprozess findet sich die Festlegung der „Anforderungen“ ganz zu Beginn - mit zahlreichen weiteren Prozessschritten, die auf die Anforderungen zugreifen. Die Konzeptentscheidung mittels der Methode „Qualitative Konzeptbewertung“ erfolgt im Zuverlässigkeitsprozess in der Phase „Konzeption“. Somit bildet der Prozessschritt „Anforderungen“ den

Beginn der durchzuführenden Suche und Analyse. Das Vorgehen besteht gemäß Tabelle 6 darin, von den „Anforderungen“ alle Prozessschritte und Elemente zu ermitteln, welche auf sie zugreifen. Hierzu ist die entsprechende Spalte „Anforderungen“ auszuwerten und die Anzahl der Verknüpfungen zu zählen. Im betrachteten Beispielsystem handelt es sich um 29 Verknüpfungen. Bei der Durchführung der Methode „Qualitative Konzeptbewertung“ konnte nach Expertenmeinung festgehalten werden, dass die Änderung der Anforderung „Schließdauer“ die Konzeptentscheidung nicht beeinflusst. Elf Verknüpfungen fallen als irrelevant weg, da sie in die Methode selbst verknüpfen. Die übrigen 18 Verknüpfungen sind in Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 15: Auszug aus den ermittelten Anforderungen für das Beispielsystem „elektrischer Fensterheber“: Kundenbedarfe (links), Anforderungen nach Befragung des Unternehmensmanagements (Mitte), festgelegte Anforderungen (rechts) nach Einsatz der Methode „Qualitative Konzeptbewertung“

Kundenbedarfe	Befragung Management	festgelegte Anforderungen
- automat. Öffnen	- Öffnungs-/Schließautomatik	- Anhalten bei Öffnen/Schließen
- automat. Schließen	- Anhalten bei Öffnen/Schließen	- Öffnungs-/Schließautomatik
- Anhalten bei Öffnen/Schließen	- geringe Geräusentwicklung	- geringe Geräusentwicklung
- schnelles Öffnen/Schließen	- automat. Regenschließung	- Öffnungsdauer = Schließdauer
- Automatisches Schließen bei Fahrzeugverriegelung	- Schließdauer <3 Sek.	- Schließdauer <4,5 Sek.
	- Öffnungsdauer = Schließdauer	- Automatisches Schließen bei Fahrzeugverriegelung
	- gleichmäßige Geschwindigkeit	- gleichmäßige Geschwindigkeit

Tabelle 16: Übersicht der direkt verknüpften Prozessschritte bis zum Meilenstein A, für die die Informationen des Prozessschrittes „Anforderungen“ notwendig sind

Domäne	Bezeichnung_Prozessschritt
Mt_Mechatronik	Systementwurf
Mt_Mechatronik	Modellbildung und -analyse
Me_Mechanik	Planen
Me_Mechanik	Konzipieren
EI_Elektronik	System-Anforderungsanalyse
EI_Elektronik	Funktionaler Entwurf
EI_Elektronik	System-Entwurf
SW_Software	System spezifiziert
Me_Mechanik	Herstellung, Montage
EI_Elektronik	Herstellung, Montage
SW_Software	Herstellung
Zuv-Prozess	Zuverlässigkeitsziele
Zuv-Prozess	Zuverlässigkeitsrisiken
Zuv-Prozess	Zuverlässigkeitsrelevante Unterstützung der Konzeptentwicklung
Lastenheft_neu	Zuverlässigkeitsziel
Lastenheft_neu	Use_Cases: 15.000 Öffnungszyklen
Lastenheft_neu	Use_Cases: 5.000 Mal anhalten
Lastenheft_neu	Öffnungsgeschwindigkeit >0,15m/s

Diese 18 Prozessschritte dienen nun wiederum weiteren Prozessschritten als Eingangsinformationen, wohin die „Anforderungen“ indirekt weitergegeben

werden können. All diese Verknüpfungen sind nach gleichem Vorgehen ebenfalls zu überprüfen. Mit dem Blick auf die beiden nicht mehr dargestellten, tiefer liegenden Prozessebenen ergeben sich (über die verschiedenen Ebenen summiert) von diesen 18 direkt verknüpften Prozessschritten weitere insgesamt 49 Prozessschritte, in denen die Anforderungen indirekt weiterverwendet wurden. Somit ergeben sich bei der Analyse insgesamt 67 Prozessschritte, bei denen zu überprüfen ist, inwiefern die neuen Informationen (neue Funktion und geänderte Schließdauer) in den jeweiligen Schritten Diskrepanzen oder Beeinflussungen hervorrufen.

Ein Beispiel für eine Informationskette (Anzahl Informationsverknüpfungen) mit indirekter Verknüpfung der „Anforderungen“ zeigt sich nachfolgend und in Abbildung 53: Informationen des Prozessschrittes „Anforderungen“ (Mt) werden im Prozessschritt „Modellbildung und -analyse“ (Mt) als Eingangsinformationen verwendet, dessen Informationen wiederum im Prozessschritt „System spezifiziert“ (SW) verwendet werden. Da die aktuelle Systementwicklung noch nicht über den Prozessschritt „System spezifiziert“ im domänenspezifischen Entwurf der Software hinausgekommen ist, sind alle folgenden Verknüpfungen nicht mehr zu überprüfen.

		Anforderungen	Systementwurf	Domänenspezifischer Entwurf													
		Systementwurf	Modellbildung und -analyse	Planen	Konzipieren	Entwerfen	Ausarbeiten	System-Anforderungsanalyse	Funktionaler Entwurf	System-Entwurf	Implementierung	System spezifiziert	System entworfen	Feinentwurf abgeschlossen	Systemelemente realisiert	...	
	Anforderungen																
	Systementwurf			X	X			X	X			X	X				
	Modellbildung und -analyse	X		X	X			X	X			X	X			X	
Domänenspezifischer Entwurf	Planen			X	X												
	Konzipieren	X		X	X			X	X							X	
	Entwerfen																
	Ausarbeiten																
	System-Anforderungsanalyse	X	X	X	X							X					
	Funktionaler Entwurf	X	X	X	X	X		X				X	X			X	
	System-Entwurf																
	Implementierung																
	System spezifiziert	X		X	X			X	X								
	System entworfen																
Feinentwurf abgeschlossen																	
Systemelemente realisiert																	
...		X	X	X				X			X	X			X	X	

Abbildung 53: Beispielhafte Informationskette (Anzahl Informationsverknüpfungen) mit indirekter Verknüpfung zu Prozessschritt „Anforderungen“

Als weiteres Beispiel werden ausgehend vom Prozessschritt „Einzelentwicklungsfähigkeit je Funktion und Konzept ermitteln“ der Methode „Qualitative Konzeptbewertung“ alle die Methoden- und Prozessschritte ermittelt, die Informationen für diesen Prozessschritt geliefert haben. Es ist auch hier jeweils

zu untersuchen, ob die Änderung der „Anforderungen“ Auswirkungen hat. Eine beliebige dieser Informationsketten (Anzahl Informationsverknüpfungen) sieht im konkreten Beispiel wie folgt aus (siehe auch Abbildung 54):

- Der Methodenschritt „Einzelentwicklungsfähigkeit je Funktion und Konzept ermitteln“ benötigt Informationen des Methodenschrittes „technische Umsetzbarkeit U für Funktionen ermitteln“, welcher über den Schritt „Gewichtung der Funktionen“ wiederum auf Informationen des Schrittes „Funktionen ermitteln“ zugreift. Für alle Schritte ist die Relevanz der Änderung zu überprüfen. Im konkreten Anwendungsfall der Methode sind für diesen Methodenschritt keine Informationen direkt aus dem Entwicklungs- oder Zuverlässigkeitsprozess oder Dokumenten verknüpft.

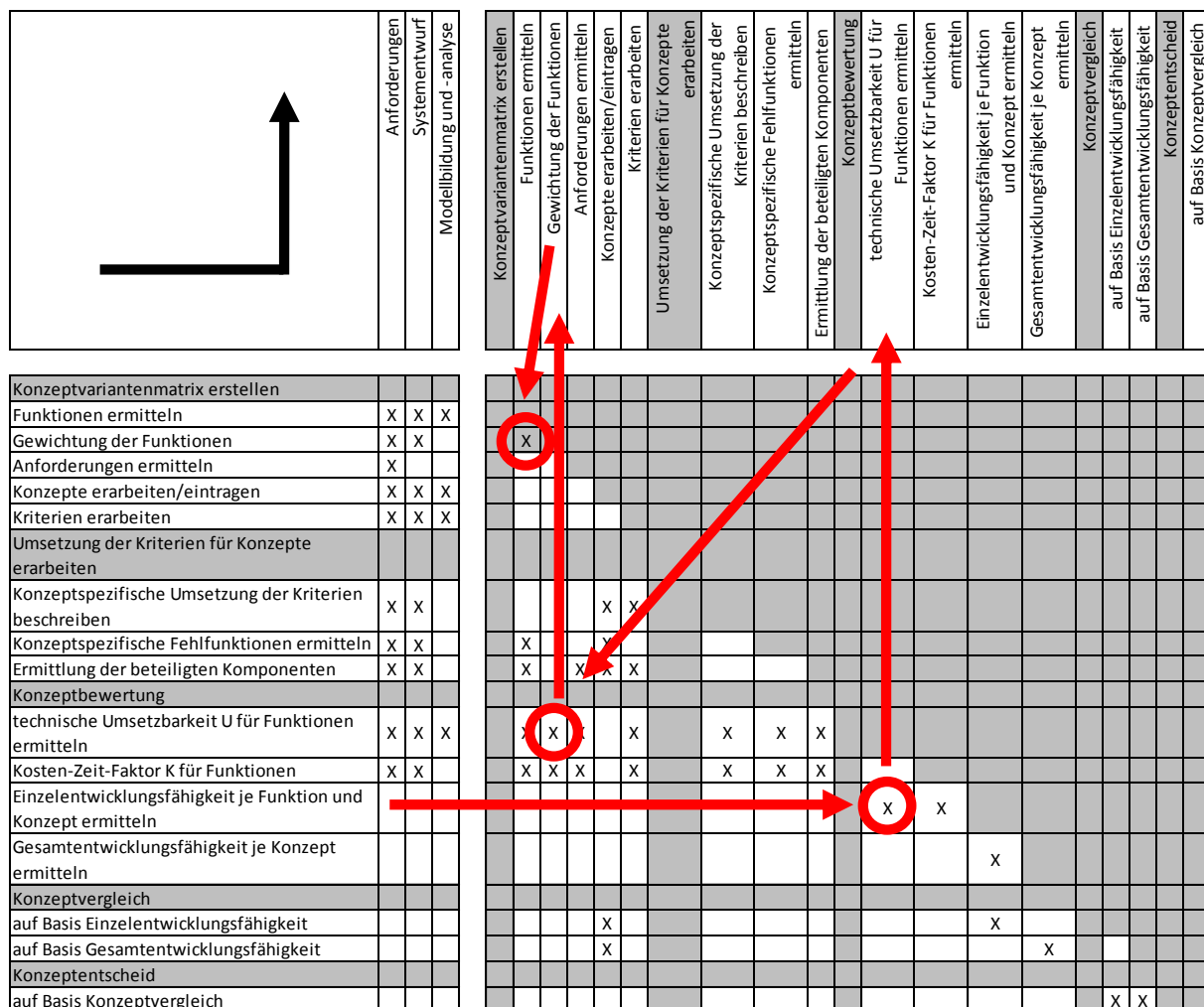


Abbildung 54: Beispielhafte Informationskette (Anzahl Informationsverknüpfungen), in der Vorläuferinformationen des Prozessschrittes „Einzelentwicklungsfähigkeit je Funktion und Konzept ermitteln“ als Eingangsinformation dienen

In diesem Fall wurden (unter Einbezug der tiefer liegenden Prozessebenen) insgesamt 12 Prozessschritte identifiziert, für die die Änderungen theoretisch relevant sein könnten.

Im konkreten Beispiel sind somit für diese Änderung 79 Prozessschritte bezüglich Relevanz, Diskrepanz und Beeinflussung zu untersuchen.

7.4 Die Zuverlässigkeitsinformationsmodelle

Die für den Prozessschritt „Anforderungen überarbeiten“ im Anwendungsbeispiel charakteristischen Kennzahlen des Zuverlässigkeitsinformationsmodells ZIM - Prozesssicht beschreibt Abschnitt 7.4.1, während Abschnitt 7.4.2 den Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM und Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We anhand einer Beispielkomponente erläutert.

7.4.1 Eigenschaften und Kennzahlen des Prozessschrittes „Anforderungen“

Am Beispiel des Prozessschrittes „Anforderungen überarbeiten“ werden die Kennzahlen für das Zuverlässigkeitsinformationsmodell - Prozesssicht dargestellt.

Bei den nach Tabelle 10 für Prozessschritte charakterisierenden Kennzahlen ergeben sich für das Beispiel nachfolgende Werte:

- $MG_{PS_Anf} = \frac{3}{3} = 1$
- $MKG_{PS_Anf} = \frac{53}{347} = 0,153$
- $IDG_{PS_Anf} = \frac{136}{211} = 0,645$
- $DPG_{Anf_I} = \frac{34}{219} = 0,155$
- $BEG_{Anf_I} = \frac{58}{219} = 0,265$

Durch die Verwendung der „Anforderungen“ in den Prozessschritten „Planen“ und „Konzipieren“ (Domäne Mechanik), der Schritte „System-Anforderungsanalyse“ und „Funktionaler Entwurf“ (Domäne Elektronik) sowie im Schritt „System spezifiziert“ (Domäne Software) ist der höchstmögliche Mechatronisierungsgrad $MG_{PS_Anf} = 1$ erreicht.

Der Methodenverknüpfungsgrad $MKG_{PS_Anf} = 0,153$ stellt eine vergleichsweise hohe Verknüpfung des Prozessschrittes zu Methoden hin dar. Dadurch wird dieser Prozessschritt als ein wesentlicher für den Methodeneinsatz hervorgehoben.

Ein Informationsverdichtungsgrad $IDG_{PS_Anf} = 0,645 < 1$ stellt dar, dass der Prozessschritt „Anforderungen“ deutlich mehr aus- als eingehende Informationsverknüpfungen besitzt und somit als „informationsentdichtend“ anzusehen ist. Diese Prozessschritte sind bezüglich Änderungen besonders kritisch, da die ausgehenden Informationen umso stärker gestreut werden, je kleiner der

Informationsverdichtungsgrad IDG ist. Dies ist auch im konkreten Beispiel der Fall - und bedingt daher in Abschnitt 7.3 dargestellte umfassende Nachverfolgungen im matrizenbasierten Informationsverknüpfungsmodell.

Bei Überprüfung der acht bereits festgelegten Anforderungen auf Diskrepanz mit der neuen Schließdauer ergibt sich ein $DPG_{Anf_I} = 0,155$ und somit ungleich Null, das heißt es existiert eine Diskrepanz. Durch Ersetzen der alten Schließdauer <3 Sek. durch die neue Schließdauer lässt sich diese Diskrepanz beheben.

Die Untersuchung auf Beeinflussungen hat ergeben, dass die neu festgelegte Schließdauer auch die Anforderung „Öffnungsdauer = Schließdauer“ tangiert ($BEG_{Anf_I} = 0,265$). Die Beeinflussung dieser Anforderung durch die geänderte Anforderung ist auf eventuelle Auswirkungen näher zu untersuchen.

Somit liegt zum aktuellen Zeitpunkt der Produktentwicklung (zwischen Meilenstein 0 und Meilenstein A) eine umfassende Sicht auf alle Prozessschritte vor. Die Relevanz der Kennzahlen für die Entwicklung des Zuverlässigkeitsinformationsmodells zur Wissensentwicklung ZIM-We aus dem Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM heraus zeigt nachfolgender Abschnitt 7.4.2 am Komponentenbeispiel „elektrischer Motor“ des Konzepts 2 auf.

7.4.2 Zusammenhang der Zuverlässigkeitsinformationsmodelle (System-sicht) am Beispiel der Komponente „elektrischer Motor“

Anhand der Systementwicklung „elektrischer Fensterheber“ werden auf Basis des Konzepts 2 (Seilzugfensterheber) die Verläufe der Kennzahlen über den Entwicklungsprozess hinweg dargestellt, siehe Abbildung 55 und Abbildung 56. Die Verläufe ergeben sich aus Analysen der beschriebenen Kenngrößen nach jedem Entwicklungsschritt beziehungsweise Meilenstein. Eine detaillierte Übersicht ist im Anhang, Tabelle 19, dargestellt.

Für Mechatronisierungsgrad MG, Dokumentenverknüpfungsgrad DKG und Methodenverknüpfungsgrad MKG erfolgt die Betrachtung auf oberster Ebene über den gesamten Entwicklungsprozess, für die Kennzahlen Diskrepanzgrad DPG und Beeinflussungsgrad BEG jedoch lediglich bis Meilenstein C, da die detaillierte weitere Entwicklung aufgrund der zeitlichen Dauer nicht über diesen Meilenstein hinaus begleitet werden konnte.

Der Verlauf des Dokumentenverknüpfungsgrades DKG über den Entwicklungsprozess hinweg zeigt eine Zunahme der Verknüpfungen bis zum Meilenstein C, was an der zunehmenden Detaillierung des Systems beziehungsweise der Komponenten in den Entwurfsphasen liegt. Nach einer Abnahme um Meilenstein D und E zeigt sich um den Produktionsanlauf (Meilenstein F) und die Produktion/Montage (Meilenstein G) wiederum eine hohe Dokumentenverknüpfung.

Der Methodenverknüpfungsgrad MKG folgt tendenziell demselben Verlauf - dieser ist im Besonderen zwischen den Meilensteinen A und C sehr hoch. Dies ist im konkreten Entwicklungsfall auf die hohe Methodendichte während der Planungs-, Konzeptions- und Entwurfsphasen zurückzuführen.

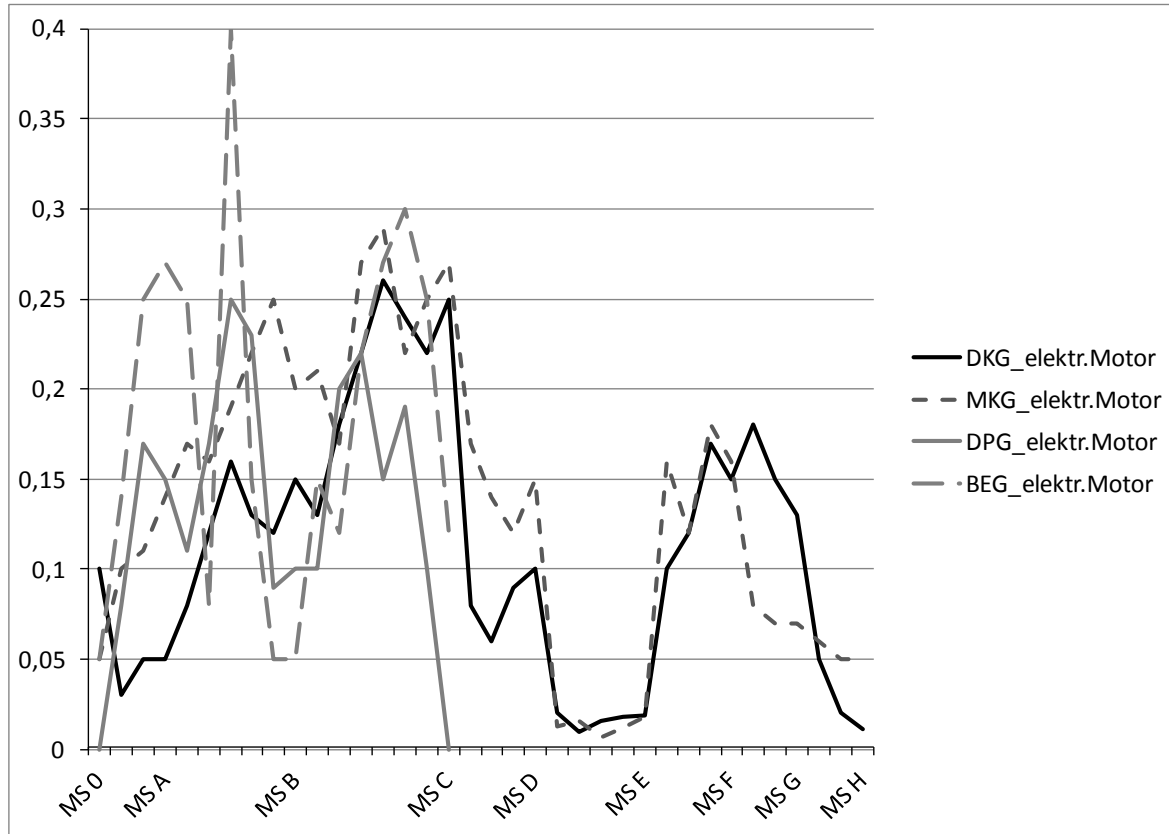


Abbildung 55: Verlauf von Dokumentenverknüpfungsgrad DKG, Methodenverknüpfungsgrad MKG, Diskrepanzgrad DPG und Beeinflussungsgrad BEG für die Komponente „elektrischer Motor“ des Konzepts 2

Ebenfalls zu erwarten war der ähnliche Verlauf von Diskrepanzgrad DPG und Beeinflussungsgrad BEG mit höheren absoluten Werten des Beeinflussungsgrades. Zu erklären ist dies damit, dass die Wahrscheinlichkeit, eine Diskrepanz hervorzurufen, mit zunehmender Beeinflussung steigt. Für Beeinflussungsgrad BEG und Diskrepanzgrad DPG gilt im konkreten Beispiel, dass sie zwischen MS A und MS C besonders hoch sind. Dies zeigt die Aktivität, hohe Änderungsdichte und den intensiven Informationsaustausch in diesen Entwicklungsphasen - und damit auch die tendenziell hohe Wahrscheinlichkeit, zuverlässigkeitskritische Aspekte hervorzurufen.

Das Ziel, den Diskrepanzgrad DPG jeweils zu einem Meilenstein hin wieder auf den Wert Null zurückzuführen, konnte im konkreten Fall zum Meilenstein A nicht umgesetzt werden. Für die beispielhafte Produktentwicklung zeigen sich im Mechatrisierungsgrad MG deutliche Phasen, in denen alle Domänen miteinander verknüpft sind und der Informationsaustausch domänenübergreifend intensiv ist (zum Beispiel um MS A oder MS B). Dennoch existieren immer wieder Phasenbereiche, in denen intensiv domänenspezifisch gearbeitet

wird (zum Beispiel zwischen MS B und MS C) oder lediglich Verknüpfungen zwischen zwei mechatronischen Domänen existieren (zum Beispiel zwischen MS A und B, vor MS C, zwischen MS C und D sowie um MS E). Bis zum MS D treten dabei die Verknüpfungen Mechanik/Elektronik und Elektronik/Software gleichsam auf, ab MS D mit zunehmender Fokussierung der Produktionsprozesse rückt jedoch die Paarung Mechanik/Elektronik in den Fokus.

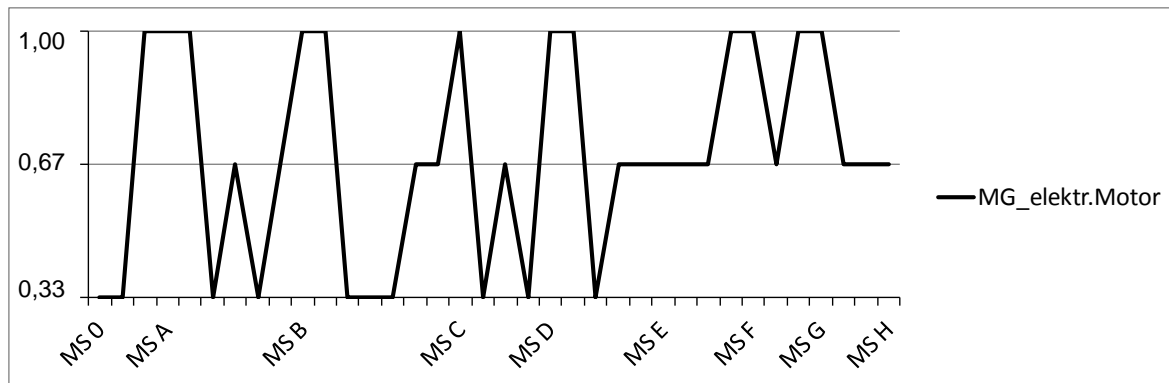


Abbildung 56: Verlauf des Mechatrisierungsgrades MG für die Komponente „elektrischer Motor“ (Konzept 2)

Ein zuverlässigkeits- und entwicklungstechnisches Risiko besteht in den Phasen, in denen keine Verknüpfung über alle Domänen hinweg erreicht werden kann, falls in der nicht verknüpften Domäne Änderungen auftreten, die alle oder mehrere Domänen betreffen. Hierzu sollen der Beeinflussungsgrad BEG und Diskrepanzgrad DPG ihren Beitrag leisten.

Abbildung 57 gibt in Form der tabellarischen Auflistung aller eingegangenen, ausgegangenen und verfügbaren Informationen einen Überblick über den Stand des Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM - Systemsicht der Komponente „elektrischer Fensterheber“ zum Meilenstein B. In Kombination mit dem Verlauf der Kennzahlen sowie dem Schritt-für-Schritt-Modell der verknüpften Informationen ergibt sich das entwicklungsbegleitende Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We - Systemsicht. Hierbei korreliert jede dargestellte Information im Schritt-für-Schritt-Modell mit einer Information (Zeile) im Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM.

Die in dieser Entwicklung an jedem beliebigen Entwicklungsschritt aktuell verfügbaren Informationen sowie alle bis dahin vollzogenen Informationsflüsse, Rekursionen, Iterationen und Abhängigkeiten lassen sich somit für jede Komponente nachvollziehen. In Kombination mit der tatsächlich erreichbaren und erreichten Systemzuverlässigkeit lassen sich die Entwicklungsdefizite ermitteln genauso wie die Entwicklung positiv beeinflussende Schritte, Methoden und Entscheidungen. Vergleichend können somit relative Vergleiche bezüglich der Entwicklungseffizienz aus Sicht einer zuverlässigkeitsorientierten Entwicklung gezogen und diese Erkenntnisse im Sinne einer durch das Zuverlässigkeitsin-

formationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We geprägten Entwicklung verwendet werden.

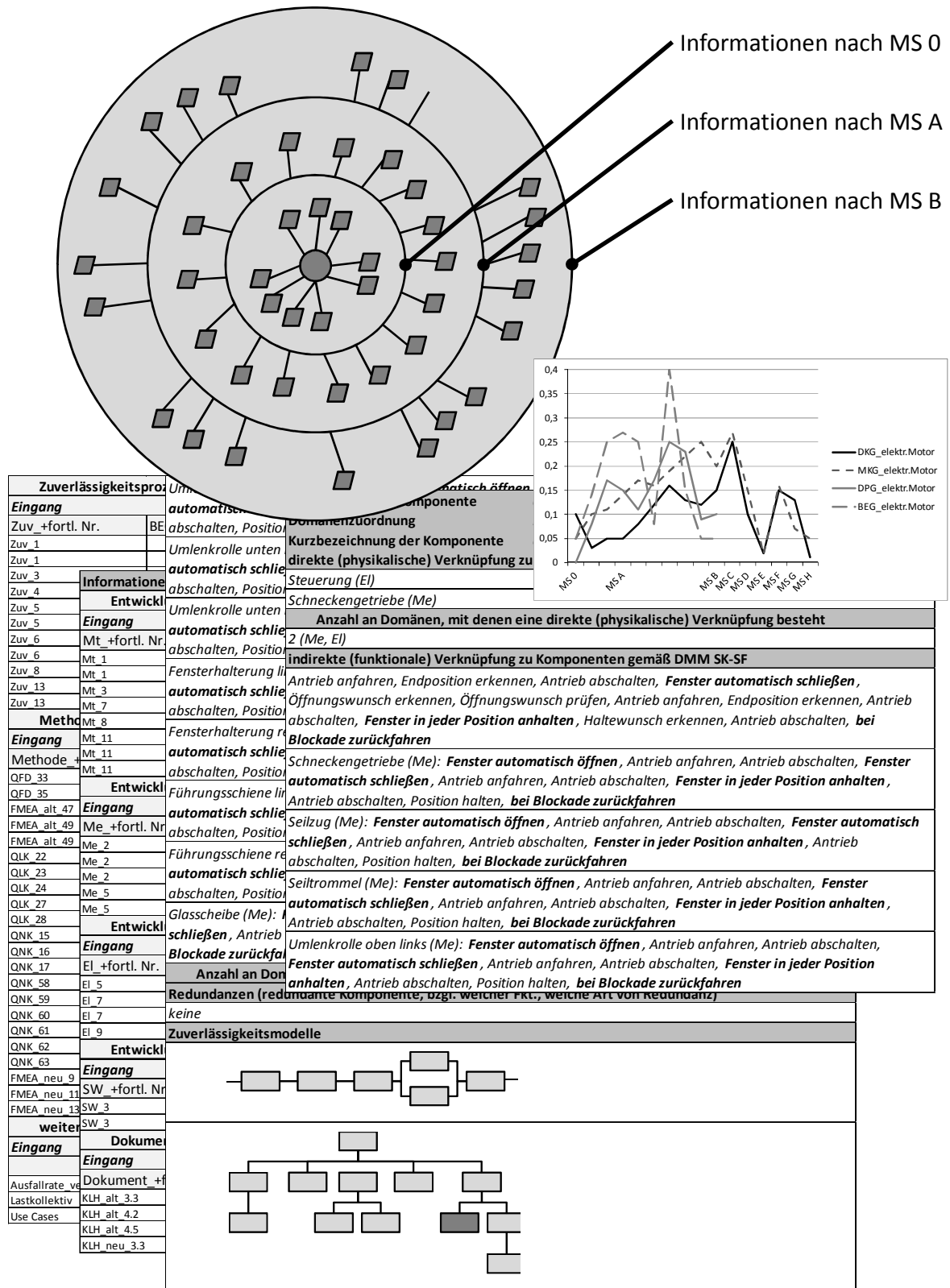


Abbildung 57: Übersicht über den Zwischenstand des Zuverlässigkeitsinformationsmodells zur Wissensentwicklung ZIM-We - Systemsicht für die Komponente „elektrischer Motor“ des ausgewählten Konzepts 2 bis zum Meilenstein B

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit zeigt, welche essentielle Relevanz Informationen für die Effizienz einer zuverlässigkeitsorientierten Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme haben. Zudem stellt die Arbeit die Defizite in der Einbindung und Analyse von Informationen in aktuellen Entwicklungsprozessen der Mechatronik beziehungsweise der Einzeldomänen „Mechanik“, „Elektronik“ und „Software“ dar. Um dies zu beheben, wurde mittels einer Analyse und Bewertung bestehender Prozesse ein charakteristischer Grundentwicklungsprozess für komplexe mechatronische Systeme erarbeitet, der auf die Existenz standardisierter Verknüpfungseinheiten hin untersucht wurde. Zudem wurden bestehende Werkzeuge zur Beherrschung und zum Umgang mit umfassenden Informationen und Informationsflüssen (wie zum Beispiel Matrizen) betrachtet und auf ihre Eignung im zuverlässigkeitsrelevanten Einsatz hin überprüft.

Neben der prozeduralen Betrachtung von Informationen und Informationsflüssen wurden zudem systemrelevante Verknüpfungen zu „Komponenten“ und „Funktionen“ eingebunden. Darüber hinaus wurden Entwicklungsdokumente und Methoden als wesentliche Elemente zur Analyse und Bewertung von Informationen in der zuverlässigkeitsorientierten Systementwicklung identifiziert. Unter Nutzung von Matrizen als Werkzeuge zur Handhabung und Analyse der Informationsmenge wurde aus diesen Elementen das Zuverlässigkeitsinformationsmodell (ZIM) entwickelt. Es bietet die Möglichkeit zur umfassenden Sammlung, Aufbereitung, Analyse und Bewertung aller für ein zu entwickelndes System bekannten zuverlässigkeitsrelevanten Informationen inklusive deren Abhängigkeiten. Aufbauend auf dem Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM wurde ein Modell zur Wissensentwicklung (ZIM-We) eingeführt, dessen mögliche Umsetzung angedeutet wurde.

Ausblickend lässt sich erkennen, dass für eine Implementierung der Informationsbetrachtung in die etablierten und komplexen Entwicklungsprozesse mechatronischer Systeme als nächster Schritt die vollständige Begleitung und Analyse eines Produktentwicklungszyklus zielführend wäre. Darauf aufbauend könnte zur Handhabung der komplexen Abhängigkeiten in der Informations- und Informationsflussbetrachtung ein auf die zuverlässigkeitstechnischen Aspekte hin fokussiertes Software-Werkzeug für Multiple Domain Matrizen, Zuverlässigkeitsinformationsmodell ZIM und Zuverlässigkeitsinformationsmodell zur Wissensentwicklung ZIM-We erstellt werden, das entweder eigenständig agiert oder an bereits bestehende Tools angegliedert wird. Dieses Tool gilt es dann mit bestehenden Entwicklungsdatenbanken wie beispielsweise EDM- oder PDM-Systemen, Feldausfallratensystemen oder Wissensspeichern des Unternehmens zu verknüpfen. Ferner könnten weitere Sichten, wie zum Beispiel Sicherheit oder Wartbarkeit sowie weitere Analyseparameter in das Modell modular aufgenommen werden.

Zur nachhaltigen Nutzung des Modells für Wissensentwicklung (ZIM-We) wäre eine umfassende Analyse von Kennzahlen und Kennzahlverläufen für verschiedene Systeme, Entwicklungsarten (Neu-/Varianten-/Anpassungskonstruktion) et cetera zielführend. Der Aufbau dieser Hintergrundinformationen zusammen mit dem Werkzeug zum Umgang mit den Informationen in der zuverlässigkeitsorientierten Produktentwicklung können die Grundlage für eine zunehmende Berücksichtigung der Informationen und somit eine ganzheitliche Betrachtung der die Zuverlässigkeit beeinflussenden Parameter in der Produktentwicklung bilden.

9 Literatur

- [Ack89] Ackoff, R.: From Data to Wisdom. In: Journal of Applied Systems Analysis, Lancaster, 1989; S. 3-9.
- [Aka04] Akao, Y.: Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements into Product Design. Productivity Press, Cambridge, 2004.
- [Ale64] Alexander, C.: Notes on the synthesis of form. Harvard Univ. Pr, Cambridge, Mass., 1964.
- [AlMe07] Albers, A.; Meboldt, M.: SPALTEN Matrix - product development process on the basis of systems engineering and systematic problem solving. In: The Future of Product Development. Proceedings of the 17th CIRP Design Conference. Springer, Berlin, 2007; S. 43-52.
- [And91] Andrásfai, B.: Graph theory. Flows, matrices. Hilger, Bristol, 1991.
- [Arb et al.06] Arbinger, R.; Jäger, R. S.; Jäger-Flor, D.: Lernen lernen. Ein Lern- und Arbeitsbuch. Verl. Empirische Pädagogik, Landau, 2006.
- [Arn et al.04] Arnaout, T. et al.: Reliability Considerations for Mechatronic Systems on the Basis of a State Model. In: Organic and pervasive computing. ARCS 2004 workshop proceedings, March 26, 2004, Augsburg. Gesellschaft für Informatik, Bonn, 2004.
- [Aur et al.07] Aurich, J. et al.: Die Nadel im Heuhaufen. In: QZ - Qualität und Zuverlässigkeit, 2007; S. 72-73.
- [Avi et al.01] Avizienis, A.; Laprie, J.-C.; Randell, B.: Fundamental Concepts of Dependability. UCLA, Los Angeles, 2001.
- [BaEb08] Balzert, H.; Ebert, C.: Softwaremanagement. Spektrum Akad. Verl., Heidelberg, 2008.
- [Bah77] Bahrmann, H.: Einführung in das methodische Konstruieren. Vieweg, Braunschweig, 1977.
- [Bec89] Becker, G.: Softwarezuverlässigkeit. Quantitative Modelle und Nachweisverfahren. Techn. Univ., Dissertation. Berlin. de Gruyter, Berlin, 1989.
- [Ben04] Benz, S.: Eine Entwicklungsmethodik für sicherheitsrelevante Elektroniksysteme im Automobil. Dissertation, Karlsruhe, 2004.
- [Ben05] Bender, K.: Embedded Systems. Qualitätsorientierte Entwicklung. Springer, Berlin, 2005.
- [Ber et al.09] Bertsche, B.; Göhner, P.; Jensen, U.; Schinköthe, W.; Wunderlich, H.-J.: Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme.

- Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen. Springer, Berlin, 2009.
- [Ber04] Bertsche, B.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Hongkong, London, Mailand, Paris, Tokio, 2004.
- [Bir07] Birolini, A.: Reliability Engineering. Theory and Practice. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [Bit86] Bitter, P.: Technische Zuverlässigkeit. Problematik, mathemat. Grundlagen, Untersuchungsmethoden, Anwendungen. Springer, Berlin, 1986.
- [Bod06] Bodendorf, F.: Daten- und Wissensmanagement. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2006.
- [Bod93] Bode, J.: Betriebliche Produktion von Information. DUV, Dt. Univ.-Verl, Wiesbaden, 1993.
- [Boe et al.82] Boehm, B. W. et al.: The TRW Software Productivity System. In: Proceedings 6th International Conference on Software Engineering. IEEE, Piscataway, NJ, 1982; S. 148-156.
- [Boe87] Boehm, B. W.: A Spiral Modell of Software Development and Enhancement. In: Software Engineering Project Management. IEEE, Piscataway, NJ, 1987; S. 513-527.
- [Boo et al.05] Booch, G.; Rumbaugh, J.; Jacobson, I.: The unified modeling language user guide. [covers UML 2.0]. Addison-Wesley, Upper Saddle River, NJ, 2005.
- [Bro01] Browning, T. R.: Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and New Directions. In: Transactions on Engineering Management. IEEE, Piscataway, NJ, 2001; S. 292-306.
- [Bul99] Bullinger, H.-J.: Marktstudie Engineering-Data-Management-Systeme EDM als strategischer Erfolgsfaktor im innovativen Unternehmen. IAO, Stuttgart, 1999.
- [Bür75] Bürdek, B. E.: Einführung in die Designmethodologie. Designtheorie, Hamburg, 1975.
- [Che76] Chen, P. P.-s.: The Entity-Relationship Model: Toward a Unified View of Data. In ACM Transactions on Database Systems, 1976, 1; S. 9-36.
- [Chr et al.09] Chrissis, M. B.; Konrad, M.; Shrum, S.: CMMI. Richtlinien für Prozess-Integration und Produkt-Verbesserung. Addison-Wesley, München, 2009.
- [Chr92] Chroust, G.: Modelle der Software-Entwicklung. Oldenbourg, München, 1992.

- [CIRo98] Claussen, U.; Rodenacker, W. G.: Maschinensystematik und Konstruktionsmethodik Grundlagen und Entwicklung moderner Methoden. Springer, Berlin, 1998.
- [Czi08] Czichos, H.: Mechatronik. Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme ; mit 12 Tabellen. Vieweg&Teubner Verlag/GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2008.
- [DaBr07] Danilovic, M.; Browning, T. R.: Managing Complex Product Development Projects with Design Structure Matrices and Domain Mapping Matrices. In: International Journal of Management, Dorset, 2007; S. 300-314.
- [DAT11] DAT: Kriterien beim Neuwagenkauf. In: DAT-Report 2011. AUTOHAUS Extra. Springer Fachmedien München GmbH, München; S. 24.
- [Del07] DeLonga, M.: Zuverlässigkeitsmanagementsystem auf Basis von Felddaten. Dissertation, Universität Stuttgart, 2007.
- [DeSt91] DeGrace, P.; Stahl, L. H.: Wicked problems, righteous solutions - A catalogue of modern software engineering paradigms. Yourdon Press, Upper Saddle River, NJ, 1991.
- [Dhi07] Dhillon, B. S.: Applied Reliability and Quality. Fundamentals, Methods and Procedures. Springer, London, 2007.
- [Die92] Dietmann, H.: Einführung in die Elastizitäts- und Festigkeitslehre. Kröner, Stuttgart, 1992.
- [DiGe01] Dittrich, K. R.; Geppert, A.: Component database systems. Morgan Kaufmann Publ. [u.a.], San Francisco, CA, 2001.
- [DIN04] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 60300: Zuverlässigkeitsmanagement. Beuth, Berlin, 2004.
- [DIN06] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 60812: Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen - Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA). Beuth, Berlin, 2006.
- [DIN07] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 61025: Fehlzustandsbaumanalyse. Beuth, Berlin, 2007.
- [DIN90] Deutsches Institut für Normung: DIN 40041: Zuverlässigkeit - Begriffe. Beuth, Berlin, 1990.
- [DIN97] Deutsches Institut für Normung: DIN-TERM Informationstechnik. Begriffe aus DIN-Normen. Beuth, Berlin, 1997.
- [DKE02] DKE-Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Kapitel 191: Zuverlässigkeit und Dienstgüte (Konsolidierte Fassung einschließlich Änderung 1 und Änderung 2), 2002.

- [Ehr09] Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. Hanser Fachbuchverlag, 2009.
- [Eig01] Eigner, M.: Produktdatenmanagement-Systeme ein Leitfaden für product development und Life-cycle-Management. Springer, Berlin, 2001.
- [Esc85] Eschenröder, G.: Planungsaspekte einer ressourcenorientierten Informationswirtschaft. Eul, Bergisch Gladbach, 1985.
- [GäBe09] Gäng, J.; Bertsche, B.: Frühzeitige komponentenbasierte Zuverlässigkeitsbewertung von Wechselwirkungen in mechatronischen Systemen. HNI, Paderborn, 2009.
- [GaAu10] Gausemeier, J.; Auersperg, J.: Frühzeitige Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme. Hanser, München, Wien, 2010.
- [Glu94] Glunz, W.: Hardware-Entwurf auf abstrakten Ebenen unter Verwendung von Methoden aus dem Software-Entwurf. HNI, Paderborn, 1994.
- [Göt02] Götz, K.: Wissensmanagement zwischen Wissen und Nichtwissen. Hampp, München, 2002.
- [HaDa02] Haberfellner, R.; Daenzer, W. F.: Systems engineering. Methodik und Praxis. Verl. Industrielle Organisation, Zürich, 2002.
- [Hah et al.97] Hahn, M.; Lückel, J.; Wittler, G.: Eine Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme. In: Entwicklungsmethoden und Entwicklungsprozesse im Maschinenbau. 3. Magdeburger Maschinenbau-Tage. Logos, Berlin, 1997.
- [Han74] Hansen, F.: Konstruktionswissenschaft Grundlagen und Methoden. Hanser, München, 1974.
- [Har et al.96] Harashima, F.; Tomizuka, M.; Fukuda, T.: Mechatronics - „What Is It, Why, and How?“. In: Transactions on Mechatronics. IEEE, Piscataway, NJ, 1996; S. 1-4.
- [Hit07] Hitziger, T.: Übertragbarkeit von Vorkenntnissen bei der Zuverlässigkeitstestplanung. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Stuttgart, 2007.
- [HoBe10] Hofmann, D.; Bertsche, B.: Nutzung zuverlässigkeitsrelevanter Informationen zur Unterstützung der Entwicklung mechatronischer Systeme. In: Absicherung der Systemzuverlässigkeit. 3. Tagung DVM-Arbeitskreis Zuverlässigkeit mechatronischer und adaptronischer Systeme. DVM, Berlin, 2010.
- [Hof et al.09] Hofmann, D.; Kopp, M.; Bertsche, B.; Wedel, M.; Göhner, P.; Mannhart, A.; Fritz, O.: Early Reliability Prediction of Mechatronic Systems in Automotive Industry. In: 15th ISSAT Interna-

- tional Conference on Reliability and Quality in Design, San Francisco, CA, 2009; S. 10-15.
- [Hof et al.10] Hofmann, D.; Kopp, M.; Bertsche, B.: Integrated Use of Reliability-relevant Information and Knowledge in Product Development of Mechatronics. In: 16th ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, Washington D.C., 2010; S. 16-168.
- [HSE03] HSE - Health and Safety Executive: Why control systems go wrong and how to prevent failure. HSE Books, Sudbury, 2003.
- [Hub76] Hubka, V.: Theorie der Konstruktionsprozesse Analyse der Konstruktionstätigkeit. Springer, Berlin, 1976.
- [Hüb96] Hübner, H.: Informationsmanagement und strategische Unternehmensführung: vom Informationsmarkt zur Information. Oldenbourg, München, 1996.
- [IAB05] IABG - Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH: V-Modell XT. <http://v-modell.iabg.de/index.php>, 27.10.2010.
- [Ise06] Isermann, R.: Fault-Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [Ise08] Isermann, R.: Mechatronische Systeme. Grundlagen ; mit 103 Tabellen. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, NY, 2008.
- [ISO05] ISO-International Standardization Organization: ISO 9000:2005: Quality management systems - Fundamentals and vocabulary, 2005.
- [ISO06] ISO-International Standardization Organization: Information technology -- Process Assessment, 2006.
- [Jac et al.99] Jacobson, I.; Booch, G.; Rumbaugh, J.: The unified software development process. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1999.
- [Jäg07] Jäger, P.: Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen. Dissertation, Universität Stuttgart, 2007.
- [Kal97] Kallenbach, E.: Zur Gestaltung integrierter mechatronischer Produkte. In: Mechatronik im Maschinen- und Fahrzeugbau. VDI-Verl., Düsseldorf, 1997.
- [Kal98] Kallmeyer, F.: Eine Methode zur Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme. HNI, Paderborn, 1998.
- [KBA11] KBA-Kraftfahrt-Bundesamt: Jahresbericht 2011. Druckzentrum KBA, Flensburg, 2011.

- [Kec02] Kececioglu, D.: Reliability engineering handbook. DEStech Publ, Lancaster, Penn., 2002.
- [Kes54] Kesselring, F.: Technische Kompositionslehre Anleitung zu technisch-wirtschaftlichem und verantwortungsbewußtem Schaffen. Springer, Berlin, 1954.
- [Kne01] Knepper, R.: Technische Sicherheit - Der Sicherheits- und Zuverlässigkeitsprozess in der zivilen Luftfahrt. In: August Euler-Luftfahrtpreis Verleihung. Sicherheit und Innovation im Luftverkehr ; achtes Kolloquium Luftverkehr an der Technischen Universität Darmstadt ; WS 2000/2001 /. Arbeitskreis Luftverkehr der Techn. Univ., Darmstadt, 2001.
- [KoPe04] Kochs, H.-D.; Petersen, J.: A Framework for Dependability Evaluation of Mechatronic Units. In: Organic and pervasive computing. ARCS 2004 workshop proceedings, March 26, 2004, Augsburg. Gesellschaft für Informatik, Bonn, 2004; S. 92-105.
- [Krc10] Krcmar, H.: Informationsmanagement. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [Kro et al.09] Krolo, A.; Gäng, J.; Bertsche, B.: Early Allocation of Reliability Information based on Component Interactions. In: Proceedings of the third International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics. October 21 - 23, 2009, Beijing, China. Science Press, Monmouth Junction, NJ, 2009.
- [Kro04] Krolo, A.: Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Stuttgart, 2004.
- [Leh et al.09] Lehner, F.; Scholz, M.; Wildner, S.: Wissensmanagement. Grundlagen, Methoden und technische Unterstützung. Hanser, München, 2009.
- [LeKa03] Levin, M. A.; Kalal, T. T.: Improving product reliability. Strategies and implementation. Wiley, Chichester, England, 2003.
- [Lin et al.09] Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T.: Structural Complexity Management. An Approach for the Field of Product Design. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Lin09] Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Lip01] Lippold, C.: Eine domänenübergreifende Konzeptionsumgebung für die Entwicklung mechatronischer Systeme. Shaker, Aachen, 2001.

- [Loh09] Loh, S. G. von: Evidenzbasiertes Wissensmanagement. Univ., Dissertation, Düsseldorf, 2009. Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler, Wiesbaden, 2009.
- [Man et al.07b] Mannhart, A.; Bilgic, A.; Bertsche, B.: Funktionsorientierter Ansatz zur Zuverlässigkeitsbetrachtung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen. In: Entwicklung und Betrieb zuverlässiger Produkte. 23. Tagung Technische Zuverlässigkeit TTZ 2007 ; Tagung Stuttgart, 22. und 23. März 2007. VDI-Verl., Düsseldorf, 2007.
- [Man et al.09] Mannhart, A.; Hofmann, D.; Bertsche, B.: Praxisorientierte Zuverlässigkeitsbewertung in frühen Entwicklungsphasen. In: Technische Zuverlässigkeit 2009. Entwicklung und Betrieb zuverlässiger Produkte; Leonberg, 29. und 30. April 2009. VDI, Düsseldorf, 2009.
- [MePa10] Meyna, A.; Pauli, B.: Taschenbuch der Zuverlässigkeitstechnik: quantitative Bewertungsverfahren. Hanser, München, 2010.
- [Mül07] Müller, M.: Automotive SPICE in der Praxis. Interpretationshilfe für Anwender und Assessoren. dpunkt-Verl., Heidelberg, 2007.
- [Mül09] Müller, T.: Integration von Verlässlichkeitsanalysen und -konzepten innerhalb der Entwicklungsmethodik mechatronischer Systeme. Universität Paderborn Heinz Nixdorf Inst., Paderborn, 2009.
- [Mur et al.08] Murthy, D. N. P.; Rausand, M.; Østerås, T.: Product reliability. Specification and performance. Springer, London, 2008.
- [Mus et al.90] Musa, J. D.; Iannino, A.; Okumoto, K.: Software reliability. Measurement, prediction, application. McGraw Hill, New York, 1990.
- [O'Ne03] O'Connor, P. D. T.; Newton, D.: Practical reliability engineering. Wiley, Chichester, 2003.
- [Ott06] Otte, B.: Strukturierung und Bewertung von Eingangsdaten für Zuverlässigkeitsanalysen. Univ., Dissertation, Stuttgart, 2006. IMA, Stuttgart, 2006.
- [Pah07] Pahl, G.: Konstruktionslehre Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [Pau98] Pauli, B.: Zuverlässigkeitsprognosen für elektronische Steuergeräte im Kraftfahrzeug. Modellbildungen und deren praktische Anwendungen. Dissertation, Universität Wuppertal, 1997. Shaker, Aachen, 1998.

- [PeBl06] Pellegrini, T.; Blumauer, A.: Semantic Web. Wege zur vernetzten Wissensgesellschaft. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [Pet et al.10] Peters, S.; Brühl, R.; Stelling, J. N.: Betriebswirtschaftslehre. Einführung. Oldenbourg, München, 2010.
- [Pic10] Picot, A.: Die grenzenlose Unternehmung Information, Organisation und Management. Lehrbuch zur Unternehmensführung im Informationszeitalter. Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler, Wiesbaden, 2010.
- [Pie04] Pietsch, T.: Strategisches Informationsmanagement Bedeutung, Konzeption und Umsetzung. Erich Schmidt, Berlin, 2004.
- [PoLi08] Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Optimierte Produkte - systematisch von Anforderungen zu Konzepten. Springer, Berlin, 2008.
- [Pro10] Probst, G. J. B.: Wissen managen wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen. Gabler, Wiesbaden, 2010.
- [Rak02] Rakowsky, U. K.: System-Zuverlässigkeit. Terminologie, Methoden, Konzepte. Univ., Habil.-Schr.--Wuppertal, 2000. LiLoLe-Verl., Hagen/Westfalen, 2002.
- [Rod02] Rodríguez Dapena, P.: Software safety verification in critical software intensive systems. Techn. Univ, Eindhoven, 2002.
- [Rot00] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Springer, Berlin, 2000.
- [Roy70] Royce, W. W.: Managing the Development of Large Software Systems. In: Proceedings of IEEE WESCON. IEEE, Piscataway, NJ, 1970.
- [ScSc10] Schnieder, E.; Schnieder, L.: Formalisierte Terminologien technischer Systeme und ihrer Zuverlässigkeit. Inst. für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig, 2010.
- [SEI10] SEI - Software Engineering Institute: CMMI. Capability Maturity Model Integration (CMMI). <http://www.sei.cmu.edu/cmml/>, 28.10.2010.
- [Sei82] Seiffert, H.: Information über die Information. C. H. Beck, München, 1982.
- [Shi04] Shi, B.: Design for multi-technology systems. VDI-Verl, Düsseldorf, 2004.
- [Sho84] Shooman, M.: Software Reliability: A historical perspective. In: IEEE Transaction on Reliability. IEEE, Piscataway, NJ, 1984; S. 48-55.

- [Spi98] Spinner, H.: Die Architektur der Informationsgesellschaft. Philo Verlagsgesellschaft, Berlin, 1998.
- [Sta03] Stamatis, D. H.: Failure mode and effect analysis. FMEA from theory to execution. ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisc, 2003.
- [Ste81] Steward, D. V.: The Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems. In: IEEE Transactions on Engineering Management. IEEE, Piscataway, NJ, 1981; S. 71-74.
- [Ste93] Steinmüller, W.: Informationstechnologie und Gesellschaft. Einführung in die Angewandte Informatik. Wiss. Buchges., Darmstadt, 1993.
- [Sto08] Stockinger, S. M.: Konzept zur Optimierung des PDM-Einsatzes in der Automobilindustrie, 2008.
- [Str et al.04] Strauch, D.; Kuhlen, R.; Laisiepen, K.: Grundlagen der praktischen Information und Dokumentation. Saur, München, 2004.
- [Suc et al.09] Suchowerskyj, W.; Gamweger, J.; Jöbstl, O., Strohrmann, M.: Design for Six Sigma: Kundenorientierte Produkte und Prozesse fehlerfrei entwickeln. Hanser, München, 2008.
- [Tsc54] Tschochner, H.: Konstruieren und Gestalten. Abriß einer Konstruktions- u. Gestaltungslehre unter besonderer Berücksichtigung von Maschinenbau und Feinmechanik. Girardet, Essen, 1954.
- [VDA00] VDA-Verband der Automobilindustrie: Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie - Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten, 2000.
- [VDI01] VDI-Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2519: Vorgehensweise bei der Erstellung von Lasten-/Pflichtenheften. VDI-Verl., Düsseldorf, 2001.
- [VDI04] VDI-Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Verl., Düsseldorf, 2004.
- [VDI07] VDI-Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4003: Zuverlässigkeitsmanagement. VDI-Verl., Düsseldorf, 2007.
- [VDI86] VDI-Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4004: Zuverlässigkeitskenngrößen. VDI-Verl., Düsseldorf, 1986.
- [VDI93] VDI-Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI-Verl., Düsseldorf, 1993.

- [VDI94] VDI-Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2422: Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik. VDI-Verl., Düsseldorf, 1994.
- [Wat06] Watty, R.: Methodik zur Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik. Dissertation, Universität Stuttgart, 2006.
- [Wed et al.07] Wedel, M. et al.: Domänenübergreifende Zuverlässigkeitsbewertung in frühen Entwicklungsphasen unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen. In: Entwurf mechatronischer Systeme. Grundlagen, Methoden und Werkzeuge, Adaption und Selbstoptimierung, Integration Mechanik und Elektronik, Miniaturisierung ; 5. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, 22. und 23. März 2007, Heinz-Nixdorf-Institut. Heinz-Nixdorf-Inst., Paderborn, 2007.
- [Wer74] Wersig, G.: Information, Kommunikation, Dokumentation. Ein Beitrag zur Orientierung der Informations- und Dokumentationswissenschaft. Verl. Dokumentation, Pullach bei München, 1974.
- [Wie01] Wiederspohn, K.: Wissensmanagement ist ein Top-Thema - aber die Unternehmen stehen noch am Anfang. In: Wissensmanagement. Systeme - Anwendungen - Technologien. Shaker, Aachen, 2001; S. 45-63.
- [Wil04] Wilker, H.: Leitfaden zur Zuverlässigkeitsermittlung technischer Produkte. Books on Demand, Norderstedt, 2004.
- [Wym07] Wyman, O.: Oliver Wyman-Studie „Auto & Umwelt 2007“. Kriterien beim Neuwagenkauf - EU, USA, Frankfurt a. M., 2007.
- [Yan07] Yang, G.: Life cycle reliability engineering. Wiley, Hoboken, NJ, 2007.
- [Zel05] Zeleny, M.: Human systems management. Integrating knowledge, management and systems. World Scientific Publ., Singapore, 2005.
- [Zel87] Zeleny, M.: Management Support Systems: Towards Integrated Knowledge Management. In: Human Systems Management, 1987; S. 59-70.
- [Zim72] Zimmermann, D.: Produktionsfaktor Information. Neuwied, Berlin, 1972.

10 Anhang

Abbildung 58 bietet einen Überblick über Prozessabschnitte der vier in Abschnitt 4.1 betrachteten Entwicklungsprozesse.

VDI 2206	VDI 2221	Benz	V-Modell
Systementwurf	Planen	System-Anforderungsanalyse	Projekt genehmigt
Modellbildung und -analyse (begleitend)	Konzipieren	Funktionaler Entwurf	Projekt definiert
Domänenspezifischer Entwurf	Entwerfen	Funktionale Gefährdungsanalyse	Projekt ausgeschrieben (AG/AN)
Systemintegration	Ausarbeiten	System-Entwurf	Angebot abgegeben (AG/AN)
Eigenschaftsabsicherung		Entwurfsbegleitende System-Sicherheitsbewertung	Projekt beauftragt (AG/AN)
		Implementierung	System spezifiziert
		Integration und Test	System entworfen
		System-Sicherheitsbewertung	Feinentwurf abgeschlossen
		Zulassung und Inbetriebnahme	Systemelemente realisiert
			System integriert
			Iteration geplant
			Lieferung durchgeführt (AG/AN)
			Abnahme erfolgt (AG/AN)
			Projektfortschritt überprüft
			Projekt abgeschlossen

Abbildung 58: Übersicht der Prozessabschnitte in den vier betrachteten Entwicklungsprozessen, [VDI04], [VDI93], [Ben04], [IAB05]

Abbildung 59 zeigt die Meilensteine und Prozessabschnitte der drei in Abschnitt 4.1 betrachteten Zuverlässigkeitsprozesse als Übersicht.

VDA 3.1	VDI 4003	DIN 60300
Projektunabhängige Vorentwicklung	Entwicklung	Konzept- und Definitionsphase
Meilenstein 0	Vorentwicklung, Studien, Konzept, Definition	Entwicklungsphase
Konzeption	Meilenstein M0	Fertigungsphase
Meilenstein A: Projektanfrage, -auftrag	Meilenstein M1	Installationsphase
Meilenstein B: Freigabe zur Grobentwicklung	Detailentwicklung, Konstruktion	Betriebs- und Instandhaltungsphase
Produktentwicklung und Verifizierung	Meilenstein M2	Entsorgungsphase
Meilenstein C: Freigabe zur Detailentwicklung	Qualifikation, Verifikation	
Meilenstein D: Freigabe zur Detailplanung	Meilenstein M3	
Meilenstein E: Freigabe Anlagenbeschaffung	Herstellung	
Meilenstein F: Freigabe Serienproduktion	Herstellung planen	
Fertigung und Nutzung	Meilenstein M4	
Meilenstein G: Produkt-Review	Herstellung ausführen	
Meilenstein H: Modellauslauf/	Meilenstein M5	
	Montage, Abnahmeprüfung	
	Meilenstein M6	
	Betrieb	
	Betriebsplanung	
	Meilenstein M7	
	Betrieb, Nutzung	
	Meilenstein M8	
	Betriebserweiterung, Betriebsausdehnung,	
	Meilenstein M9	
	Entsorgung	
	Außerbetriebsetzung, Entsorgung	
	Meilenstein M10	

Abbildung 59: Übersicht der Meilensteine und Prozessabschnitte in den drei betrachteten Zuverlässigkeitsprozessen, [VDA00], [VDI07], [DIN04]

Nachfolgende Tabelle 17 bildet die beispielhafte Gliederung eines Lastenheftes in Anlehnung an [VDI01] ab.

Tabelle 17: Beispielhafte Gliederung eines Lastenheftes in Anlehnung an [VDI01]

Beispielhafte Gliederung eines Lastenheftes	
1	Einführung in das Projekt
1.1	Veranlassung
1.2	Zielsetzung
1.3	Projektumfeld
1.4	Wesentliche Aufgaben
1.5	Eckdaten für das Projekt
2	Beschreibung der Ausgangssituation (Ist-Zustand)
2.1	Beschreibung der Abläufe
2.2	Beschreibung technischer Komponenten
2.3	Organisation (Arbeitsgebiete, Verantwortlichkeiten, Zuständigkeiten)
2.4	Datendarstellung
3	Aufgabenstellung (Soll-Zustand)
3.1	Kurzbeschreibung der Aufgabenstellung
3.2	Gliederung und Beschreibung der Aufgabenstellung
3.3	Ablaufbeschreibung
3.4	Datendarstellung und Mengengerüst
3.5	Zukunftsaspekte
4	Schnittstellen
5	Anforderungen an die Systemtechnik
5.1	Umgebung
5.2	Technische Merkmale des Gesamtsystems
5.3	Kaufmännische und vertragliche Merkmale
5.4	Betriebsmittelvorschriften
5.5	Sicherheitsvorschriften
6	Anforderungen für die Inbetriebnahme und den Einsatz
6.1	Dokumentation
6.2	Montage
6.3	Inbetriebnahme
6.4	Probetrieb, Abnahmen
6.5	Schulung
6.6	Betriebsablauf
6.7	Instandhaltung
7	Anforderungen an die Qualität
8	Anforderungen an die Projektabwicklung
8.1	Projektorganisation
8.2	Projektdurchführung
8.3	Allgemeine Vorgaben
9	Systemtechnische Lösungen
9.1	Kurzbeschreibung der Lösung
9.2	Gliederung und Beschreibung der systemtechnischen Lösung
9.3	Beschreibung der systemtechnischen Lösung für den regulären Betrieb (Normalbetrieb, Anlauf und Wiederanlauf) und für den irregulären Betrieb (gestörter Betrieb, Notbetrieb)
10	Systemtechnik
10.1	Technische Daten der Materialflusssysteme und Komponenten
10.2	Technische Angaben für das Gesamtsystem
Anhang	

Das „Detail-Beschreibungsblatt für Funktionen“ im Zuverlässigkeitsinformati-
onsmodell ZIM - Systemsicht zeigt Abbildung 60.

Bezeichnung der Funktion									
Kurzbezeichnung der Funktion									
indirekte (funktionale) Verknüpfung zu Komponenten gemäß DMM SK-SF									
Anzahl an Domänen, mit denen eine indirekte (funktionale) Verknüpfung zu Komponenten besteht									
Zuverlässigkeitsmodelle									
Informationen mit Zuverlässigkeitsrelevanz									
Entwicklungsprozess Mechatronik									
Eingang			Info. m. Zuv-Relevanz				Ausgang		
Mt_+fortl. Nr.	BEG _I	DPG _I							Domäne/Methode inkl. fortl. Nr.
Entwicklungsprozess Mechanik									
Eingang			Info. m. Zuv-Relevanz				Ausgang		
Me_+fortl. Nr.	BEG _I	DPG _I							Domäne/Methode inkl. fortl. Nr.
Entwicklungsprozess Elektronik									
Eingang			Info. m. Zuv-Relevanz				Ausgang		
El_+fortl. Nr.	BEG _I	DPG _I							Domäne/Methode inkl. fortl. Nr.
Entwicklungsprozess Software									
Eingang			Info. m. Zuv-Relevanz				Ausgang		
SW_+fortl. Nr.	BEG _I	DPG _I							Domäne/Methode inkl. fortl. Nr.
Dokumente									
Eingang			Info. m. Zuv-Relevanz				Ausgang		
Dokument_+fortl. Nr.	BEG _I	DPG _I							Domäne/Methode inkl. fortl. Nr.
Zuverlässigkeitsprozess									
Eingang			Info. m. Zuv-Relevanz				Ausgang		
Zuv_+fortl. Nr.	BEG _I	DPG _I							Domäne/Methode inkl. fortl. Nr.
Methodenergebnisse									
Eingang			Info. m. Zuv-Relevanz				Ausgang		
Methode_+fortl. Nr.	BEG _I	DPG _I							Domäne/Methode inkl. fortl. Nr.
weitere Informationen									
Eingang			Info. m. Zuv-Relevanz				Ausgang		
	BEG _I	DPG _I							Domäne/Methode inkl. fortl. Nr.

Abbildung 60: Detail-Beschreibungsblatt für Funktionen

Die nachfolgende Tabelle 18 zeigt alle im Rahmen dieser Arbeit identifizierten charakterisierenden Eigenschaften einer Funktion auf.

Tabelle 18: Charakterisierende Eigenschaften einer Funktion

Bezeichnung der Funktion
Kurzbezeichnung der Funktion
indirekte (funktionale) Verknüpfung zu Komponenten gemäß DMM Sk-Sf Anzahl an Domänen, mit denen eine indirekte (funktionale) Verknüpfung zu Komponenten besteht
Zuverlässigkeitsmodelle
Informationen mit Zuverlässigkeitsrelevanz
Eingang Domäne/ Methode inkl. fortl. Nr.; BEG _i ; DPG _i
Informationen mit Zuverlässigkeitsrelevanz fortl. Nr.; Bezeichnung; Beschreibung; Wert; Einheit; Anzahl Informationsverknüpfungen
Ausgang Domäne/ Methode inkl. fortl. Nr.
Mechatronisierungsgrad MG
Dokumentenverknüpfungsgrad DKG
Methodenverknüpfungsgrad MKG
Diskrepanzgrad DPG_{Fi}
Beeinflussungsgrad BEG_{Fi}

Tabelle 19 zeigt die detaillierte Übersicht der Verläufe von Mechatronisierungsgrad MG, Dokumentenverknüpfungsgrad DKG, Methodenverknüpfungsgrad MKG, Diskrepanzgrad DPG und Beeinflussungsgrad BEG für die Komponente „elektrischer Motor“ des Beispielsystems „elektrischer Fensterheber“ (Konzept 2: Seilzugfensterheber) über den Entwicklungsprozess hinweg dargestellt.

Tabelle 19: Übersicht über die im Zuverlässigkeitsinformationsmodell verzeichneten Verläufe der Kennzahlen für die Komponente „elektrischer Motor“ des Beispielsystems „elektrischer Fensterheber“, Konzept 2 (Seilzugfensterheber)

Eintragungen im Zuverlässigkeitsinformationsmodell am Beispiel "elektrischer Motor"					
	MG	DKG	MKG	DPG	BEG
MS 0	1	0,1	0,05	0	0,05
MS A	3	0,05	0,14	0,15	0,27
MS B	3	0,15	0,2	0,1	0,05
MS C	3	0,25	0,27	0	0,12
MS D	3	0,1	0,15		
MS E	2	0,019	0,018		
MS F	3	0,15	0,16		
MS G	3	0,13	0,07		
MS H	2	0,011	0,05		

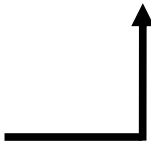
Abbildungen 62 bis 82 zeigen das matrisenbasierte Informationsverknüpfungsmo-
dell für Konzept 1 („elektrischer Fensterheber“: Kurbelfensterheber).

	Fenster automatisch öffnen	Öffnungswunsch erkennen	Öffnungswunsch prüfen	Antrieb anfahren	Endposition erkennen	Antrieb abschalten	Fenster automatisch schließen	Schließwunsch erkennen	Schließsituation prüfen	Antrieb anfahren	Endposition erkennen	Antrieb abschalten	Fenster in jeder Position anhalten	Haltewunsch erkennen	Antrieb abschalten	Position halten	bei Blockade zurückfahren
elektrischer Motor	X		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
Steuerung	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
mechanisches Stirnradgetriebe	X		X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X
Hebearm	X		X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X
Stützarm	X		X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X
Glasführungsschiene	X		X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X
Stützschiene	X		X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X
Glasscheibe	X		X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X

Abbildung 61: Zuverlässigkeitsinformationsmodell des Beispiels „elektrischer Fensterheber“ -
Domain Mapping Matrix Systemkomponenten-Systemfunktionen (DMM Sk-Sf)

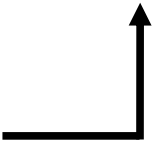
		Domänenspezifischer Entwurf																											
		Anforderungen	Systementwurf	Modellbildung und -analyse			System-Anforderungsanalyse			Funktionaler Entwurf			System-Entwurf			Systemintegration			Eigenschaftsabsicherung		Herstellung, Montage		Herstellung, Montage		Herstellung		Betrieb, Nutzung		Entsorgung
		Planen	Konzipieren	Entwerfen	Ausarbeiten	System-Anforderungsanalyse	Funktionaler Entwurf	System-Entwurf	Implementierung	System spezifiziert	System entworfen	Feinentwurf abgeschlossen	Systemelemente realisiert	Systemintegration	Eigenschaftsabsicherung	Herstellung, Montage	Herstellung, Montage	Herstellung, Montage	Herstellung	Betrieb, Nutzung	Entsorgung								
Anforderungen																													
Systementwurf		X		X	X		X	X		X	X												X	X			X		
Modellbildung und -analyse		X	X	X	X		X	X		X	X				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Domänenspezifischer Entwurf	Planen	X	X	X	X										X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	Konzipieren	X	X	X	X		X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	Entwerfen																												
	Ausarbeiten																												
	System-Anforderungsanalyse	X	X	X	X	X							X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Funktionaler Entwurf	X	X	X	X	X	X						X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	System-Entwurf																												
	Implementierung																												
	System spezifiziert	X	X	X	X			X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
System entworfen																													
Feinentwurf abgeschlossen																													
Systemelemente realisiert																													
Systemintegration	X	X	X			X			X	X			X	X															
Eigenschaftsabsicherung	X	X																									X		
Herstellung, Montage	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X				X	X	X									X			
Herstellung, Montage	X		X	X			X	X							X	X										X	X		
Herstellung	X						X	X		X					X	X										X			
Betrieb, Nutzung	X																												
Entsorgung	X		X	X		X	X		X	X					X											X			

Abbildung 62: Zuverlässigkeitsinformationsmodell des Beispiels „elektrischer Fensterheber“ -
Design Structure Matrix Mechatronik (DSM Mt)



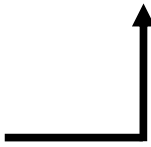
		Projektunabhängige Vorentwicklung		Konzeption		MS A: Projektanfrage, -auftrag		MS B: Freigabe zur Grobentwicklung		MS C: Freigabe zur Detailentwicklung		MS D: Freigabe zur Detailplanung		MS E: Freigabe Anlagenbeschaffung		MS F: Freigabe Serienproduktion		MS G: Produkt-Review		MS H: Modellauslauf/Entsorgung	
		MS 0																			
		Zuverlässigkeitsziele	Zuverlässigkeitsrisiken																		
Anforderungen		X	X																		
Systementwurf								X													
Modellbildung und -analyse								X	X												
Domänenspezifischer Entwurf	Planen	X	X			X	X														
	Konzipieren	X	X			X	X	X	X												
	Entwerfen	X	X			X	X	X	X	X											
	Ausarbeiten	X	X			X	X	X	X	X	X										
	System-Anforderungsanalyse	X	X			X	X														
	Funktionaler Entwurf	X	X			X	X														
	System-Entwurf	X	X			X	X	X	X	X											
	Implementierung	X	X			X	X	X	X	X	X										
	System spezifiziert																				
	System entworfen	X	X			X	X														
Feinentwurf abgeschlossen	X	X			X	X	X	X	X												
Systemelemente realisiert	X	X			X	X															
Systemintegration		X	X					X	X	X	X										
Eigenschaftsabsicherung		X	X					X	X	X	X										
Herstellung, Montage		X	X							X	X										
	Herstellung, Montage	X	X							X	X										
	Herstellung, Montage	X	X							X	X										
	Herstellung	X	X							X	X										
Betrieb, Nutzung																					
Entsorgung																					

Abbildung 63: Zuverlässigkeitsinformationsmodell des Beispiels „elektrischer Fensterheber“ - Domain Mapping Matrix Mechatronik-Zuverlässigkeitsprozess (DMM Mt-Zp)



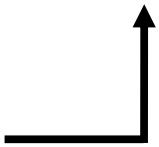
		Lastenheft_Vorgänger					Lastenheft_neu					FMEA_Vorgänger	
		Kap_1.1 Zuverlässigkeitziel: 500ppm/a	Kap_2.3 Use Cases 10.000 Öffnungszyklen 300 Mal anhalten	Kap_5.1 Öffnungsgeschwindigkeit >0,07m/s	Kap_1.1 Zuverlässigkeitziel: 225ppm/a	Kap_2.3 Use Cases 15.000 Öffnungszyklen 5.000 Mal anhalten	Kap_5.1 Öffnungsgeschwindigkeit >0,15m/s						
Anforderungen		X	X	X	X	X							X
Systementwurf													
Modellbildung und -analyse													
Domänenspezifischer Entwurf	Planen						X	X	X	X	X		
	Konzipieren						X	X	X	X	X		
	Entwerfen												
	Ausarbeiten												
	System-Anforderungsanalyse						X	X	X	X	X		
	Funktionaler Entwurf												
	System-Entwurf						X	X	X	X	X		
	Implementierung												
	System spezifiziert						X	X	X	X	X		
	System entworfen						X	X	X	X	X		
Feinentwurf abgeschlossen						X	X	X	X	X			
Systemelemente realisiert													
Systemintegration													
Eigenschaftsabsicherung							X	X	X	X	X		
Herstellung, Montage													
	Herstellung, Montage												
	Herstellung, Montage												
	Herstellung												
Betrieb, Nutzung													
Entsorgung													

Abbildung 64: Zuverlässigkeitsinformationsmodell des Beispiels „elektrischer Fensterheber“ - Domain Mapping Matrix Mechatronik-Dokument 1 (DMM Mt-D1: Mechatronik - Lastenheft Vorgänger), Domain Mapping Matrix Mechatronik-Dokument 2 (DMM Mt-D2: Mechatronik - Lastenheft neu), Domain Mapping Matrix Mechatronik-Methode 1 (DMM Mt-M1: Mechatronik - FMEA Vorgänger)



		Konzeptvariantenmatrix erstellen	Funktionen ermitteln	Gewichtung der Funktionen	Anforderungen ermitteln	Konzepte erarbeiten/eintragen	Kriterien erarbeiten	Umsetzung der Kriterien für Konzepte erarbeiten	Konzeptspezifische Umsetzung der Kriterien beschreiben	Konzeptspezifische Fehlfunktionen ermitteln	Ermittlung der beteiligten Komponenten	Konzeptbewertung	technische Umsetzbarkeit U für Funktionen ermitteln	Kosten-Zeit-Faktor K für Funktionen	Einzelentwicklungsfähigkeit je Funktion und Konzept ermitteln	Gesamtentwicklungsfähigkeit je Konzept ermitteln	Konzeptvergleich	auf Basis Einzelentwicklungsfähigkeit	auf Basis Gesamtentwicklungsfähigkeit	Konzeptentscheid	auf Basis Konzeptvergleich
Anforderungen																					
Systementwurf		X	X		X	X			X	X	X		X	X	X	X		X	X		X
Modellbildung und -analyse																					
Domänenspezifischer Entwurf	Planen	X	X	X		X			X	X		X	X								
	Konzipieren																				
	Entwerfen																				
	Ausarbeiten																				
	System-Anforderungsanalyse	X	X	X		X			X	X		X	X								
	Funktionaler Entwurf																				
	System-Entwurf																				
	Implementierung																				
	System spezifiziert	X	X	X		X			X	X		X	X								
	System entworfen																				
Feinentwurf abgeschlossen																					
Systemelemente realisiert																					
Systemintegration																					
Eigenschaftsabsicherung			X	X		X							X	X				X	X		
Herstellung, Montage													X	X							
	Herstellung, Montage																				
	Herstellung, Montage																				
	Herstellung																				
Betrieb, Nutzung																					
Entsorgung																					

Abbildung 65: Zuverlässigkeitsinformationsmodell des Beispiels „elektrischer Fensterheber“ - Domain Mapping Matrix Mechatronik-Methode 2 (DMM Mt-M2: Mechatronik - Qualitative Konzeptbewertung)

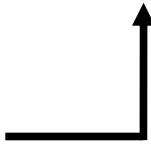


	elektrischer Motor	Steuerung	mechanisches Stirnradgetriebe	Hebearm	Stützarm	Glasführungsschiene	Stützschiene	Glasscheibe	Fenster automatisch öffnen	Öffnungswunsch erkennen	Öffnungswunsch prüfen	Antrieb anfahren	Endposition erkennen	Antrieb abschalten	Fenster automatisch schließen	Schließwunsch erkennen	Schließsituation prüfen	Antrieb anfahren	Endposition erkennen	Antrieb abschalten	Fenster in jeder Position anhalten	Haltewunsch erkennen	Antrieb abschalten	Position halten	bei Blockade zurückfahren
Anforderungen																									
Systementwurf	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Modellbildung und -analyse									X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Domänenspezifischer Entwurf	Planen	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Konzipieren																								
	Entwerfen																								
	Ausarbeiten																								
	System-Anforderungsanalyse		X						X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Funktionaler Entwurf								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	System-Entwurf																								
	Implementierung																								
	System spezifiziert		X						X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	System entworfen																								
	Feinentwurf abgeschlossen																								
Systemelemente realisiert																									
Systemintegration	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Eigenschaftsabsicherung	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Herstellung, Montage	X	X	X	X	X	X	X																		
Herstellung, Montage	Herstellung, Montage	X	X	X	X	X	X																		
	Herstellung, Montage	X																							
	Herstellung	X																							
Betrieb, Nutzung	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Entsorgung	X	X	X	X	X	X	X																		

Abbildung 66: Zuverlässigkeitsinformationsmodell des Beispiels „elektrischer Fensterheber“ - Domain Mapping Matrix Mechatronik-Systemkomponenten (DMM Mt-Sk), Domain Mapping Matrix Mechatronik-Systemfunktionen (DMM Mt-Sf)

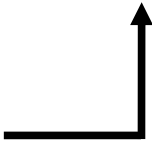
	Anforderungen	Systementwurf	Domänenspezifischer Entwurf										Systemintegration	Eigenschaftsabsicherung	Herstellung, Montage	Herstellung, Montage	Herstellung	Betrieb, Nutzung	Entsorgung
			Modellbildung und -analyse	Planen	Konzipieren	Entwerfen	Ausarbeiten	System-Anforderungsanalyse	Funktionaler Entwurf	System-Entwurf	Implementierung	System spezifiziert							
Projektunabhängige Vorentwicklung																			
MS 0																			
Zuverlässigkeitsziele	X	X	X				X						X						
Zuverlässigkeitsrisiken	X	X	X	X	X		X	X	X				X	X	X				
Konzeption																			
MS A: Projektanfrage, -auftrag																			
ZUV-relevante Unterstützung																			
Konzeptentwicklung	X	X	X	X	X		X	X	X			X	X	X					
Konzeptentscheidung: QLK	X	X	X	X			X	X				X							
MS B: Freigabe zur Grobentwicklung																			
ZUV-Konzeptanalyse: QNK	X	X	X	X	X		X	X	X			X	X	X		X	X	X	
Systemmodell Zuverlässigkeit aufstellen																			
Fehlerbaum erstellen	X	X	X	X	X		X	X	X			X	X	X		X			
Blockschaltbild erstellen	X	X	X	X	X		X	X	X			X	X	X		X			
Zuverlässigkeits(test)planung mit Lieferanten durchführen	X				X		X	X				X	X		X	X	X	X	
Produktentwicklung und Verifizierung																			
MS C: Freigabe zur Detailentwicklung																			
FMEA starten	X	X		X	X	X	X	X	X			X	X	X		X	X	X	
MS D: Freigabe zur Detailplanung																			
Produktionsprozess																			
MS E: Freigabe Anlagenbeschaffung																			
MS F: Freigabe Serienproduktion																			
Fertigung und Nutzung																			
MS G: Produkt-Review																			
MS H: Modellauslauf/Entsorgung																			

Abbildung 67: Zuverlässigkeitsinformationsmodell des Beispiels „elektrischer Fensterheber“ - Domain Mapping Matrix Zuverlässigkeitsprozess-Mechatronik (DMM Zp-Mt)




		Projektunabhängige Vorentwicklung																				
		MS 0		Konzeption		MS A: Projektanfrage, -auftrag		MS B: Freigabe zur Grobentwicklung		MS C: Freigabe zur Detailentwicklung		MS D: Freigabe zur Detailplanung		MS E: Freigabe Anlagenbeschaffung		MS F: Freigabe Serienproduktion		MS G: Produkt-Review		MS H: Modellauslauf/Entsorgung		
		Zuverlässigkeitsziele	Zuverlässigkeitsrisiken	ZUV-relevante Unterstützung	Konzeptentwicklung	Konzeptentscheidung: QLK	ZUV-Konzeptanalyse: QNK	Systemmodell Zuverlässigkeit	Fehlerbaum erstellen	Blockschaltbild erstellen	Zuverlässigkeits(test)planung mit Lieferanten durchführen	Produktentwicklung und Verifizierung	FMEA starten	Produktionsprozess	Fertigung und Nutzung							
Projektunabhängige Vorentwicklung																						
MS 0																						
	Zuverlässigkeitsziele			X	X	X																
	Zuverlässigkeitsrisiken	X		X	X	X	X	X	X	X												
Konzeption																						
MS A: Projektanfrage, -auftrag																						
	ZUV-relevante Unterstützung																					
	Konzeptentwicklung	X	X			X																
	Konzeptentscheidung: QLK	X	X			X																
MS B: Freigabe zur Grobentwicklung																						
	ZUV-Konzeptanalyse: QNK	X	X			X	X															
	Systemmodell Zuverlässigkeit aufstellen																					
	Fehlerbaum erstellen	X	X			X	X															
	Blockschaltbild erstellen	X	X			X	X															
	Zuverlässigkeits(test)planung mit Lieferanten durchführen	X	X			X	X	X	X	X												
Produktentwicklung und Verifizierung																						
MS C: Freigabe zur Detailentwicklung																						
	FMEA starten	X	X			X	X	X	X	X												
MS D: Freigabe zur Detailplanung																						
Produktionsprozess																						
MS E: Freigabe Anlagenbeschaffung																						
MS F: Freigabe Serienproduktion																						
Fertigung und Nutzung																						
MS G: Produkt-Review																						
MS H: Modellauslauf/Entsorgung																						

Abbildung 68: Zuverlässigkeitsinformationsmodell des Beispiels „elektrischer Fensterheber“ - Design Structure Matrix Zuverlässigkeitsprozess (DSM Zp)



	Lastenheft_Vorgänger						Lastenheft_neu						FMEA_Vorgänger			
	Kap_1.1	Zuverlässigkeitziel: 500ppm/a	Kap_2.3	Use Cases	10.000 Öffnungszyklen	300 Mal anhalten	Kap_5.1	Öffnungsgeschwindigkeit >0,07m/s	Kap_1.1	Zuverlässigkeitziel: 225ppm/a	Kap_2.3	Use Cases		15.000 Öffnungszyklen	5.000 Mal anhalten	Kap_5.1
Projektunabhängige Vorentwicklung																
MS 0																
Zuverlässigkeitsziele	X							X			X	X		X		
Zuverlässigkeitsrisiken	X										X	X		X		
Konzeption																
MS A: Projektanfrage, -auftrag																
ZUV-relevante Unterstützung																
Konzeptentwicklung				X	X		X									
Konzeptentscheidung: QLK				X	X		X									
MS B: Freigabe zur Grobentwicklung																
ZUV-Konzeptanalyse: QNK																
Systemmodell Zuverlässigkeit aufstellen								X		X	X			X		
Fehlerbaum erstellen																
Blockschaltbild erstellen																
Zuverlässigkeits(test)planung mit Lieferanten durchführen								X		X	X			X		
Produktentwicklung und Verifizierung																
MS C: Freigabe zur Detailentwicklung																
FMEA starten											X	X		X		
MS D: Freigabe zur Detailplanung																
Produktionsprozess																
MS E: Freigabe Anlagenbeschaffung																
MS F: Freigabe Serienproduktion																
Fertigung und Nutzung																
MS G: Produkt-Review																
MS H: Modellauslauf/Entsorgung																

Abbildung 69: Zuverlässigkeitsinformationsmodell des Beispiels „elektrischer Fensterheber“ - Domain Mapping Matrix Zuverlässigkeitsprozess-Dokument 1 (DMM Zp-D1: Zuverlässigkeitsprozess - Lastenheft Vorgänger), Domain Mapping Matrix Zuverlässigkeitsprozess-Dokument 2 (DMM Zp-D2: Zuverlässigkeitsprozess - Lastenheft neu), Domain Mapping Matrix Zuverlässigkeitsprozess-Methode 1 (DMM Zp-M1: Zuverlässigkeitsprozess - FMEA Vorgänger)



	Konzeptvariantenmatrix erstellen	Funktionen ermitteln	Gewichtung der Funktionen	Anforderungen ermitteln	Konzepte erarbeiten/eintragen	Kriterien erarbeiten	Umsetzung der Kriterien für Konzepte erarbeiten	Konzeptspezifische Umsetzung der Kriterien beschreiben	Konzeptspezifische Fehlfunktionen ermitteln	Ermittlung der beteiligten Komponenten	Konzeptbewertung	technische Umsetzbarkeit U für Funktionen ermitteln	Kosten-Zeit-Faktor K für Funktionen	Einzelentwicklungsfähigkeit je Funktion und Konzept ermitteln	Gesamtentwicklungsfähigkeit je Konzept ermitteln	Konzeptvergleich	auf Basis Einzelentwicklungsfähigkeit	auf Basis Gesamtentwicklungsfähigkeit	Konzeptentscheid	auf Basis Konzeptvergleich
Projektunabhängige Vorentwicklung																				
MS 0																				
Zuverlässigkeitsziele												X	X	X	X					
Zuverlässigkeitsrisiken	X	X	X		X							X	X	X	X					
Konzeption																				
MS A: Projektanfrage, -auftrag																				
ZUV-relevante Unterstützung Konzeptentwicklung																				
Konzeptentscheidung: QLK																				X
MS B: Freigabe zur Grobentwicklung																				
ZUV-Konzeptanalyse: QNK																				
Systemmodell Zuverlässigkeit aufstellen	X	X	X		X				X											
Fehlerbaum erstellen	X	X	X		X				X											
Blockschaltbild erstellen	X	X	X		X				X											
Zuverlässigkeits(test)planung mit Lieferanten durchführen	X	X	X		X			X	X			X	X	X	X					
Produktentwicklung und Verifizierung																				
MS C: Freigabe zur Detailentwicklung																				
FMEA starten																				
MS D: Freigabe zur Detailplanung Produktionsprozess																				
MS E: Freigabe Anlagenbeschaffung																				
MS F: Freigabe Serienproduktion																				
Fertigung und Nutzung																				
MS G: Produkt-Review																				
MS H: Modellauslauf/Entsorgung																				

Abbildung 70: Zuverlässigkeitsinformationsmodell des Beispiels „elektrischer Fensterheber“ - Domain Mapping Matrix Zuverlässigkeitsprozess-Methode 2 (DMM Zp-M2: Zuverlässigkeitsprozess - Qualitative Konzeptbewertung)

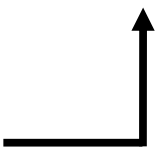
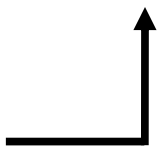
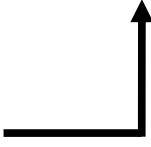
	elektrischer Motor	Steuerung	mechanisches Stirnradgetriebe	Hebearm	Stützarm	Glasführungsschiene	Stützschiene	Glasscheibe	Fenster automatisch öffnen	Öffnungswunsch erkennen	Öffnungswunsch prüfen	Antrieb anfahren	Endposition erkennen	Antrieb abschalten	Fenster automatisch schließen	Schließwunsch erkennen	Schließsituation prüfen	Antrieb anfahren	Endposition erkennen	Antrieb abschalten	Fenster in jeder Position anhalten	Hallewunsch erkennen	Antrieb abschalten	Position halten	bei Blockade zurückfahren
																									
Projektunabhängige Vorentwicklung																									
MS 0																									
Zuverlässigkeitsziele	X	X	X	X	X	X	X	X																	
Zuverlässigkeitsrisiken	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Konzeption																									
MS A: Projektanfrage, -auftrag																									
ZUV-relevante Unterstützung																									
Konzeptentwicklung									X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Konzeptentscheidung: QLK																									
MS B: Freigabe zur Grobentwicklung																									
ZUV-Konzeptanalyse: QNK																									
Systemmodell Zuverlässigkeit aufstellen									X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Fehlerbaum erstellen									X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Blockschaltbild erstellen									X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Zuverlässigkeits(test)planung mit Lieferanten durchführen									X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Produktentwicklung und Verifizierung																									
MS C: Freigabe zur Detailentwicklung																									
FMEA starten									X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
MS D: Freigabe zur Detailplanung																									
Produktionsprozess																									
MS E: Freigabe Anlagenbeschaffung																									
MS F: Freigabe Serienproduktion																									
Fertigung und Nutzung																									
MS G: Produkt-Review																									
MS H: Modellauslauf/Entsorgung																									

Abbildung 71: Zuverlässigkeitsinformationsmodell des Beispiels „elektrischer Fensterheber“ - Domain Mapping Matrix Zuverlässigkeitsprozess-Systemkomponenten (DMM Zp-Sk), Domain Mapping Matrix Zuverlässigkeitsprozess-Systemfunktionen (DMM Zp-Sf)




		Anforderungen	Systementwurf	Modellbildung und -analyse	Domänenspezifischer Entwurf										Systemintegration	Eigenschaftsabsicherung	Herstellung, Montage	Herstellung, Montage	Herstellung	Betrieb, Nutzung	Entsorgung
					Planen	Konzipieren	Entwerfen	Ausarbeiten	System-Anforderungsanalyse	Funktionaler Entwurf	System-Entwurf	Implementierung	System spezifiziert	System entworfen							
Lastenheft_Vorgänger	Kap_1.1																				
		Zuverlässigkeitsziel: 500ppm/a																			
	Kap_2.3																				
		Use Cases																			
		10.000 Öffnungszyklen 300 Mal anhalten																			
Lastenheft_Vorgänger	Kap_5.1																				
		Öffnungsgeschwindigkeit >0,07m/s																			
Lastenheft_neu	Kap_1.1																				
		Zuverlässigkeitsziel: 225ppm/a	X	X	X																
	Kap_2.3																				
		Use Cases																			
		15.000 Öffnungszyklen 5.000 Mal anhalten	X	X																	
Lastenheft_neu	Kap_5.1																				
		Öffnungsgeschwindigkeit >0,15m/s	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X							
FMEA_Vorgänger																					

Abbildung 72: Zuverlässigkeitsinformationsmodell des Beispiels „elektrischer Fensterheber“ - Domain Mapping Matrix Dokument 1-Mechatronik (DMM D1-Mt: Lastenheft Vorgänger - Mechatronik), Domain Mapping Matrix Dokument 2-Mechatronik (DMM D2-Mt: Lastenheft neu - Mechatronik), Domain Mapping Matrix Methode 1-Mechatronik (DMM M1-Mt: FMEA Vorgänger - Mechatronik)



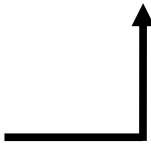
		Projektunabhängige Vorentwicklung																						
		MS 0	Zuverlässigkeitsziele	Zuverlässigkeitsrisiken	Konzeption	MS A: Projektanfrage, -auftrag	ZUV-relevante Unterstützung Konzeptentwicklung	Konzeptentscheidung: QLK	MS B: Freigabe zur Grobentwicklung	ZUV-Konzeptanalyse: QNK	Systemmodell Zuverlässigkeit	Fehlerbaum erstellen	Blockschaltbild erstellen	Zuverlässigkeits(test)planung mit Lieferanten durchführen	Produktentwicklung und Verifizierung	MS C: Freigabe zur Detailentwicklung	FMEA starten	MS D: Freigabe zur Detailplanung Produktionsprozess	MS E: Freigabe Anlagenbeschaffung	MS F: Freigabe Serienproduktion	Fertigung und Nutzung	MS G: Produkt-Review	MS H: Modellauslauf/Entsorgung	
Lastenheft_Vorgänger	Kap 1.1																							
	Zuverlässigkeitziel: 500ppm/a																							
	Kap 2.3																							
	Use Cases																							
	10.000 Öffnungszyklen																							
	300 Mal anhalten																							
Lastenheft_neu	Kap 1.1																							
	Zuverlässigkeitziel: 225ppm/a		X	X						X														
FMEA_Vorgänger	Kap 2.3																							
	Use Cases																							
	15.000 Öffnungszyklen									X				X										
	5.000 Mal anhalten									X				X										
FMEA_Vorgänger	Kap 5.1																							
	Öffnungsgeschwindigkeit >0,15m/s									X				X										

Abbildung 73: Zuverlässigkeitsinformationsmodell des Beispiels „elektrischer Fensterheber“ - Domain Mapping Matrix Dokument 1-Zuverlässigkeitsprozess (DMM D1-Zp: Lastenheft Vorgänger - Zuverlässigkeitsprozess), Domain Mapping Matrix Dokument 2-Zuverlässigkeitsprozess (DMM D2-Zp: Lastenheft neu - Zuverlässigkeitsprozess), Domain Mapping Matrix Methode 1-Zuverlässigkeitsprozess (DMM M1-Zp: FMEA Vorgänger - Zuverlässigkeitsprozess)



	Lastenheft_Vorgänger						Lastenheft_neu						FMEA_Vorgänger			
	Kap_1.1	Zuverlässigkeitziel: 500ppm/a	Kap_2.3	Use Cases	10.000 Öffnungszyklen	300 Mal anhalten	Kap_5.1	Öffnungsgeschwindigkeit >0,07m/s	Kap_1.1	Zuverlässigkeitziel: 225ppm/a	Kap_2.3	Use Cases		15.000 Öffnungszyklen	5.000 Mal anhalten	Kap_5.1
Lastenheft_Vorgänger	Kap_1.1															
	Zuverlässigkeitziel: 500ppm/a															
	Kap_2.3															
	Use Cases															
Lastenheft_Vorgänger	10.000 Öffnungszyklen															
	300 Mal anhalten															
	Kap_5.1															
Lastenheft_Vorgänger	Öffnungsgeschwindigkeit >0,07m/s															
Lastenheft_neu	Kap_1.1															
	Zuverlässigkeitsziel: 225ppm/a	X			X	X	X					X	X	X	X	X
	Kap_2.3															
	Use Cases															
Lastenheft_neu	15.000 Öffnungszyklen				X	X										
	5.000 Mal anhalten				X	X										
Lastenheft_neu	Kap_5.1															
	Öffnungsgeschwindigkeit >0,15m/s				X	X	X									
FMEA_Vorgänger																

Abbildung 74: Zuverlässigkeitsinformationsmodell des Beispiels „elektrischer Fensterheber“ - Design Structure Matrix Dokument 1 (DSM D1: Lastenheft Vorgänger), Domain Mapping Matrix Dokument 1-Dokument 2 (DMM D1-D2: Lastenheft Vorgänger - Lastenheft neu), Domain Mapping Matrix Dokument 1-Methode 1 (DMM D1-M1: Lastenheft Vorgänger - FMEA Vorgänger), Domain Mapping Matrix Dokument 2-Dokument 1 (DMM D2-D1: Lastenheft neu - Lastenheft Vorgänger), Design Structure Matrix Dokument 2 (DSM D2: Lastenheft neu), Domain Mapping Matrix Dokument 2-Methode 1 (DMM D2-M1: Lastenheft neu - FMEA Vorgänger), Domain Mapping Matrix Methode 1-Dokument 1 (DMM M1-D1: FMEA Vorgänger - Lastenheft Vorgänger), Domain Mapping Matrix Methode 1-Dokument 2 (DMM M1-D2: FMEA Vorgänger - Lastenheft neu), Design Structure Matrix Methode 1 (DSM M1: FMEA Vorgänger)



	Konzeptvariantenmatrix erstellen	Funktionen ermitteln	Gewichtung der Funktionen	Anforderungen ermitteln	Konzepte erarbeiten/eintragen	Kriterien erarbeiten	Umsetzung der Kriterien für Konzepte erarbeiten	Konzeptspezifische Umsetzung der Kriterien beschreiben	Konzeptspezifische Fehlfunktionen ermitteln	Ermittlung der beteiligten Komponenten	Konzeptbewertung	technische Umsetzbarkeit U für Funktionen ermitteln	Kosten-Zeit-Faktor K für Funktionen	Einzelentwicklungsfähigkeit je Funktion und Konzept ermitteln	Gesamtentwicklungsfähigkeit je Konzept ermitteln	Konzeptvergleich	auf Basis Einzelentwicklungsfähigkeit	auf Basis Gesamtentwicklungsfähigkeit	Konzeptentscheid	auf Basis Konzeptvergleich
Lastenheft_Vorgänger	Kap_1.1																			
	Zuverlässigkeitsziel: 500ppm/a																			
	Kap_2.3																			
	Use Cases																			
	10.000 Öffnungszyklen 300 Mal anhalten																			
Lastenheft_Vorgänger	Kap_5.1																			
	Öffnungsgeschwindigkeit >0,07m/s																			
Lastenheft_neu	Kap_1.1																			
	Zuverlässigkeitsziel: 225ppm/a																			
	Kap_2.3																			
	Use Cases																			
	15.000 Öffnungszyklen 5.000 Mal anhalten					X						X	X	X	X					
Lastenheft_neu	Kap_5.1					X						X	X	X	X					
	Öffnungsgeschwindigkeit >0,15m/s					X						X	X	X	X					
FMEA_Vorgänger																				

Abbildung 75: Zuverlässigkeitsinformationsmodell des Beispiels „elektrischer Fensterheber“ - Domain Mapping Matrix Dokument 1-Methode 2 (DMM D1-M2: Lastenheft Vorgänger - Qualitative Konzeptbewertung), Domain Mapping Matrix Dokument 2-Methode 2 (DMM D2-M2: Lastenheft neu - Qualitative Konzeptbewertung), Domain Mapping Matrix Methode 1-Methode 2 (DMM M1-M2: FMEA Vorgänger - Qualitative Konzeptbewertung)

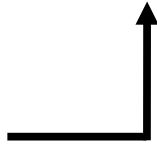
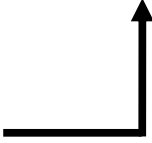
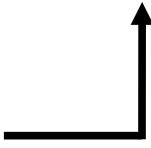
		elektrischer Motor	Steuerung	mechanisches Stirnradgetriebe	Hebearm	Stützarm	Glasführungsschiene	Stützschiene	Glasscheibe	Fenster automatisch öffnen	Öffnungswunsch erkennen	Öffnungswunsch prüfen	Antrieb anfahren	Endposition erkennen	Antrieb abschalten	Fenster automatisch schließen	Schließwunsch erkennen	Schließsituation prüfen	Antrieb anfahren	Endposition erkennen	Antrieb abschalten	Fenster in jeder Position anhalten	Haltewunsch erkennen	Antrieb abschalten	Position halten	bei Blockade zurückfahren
		Lastenheft Vorgänger		Kap_1.1	Zuverlässigkeitsziel: 500ppm/a																					
Lastenheft Vorgänger		Kap_2.3	Use Cases																							
			10.000 Öffnungszyklen																							
			300 Mal anhalten																							
Lastenheft neu		Kap_5.1	Öffnungsgeschwindigkeit >0,07m/s																							
Lastenheft neu		Kap_1.1	Zuverlässigkeitsziel: 225ppm/a	X	X	X	X	X	X	X																
Lastenheft neu		Kap_2.3	Use Cases																							
			15.000 Öffnungszyklen							X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X	
			5.000 Mal anhalten																			X	X	X	X	
Lastenheft neu		Kap_5.1	Öffnungsgeschwindigkeit >0,15m/s							X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					
FMEA_Vorgänger																										

Abbildung 76: Zuverlässigkeitsinformationsmodell des Beispiels „elektrischer Fensterheber“ - Domain Mapping Matrix Dokument 1-Systemkomponenten (DMM D1-Sk: Lastenheft Vorgänger - Systemkomponenten), Domain Mapping Matrix Dokument 1-Systemfunktionen (DMM D1-Sf: Lastenheft Vorgänger - Systemfunktionen), Domain Mapping Matrix Dokument 2-Systemkomponenten (DMM D2-Sk: Lastenheft neu - Systemkomponenten), Domain Mapping Matrix Dokument 2-Systemfunktionen (DMM D2-Sf: Lastenheft neu - Systemfunktionen), Domain Mapping Matrix Methode 1-Systemkomponenten (DMM M1-Sk: FMEA Vorgänger - Systemkomponenten), Domain Mapping Matrix Methode 1-Systemfunktionen (DMM M1-Sf: FMEA Vorgänger - Systemfunktionen)



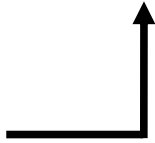
	Anforderungen	Systementwurf	Domänenspezifischer Entwurf										Eigenschaftsabsicherung		Herstellung, Montage		Betrieb, Nutzung		Entsorgung		
		Modellbildung und -analyse	Planen	Konzipieren	Entwerfen	Ausarbeiten	System-Anforderungsanalyse	Funktionaler Entwurf	System-Entwurf	Implementierung	System spezifiziert	System entworfen	Feinentwurf abgeschlossen	Systemelemente realisiert	Systemintegration		Herstellung, Montage	Herstellung, Montage	Herstellung	Betrieb, Nutzung	Entsorgung
Konzeptvariantenmatrix erstellen																					
Funktionen ermitteln	X	X	X																		
Gewichtung der Funktionen	X	X	X				X				X										
Anforderungen ermitteln	X																				
Konzepte erarbeiten/eintragen	X	X	X	X			X				X										
Kriterien erarbeiten	X	X	X																		
Umsetzung der Kriterien für Konzepte																					
Konzeptspezifische Umsetzung der Kriterien beschreiben	X	X	X				X				X										
Konzeptspezifische Fehlfunktionen ermitteln	X	X																			
Ermittlung der beteiligten Komponenten	X	X	X				X				X										
Konzeptbewertung																					
technische Umsetzbarkeit U für Funktionen ermitteln	X	X	X	X			X				X										
Kosten-Zeit-Faktor K für Funktionen ermitteln	X	X	X				X				X										
Einzelentwicklungsfähigkeit je Funktion und Konzept ermitteln																					
Gesamtentwicklungsfähigkeit je Konzept ermitteln																					
Konzeptvergleich																					
auf Basis Einzelentwicklungsfähigkeit																					
auf Basis Gesamtentwicklungsfähigkeit																					
Konzeptentscheid																					
auf Basis Konzeptvergleich																					

Abbildung 77: Zuverlässigkeitsinformationsmodell des Beispiels „elektrischer Fensterheber“ - Domain Mapping Matrix Methode 2-Mechatronik (DMM M2-Mt: Qualitative Konzeptbewertung - Mechatronik)



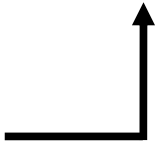
	Projektunabhängige Vorentwicklung																								
	MS 0	Zuverlässigkeitsziele	Zuverlässigkeitsrisiken	Konzeption	MS A: Projektanfrage, -auftrag	ZUV-relevante Unterstützung	Konzeptentwicklung	Konzeptentscheidung: QLK	MS B: Freigabe zur Grobentwicklung	ZUV-Konzeptanalyse: QNK	Systemmodell Zuverlässigkeit	Fehlerbaum erstellen	Blockschaltbild erstellen	Zuverlässigkeits(test)planung mit Lieferanten durchführen	Produktentwicklung und Verifizierung	MS C: Freigabe zur Detailentwicklung	FMEA starten	MS D: Freigabe zur Detailplanung	Produktionsprozess	MS E: Freigabe Anlagenbeschaffung	MS F: Freigabe Serienproduktion	Fertigung und Nutzung	MS G: Produkt-Review	MS H: Modellauslauf/Entsorgung	
Konzeptvariantenmatrix erstellen																									
Funktionen ermitteln																									
Gewichtung der Funktionen			X																						
Anforderungen ermitteln																									
Konzepte erarbeiten/eintragen																									
Kriterien erarbeiten																									
Umsetzung der Kriterien für Konzepte																									
Konzeptspezifische Umsetzung der Kriterien beschreiben																									
Konzeptspezifische Fehlfunktionen ermitteln			X			X																			
Ermittlung der beteiligten Komponenten																									
Konzeptbewertung																									
technische Umsetzbarkeit U für Funktionen ermitteln																									
Kosten-Zeit-Faktor K für Funktionen ermitteln																									
Einzelentwicklungsfähigkeit je Funktion und Konzept ermitteln																									
Gesamtentwicklungsfähigkeit je Konzept ermitteln																									
Konzeptvergleich																									
auf Basis Einzelentwicklungsfähigkeit																									
auf Basis Gesamtentwicklungsfähigkeit																									
Konzeptentscheid																									
auf Basis Konzeptvergleich																									

Abbildung 78: Zuverlässigkeitsinformationsmodell des Beispiels „elektrischer Fensterheber“ - Domain Mapping Matrix Methode 2-Zuverlässigkeitsprozess (DMM M2-Zp: Qualitative Konzeptbewertung - Zuverlässigkeitsprozess)



	Lastenheft_Vorgänger						Lastenheft_neu						FMEA_Vorgänger			
	Kap_1.1	Zuverlässigkeitziel: 500ppm/a	Kap_2.3	Use Cases	10.000 Öffnungszyklen	300 Mal anhalten	Kap_5.1	Öffnungsgeschwindigkeit >0,07m/s	Kap_1.1	Zuverlässigkeitziel: 22,5ppm/a	Kap_2.3	Use Cases		15.000 Öffnungszyklen	5.000 Mal anhalten	Kap_5.1
Konzeptvariantenmatrix erstellen																
Funktionen ermitteln																
Gewichtung der Funktionen																
Anforderungen ermitteln	X			X	X		X		X			X	X		X	
Konzepte erarbeiten/eintragen																
Kriterien erarbeiten				X	X		X		X			X	X		X	X
Umsetzung der Kriterien für Konzepte																
Konzeptspezifische Umsetzung der Kriterien beschreiben																
Konzeptspezifische Fehlfunktionen ermitteln																
Ermittlung der beteiligten Komponenten																X
Konzeptbewertung																
technische Umsetzbarkeit U für Funktionen ermitteln																
Kosten-Zeit-Faktor K für Funktionen ermitteln																
Einzelentwicklungsfähigkeit je Funktion und Konzept ermitteln																
Gesamtentwicklungsfähigkeit je Konzept ermitteln																
Konzeptvergleich																
auf Basis Einzelentwicklungsfähigkeit																
auf Basis Gesamtentwicklungsfähigkeit																
Konzeptentscheid																
auf Basis Konzeptvergleich																

Abbildung 79: Zuverlässigkeitsinformationsmodell des Beispiels „elektrischer Fensterheber“ - Domain Mapping Matrix Methode 2-Dokument 1 (DMM M2-D1: Qualitative Konzeptbewertung - Lastenheft Vorgänger), Domain Mapping Matrix Methode 2-Dokument 2 (DMM M2-D2: Qualitative Konzeptbewertung - Lastenheft neu), Domain Mapping Matrix Methode 2-Methode 1 (DMM M2-M1: Qualitative Konzeptbewertung - FMEA Vorgänger)



	Konzeptvariantenmatrix erstellen	Funktionen ermitteln	Gewichtung der Funktionen	Anforderungen ermitteln	Konzepte erarbeiten/eintragen	Kriterien erarbeiten	Umsetzung der Kriterien für Konzepte erarbeiten	Konzeptspezifische Umsetzung der Kriterien beschreiben	Konzeptspezifische Fehlfunktionen ermitteln	Ermittlung der beteiligten Komponenten	Konzeptbewertung	technische Umsetzbarkeit U für Funktionen ermitteln	Kosten-Zeit-Faktor K für Funktionen ermitteln	Einzelentwicklungsfähigkeit je Funktion und Konzept ermitteln	Gesamtentwicklungsfähigkeit je Konzept ermitteln	Konzeptvergleich	auf Basis Einzelentwicklungsfähigkeit	auf Basis Gesamtentwicklungsfähigkeit	Konzeptentscheid	auf Basis Konzeptvergleich
Konzeptvariantenmatrix erstellen																				
Funktionen ermitteln																				
Gewichtung der Funktionen		X																		
Anforderungen ermitteln																				
Konzepte erarbeiten/eintragen																				
Kriterien erarbeiten																				
Umsetzung der Kriterien für Konzepte																				
Konzeptspezifische Umsetzung der Kriterien beschreiben					X	X														
Konzeptspezifische Fehlfunktionen ermitteln	X				X															
Ermittlung der beteiligten Komponenten	X	X	X	X	X															
Konzeptbewertung																				
technische Umsetzbarkeit U für Funktionen ermitteln	X	X	X	X	X		X	X	X											
Kosten-Zeit-Faktor K für Funktionen ermitteln	X	X	X	X	X		X	X	X											
Einzelentwicklungsfähigkeit je Funktion und Konzept ermitteln												X	X							
Gesamtentwicklungsfähigkeit je Konzept ermitteln														X						
Konzeptvergleich																				
auf Basis Einzelentwicklungsfähigkeit					X									X						
auf Basis Gesamtentwicklungsfähigkeit					X										X					
Konzeptentscheid																				
auf Basis Konzeptvergleich																X	X			

Abbildung 80: Zuverlässigkeitsinformationsmodell des Beispiels „elektrischer Fensterheber“ - Design Structure Matrix Methode 2 (DSM M2: Qualitative Konzeptbewertung)

	elektrischer Motor	Steuerung	mechanisches Stirnradgetriebe	Hebearm	Stützarm	Glasführungsschiene	Stützschiene	Glasscheibe	Fenster automatisch öffnen	Öffnungswunsch erkennen	Öffnungswunsch prüfen	Antrieb anfahren	Endposition erkennen	Antrieb abschalten	Fenster automatisch schließen	Schließwunsch erkennen	Schließsituation prüfen	Antrieb anfahren	Endposition erkennen	Antrieb abschalten	Fenster in jeder Position anhalten	Haltewunsch erkennen	Antrieb abschalten	Position halten	bei Blockade zurückfahren
Konzeptvariantenmatrix erstellen																									
Funktionen ermitteln									X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Gewichtung der Funktionen																									
Anforderungen ermitteln																									
Konzepte erarbeiten/eintragen	X	X	X	X	X	X	X	X																	
Kriterien erarbeiten																									
Umsetzung der Kriterien für Konzepte																									
Konzeptspezifische Umsetzung der Kriterien beschreiben																									
Konzeptspezifische Fehlfunktionen ermitteln	X	X	X	X	X	X	X	X																	
Ermittlung der beteiligten Komponenten																									
Konzeptbewertung																									
technische Umsetzbarkeit U für Funktionen ermitteln																									
Kosten-Zeit-Faktor K für Funktionen ermitteln																									
Einzelentwicklungsfähigkeit je Funktion und Konzept ermitteln																									
Gesamtentwicklungsfähigkeit je Konzept ermitteln																									
Konzeptvergleich																									
auf Basis Einzelentwicklungsfähigkeit																									
auf Basis Gesamtentwicklungsfähigkeit																									
Konzeptentscheid																									
auf Basis Konzeptvergleich																									

Abbildung 81: Zuverlässigkeitsinformationsmodell des Beispiels „elektrischer Fensterheber“ - Domain Mapping Matrix Methode 2-Systemkomponenten (DMM M2-Sk: Qualitative Konzeptbewertung - Systemkomponenten), Domain Mapping Matrix Methode 2-Systemfunktionen (DMM M2-Sf: Qualitative Konzeptbewertung - Systemfunktionen)

Lebenslauf

Angaben zur Person:

Name: Hofmann, Daniel
Geburtsdatum, -ort 09.06.1982, Stuttgart-Bad Cannstatt
Staatsangehörigkeit deutsch
Familienstand ledig

Schulbildung und beruflicher Werdegang:

09/1988 - 07/1992 Besuch der Grundschule in Rutesheim
08/1992 - 06/2001 Besuch des Albert-Schweitzer-Gymnasiums in Leonberg
10/2002 - 03/2007 Studium des Maschinenwesens (Fachrichtung: allgemeiner Maschinenbau) an der Universität Stuttgart
05/2007 - 04/2011 Akademischer Angestellter (Bereich: Zuverlässigkeitstechnik) am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart
10/2010 - 01/2011 Gastwissenschaftler bei Prof. Dr. Dhillon an der University of Ottawa, Faculty of Engineering, Ottawa, ON, Kanada im Rahmen der Tätigkeit als akademischer Angestellter an der Universität Stuttgart
seit 05/2011 Entwicklungsingenieur bei der Robert Bosch GmbH, Leonberg

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
3	K. Karow	Konzentrische Doppelgewindewellendichtung im laminaren Bereich
3	F.E. Breit	Die Kreiszyinderschalendichtung: 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-Verzahn 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;	Forschungsarbeiten zur Zuverlässigkeit im Maschinenbau
	K.-H.Hirschmann;	
	B. Bertsche	
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
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;	Berührungsfreie Spindelabdichtungen im Werkzeugmaschinenbau. Konstruktionskatalog
	H.K. Müller	

Nr.	Verfasser	Titel
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 Wälzlageeinheiten 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 geradzahnten 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 Wiederholteil-suchsystem
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 Flächen-dichtungen
63	K. Riedl	Pulsationsoptimierte Außenzahnpumpen mit ungleichförmig übersetzenden Radpaaren
64	D. Schwuchow	Sonderverzahnungen für Zahnpumpen 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 Qualitätssystem 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 Werkzeug-schleifens
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 Fang-labyrinth
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
83	A. Seifried	Eine neue Methode zur Berechnung von Rollenlagern über lagerinterne Kontakt-Beanspruchungen
84	Ch. Dörr	Ermittlung von Getriebebelastkollektiven 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 Außenzahnpumpen mit pulsationsarmer Sonderverzahnung
88	M. Lambert	Abdichtung von Werkzeugmaschinen-Flachführungen
89	R. Kubalczyk	Gehäusegestaltung von Fahrzeuggetrieben im Abdichtbereich

Nr.	Verfasser	Titel
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 Produktentwicklungsprozess
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 Werkzeugmaschinen
100	M. Olbrich	Werkstoffmodelle zur Finiten-Elemente-Analyse von PTFE-Wellendichtungen
101	M. Kunz	Ermittlung des Einflusses fahrzeug-, fahrer- und verkehrsspezifischer Parameter auf die Getriebelastkollektive 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 Krafffahrzeuge 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 Zuverlässigkeit 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, Gegenlaufläche und Fluid
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 Berücksichtigung 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
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 Dichtungsgegenläufigen Flächen

Nr.	Verfasser	Titel
136	J. Gäng	Berücksichtigung von Wechselwirkungen bei Zuverlässigkeitsanalysen
137	Ch. Maisch	Berücksichtigung der Ölalterung bei der Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsprognose von Getrieben
138	D. Kirschmann	Ermittlung erweiterter Zuverlässigkeitsziele in der Produktentwicklung
139	D. Weber	Numerische Verschleißsimulation auf Basis tribologischer Untersuchungen am Beispiel von PTFE-Manschettenichtungen
140	T. Leopold	Ganzheitliche Datenerfassung für verbesserte Zuverlässigkeitsanalysen
141	St. Jung	Beitrag zum Einfluss der Oberflächencharakteristik von Gegenläufflächen auf das tribologische System Radial-Wellendichtung
142	T. Prill	Beitrag zur Gestaltung von Leichtbau-Getriebegehäusen und deren Abdichtung