

Patrick Dallinger, BSc

# Entwicklung eines Datenmodells für eine innovative Analyseverfahren mechatronischer Systeme im Fahrzeug

Masterarbeit

Eingereicht an der



Technischen Universität Graz

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Institut für Fahrzeugtechnik

Member of [FSI]

Institutsvorstand:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Fischer

Betreuer:

Dipl.-Ing. Markus Ernst

Dipl.-Ing. Dr.techn. Jürgen Fabian

Betreuer MAGNA Powertrain AG & Co KG:

Adam Schnellbach, MSc

Graz, April 2015

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die sowohl durch ihre fachliche als auch persönliche Unterstützung zum Erfolg dieser Masterarbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meinen Betreuern des Instituts für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Graz, Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Jürgen Fabian und Herrn Dipl.-Ing. Markus Ernst für die Ermöglichung dieser interessanten Masterarbeit, die produktiven Diskussionen bei Unklarheiten und die freundliche Unterstützung während der gesamten Zeit. Sie standen nicht nur fachlich mit Rat und Tat zur Seite, auch Konversationen abseits der zu bearbeiteten Aufgabenstellung waren stets lohnend und interessant.

Als nächstes möchte ich mich recht herzlich bei meinem Betreuer von MAGNA Powertrain AG & Co KG, Herrn Adam Schnellbach, MSc bedanken, welcher beim Aufbereiten dieses Themas nicht nur die wöchentlich eingeplante Zeit investierte, sondern auch jederzeit als Ansprechpartner zur Verfügung stand. Ohne seine Idee (in Zusammenarbeit mit Herrn Dipl.-Ing. Martin Werdich von Werdich Engineering) zu dieser neuartigen Analysemethodik und Erläuterung dieser, wäre die Masterarbeit nie zustande gekommen.

Ich danke meinen Eltern für die Unterstützung bei meinen Entscheidungen, insbesondere meinem Vater, welcher mir das Studium erst ermöglicht hat und daher einen gewichtigen Teil dazu beitrug.

Einen herzlichen Dank auch an meine Freundin für die Ermutigung und Unterstützung bei dieser Arbeit.

Ein Dankeschön auch an meine Freunde und Studienkollegen, welche immer wieder für den nötigen Ausgleich abseits der Masterarbeit gesorgt haben.

# Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

(Unterschrift)

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from used sources.

.....

(Date)

(Signature)

# Abstract

This thesis deals with the observation of classical analytical methods in the field of automotive engineering and subsequently the overview of its most important functions in a data model. The state of the art analysis methods are currently the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) and the Fault Tree Analysis (FTA). These methods were developed in part based on conventional approaches and are suitable for the analysis of mechanical products. However, the rules of safety and quality standards can only be met by combining different types of analyses which thereon results in significant redundancies and poor efficiency. Due to the increasing electrification of powertrains in the automotive industry, alternative drive mechanisms are needed for the realization of modern vehicle concepts. The development of a new type of analysis methodology is essential to meet the challenges regarding upcoming mechatronic systems and their technical specifications, complex relations regarding security and quality, the demand of OEMs and their suppliers, increasing component reliability, and the necessary failure risk reduction of subsystems. For the realization of such new and innovative analysis software, the data model of the conventional technology is developed and the incoming demand on storage resources evaluated both qualitatively and quantitatively.

# Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit der Betrachtung klassischer Analysemethoden im Bereich des Automobilbaus und in weiterer Folge der Abbildung deren wichtigsten Funktionen in einem Datenmodell. Den Stand der Technik bilden aktuell die Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) und die Fehlerbaumanalyse (FTA). Diese Methoden wurden zum Teil auf Basis herkömmlicher Ansätze entwickelt und eignen sich für die Analyse mechanischer Produkte. Die Vorschriften der Sicherheitsnormen und Qualitätsstandards können jedoch nur durch Kombinationen unterschiedlicher Analysearten eingehalten werden, was zu signifikanten Redundanzen und schlechter Effizienz führt. Durch die zunehmende Elektrifizierung der Antriebsstränge im Automobilbau werden alternative Antriebsmechanismen zur Realisierung moderner Fahrzeugkonzepte benötigt. Um der Analyse dieser neu entstehenden mechatronischen Systeme bzw. deren steigenden technischen Eigenschaften und komplexen Zusammenhänge im Hinblick auf die erhöhte Sicherheits- und Qualitätsanforderung der Automobilhersteller und deren Zulieferern zur Steigerung der Komponentenzuverlässigkeit bzw. der Senkung des Ausfallrisikos von Subsystemen gerecht zu werden, ist eine neue Art der Analysemethodik unumgänglich. Der moderne Entwicklungsprozess mechatronischer Komponenten bedarf unkonventioneller Analysetechniken, zur Optimierung des Verhaltens und der Fehlfunktionen der Systeme, Erkennung sicherheitskritischer Situationen, Bewertung deren Auswirkungen und Einleitung von Abhilfemaßnahmen. Zur Realisierung einer solchen neuartigen, innovativen Analysesoftware wird das Datenmodell der herkömmlichen Technik weiterentwickelt und auf den hinzukommenden Bedarf an Speicherressourcen sowohl quantitativ als auch qualitativ bewertet.

# Inhalt

Danksagung .....	i
Eidesstattliche Erklärung .....	ii
Abstract .....	iii
Kurzfassung .....	iv
Inhalt .....	v
Abkürzungen .....	viii
1 Einleitung .....	- 1 -
2 Grundlagen .....	- 3 -
2.1 Zuverlässigkeitsanalysemethoden.....	- 3 -
2.1.1 Qualitative Zuverlässigkeitsanalyse.....	- 4 -
2.1.2 Quantitative Zuverlässigkeitsanalyse .....	- 4 -
2.2 Fehler Möglichkeiten und Einfluss Analyse FMEA.....	- 5 -
2.2.1 Verfahren .....	- 6 -
2.2.2 Strukturanalyse .....	- 8 -
2.2.3 Funktionsanalyse .....	- 9 -
2.2.4 Fehleranalyse.....	- 13 -
2.2.5 Maßnahmenanalyse.....	- 16 -
2.2.6 Optimierungen.....	- 16 -
2.3 Fehlerbaumanalyse FTA .....	- 17 -
2.3.1 Fehlerarten und logische Gatter .....	- 19 -
2.4 SysML-Blockdiagramm .....	- 21 -
2.5 Semantische Datenmodellierung, insbesondere Entity-Relationship-Modeling..	- 22 -
2.5.1 Semantische Datenmodellierung.....	- 22 -
2.5.2 Entity-Relationship-Modell ERM.....	- 24 -
3 Analyse von aktuellen FMEA-, FTA- und SysML-Blockdiagramm-TOOLS .....	- 32 -
3.1 Fehler Möglichkeiten und Einfluss Analyse FMEA.....	- 32 -
3.1.1 Darstellungs-/Analysemöglichkeit.....	- 32 -
3.1.2 Vorgehensweise.....	- 34 -
3.1.3 Datenmodell.....	- 43 -
3.1.4 Grenzen der Analysemethodik und der Analysetools .....	- 47 -

3.2	Fehlerbaumanalyse FTA .....	- 48 -
3.2.1	Darstellungs-/Analysemöglichkeit.....	- 48 -
3.2.2	Vorgehensweise.....	- 48 -
3.2.3	Datenmodell.....	- 50 -
3.2.4	Grenzen der Analysemethodik und der Analysetools .....	- 51 -
3.3	SysML-Blockdiagramme.....	- 52 -
3.3.1	Darstellungs-/Analysemöglichkeit.....	- 52 -
3.3.2	Grenzen der Modellierungssprache.....	- 53 -
4	Konzept und Datenmodellierung einer innovative Analysemethodik.....	- 54 -
4.1	Konzept der innovativen Analysemethodik .....	- 55 -
4.1.1	Aufbau der Datenmodellierung.....	- 57 -
4.2	Ausbaustufe 1 .....	- 58 -
4.2.1	Anforderungen .....	- 58 -
4.2.2	Realisierung im Datenmodell.....	- 62 -
4.2.3	Datenmodell.....	- 63 -
4.3	Ausbaustufe 2 .....	- 64 -
4.3.1	Anforderungen .....	- 64 -
4.3.2	Realisierung im Datenmodell.....	- 67 -
4.3.3	Datenmodell.....	- 69 -
4.4	Ausbaustufe 3 .....	- 70 -
4.4.1	Anforderungen .....	- 71 -
4.4.2	Realisierung im Datenmodell.....	- 73 -
4.4.3	Datenmodell.....	- 74 -
4.5	Ausbaustufe 4 .....	- 75 -
4.5.1	Anforderungen .....	- 75 -
4.5.2	Realisierung im Datenmodell.....	- 76 -
4.5.3	Datenmodell.....	- 77 -
4.6	Zugriffszeiten.....	- 78 -
5	Bewertung des Speicherbedarfs.....	- 79 -
5.1	Quantitative Speicherbewertung.....	- 79 -
5.1.1	Vorgehensweise.....	- 80 -
5.1.2	Vergleich der Verbindungsvarianten.....	- 85 -
5.1.3	Standard FMEA.....	- 86 -

5.1.4	Innovative Analysemethodik Ausbaustufe 1 .....	- 88 -
5.1.5	Innovative Analysemethodik Ausbaustufe 2 .....	- 88 -
5.1.6	Innovative Analysemethodik Ausbaustufe 3 .....	- 89 -
5.1.7	Innovative Analysemethodik Ausbaustufe 4 .....	- 89 -
5.2	Qualitativer Vergleich bestehender Tools mit der innovativen Analysemethode	- 90 -
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	- 92 -
	Abbildungsverzeichnis.....	I
	Tabellenverzeichnis.....	III
	Literaturverzeichnis .....	IV
A.	Anhang.....	VII

# Abkürzungen

<b>A</b>	Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache
<b>AIAG</b>	Automotive Industry Action Group
<b>B</b>	Bedeutung der Fehlerfolge
<b>BPMN</b>	Business Process Model and Notation (dt. Geschäftsprozessmodell und -notation)
<b>BUS</b>	Binary Unit System
<b>CAN</b>	Controller Area Network
<b>DC</b>	Diagnostic Coverage (dt. Diagnosedeckungsgrad)
<b>DGQ</b>	Deutsche Gesellschaft für Qualität
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung
<b>E</b>	Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers bzw. seiner Ursache
<b>ECU</b>	Electronic Control Unit (dt. Steuergerät)
<b>EN</b>	Europäische Norm
<b>ERD</b>	Entity Relationship Diagram (dt. Gegenstand-Beziehung-Diagramm)
<b>ERM</b>	Entity Relationship Model (dt. Gegenstand-Beziehung-Modell)
<b>ETA</b>	Event Tree Analysis (dt. Ereignisbaumanalyse)
<b>FMEA</b>	Failure Mode and Effects Analysis (dt. Fehler Möglichkeiten und Einfluss Analyse)
<b>FTA</b>	Failure Tree Analysis (dt. Fehlerbaumanalyse)
<b>HAZOP</b>	Hazard Operational Analysis (dt. Gefahrenanalyse)
<b>ID</b>	Identification (dt. Identifikator)
<b>IEC</b>	International Electrotechnical Commission (dt. Internationale Elektrotechnische Kommission)
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization (dt. Internationale Organisation für Normung)
<b>LFM</b>	Latent Fault Metric (dt. Latent Fehler Metrik)
<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration (dt. Nationale Aeronautik- und Raumfahrtbehörde)
<b>OMG</b>	Object Management Group (internationales Konsortium für die Entwicklung von Standards der objektorientierten Programmierung)
<b>QS</b>	Quality Standard (dt. Qualitätsstandard)
<b>RPZ</b>	Risikoprioritätszahl
<b>SE</b>	Strukturelement
<b>SFF</b>	Safe Failure Fraction (dt. Anteil sicherer Ausfälle)
<b>SPFM</b>	Single Point Fault Metric (dt. Einzelfehlermetrik)
<b>SysML</b>	Systems Modeling Language (dt. Modellierungssprache für Systeme)
<b>UML</b>	Unified Modeling Language (dt. vereinheitlichte Modellierungssprache)
<b>VDA</b>	Verband der Automobilindustrie

# 1 Einleitung

Die Realisierung moderner Fahrzeugkonzepte und der Wunsch nach neuen, alternativen Antriebsmechanismen führen zu einer steigenden Elektrifizierung der Antriebsstränge im Bereich des Kraftfahrzeugbaus. Dies hat eine zunehmende Bedeutung mechatronischer Systeme im Automobilbereich zur Folge. Um die Qualitäts- und Sicherheitsstandards der KFZ-Hersteller und deren Zulieferer zu gewährleisten, steigt die Herausforderung bezüglich der Verbesserung der Komponentensicherheit und der Senkung von Ausfallrisiken. Sicherheitskritische Aspekte bei der Entwicklung dieser mechatronischen Komponenten müssen im Speziellen berücksichtigt werden. Im Entwicklungsprozess ist es somit unausweichlich, neue Wege der Analyse- und Bewertungsmethoden zu beschreiten. Vor allem durch die Vielzahl technischer Eigenschaften und die immer komplexer werdenden Zusammenhänge mechatronischer Systeme moderner Fahrzeuge, reichen die klassischen Analysemethoden, wie beispielsweise die FMEA (siehe Kapitel 2.2) oder die FTA (siehe Kapitel 2.3), nicht mehr aus, [1], [2].

Im Jahr 1949 hatte ein Mercedes Modell 170 S (Abbildung 1.1, links oben) beispielsweise nur 40 Kabel und 60 Kontaktierungen. Im Mercedes Modell S-Klasse aus dem Jahr 1990 (Abbildung 1.1, unten) wurden bereits 1.900 Kabel, 3.800 Kontaktierungen, 40 Steuergeräte und 90 Stellmotoren verbaut. Im gleichen Modell aus dem Jahr 2012 (Abbildung 1.1, rechts oben) waren es hingegen schon 80 Steuergeräte, das BUS-System hatte 150Mbit/s und es kamen Kameras, Radar, Lasersensoren, etc. zum Einsatz, [3].



Abbildung 1.1: Mercedes Modelle (Modell 170 S oben links; Modell S-Klasse 2012 oben rechts; Modell S-Klasse 1990 unten), [4], [5], [6]

Durch die steigenden Sicherheitsanforderungen und die neuen Antriebskonzepte durch Hybridisierung und Elektrifizierung in der Automobilindustrie (siehe Tabelle 1.1) ist eine noch exaktere Analyse von Fehlverhalten der zu entwickelnden Systeme erforderlich. Als einen Indikator für die immer komplexer werdenden Anforderungen an Analysewerkzeuge sind beispielsweise die verschiedenen Betriebsmodi von Hybridantrieben heranzuziehen:

- Rein verbrennungsmotorisches Fahren,
- Rein elektrisches Fahren,
- Hybridisches Fahren,
- Boosten,
- Rekuperation (regeneratives Bremsen),
- Range Extender (Generatorbetrieb, elektrische Energieerzeugung),
- Start-Stopp-Funktion.

Abhängig von Elektrifizierungsgrad und Antriebsarchitektur sind unterschiedliche Analysekonzepte erforderlich, bei denen ein dynamisches und flexibles Handeln von Vorteil ist. Die Komplexität entsteht durch die Vernetzung aller notwendigen Komponenten, [7], [8], [9].

Die verbreiteten Analyseprogramme, welche immense Akzeptanz bei Herstellern und Zulieferern genießen, decken die steigenden Anforderungen einzeln nicht mehr ab. Nur das Zusammenspiel diverser Analysemethoden, welche allerdings zum Teil signifikante Überlappungen besitzen, kann noch annähernd den steigenden Erwartungen gerecht werden. Daher ist es von großer Bedeutung eine Weiterentwicklung von modernen Tools voranzutreiben, um die diversen Stärken der unterschiedlichen Software zu vereinen.

**Tabelle 1.1: Änderungen im Antriebsstrang im Zuge der Hybridisierung bzw. Elektrifizierung, [10]**

<b>Konventionelle Komponenten</b>	<b>Modifizierte Komponenten</b>	<b>Hinzukommende Komponenten</b>
Verbrennungsmotor	Getriebe	Elektromotor
Tanksystem	Radaufhängung	Leistungselektronik
Einspritzanlage	Kraftübertragung	Batteriesystem
Kupplung	Klimaanlage/Heizung	
Abgasanlage	Kühlwasserpumpe	
Nebenaggregate	Wärmedämmung	

Die Verwirklichung solcher Neuerungen stellt eine gewisse Veränderung bei den bewährten Ablaufprozessen der Industrie dar, da die Vereinigung wichtiger Funktionen einzelner Software einen wesentlichen Einschnitt in bestehende Programme bedeutet. Um die Machbarkeit der Herstellung solch innovativer Tools zu bestätigen, wird daher der Schwerpunkt dieser Arbeit auf das Datenmodell, welches den Ausgangspunkt der Programmierbarkeit repräsentiert, gelegt. Die Unterschiede zu aktueller Software und das bedeutsame Potential der neuen Features werden dabei aufgezeigt, [10], [11].

## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen, welche zum Verständnis dieser Masterarbeit beitragen sollen, erläutert. Zum einen liegt der Schwerpunkt auf den Möglichkeiten der Zuverlässigkeitsanalyse (Kapitel 2.1), insbesondere der *FMEA* (Kapitel 2.2) und der Fehlerbaumanalyse *FTA* (Kapitel 2.3). Diese dienen als Grundlage der innovativen Analysemethoden. Zum anderen werden Datenmodellierungssprachen (Kapitel 2.5), insbesondere das Entity Relationship Modell *ERM* (Kapitel 2.5.2) und die Darstellungsmöglichkeiten der Systems Modelling Language *SysML* anhand von Blockdiagrammen (Kapitel 2.4) behandelt.

### 2.1 Zuverlässigkeitsanalysemethoden

Zuverlässigkeitsanalysen sind notwendig, um etwaige Schwachstellen oder Fehler bei einem Produkt oder Prozess zu erkennen und rechtzeitig zu eliminieren. Diese Methoden lassen sich prinzipiell in die qualitative und quantitative Analyse einteilen. Diese Unterscheidung sowie die Ziele von Zuverlässigkeitsanalysen sind in Abbildung 2.1 dargestellt. In den Kapiteln 2.1.1 und 2.1.2 wird diese Unterscheidung näher erläutert.

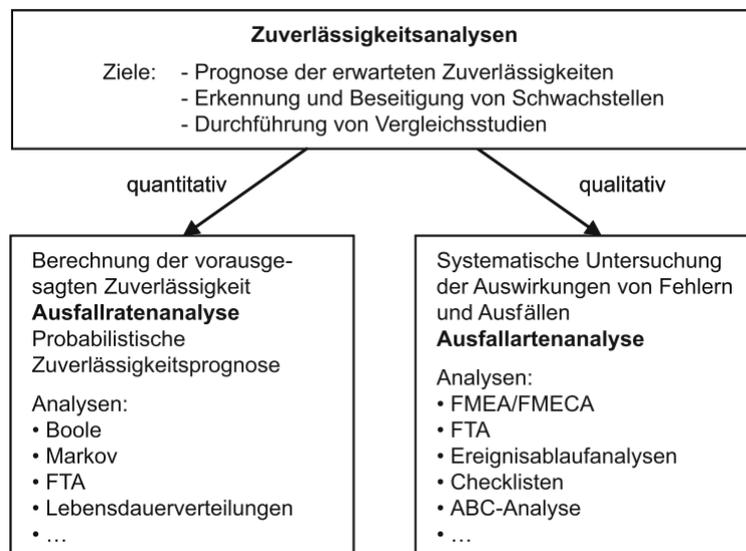


Abbildung 2.1: Einteilung der Zuverlässigkeitsanalysen, [1]

### 2.1.1 Qualitative Zuverlässigkeitsanalyse

Die qualitativen Zuverlässigkeitsanalysen dienen vordergründig der Erkennung, Bewertung und Beseitigung von Schwachstellen bzw. der Identifizierung von Folgen und Ursachen der Fehler im Produkt, und der Ableitung von Mechanismen, die diese Fehler im Feld beherrschen können. Hierfür gibt es zahlreiche Möglichkeiten (siehe Abbildung 2.1), insbesondere haben sich die FMEA und FTA in der Automobilindustrie durchgesetzt und sind somit von besonderer Bedeutung (in anderen Branchen sind manchmal ganz andere Methoden im Fokus, wie beispielsweise HAZOP oder ETA). Speziell die FMEA wird im Gesamtentwicklungsprozess eingesetzt und stellt den Rahmen für Entwicklungsstandards, welche unbedingt eingehalten werden müssen, dar. Die qualitative Zuverlässigkeitsanalyse dient zur Ermittlung der Ausfallarten, [1], [12].

### 2.1.2 Quantitative Zuverlässigkeitsanalyse

Die quantitativen Zuverlässigkeitsanalysen werden zur Bestimmung von Zuverlässigkeitswerten einzelner Komponenten oder Systemen bzw. des Ausfallverhaltens verwendet. Diese Methoden basieren auf den Begriffen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik. Sie geben Auskunft über Zuverlässigkeit von Produkten oder Prozessen über die Einsatz- bzw. Lebensdauer. Die mathematische Beschreibung erfolgt beispielsweise durch:

- Markov-Ketten
- bool'sche Algebra
- Verteilungsfunktionen
  - *Normalverteilung*
  - *Exponentialverteilung*
  - *logarithmische Normalverteilung*
  - *Weibullverteilung*.

Die quantitative Zuverlässigkeitsanalyse dient zur Ermittlung von Ausfallraten und anderen aus diesen Raten abgeleitete Metriken (z.B. SPFM, LFM in der ISO 26262 oder die SFF in der IEC 61508), [1], [13], [14].

Die Fehlerbaumanalyse kann zur qualitativen, als auch zur quantitativen Zuverlässigkeitsbewertung, abhängig von der Auswertung, eingesetzt werden, [12]. Dies ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Ein Beispiel für einen Fehlerbaum ist in Abbildung 2.13 zu sehen.

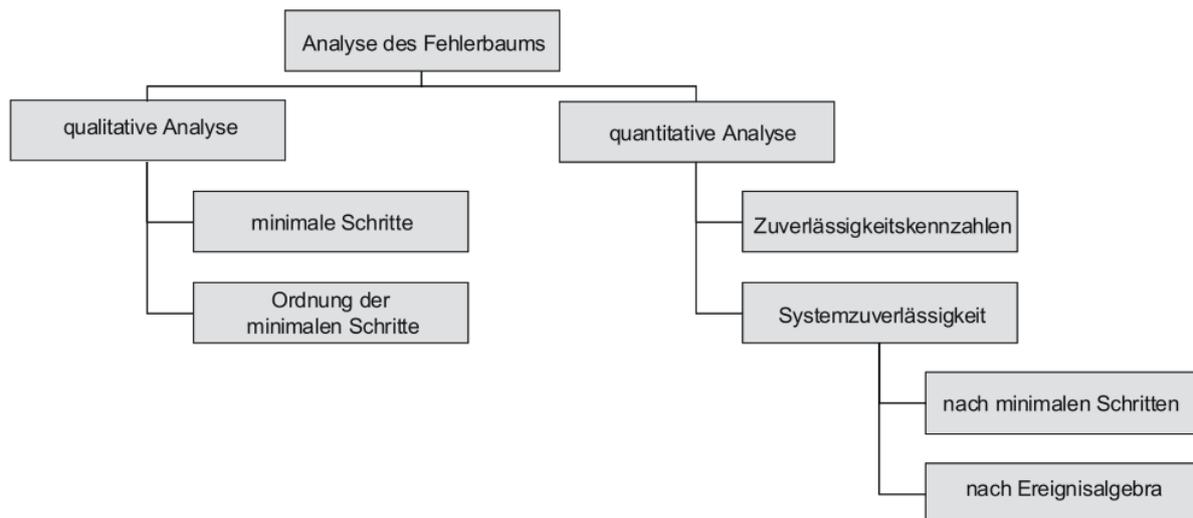


Abbildung 2.2: Möglichkeiten der Fehlerbaumanalyse, [12]

## 2.2 Fehler Möglichkeiten und Einfluss Analyse FMEA

Die Fehler **M**öglichkeiten und **E**influss **A**nalyse (englisch *Failure Mode and Effects Analysis*) ist eine Methode des Qualitäts- bzw. Sicherheitsmanagements zur Fehlervermeidung und der Erhöhung der Zuverlässigkeit von Systemen. Diese Analyse wird speziell bei der Planung, Entwicklung und Herstellung neuer Prozesse oder Produkte im Automobilbereich aber auch in anderen Industrien eingesetzt. Sie soll funktionale Zusammenhänge und Fehler früh erkennbar machen und ist eine Risikoanalyse nach dem Stand der Technik. Die FMEA unterstützt eine planbare, zielorientierte und nachvollziehbare Umsetzung des Produkts und bietet eine strukturierte Dokumentation der Vorgehensweise. Durch diese Analysemethode können Zeit und Kosten eingespart werden, wenn sie rechtzeitig eingesetzt wird. Im Rahmen eines Projektes dient die FMEA grundsätzlich als Rahmenwerk. Mit dieser groben Methodik können diverseste Analysen vorgenommen werden, von Herstellprozessen bis Geschäftsentscheidungen. Vor allem im Bereich der Automobilindustrie, wird die FMEA zumeist für die Analyse von Produkten und Herstellprozessen verwendet. Mit Hilfe dieser Methodik lassen sich bei Prozessen und Produkten alle Funktionen und Fehler inklusive deren Risikobewertung darstellen. Auf Grund dieser Fehler werden Maßnahmen (Entdeckungs- und Vermeidungsmaßnahmen) und Optimierungen eingeführt. Somit werden bei der Serienfertigung die Fehler minimiert und kostenintensive Rückrufaktionen von Produkten, wie zum Beispiel Autos, vermieden. Zusätzlich können auch sicherheitskritische Probleme bei einem Projekt detektiert und behoben werden, [2], [12], [15].

Die FMEA lässt sich in verschiedene Arten unterteilen. Einige verbreitete Bezeichnungen sind, [2]:

- System-FMEA
- Design-FMEA
- Konstruktions-FMEA
- Prozess-FMEA
- Logistik-FMEA
- Zuverlässigkeits-FMEA
- Human-FMEA
- Produkt-FMEA
- Maschinen FMEA
- Hybrid-FMEA
- Software-FMEA
- Matrix-FMEA.

Um Missverständnissen vorzubeugen, empfiehlt es sich, nur Begriffe von FMEA-Schriften wie zum Beispiel VDA oder DGQ zu verwenden, [2].

Die FMEA wurde 1949 vom US Militär als Bewertungstechnik der Zuverlässigkeit von Ausrüstung entwickelt. 1963 wurde die FMEA von der NASA im Rahmen des „Apollo“-Projekts zum ersten Mal eingesetzt, bevor sie zwei Jahre später von der Luft- und Raumfahrt übernommen wurde. Weitere zehn Jahre später fand diese Methode in der Kerntechnik ihren Einsatz, bevor 1977 der Automobilhersteller Ford diese Technik zur präventiven Qualitätssicherung erstmalig angewendet hatte. Eine Weiterentwicklung der FMEA für die Automobilindustrie durch eine erste Methodenbeschreibung im Jahr 1986 findet man im VDA (Verband der Automobilindustrie) Bd. 4, Qualitätssicherung vor Serieneinsatz, [2]. Durch die Beschreibung der Vorgehensweise dieser Methode durch die DGQ (Deutsche Gesellschaft für Qualität) erweiterte sich das Einsatzgebiet im Bereich der Nachrichtentechnik und Medizin (1990). Vier Jahre später führten die drei großen amerikanischen Automobilhersteller General Motors, Ford und Chrysler einen gemeinsamen Qualitätsstandard (QS-9000) ein, [2], welcher auf das FMEA-Handbuch mit Basis der DIN EN ISO 9001:1994-2008 hinweist, [2]. Weitere nicht-technische Einsatzgebiete der FMEA werden von der Deutschen Gesellschaft für Qualität im DGQ-Band 13-11 beschrieben, [2].

### **2.2.1 Verfahren**

Nach der Abwägung ob die Durchführung einer FMEA sinnvoll ist, werden die benötigten Daten gesammelt (zum Beispiel Stücklisten, Vorschriften, Benchmarkergebnisse) und die Betrachtungstiefe bzw. der Analyseumfang festgelegt. Zur Bewertung der Sinnhaftigkeit einer FMEA werden beispielsweise folgende Kriterien herangezogen, welche in weiterer Folge auch Indikatoren für den Analyseumfang bzw. die Betrachtungstiefe darstellen, [2], [16]:

- Produktänderungen
- Hohe Sicherheitsrelevanz
- Prozessänderungen
- Veränderte Einsatzbedingungen
- Hohe Garantie- und Kulanzkosten
- Hohes Umwelt- oder Arbeitsrisiko
- Komplexe oder schwierige Herstellbarkeit
- Neuentwicklung von Produkten
- Einsatz neuer Maschinen, Werkzeuge oder Anlagen
- Hoher Ausschussanteil bei ähnlichen Produkten
- Hohe Betriebskosten.

Speziell im Bereich der Automobilindustrie ist die FMEA durch direkte explizite Kundenanforderung zwingend erforderlich. Auch in anderen Branchen ist diese Methodik bereits Stand der Technik und dadurch die absolute Notwendigkeit einer Durchführung dieser Analyse gegeben.

Nach der Abgrenzung des Analyseumfangs werden durch den Moderator eventuell Teammitglieder bestimmt und Kompetenzen verteilt. Die Analyse selbst besteht laut VDA Band 4 aus fünf wichtigen Teilen, [2], [17].

1. Strukturanalyse (siehe Kapitel 2.2.2)
2. Funktionsanalyse (siehe Kapitel 2.2.3)
3. Fehleranalyse (siehe Kapitel 2.2.4)
4. Maßnahmenanalyse (siehe Kapitel 2.2.5)
5. Optimierungen (siehe Kapitel 2.2.6)

Schritt 1 und 2 werden auch sehr oft in umgekehrter Reihenfolge oder parallel durchgeführt, da in der Konzeptphase eventuell noch keine Struktur besteht, Funktionen aber sehr wohl definiert sind. Es ist ausreichend mit einer eingeschränkten Struktur zu beginnen um einen schnelleren Start der Analyse zu ermöglichen. Insbesondere gilt diese Vorgehensweise bei einer Neuentwicklung von Prozessen oder Produkten.

Handelt es sich hingegen um eine Weiterentwicklung oder Anpassung eines Produkts, ist es meist einfacher mit der Strukturanalyse zu beginnen, bevor die Funktionen analysiert werden. Die „best practice“ Reihenfolge der Analysemethode ist im DGQ Band beschrieben (siehe Abbildung 2.3), [2].

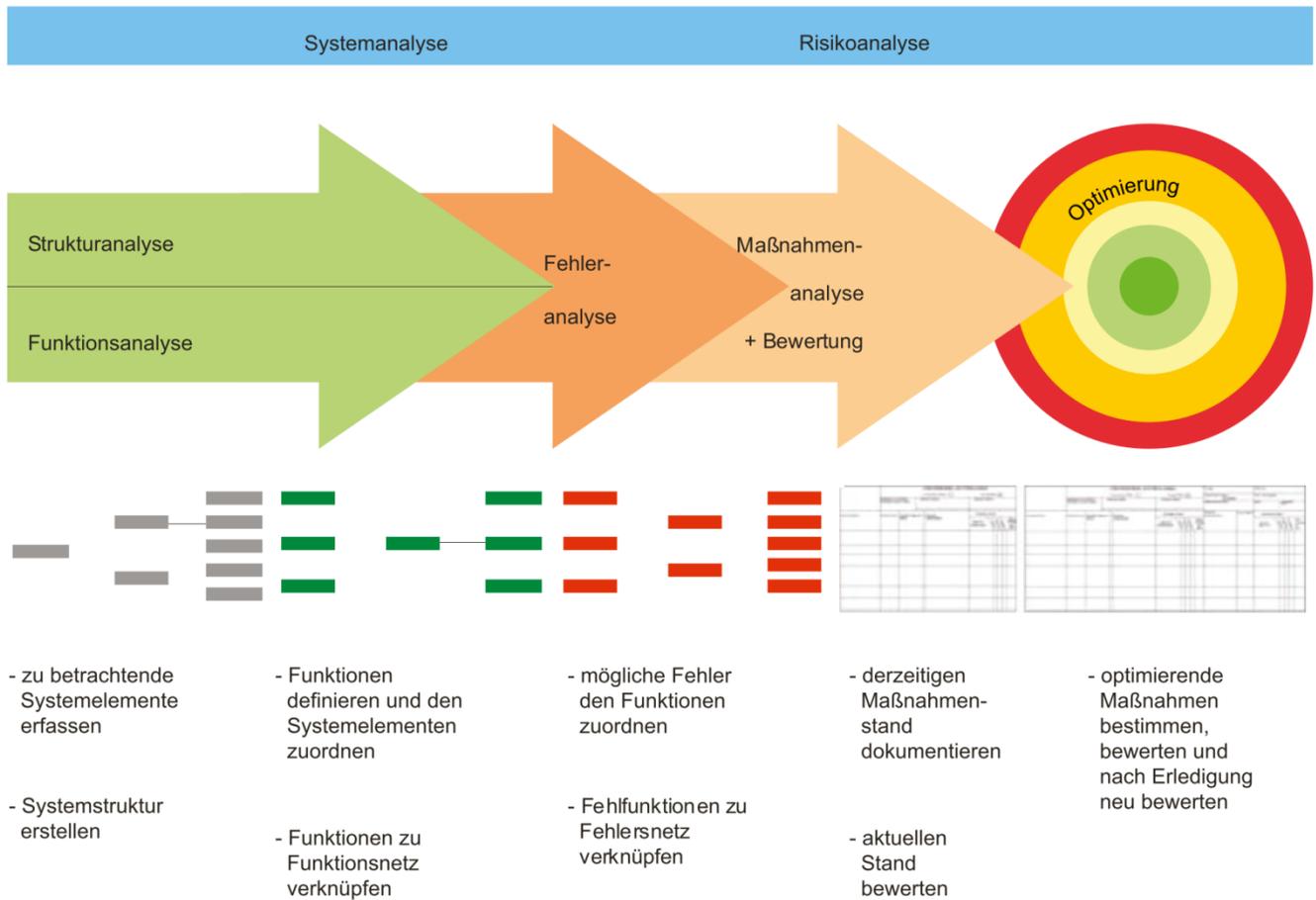


Abbildung 2.3: „best practice“ Reihenfolge zur Erstellung einer FMEA nach dem DGQ Band, [18]

## 2.2.2 Strukturanalyse

Anfangs wird der hierarchische Zusammenhang der Strukturelemente (SE) erstellt. Ausgangspunkt hierfür ist das gesamte Produkt. In mehreren Schritten bzw. Ebenen wird eine weitere Verfeinerungen vorgenommen. Hierbei wird das Produkt in seine Bestandteile zerlegt. Ein solcher Strukturbaum ist anhand eines vereinfachten Beispiels für ein Schiebetürsystem in Abbildung 2.4 zu sehen. In der obersten Ebene ist das Element „Schiebetürsystem“ als Ganzes dargestellt. Eine Ebene tiefer sind die einzelnen Bestandteile dieses Produkts wie zum Beispiel die Schiebetür selbst, das Getriebe oder das Steuergerät dargestellt. Diese Elemente können wiederum eine Ebene tiefer genauer definiert werden. Beispielsweise besteht das Steuergerät aus Hardware und Software. Dieser Vorgang kann beliebig oft wiederholt werden, um den gewünschten Grad der Verfeinerung, welcher vor der Analyse bestimmt wurde, zu erreichen, [2].

Laut dem Verband der Automobilindustrie (VDA) gelten folgende Regeln, [17]:

- Strukturelemente dürfen niemals doppelt vorkommen
- Jede Verfeinerung eines Elements stellt eine eigenständige Teilstruktur dar
- Schnittstellen von Strukturelementen einer Teilstruktur zu SE einer anderen Teilstruktur sind im System vorhandene physikalische Verbindungen
- Alle funktionalen Zusammenhänge der Strukturelemente sind zu berücksichtigen
- Funktionen gehören immer zu einem Strukturelement und können nicht selbstständig existieren, selbst wenn das betroffene SE nur auf Grund der einen Funktion ihre Berechtigung besitzt.

Das Anfertigen einer Übersicht der Strukturelemente inklusive deren Zusammenhänge dient unter anderem der besseren Übersicht des Produkts und dem modularen Aufbau. Es können somit auch verantwortliche Personen für einen Teilbereich (Bestandteil) des Produkts besser festgelegt werden. In diesem Strukturbaum werden den einzelnen Elementen nun die entsprechenden Funktionen hinzugefügt (siehe 2.2.3 Funktionsanalyse), [2].

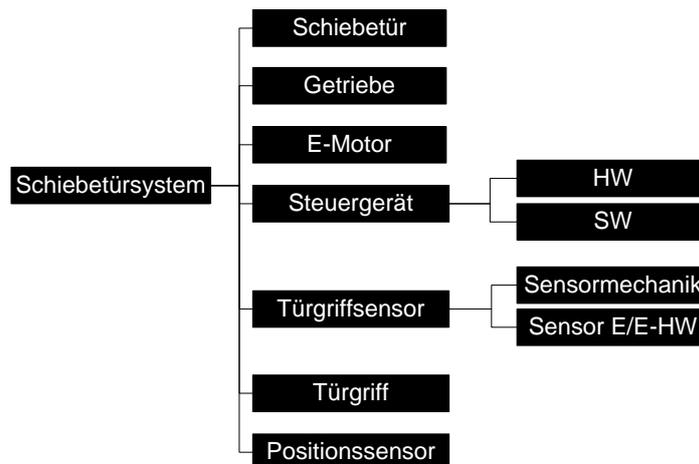


Abbildung 2.4: Strukturbaum einer FMEA für ein Schiebetürsystem, [3]

### 2.2.3 Funktionsanalyse

Bei der Funktionsanalyse werden den bestehenden Strukturelementen des Strukturbaums Funktionen zugeordnet. Es kann ebenso vorkommen, dass die Funktionen bereits bekannt und deklariert sind, obwohl die Struktur noch nicht vorhanden ist. Somit kann, wie schon unter 2.2.1 erwähnt, mit der Funktionsanalyse begonnen werden und anschließend die Struktur um die Funktionen herum bilden. Die Kriterien für die Funktionsanalyse sind unter anderem Plausibilität, Nachvollziehbarkeit, Messbarkeit und Voraussetzungen. Die Funktionen sind durch technische Anforderungen oder Konstruktionsziele eindeutig, validierbar und verifizierbar definiert, [2], [12], [13].

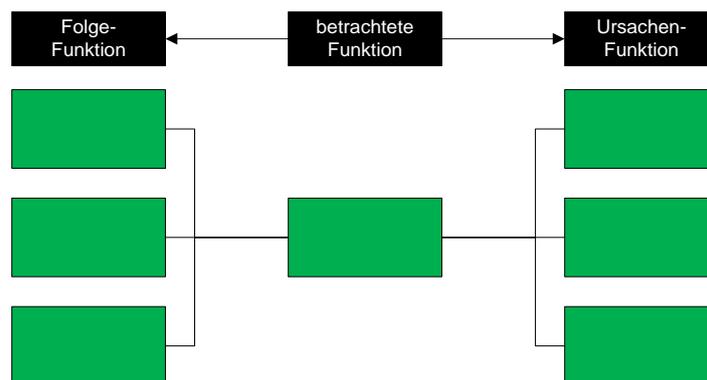
Ziele dieser Funktionsanalyse sind laut VDA, [17]:

- Übersicht über Funktionalität des Produkts
- Übersicht über die Ursachen-Wirkungsbeziehungen
- Verifizieren des Lastenheft
- Grundlage für die Fehleranalyse.

Nachdem den Strukturelementen Funktionen zugeordnet und diese dann miteinander verlinkt worden sind, entsteht das Funktionsnetz (siehe Abbildung 2.6). Der Detaillierungsgrad der Funktionsstruktur nimmt nach rechts zu. Diese Funktionen werden auch als Ursachen-Funktionen bezeichnet. Die Verfeinerung wird, je nach Betrachtungstiefe zum Teil solange fortgeführt, bis Zahlenwerte oder messbare Größen zugeordnet werden können. Links der betrachteten Funktion befinden sich die Folge-Funktionen (siehe Abbildung 2.5). Das Funktionsnetz stellt die Funktionen des Produkts strukturiert dar und sorgt dafür, dass jede Funktion erfasst wird.

Durch Betrachtung der einzelnen Funktionselemente und deren Verbindung mit vorherigen bzw. weiteren Funktionen, wird das Funktionsnetz ersichtlich (siehe Abbildung 2.5, Abbildung 2.7 und Abbildung 2.8). Dies stellt sich aber nur als Netz dar, wenn die gewählte fokussierte Funktion auch mehrere Folge-Funktionen besitzt. Bei dem Beispiel „Signal abhängig von Türgriffposition liefern“ (Abbildung 2.7) bzw. „Schiebetürsystem“ stellt sich das Funktionsnetz als Baum dar, da die betrachteten Funktionen „Drehmoment abhängig von Phasenströmen erzeugen“ (Abbildung 2.8) nur eine Folge-Funktion besitzen bzw. weil auf die oberste Funktion „fokussiert“ wird.

Die Verbindungen der Funktionen im Funktionsnetz müssen nicht zwangsläufig ident sein (Im Bereich der Mechatronik werden beispielsweise auch Signalpfade zum Finden aller Funktionen verwendet.). Ist die Funktionsanalyse abgeschlossen, beginnt die Fehleranalyse (2.2.4), [2], [12].



**Abbildung 2.5: Schematische Darstellung eines Funktionsnetzes mit Ursachen- und Folge-Funktionen**

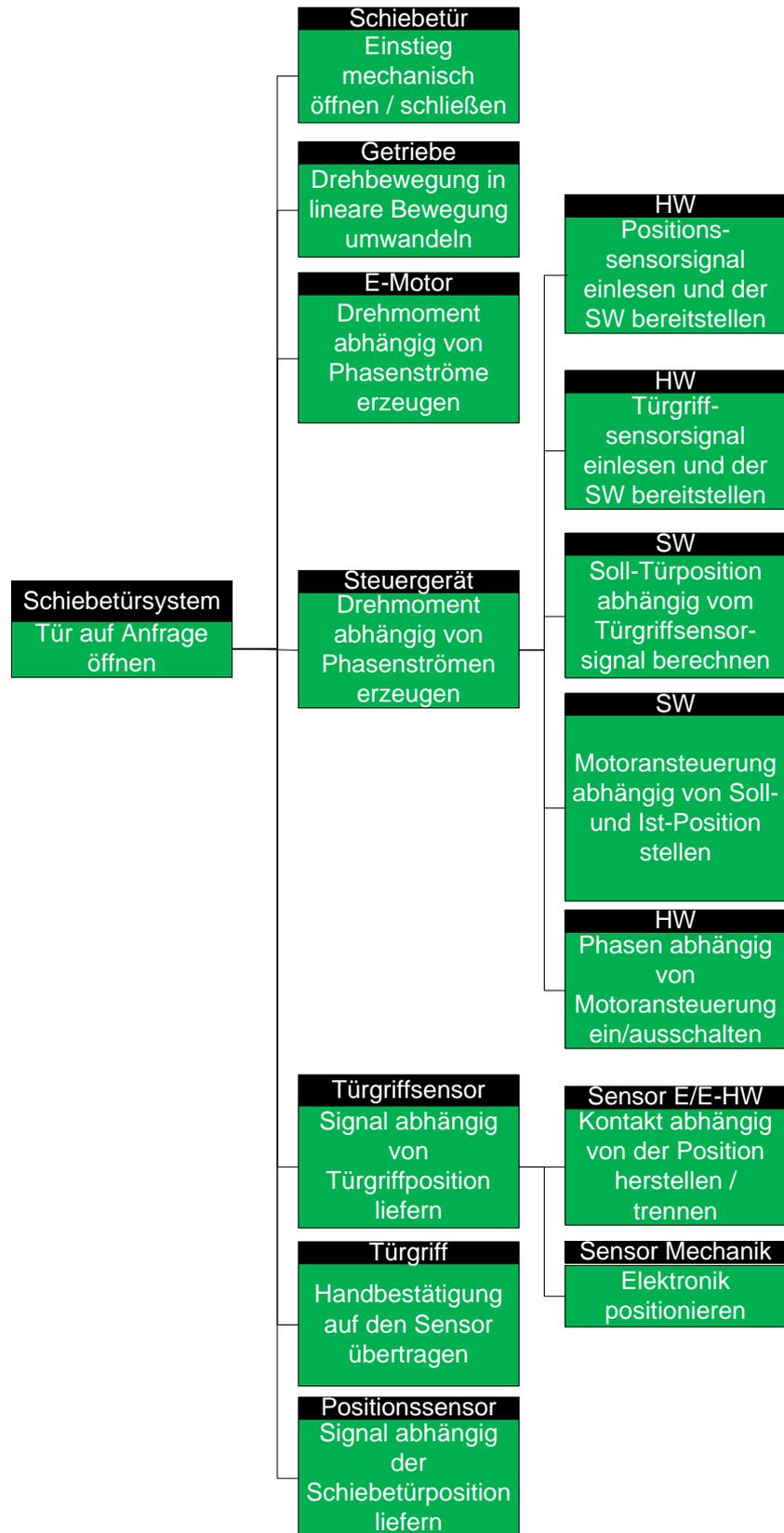


Abbildung 2.6: Funktionsnetz einer FMEA für ein Schiebetürsystem, [3]

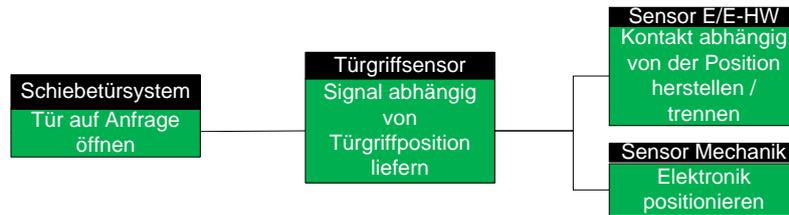


Abbildung 2.7: Funktionsnetz einer FMEA für ein Schiebetürsystem; fokussiert auf Funktion „Signal abhängig von Türgriffposition liefern“, vgl. [3]

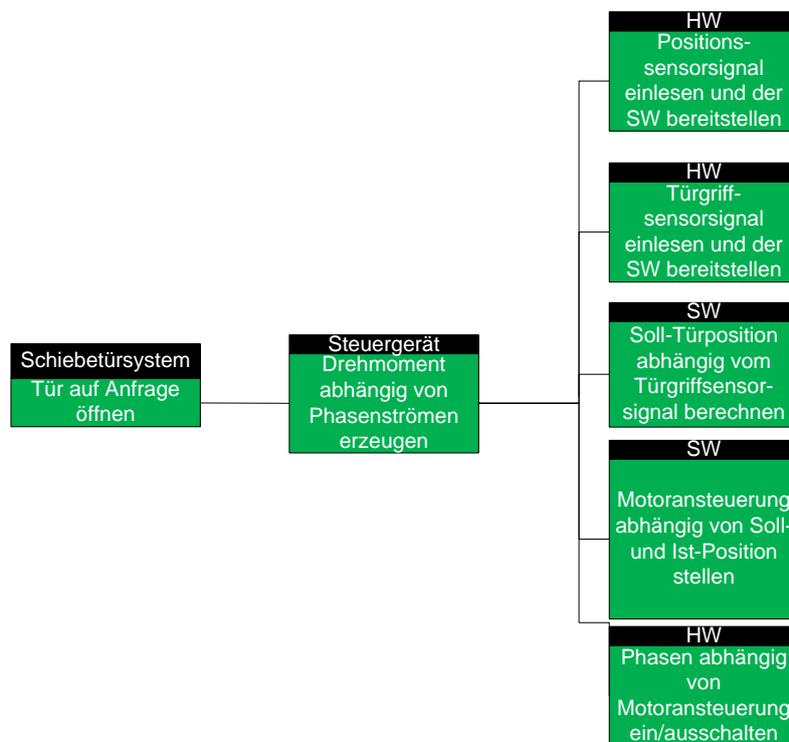


Abbildung 2.8: Funktionsnetz einer FMEA für ein Schiebetürsystem; fokussiert auf Funktion „Drehmoment abhängig von Phasenströmen erzeugen“, vgl. [3]

## 2.2.4 Fehleranalyse

Bei der Fehleranalyse werden den bereits ermittelten Funktionen (siehe Kapitel 2.2.3) Fehlfunktionen, in weiterer Folge auch Fehler oder Defekt genannt, zugeordnet. Ist dies geschehen, werden die Fehler, analog zur Funktionsanalyse, über die Strukturebenen zu einem Fehlernetz verknüpft. Es muss eine Fehleranalyse für jedes Strukturelement bzw. Funktion durchgeführt werden. Die Defekte sind Abweichungen vom Soll-Zustand der Funktion. Sinngemäß kann somit eine Funktion mehrere Fehlfunktionen besitzen. Bei der Betrachtung von einem speziellen Fehler sind links davon die Folgen, welche eine Auskunft über die Wichtigkeit bzw. Bedeutung des Fehlers geben. Auf der anderen Seite befinden sich die Ursachen, welche Fehler eines untergeordneten Systems, Bauteils oder Prozess darstellen (siehe Abbildung 2.9). Die Ursachen eines Fehlers werden oftmals mittels Ishikawa-Diagramm ermittelt (siehe Abbildung 2.10). Die Risikoeinstufung eines Fehlers kann anhand der Risiko-Prioritätszahl **RPZ** erfolgen, obwohl diese sehr umstritten ist und es durchaus schon bessere Methoden zur Abschätzung des Risikos gibt. Diese wiederum setzt sich aus drei Kennzahlen zusammen, [2], [12], [17]:

- **Bedeutung der Fehlerfolge (B),**
- **Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (A),**
- **Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers bzw. seiner Ursache (E).**

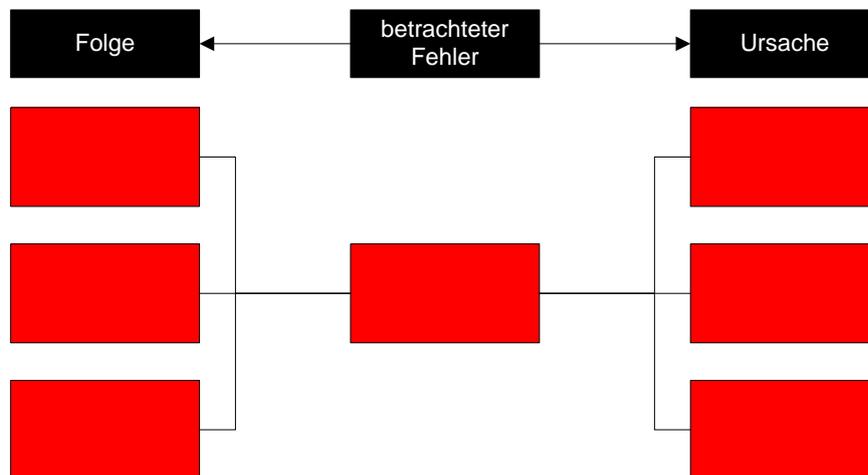


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung eines Fehlernetzes mit Ursachen und Folgen

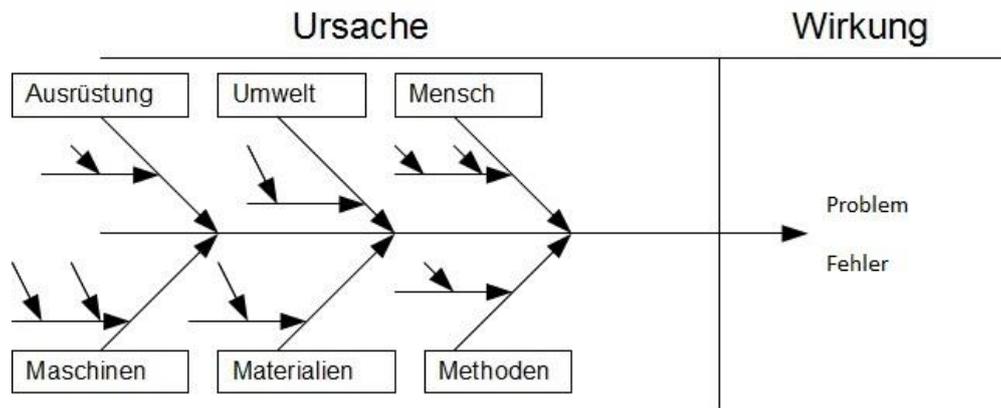


Abbildung 2.10: Ishikawa-Diagramm

Diesen drei Kennzahlen werden ganzzahlige Werte von 1 („minimales Risiko“ oder „sehr gut“) bis 10 („hohes Risiko“ oder „sehr schlecht“) zugeordnet. Durch Multiplikation dieser Werte entsteht die Risiko-Prioritäts-Zahl (siehe Formel 2.1). Diese Zahl kann somit Werte von 1 bis 1.000 annehmen. Die Risiko-Prioritäts-Zahl hat nur eine geringe Aussagekraft bezüglich der Qualität von Prozessen und Produkten und dient daher nur als Anhaltspunkt. In den aktuellen Regelwerken (VDA, AIAG, DGQ) wird die RPZ nur noch aus historischen Gründen angeführt, FMEA Spezialisten sind der Meinung, dass die Verwendung dieser Bewertungsmethode nicht zu empfehlen ist, [2].

$$RPZ = B \cdot A \cdot E \quad (2.1)$$

Das Fehlernetz für den betrachteten Fehler „Signal geliefert ohne Anforderung“ stellt sich als Baum dar, da dieser Fehler nur eine Folge besitzt und die Fokussierung wieder auf der Top-Level-Folge liegt (siehe Abbildung 2.11). In Abbildung 2.12 ist das Fehlernetz des Beispiels für ein Schiebetürsystem dargestellt. Bei der genaueren Betrachtung eines der Fehler, wird das Fehlernetz mit Folgen und Ursachen ersichtlich (siehe beispielsweise Abbildung 2.11).

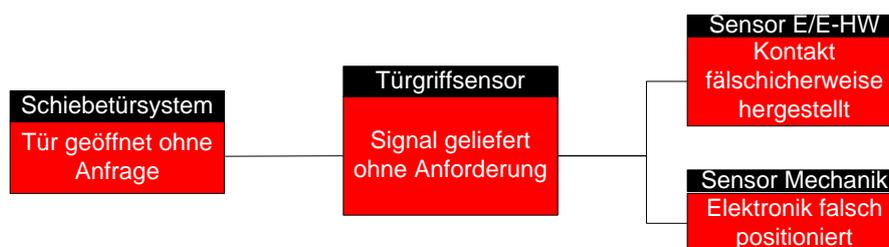


Abbildung 2.11: Fehlernetz einer FMEA für ein Schiebetürsystem; fokussiert auf Fehler „Signal geliefert ohne Anforderung“, vgl. [3]

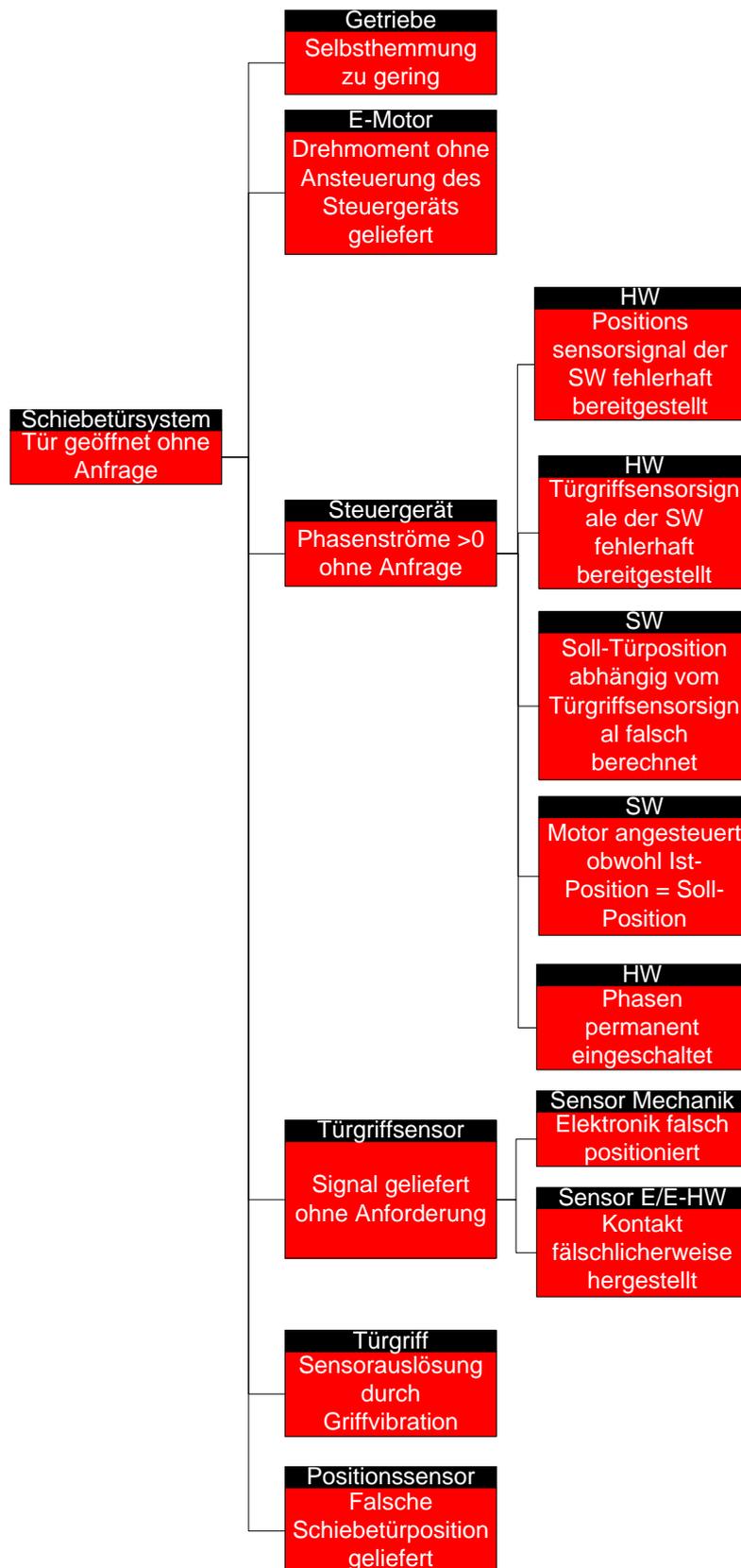


Abbildung 2.12: Fehlernetz einer FMEA für ein Schiebetürsystem, [3]

## 2.2.5 Maßnahmenanalyse

In der Maßnahmenanalyse werden den bestehenden Fehlfunktionen bereits existierende oder auch zukünftig vorgesehene Maßnahmen zugeteilt. Für den Fall einer geplanten Maßnahme ist ein Termin anzugeben. Laut VDA sollte es zu jeder Maßnahme einen Verantwortlichen, welcher sich um die Durchführung der Maßnahme kümmert, und einen Termin geben. Eine Maßnahme kann einen Status entsprechend der folgenden Auflistung einnehmen, [2]:

- **Unbearbeitet** – Umsetzung noch nicht begonnen
- **In Entscheidung** – Entscheidungsvorlage wird erstellt
- **In Umsetzung** – Maßnahme noch nicht vollständig umgesetzt
- **Abgeschlossen** – Maßnahme durchgeführt und bewertet
- **Verworfen** – Maßnahme verworfen aber dokumentiert.

Bei der Maßnahmenanalyse wird zwischen zwei verschiedenen Maßnahmengruppen unterschieden, [2]:

- **Vermeidungsmaßnahme**

Vermeidungsmaßnahmen dienen dazu, die Auftretenswahrscheinlichkeit einer Fehlerursache zu mindern. Da dies aber nicht immer möglich ist, wird die Auftretenswahrscheinlichkeit zumindest minimiert. Durch diese Maßnahmen wird die Kennzahl **A** (Auftretenswahrscheinlichkeit), welche zur Berechnung der Risiko-Prioritätszahl dient, bestimmt („A = 1“  $\triangleq$  Fehlerursache tritt sehr unwahrscheinlich auf; „A = 10“  $\triangleq$  Fehlerursache tritt sehr sicher auf). Die Vermeidungsmaßnahmen sind präventiv und wirken meist direkt auf die Ursache des Fehlers. Diese Maßnahmen sind durch beispielsweise Qualitätsvorschriften oder Arbeitsanweisungen eindeutig und nachvollziehbar. Sie können auch auf Vorschriften, Berechnungen oder weitere Dokumente verweisen, [2], [12].

- **Entdeckungsmaßnahme**

Diese Maßnahmen dienen der Entdeckung von Fehlerursachen oder deren Folgen. Die Entdeckungsmaßnahmen müssen ebenfalls nachvollziehbar und eindeutig sein. Hierzu kann auch ein Verweis auf andere Dokumente oder Testergebnisse verwendet werden. Von den Entdeckungsmaßnahmen kommt die Kennzahl **E** (Entdeckungswahrscheinlichkeit), welche zur Berechnung der Risiko-Prioritätszahl herangezogen wird. Sie beschreibt die Wahrscheinlichkeit der Entdeckung einer Fehlerursache („E = 1“  $\triangleq$  Fehler wird sehr sicher entdeckt; „E = 10“  $\triangleq$  Fehler unmöglich zu entdecken;), [2], [12].

## 2.2.6 Optimierungen

Bei der Optimierung handelt es sich um die Verbesserung notwendiger Maßnahmen und die Überprüfung der Wirksamkeit umgesetzter Maßnahmen, sowie deren Dokumentation. Ist ein

Maßnahmenstand nicht zufriedenstellend, werden neue Maßnahmen eingeführt und bewertet. Die Überprüfung der Maßnahmen sollte in regelmäßigen Abständen durchgeführt werden und wird so oft wiederholt, bis nur noch ein verantwortbares Risiko besteht, [2].

## 2.3 Fehlerbaumanalyse FTA

Die Fehlerbaumanalyse (englisch *Fault Tree Analysis, FTA*), ist eine Methode der Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik, welche basierend auf der bool'schen Algebra Wahrscheinlichkeiten des Ausfallrisikos bestimmen kann. Entwickelt wurde die FTA Anfang 1960 zur Sicherheitsbewertung des Abschusskontrollsystems einer Interkontinentalrakete von der Firma BOEING. In den darauffolgenden Jahren wurde sie im Bereich des Flugzeugbaus eingesetzt, ehe in den 1970er Jahren die Planung von Atomkraftwerken durch diese Analysemethode unterstützt wurde. Danach folgte der Durchbruch im Bereich der Automobilindustrie, [19].

Die Fehlerbaumanalyse gehört zu den Top-Down-Analysen. Der Ausgangspunkt einer Fehlerbaumanalyse ist ein unerwünschter Fehler (Top-Ereignis), um anschließend die Ursachen (beispielsweise Komponenten- oder Teilsystemausfälle) bzw. die deren Kombinationen zu untersuchen, welche zu diesem Fehler führen können. Mit Hilfe logischer Operatoren werden die Fehlerursachen und deren Folgen miteinander verknüpft, um eine Aussage bezüglich der Zuverlässigkeit des Systems zu erhalten. Die Symbole einer Fehlerbaumanalyse nach DIN 25424, Teil 1 sind in Tabelle 2.1 dargestellt. Die FTA kann zur qualitativen, aber auch zur quantitativen Bewertung eines Systems oder Produkts herangezogen werden. Die Ziele einer Fehlerbaumanalyse sind, [1], [12]:

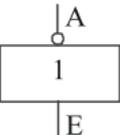
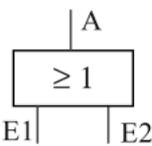
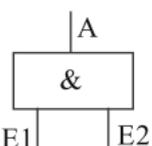
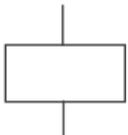
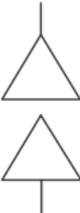
- die systematische Identifikation aller Ausfallkombinationen, welche zu einem unerwünschten Top-Ereignis führen
- die Ermittlung von Zuverlässigkeitskenngößen (beispielsweise Nichtverfügbarkeit des Systems/Produkts, Eintrittshäufigkeit der Ausfallkombinationen oder des unerwünschten Top-Ereignis)
- die Erstellung eines graphischen Systemmodells.

Der Ablauf bei einer Fehlerbaumanalyse lässt sich wie nachfolgend darstellen, [12]:

1. Detaillierte Untersuchung des Systems
2. Festlegung des unerwünschten Ereignisses und der Ausfallkriterien
3. Festlegung der Zuverlässigkeitskenngöße und der zu betrachtenden Zeitintervalle
4. Überlegungen zu den Ausfallsarten der Komponenten
5. Aufstellung des Fehlerbaumes
6. Bestimmung der Eingangsgrößen des Fehlerbaumes
7. Auswertung des Fehlerbaumes und Bewertung der Ergebnisse

Der erste Punkt stellt die „Systemanalyse“ dar, die Punkte zwei bis vier können zur „Erstellung des Fehlerbaumes“ zusammengefasst werden und die Punkte sechs und sieben der „Auswertung des Fehlerbaumes“ entsprechen, [12].

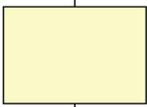
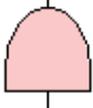
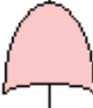
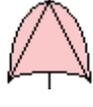
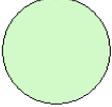
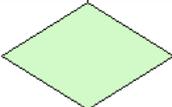
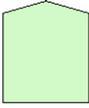
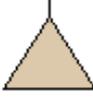
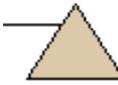
Tabelle 2.1: Symbole der Fehlerbaumanalyse nach DIN 25424, Teil 1, [12]

Standardbildzeichen																	
	<b>Standard- eingang</b>	Dieses Bildzeichen steht für einen Funktionselementausfall, wenn primäres Versagen möglich ist.															
	<b>NICHT- Verknüpfung</b>	Die NICHT-Verknüpfung steht für die Negation. Ist der Eingang "0", so ist der Ausgang "1", und umgekehrt. <table border="1" style="float: right; margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th>E</th> <th>A</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	E	A	1	0	0	1									
E	A																
1	0																
0	1																
	<b>ODER- Verknüpfung</b>	Die ODER-Verknüpfung steht für die logische Vereinigung. Es gilt folgende Funktionstabelle: <table border="1" style="float: right; margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th>E1</th> <th>E2</th> <th>A</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	E1	E2	A	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0
E1	E2	A															
1	1	1															
1	0	1															
0	1	1															
0	0	0															
	<b>UND- Verknüpfung</b>	Die UND-Verknüpfung steht für den logischen Durchschnitt. Für zwei Eingänge gilt folgende Funktionstabelle: <table border="1" style="float: right; margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th>E1</th> <th>E2</th> <th>A</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	E1	E2	A	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
E1	E2	A															
1	1	1															
1	0	0															
0	1	0															
0	0	0															
	<b>Kommentar</b>	Beschreibungen von Eingängen bzw. Ausgängen, von Verknüpfungen werden in Rechtecke eingetragen.															
	<b>Übertragung- Eingang</b>  <b>Übertragung- Ausgang</b>	Mit einem Übertragungsbildzeichen wird der Fehlerbaum abgebrochen bzw. an anderer Stelle fortgesetzt.															

### 2.3.1 Fehlerarten und logische Gatter

Bei der FTA gibt es verschiedene Arten von Fehlern (Ereignissen) und logischen Gattern. In der Tabelle 2.2 sind einige Fehlerarten bzw. Gatter inklusive deren Symbole, welche in den meisten FTA-Tools verwendet werden, dargestellt (vergleiche auch Tabelle 2.1). In Abbildung 2.13 ist ein Beispiel für eine Fehlerbaumanalyse angeführt. Das Top-Ereignis ist in diesem Beispiel das Sinken der Titanic. Durch die Betrachtung der unteren Fehler in diesem Fehlerbaum, kann nachvollzogen werden, wie es zu diesem unerwünschten Ereignis kommen kann. Den in grün dargestellten Fehlern (Base-Events, Undeveloped-Events und External-Events) können Wahrscheinlichkeitswerte zugeordnet werden (mit Ausnahme der Undeveloped-Events). Über die logischen Gatter können Wahrscheinlichkeiten der anderen Fehler und somit auch des Top-Ereignis berechnet werden.

Tabelle 2.2: Symbole der Fehlerarten und logischen Gattern

	<b>„normales“ Fehlerereignis – <i>Fault event</i></b>
	<b>UND-Gatter – <i>AND-gate</i></b>
	<b>ODER-Gatter – <i>OR-gate</i></b>
	<b>Exklusiv-ODER-Gatter – <i>XOR-gate</i></b>
	<b>BASIS-Fehlerereignis – <i>BASIC-event</i></b>
	<b>Sekundäres Ereignis – <i>Undeveloped event</i></b>
	<b>Externes Fehlerereignis – <i>External event</i></b>
	<b>Transfer eingehend – <i>Transfer gate (in)</i></b>
	<b>Transfer ausgehend – <i>Transfer gate (out)</i></b>

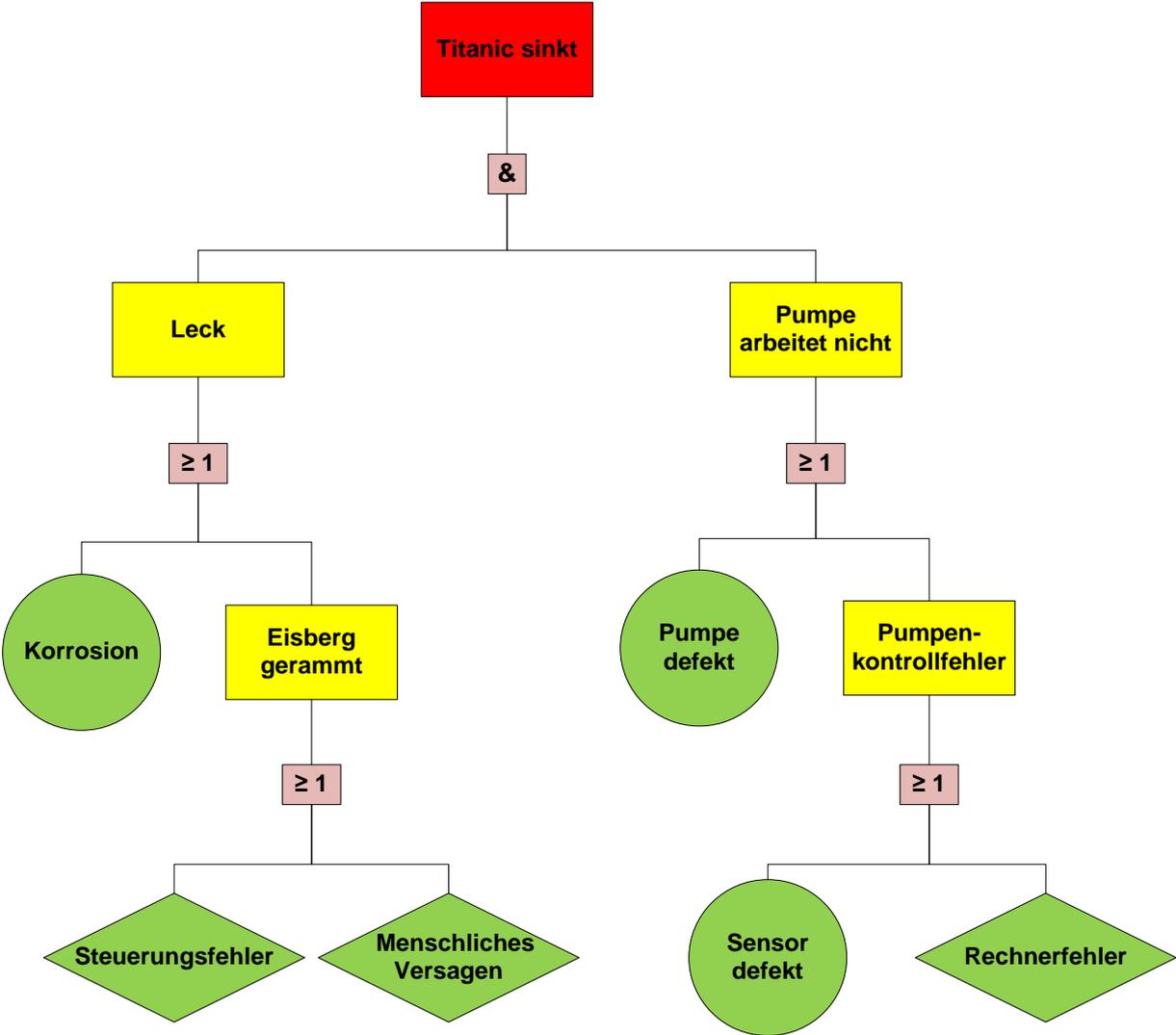


Abbildung 2.13: Fehlerbaum anhand des Beispiels „Titanic“

## 2.4 SysML-Blockdiagramm

Die **Systems Modeling Language SysML** ist eine Weiterentwicklung der Unified Modeling Language *UML* durch die Object Management Group (OMG) mit dem Ziel der Standardisierung einer Modellierungssprache für das System Engineering bezüglich Analyse, Spezifikation, Entwicklung und Verifikation komplexer Systeme. Durch die Notwendigkeit neuer Anforderungen seitens der Automobilindustrie, wurden neue Diagramme hinzugefügt bzw. bestehende soweit modifiziert, um wieder damit arbeiten zu können. Diese Diagramme integrieren Spezifikationen von Systemanforderungen, Struktur, Verhalten und parametrische Beziehungen, [20], [21].

Abbildung 2.14 zeigt ein UML-Funktionsblockdiagramm mit den Elementen von SysML-Blockdiagrammen (Ports und verschiedenen Arten der Verbindungen), welche für diese Arbeit von Bedeutung sind. Im Vergleich zur FMEA lassen sich bei diesen Diagrammen auch die Art der Verbindung (durchgezogene oder unterbrochene Verbindungen), eine Beschreibung der Verbindung (beispielsweise „12 V supply“), die Vergabe von Ports und auch Verbindungen zwischen Strukturelementen und Funktionen (Schnittstellen) realisieren. Das Beispiel in Abbildung 2.14 zeigt wieder das „Schiebetürsystem“, siehe Kapitel 2.2. Die einzelnen Blöcke stellen dabei die Strukturelemente dar, die in grün eingefärbten Blöcke die dazugehörigen Funktionen.

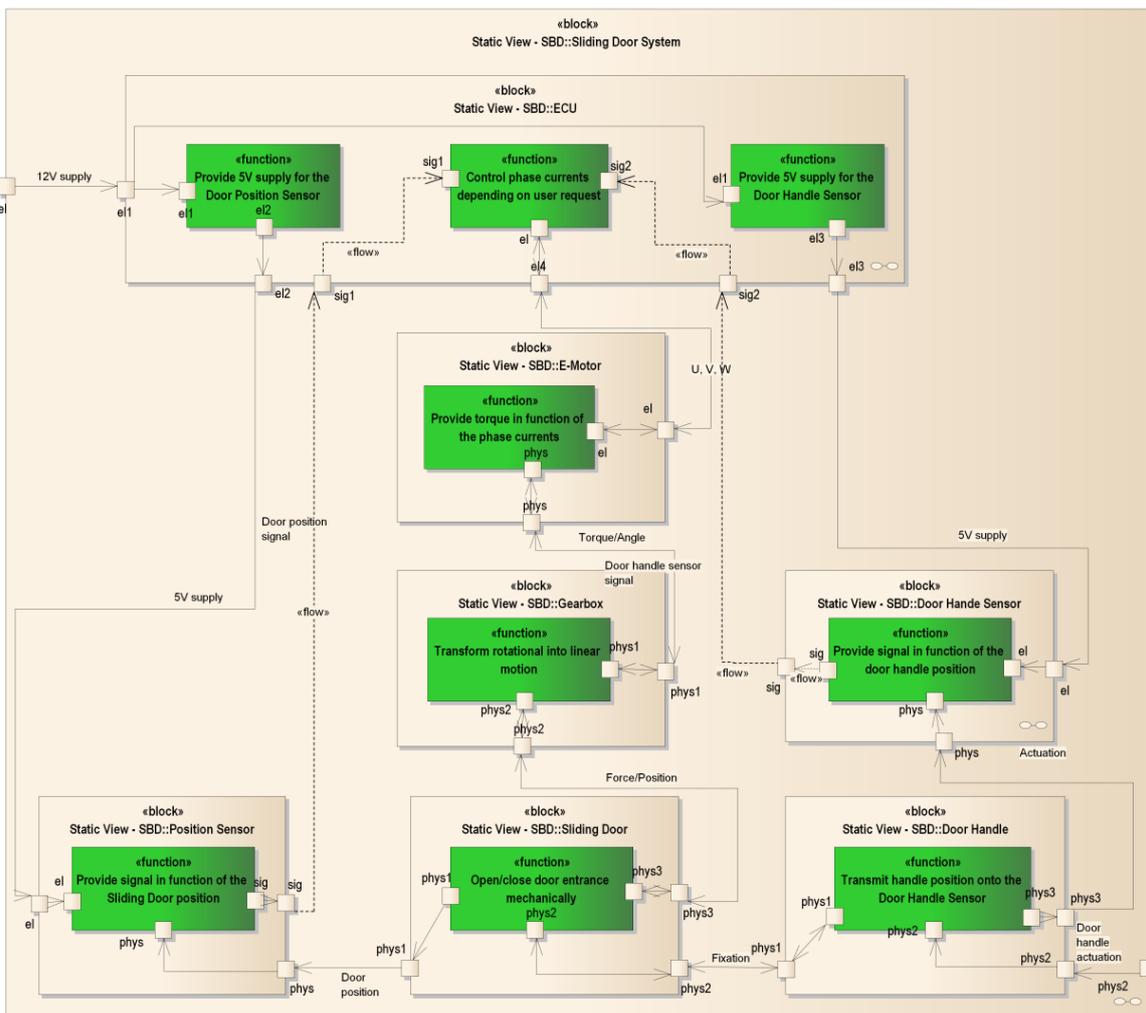


Abbildung 2.14: UML-Funktionsblockdiagramm „Schiebetürsystem“, [22]

## 2.5 Semantische Datenmodellierung, insbesondere Entity-Relationship-Modeling

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit verschiedenen Arten der semantischen Datenmodellierung, insbesondere aber mit dem Entity-Relationship-Modell *ERM* (siehe Kapitel 2.5.2).

### 2.5.1 Semantische Datenmodellierung

Zur semantischen Modellierung von Daten gibt es mehrere Möglichkeiten. Die entstehenden Modelle werden auch als konzeptionelle Datenmodelle, logische Modelle, konzeptuelle Datenbankschemata oder auch Informationsstrukturen bezeichnet und dienen der Softwareentwicklung und letztlich als Grundlage für die Entwicklung von Datenbanken. Die bekanntesten Modellierungssprachen sind:

- Unified Modeling Language *UML*
- Entity Relationship Modell *ERM*.

Das Ergebnis der einzelnen Modellierungssprachen wird als Datenmodell bezeichnet.

Zur Erstellung des Datenmodells in dieser Masterarbeit wird das Entity Relationship Modell *ERM* gewählt und im Kapitel 2.5.2 genauer erläutert. Das *ERM* bietet alle benötigten Möglichkeiten, um das Datenmodell in vollem Umfang erstellen zu können. Diese Modellierungssprache kann aber ohne großen Aufwand auch in ein *UML*-Datenmodell umgewandelt werden (siehe Abbildung 2.15), [23].

Begriff der ERM	Begriff der UML
Entität	Objekt Exemplar (instance)
Entitätentyp	Klasse
Entitätenmenge	(extent)
Beziehung	Assoziation
Beziehungstyp	Assoziation
Attribut	Attribut

Abbildung 2.15: Vergleich der Elemente von *UML*- und *ERM*-Modellen, [23]

Semantische Datenmodelle dienen als Grundlage um Anwendertools für Datenbanken zu realisieren bzw. diese weiter zu entwickeln, [24].

Datenbanken sind wegen dem stark ansteigenden Informationsfluss von großer Bedeutung und finden fast in jedem Bereich des Lebens ihre Anwendung, sei es beispielsweise um Kundendaten zu verwalten oder komplexe Zusammenhänge von verschiedenen Daten im Bereich der Softwareentwicklung darzustellen (in dieser Masterarbeit im speziellen zur Weiterentwicklung von FMEA-Tools).

### **Die Aufgaben von Datenbanken sind:**

- ***Persistenz***

Daten, welche in eine Datenbank eingetragen wurden, sollen gespeichert bleiben, selbst wenn das verwendete Programm zum Eintragen dieser beendet wird. Durch dieses Speichern werden die Daten später wieder verwendbar (persistent), [25].

- ***Anlegen von Datenschemata***

Es können idente Daten verschiedene Bedeutungen besitzen. Daher muss ein Datenschema entwickelt werden, um sicher zu stellen in welchem Zusammenhang die Daten verwendet werden. Beispielsweise kann die Zahl 13 für eine Hausnummer, Stückzahl, Stadtbezirk, etc. verwendet werden. Als Beispiel für ein Datenschema ist Tabelle 2.3 angeführt, [25].

**Tabelle 2.3: Tabelle als Datenschema**

<b>Artikelnummer</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Stückzahl</b>

- ***Einfügen, Ändern und Löschen von Daten***

Der Anwender muss nun in diese Datenschemata Daten beliebig einfügen, bearbeiten und löschen können. Tabelle 2.4 zeigt nun das befüllte Datenschema aus Tabelle 2.3, [25].

**Tabelle 2.4: gefülltes Datenschema**

<b>Artikelnummer</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Stückzahl</b>
124589	Feuerzeug	84
124590	Zündhölzer	56
124591	Teddybär	12

- ***Lesen von Daten***

Die wichtigste Aufgabe von Datenbanken ist das Lesen der vorher eingefügten Daten. Es muss eindeutig ersichtlich sein ob es einen Artikel mit der Artikelnummer 124590 in der Datenbank gibt bzw. welche zusätzlichen Daten zu diesem Artikel gehören (beispielsweise Bezeichnung oder Stückzahl; siehe Tabelle 2.4), [25].

## 2.5.2 Entity-Relationship-Modell ERM

Das *ERM* wurde in seiner Grundform zum ersten Mal im Jahr 1976 von Peter Chen im Rahmen seiner Veröffentlichung *The Entity-Relationship Model* publik. Weitere Ergänzungen wurden 1977 von J. M. Smith und D. C. P. Smith und Ende der 1980er Jahre von Wong und Katz hinzugefügt, [26].

In diesem Unterpunkt werden die wichtigsten Funktionen des ERM, welche zur Erstellung des Datenmodells benötigt werden, erklärt. Das Ergebnis eines Entity-Relationship-Modells ist ein Diagramm, genannt Entity-Relationship-Diagramm *ERD*. Die Kernelemente von ERD's sind, [24], [25], [27]:

- Entitäten (siehe Kapitel 2.5.2.1)
- Attributen (siehe Kapitel 2.5.2.2)
- Beziehungen zwischen Entitäten (siehe Kapitel 2.5.2.3).

Alle folgenden Datenmodelle wurden mit Hilfe von dem Tool *Enterprise Architect*<sup>1</sup> von Sparx Systems erstellt. Dieses Tool ist ein Modellierungswerkzeug für unter anderem UML, SysML, Business Process Model and Notation *BPMN* und eben ERM. Es bietet die Möglichkeit Datenmodelle mittels Entity-Relationship-Diagrammen darzustellen.

### 2.5.2.1 Entität

Eine Entität oder auch Informationsobjekt ist ein eindeutig identifizierbares Element. Die Summe dieser Elemente einer Entität wird auch als Entitätsmenge bezeichnet. Der Überbegriff der Informationsobjekte wird als Entitätstyp bezeichnet. Die Darstellung einer solchen Entität erfolgt mittels Rechteck (siehe Abbildung 2.16). In diesem Beispiel beinhaltet diese alle StudentInnen, welche sich ordnungsgemäß zu einem Studium gemeldet haben. Diesen Informationsobjekten können Attribute zugeordnet werden. Mehr dazu unter 2.5.2.2 Attribut, [25], [27].

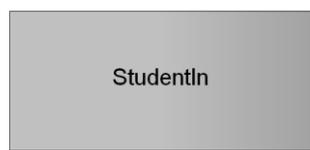


Abbildung 2.16: Entität (Entitätstyp)

#### Definition Entität:

„Eine Entität ist ein individuelles, eindeutig identifizierbares Objekt, das durch Eigenschaften charakterisiert werden kann.“ [25]

---

<sup>1</sup> Programmversion: 10.0.1010 (Corporate Edition)

**Definition Entitätstyp:**

„Ein Entitätstyp ist eine Schablone mit einem eindeutigen Namen. Sie dient zur Zusammenfassung von Entitäten. In der Schablone werden alle Attribute zusammengefasst, von denen die Entitäten konkrete Ausprägungen haben.“ [25]

**2.5.2.2 Attribut**

Den Informationsobjekten können Beschreibungen bzw. Merkmale hinzugefügt werden, welche spezifische Eigenschaften einer Entitätsmenge definieren und im Entity-Relationship-Diagramm als sogenannte Attribute aufscheinen. Zu dem Attribut gehört auch ein Wert (Attribut = Name; Wert = Müller), welcher die konkrete Ausprägung des Attributes festlegt. Merkmale können den Entitäten beliebig hinzugefügt oder entfernt werden (vergleiche Kapitel 2.5.1), [24], [27].

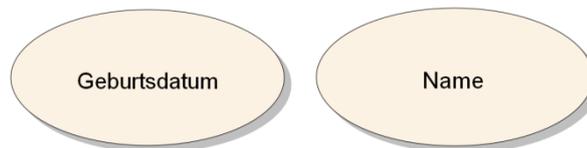
**Definition Attribut:**

„Ein Attribut besteht aus einem Namen und einem Datentypen. Attribute werden zur Modellierung von Eigenschaften verwendet.“ [25]

Es gibt verschiedene Arten von Attributen, welche im Folgenden genauer erläutert werden.

- **Attribut**

Zur genaueren Beschreibung werden den Entitäten Attribute hinzugefügt, welche jedoch keine eindeutige Unterscheidung der einzelnen Elemente des Informationsobjekts ermöglichen. Bei der Entität eines/einer StudentIn wäre dies beispielsweise der Name, Geschlecht oder auch das Geburtsdatum. Die Darstellung von Attributen im ERD ist in Abbildung 2.17 zu sehen, [27].



**Abbildung 2.17: Attribut am Beispiel „StudentIn“**

- **Schlüsselattribut**

Im Idealfall gibt es für eine Entität ein Schlüsselattribut, welches eine eindeutige Unterscheidung der einzelnen Elemente eines Informationsobjekts möglich macht. Beispielsweise wäre das Schlüsselmerkmal von Artikeln in einem Laden die Artikelnummer, bei Personen die Reisepassnummer. In dem Beispiel eines/einer StudentIn (Abbildung 2.16) wäre dies die Matrikelnummer. Die Darstellung eines Schlüsselattributs ist in Abbildung 2.18 zu sehen, [27].



**Abbildung 2.18: Schlüsselattribut am Beispiel „StudentIn“**

- **Mehrwertiges Attribut**

Wenn eine Beschreibung mehrere Werte annehmen kann, handelt es sich um ein sogenanntes „mehrwertiges Attribut“. Dies könnte beispielsweise die Farbe eines Autos sein, welches am Dach schwarz und der Rest weiß lackiert ist. Somit wäre das Merkmal Farbe Weiß und Schwarz und daher mehrwertig. Bei dem/der StudentIn wäre dies bei der Studienrichtung der Fall. Ist ein/eine StudentIn für zwei oder mehrere Studien inskribiert, wäre dieses Attribut ebenfalls mehrwertig. Zu sehen ist ein mehrwertiges Attribut in Abbildung 2.19, [27].



Abbildung 2.19: mehrwertiges Attribut am Beispiel „StudentIn“

- **Abgeleitetes Attribut**

Als abgeleitetes Attribut werden Eigenschaften bezeichnet, welche aus anderen Informationen gewonnen werden können. Wird beispielsweise das Geburtsdatum einer Person in einer Datenbank hinterlegt, so lässt sich mit Hilfe des aktuellen Datums das Alter dieser Person bestimmen. Die Darstellung eines abgeleiteten Attributs ist in Abbildung 2.20 zu sehen, [27].

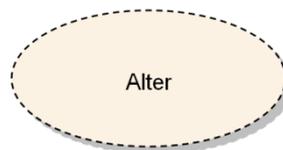


Abbildung 2.20: abgeleitetes Attribut am Beispiel „StudentIn“

- **Zusammengesetztes Attribut**

Ein Attribut kann aus mehreren Einzelmerkmalen bestehen. Dieses kann als „zusammengesetztes Attribut“ bezeichnet werden und eine mehrstufige Hierarchie haben. Eigenschaften, welche nicht weiter teilbar sind, werden als einfache oder atomare Attribute bezeichnet. Die Darstellung ist in Abbildung 2.21 am Beispiel des Namens, welcher sich aus Vor- und Nachnamen zusammensetzt, ersichtlich, [27].

Durch das Hinzufügen von charakteristischen Beschreibungen in Form von Attributen an den Entitätstyp „StudentIn“ aus Abbildung 2.16, stellt sich das ERD beispielsweise dar, wie in Abbildung 2.21 zu sehen.

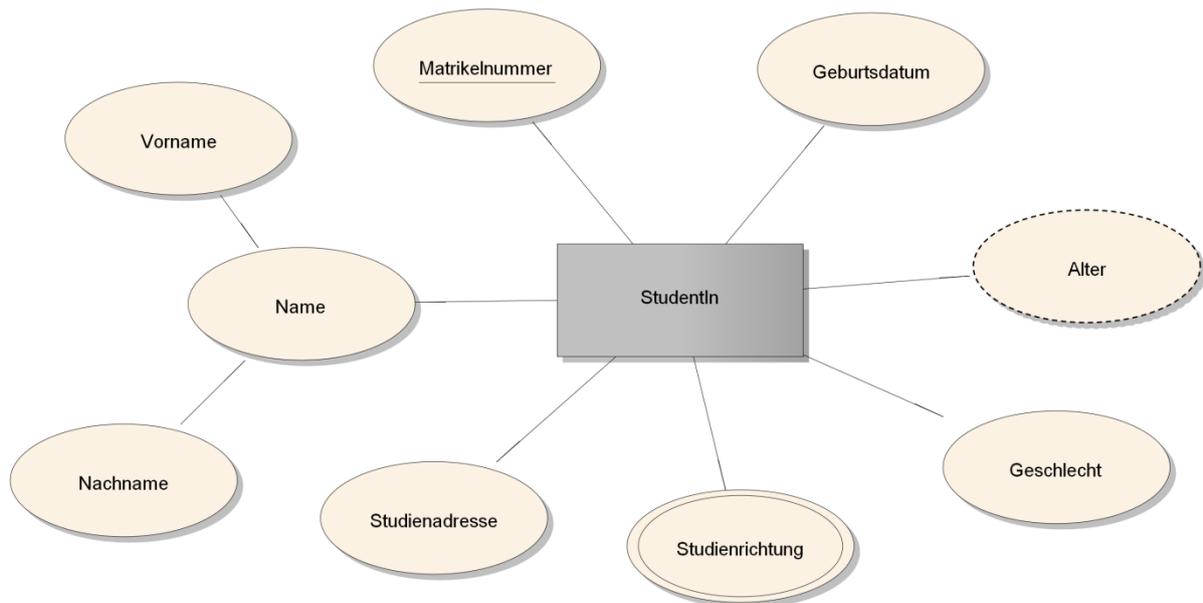


Abbildung 2.21: Entität inklusive Attributen am Beispiel „StudentIn“

### 2.5.2.3 Beziehung

Als Beziehung (englisch Relationship) wird das Verhältnis von zwei Entitätstypen bezeichnet. Hierbei kann zwischen drei grundlegenden Beziehungstypen unterschieden werden, welche durch geeignete Kardinalitäten dargestellt werden. Kardinalitäten sind Mengenangaben, welche für die verschiedenen Beziehungstypen festlegen, wie viele Entitäten einer Entitätsmenge mit genau einer Entität der anderen beteiligten Entitätsmenge in Beziehung steht. Die einzelnen Beziehungstypen lassen sich am besten anhand eines Beispiels erläutern. Hierfür wird das Beispiel eines/einer StudentIn fortgeführt, [27].

- **1:1 Beziehung**

Erlaubt eine Beziehung von zwei Entitätstypen eine eindeutige Zuordnung, ergibt sich eine 1:1 Beziehung. Der in Abbildung 2.22 dargestellte Beziehungstyp, zeigt das Verhältnis von einem/einer StudentIn und dem Studentenausweis. Da jeder Studentenausweis genau einem/einer StudentIn zugeordnet ist und ein/eine StudentIn genau einen Studentenausweis besitzt, ergibt sich das Verhältnis mit 1:1, [24], [25], [27].



Abbildung 2.22: 1:1 Beziehung am Beispiel „StudentIn“

Abbildung 2.22 liest sich wie folgt:

*Von links nach rechts:* Ein/eine StudentIn besitzt genau einen Studentenausweis  
*Von rechts nach links:* Ein Studentenausweis gehört genau einem/einer StudentIn

Dies soll auch Abbildung 2.23 veranschaulichen.

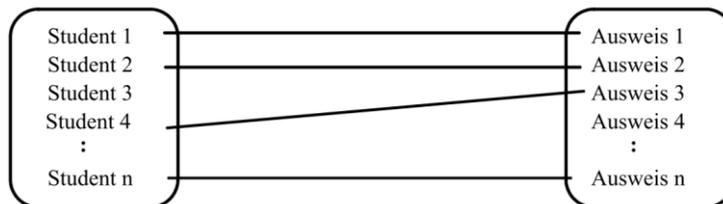


Abbildung 2.23: Erläuterung 1:1 Beziehungstyp, [27]

- **1:n Beziehung**

Nach Berücksichtigung der Definition *ein/eine StudentIn darf nur eine Hochschule besuchen*, ergibt sich die Beziehung zwischen den Entitätstypen StudentIn und Hochschule wie in Abbildung 2.24 dargestellt als 1:n Beziehung (das Symbol \* steht für mehrere (n)), [24], [25], [27].



Abbildung 2.24: 1:n Beziehung am Beispiel „StudentIn“

Abbildung 2.24 sagt Folgendes aus:

*Von links nach rechts:* Ein/eine StudentIn geht auf genau eine Hochschule  
*Von rechts nach links:* Eine Hochschule wird von mehreren (n) StudentInnen besucht

Zur genaueren Erläuterung soll Abbildung 2.25 dienen.

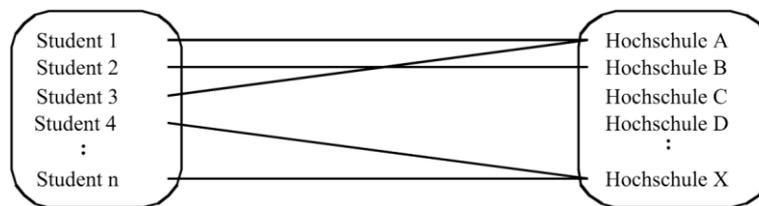


Abbildung 2.25: Erläuterung 1:n Beziehungstyp, [27]

- ***n:m Beziehung***

Ein n:m Beziehungstyp ergibt sich zwischen den Entitätstypen StudentIn und Vorlesung. Ein/eine StudentIn besucht mehrere Vorlesungen und eine Vorlesung wird von mehreren StudentInnen besucht, [24], [25], [27].

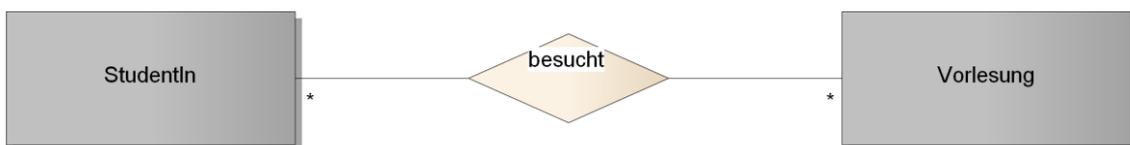


Abbildung 2.26: n:m Beziehung am Beispiel „StudentIn“

Abbildung 2.26 bedeutet sinngemäß:

- Von links nach rechts:* Ein/eine StudentIn besucht mehrere (n) Vorlesungen
- Von rechts nach links:* Eine Vorlesung wird von mehreren (n) StudentInnen besucht

Was dies genau aussagt, ist in Abbildung 2.27 dargestellt.

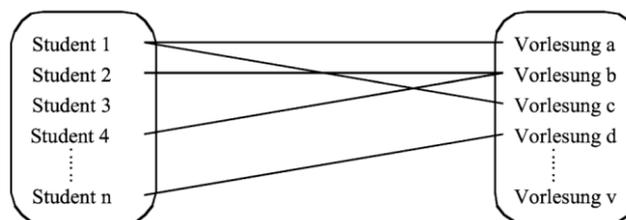
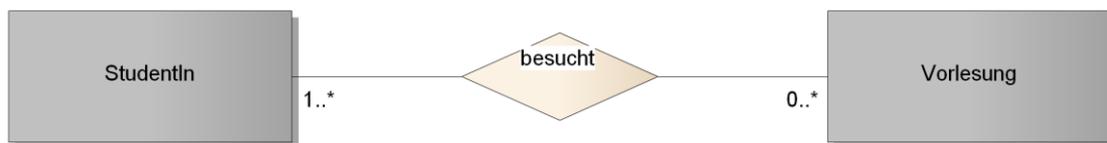


Abbildung 2.27: Erläuterung n:m Beziehungstyp, [27]

- **min-max-Notation**

Beim erweiterten Entity-Relationship-Modell *eERM* gibt es zusätzlich die Möglichkeit eine Verfeinerung der Kardinalitäten vorzunehmen. Diese Verfeinerung erfolgt mittels **min-max-Notation**. Hierdurch wird ein minimaler Wert zur genaueren Bestimmung der Beziehung hinzugenommen und bietet dadurch Vorteile beim Bestimmen von Existenzabhängigkeiten zwischen den Entitätstypen. Um dies wieder in einem Beispiel zu veranschaulichen, wird Abbildung 2.26 herangezogen und eine *min-max-Notation* zugefügt. Als Darstellungsart wird die numerische Notation gewählt (siehe Abbildung 2.28), [27].

Bei der genaueren Betrachtung der Beziehung zwischen den Entitätstypen StudentIn und Vorlesung, wird eine Verfeinerung der Beziehung möglich. Ein/eine StudentIn besucht nicht nur n Vorlesungen, sondern detaillierter betrachtet null bis n Vorlesungen. Eine Vorlesung wird aber von mindestens einem/einer StudentIn besucht, da sie ansonsten nicht zu Stande kommen würde. Diese Beziehung ist nun in Abbildung 2.28 mit Hilfe eines Entity-Relationship-Diagramms dargestellt.



**Abbildung 2.28: min-max-Notation bei Beziehungstypen am Beispiel „StudentIn“**

Zu lesen ist Abbildung 2.28 wie folgt:

- |                               |   |
|-------------------------------|---|
| <i>Von links nach rechts:</i> | Ein/eine StudentIn besucht null bis mehrere (n) Vorlesungen   |
| <i>Von rechts nach links:</i> | Eine Vorlesung wird von mindestens einem/einer bis mehreren/mehrerer (n) StudentInnen besucht (da sie ansonsten nicht abgehalten wird). |

Bei der Vollendung des Beispiels eines/einer StudentIn durch Hinzufügen von Attributen an die einzelnen Entitätstypen und der gleichzeitigen Darstellung der Beziehungen zwischen den Entitäten, könnte das resultierende Datenmodell aussehen, wie das Entity-Relationship-Diagramm aus Abbildung 2.29.

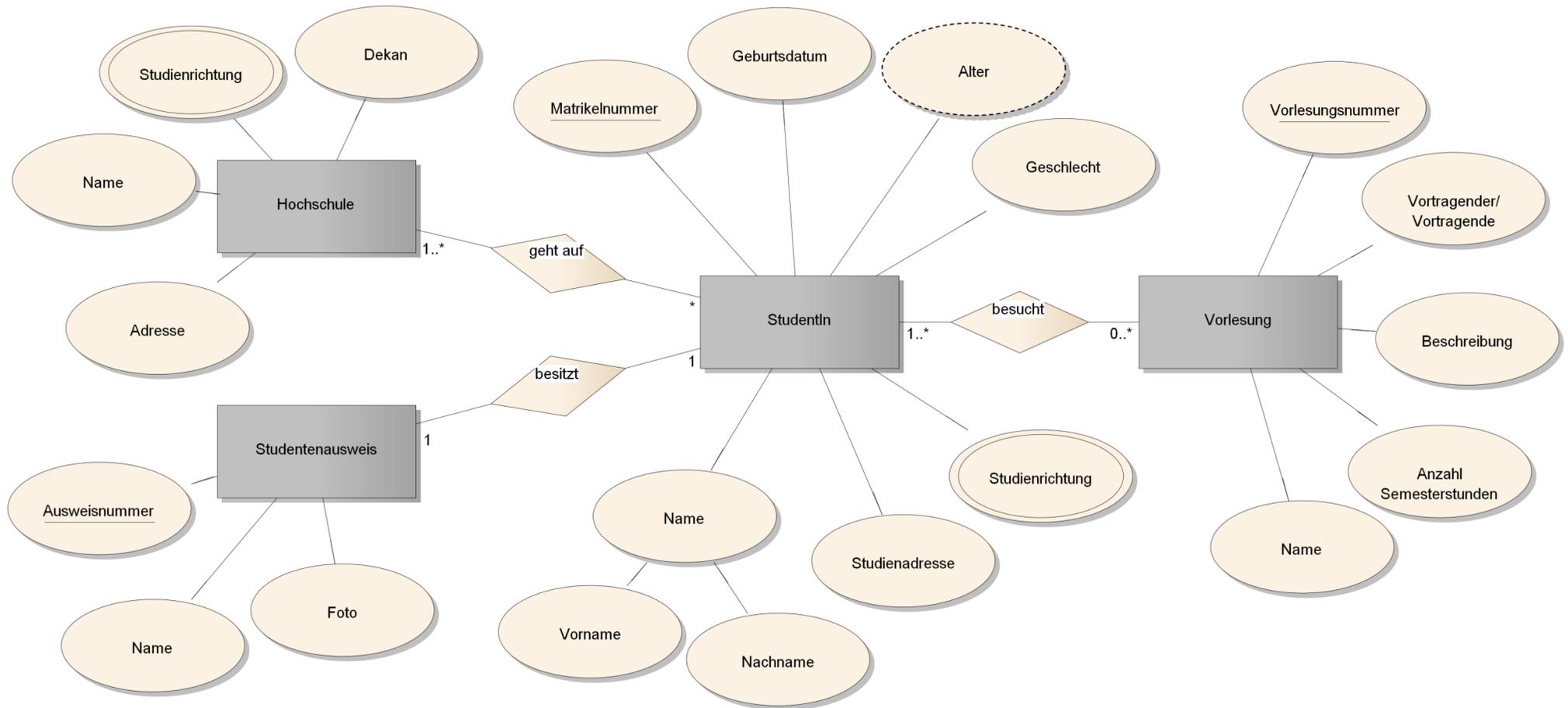


Abbildung 2.29: Datenmodell am Beispiel „StudentIn“

## **3 Analyse von aktuellen FMEA-, FTA- und SysML-Blockdiagramm-TOOLS**

In diesem Kapitel werden aktuelle FMEA- und FTA-Tools (siehe Kapitel 3.1 und 3.2) analysiert und die wichtigsten Funktionen dieser Analysemethoden mittels Entity-Relationship-Modell dargestellt. Es ist zu erwähnen, dass kein „Reverse Engineering“ durchgeführt wird, sondern die prinzipiellen Funktionen solcher Tools mittels Entity-Relationship-Diagrammen nachvollzogen werden. Somit entsprechen die angefertigten Datenmodelle nicht dem vollen Funktionsumfang von Analysewerkzeugen. Diese ERDs dienen in weiterer Folge als Grundlage für das Datenmodell der innovativen Analysemethode (siehe Kapitel 4). Die Bewertung des Speicherbedarfs von aktuellen FMEA- und FTA-Tools wird in Kapitel 5 sowohl quantitativ als auch qualitativ durchgeführt (siehe insbesondere Kapitel 5.1.3 bis 5.1.7 und 5.2).

Für SysML-Blockdiagramme wird kein Datenmodell erstellt, jedoch die wichtigsten Funktionen, welche bei der innovativen Analysemethode Relevanz besitzen, werden im Kapitel 3.3 betrachtet.

### **3.1 Fehler Möglichkeiten und Einfluss Analyse FMEA**

Die Funktionsweise dieser Analysemethode wurde in Kapitel 2.2 beschrieben. In weiterer Folge werden FMEA-Tools, welche auf dem Markt stark verbreitet sind, und deren Möglichkeiten betrachtet. Das zugehörige Datenmodell spiegelt die Arbeitsweise dieser Werkzeuge wieder und wurde in Absprache mit drei Softwareherstellern erstellt.

Im Kapitel 3.1.1 wird auf die Darstellungs- bzw. Analysemöglichkeiten von aktuellen Tools eingegangen. Unter 3.1.2 wird sukzessive erläutert, wie diese Tools arbeiten und welche Elemente als Entität in den ERDs anzusehen sind. Zusätzlich werden die Eigenschaften dieser eindeutig identifizierbaren Objekte als Attribute dargestellt. Die daraus resultierenden Datenmodelle der betrachteten FMEA-Tools, sind in Kapitel 3.1.3 (Abbildung 3.11, Abbildung 3.12 und Abbildung 3.13, vergleiche hierzu [10]) zu finden.

Abschließend werden die Grenzen der gebräuchlichen Methoden unter 3.1.4 aufgezeigt.

#### **3.1.1 Darstellungs-/Analysemöglichkeit**

Bei den verwendeten Tools ist es möglich einen Strukturbaum (siehe Abbildung 2.4) für eine FMEA anzulegen. Dazu werden die verwendeten Systemelemente mit einem Namen belegt und es wird deklariert, bei welchen Strukturvarianten der FMEA sie Relevanz besitzen. Beispiele für solche Varianten wären die Software- oder Hardware-FMEA (siehe Kapitel 2.2).

Den einzelnen Strukturelementen können Funktionen zugeordnet werden, welche wiederum mit einem Namen und verschiedenen Strukturvarianten versehen werden können. Durch

diese Möglichkeit entsteht das sogenannte Funktionsnetz (siehe Abbildung 2.6) bzw. ein Funktionsnetz (siehe Kapitel 2.2.3).

Jede Funktion kann Fehlfunktionen bzw. Abweichungen vom Soll-Wert besitzen. Hierzu wird Name und Strukturvariante des Fehlers festgelegt, ein Wert bezüglich der Bedeutung  $B$  (bei Fehlern, welche keine weiteren Folgen haben – Top-Fehler) und eine Fehlerrate  $\lambda$ . Alle Abweichungen vom Soll-Wert besitzen einen Maximalwert für die Bedeutung  $B$ -Max, welcher von den jeweiligen Folgen vererbt wird (siehe Abbildung 2.9). Hat der eine Top-Fehler eine Bedeutung von  $B = 3$  und der andere einen Wert von  $B = 7$ , ist bei der Ursache der Wert für  $B$ -Max = 7. Dies ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

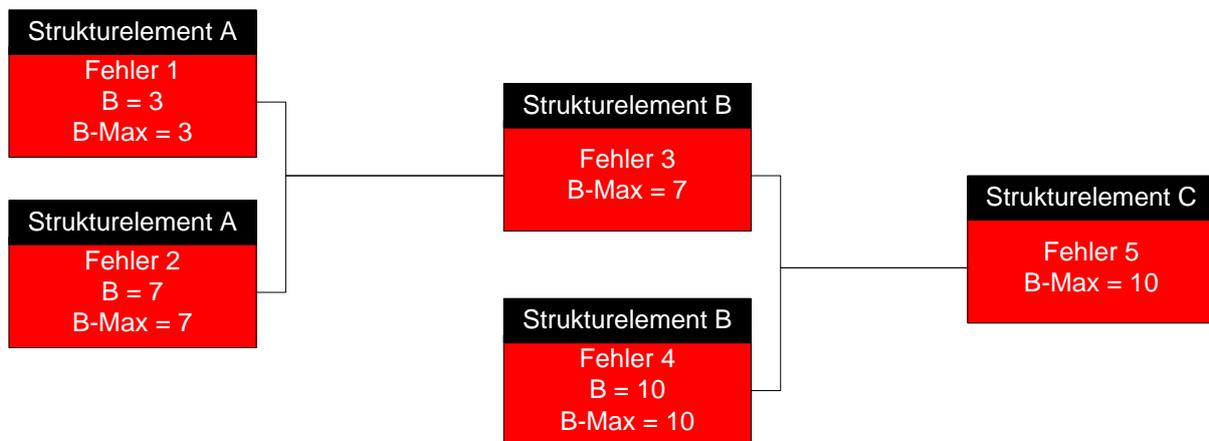


Abbildung 3.1: Vererbung der Bedeutung (B-Max) eines Fehlers

Diese Fehlerzustände können nun einen Maßnahmenstand oder mehrere Maßnahmenstände enthalten (siehe Kapitel 2.2.5). In diesen sind das Datum der Erstellung, die betroffene Strukturvariante und die restlichen beiden Parameter zur Berechnung der RPZ hinterlegt (Auftrittswahrscheinlichkeit der Fehlerursache  $A$  und Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers bzw. seiner Ursache  $E$ ). Sind alle drei Werte deklariert, wird die Risiko-Prioritäts-Zahl automatisch berechnet und auf der Benutzeroberfläche angezeigt ( $B$ -Max wird von der Fehlfunktion herangezogen).

Die in den Ständen enthaltenen Möglichkeiten zum Detektieren und Vermeiden von Fehlern, werden als Entdeckungs- bzw. Vermeidungsmaßnahmen bezeichnet, welche die Eigenschaften Name, Datum und Strukturvariante besitzen.

### 3.1.2 Vorgehensweise

In diesem Kapitel wird die Erstellung von ERDs der konventionellen FMEA-Tools näher erläutert (vergleiche hierzu alle Abbildungen in diesem Kapitel mit [10]). Dazu wird deklariert, welche Elemente von FMEA-Werkzeugen als Entitäten anzusehen sind. Jedes dieser eindeutig identifizierbaren Objekte wird gesondert betrachtet und mit dessen Eigenschaften versehen, um in weiterer Folge das gesamte Datenmodell darstellen zu können. Die Entitäten von herkömmlichen FMEA-Tools sind,

- Strukturelement,
- Funktion,
- Fehler,
- Maßnahmenstand,
- Maßnahmen,

da sie vom Programm mit einer Nummer versehen werden, welche als Schlüsselattribut zur Identifikation anzusehen ist (Attribut *ID* im Entity-Relationship-Diagramm).

- **Strukturelement**

Es wird die Entität *Strukturelement* mit deren Attributen und Beziehung zu dem Informationsobjekt *Funktion* näher erläutert, welche den ersten Schritt im Ablauf einer FMEA-Erstellung, also die Strukturanalyse, definieren (siehe Kapitel 2.2.2).

Die wichtigsten Eigenschaften dieses Informationsobjektes sind:

- ID als Schlüsselattribut – eine eindeutige Nummer zum Identifizieren der einzelnen Strukturelemente, welche vom Tool vergeben wird
- Name des Systemelements – vom Ersteller der FMEA frei wählbar
- Strukturvariante
- Anzahl der Vorkommnisse – wird vom Programm automatisch angezeigt.

Die Vernetzung der Strukturelemente und Funktionen im Datenmodell erfolgt bei den analysierten, konventionellen FMEA-Tools mittels einer 1:(0-n) Beziehung. Dabei kann ein Strukturelement null bis mehrere (n) Funktionen beinhalten. Eine Funktion wiederum kann nur zu genau einem Strukturelement gehören (siehe Abbildung 3.2). Selbst wenn dieselbe Funktion auch bei anderen Strukturelementen vorkommt, so hat sie doch eine andere ID und ist somit zu unterscheiden.

Auf die Möglichkeiten der Verbindungen der einzelnen Strukturelemente untereinander wird am Ende dieses Kapitels (3.1.2) eingegangen.

Das Entity-Relationship-Diagramm für die Strukturelemente mit den oben genannten Attributen und Beziehung ist in Abbildung 3.2 zu sehen.

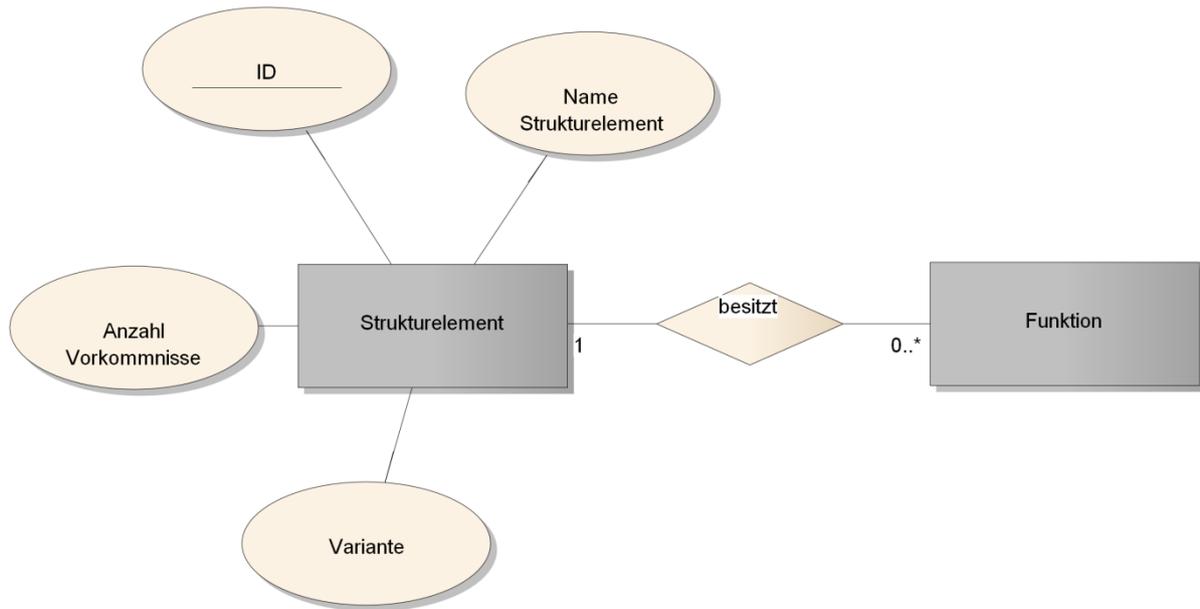


Abbildung 3.2: ERD von aktuellen FMEA-Tools für Strukturelemente

- **Funktion**

Das nächste Kernelement aktueller FMEA-Tools ist die *Funktion* (siehe auch Kapitel 2.2.3 Funktionsanalyse). Von dieser Entität werden die wichtigsten Attribute und die Beziehung zu dem Informationsobjekt *Fehler* dargestellt.

Die beschreibenden Eigenschaften der Funktionen sind dieselben, wie bei den Strukturelementen.

Im Datenmodell werden die Entitäten *Funktion* und *Fehler* mittels einer 1:(0-n) Beziehung verbunden. Somit kann eine Funktion null bis mehrere (n) Fehler enthalten. Eine dieser Fehlfunktionen gehört aber immer zu genau einer bestimmten Funktion (siehe Abbildung 3.3). Obwohl derselbe Fehler bei mehreren Funktionen vorkommen kann, ist er aber auf Grund der unterschiedlichen ID im FMEA-Tool eindeutig zu unterscheiden.

Die Verbindungen untereinander werden am Ende dieses Kapitels (3.1.2) dargestellt.

In Abbildung 3.3 ist das Entity-Relationship-Modell für das Informationsobjekt Funktion mit den bereits erwähnten Eigenschaften zu sehen.

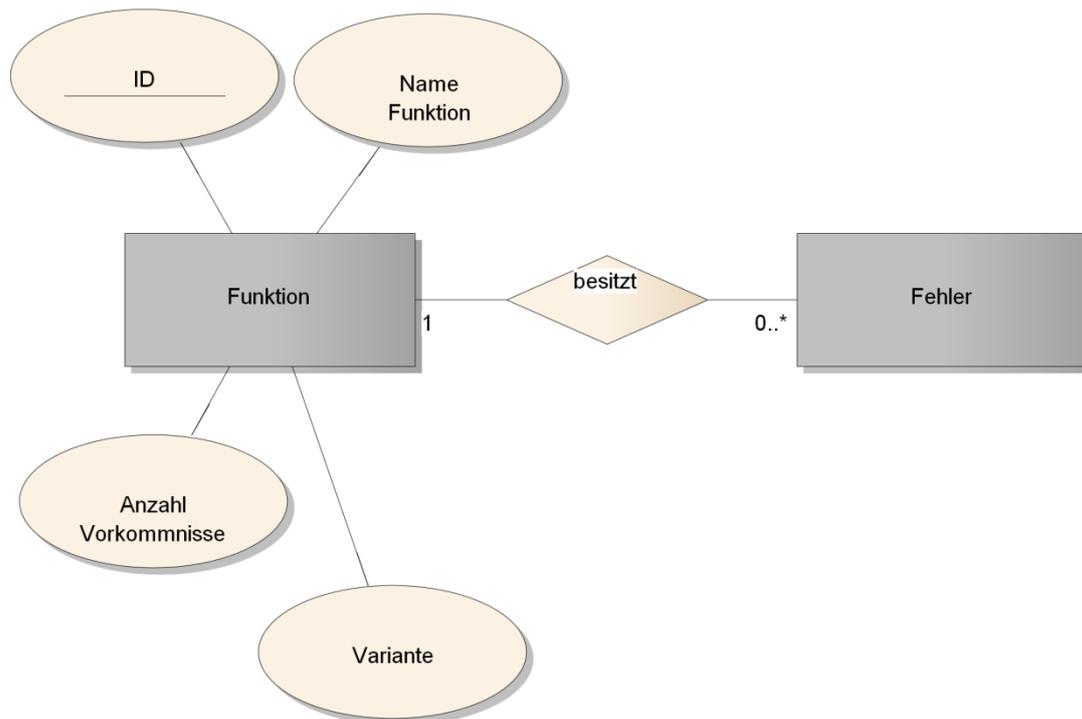


Abbildung 3.3: ERD von aktuellen FMEA-Tools für Funktionen

- **Fehler**

In den konventionellen FMEA Programmen sind die Fehlfunktionen das nächste Element, welches sich im ERD als eindeutig identifizierbares Informationsobjekt kategorisieren lässt (siehe Kapitel 2.2.4 Fehleranalyse). Die beschreibenden Eigenschaften des Entitätstyps *Fehler*, welche in den Tools hinterlegt werden können, sind:

- ID als Schlüsselattribut – für jeden Fehler durch das Tool vergeben
- Name des Fehlers – Vergabe durch den Anwender der FMEA-Software
- Strukturvariante
- Anzahl der Vorkommnisse – wird vom Programm generiert
- B-Wert – die Bedeutung des Fehler
- B-Max-Wert – von der Folge vererbter Maximalwert der Bedeutung
- Lambda – Fehlerrate.

Die Fehler können null bis n Maßnahmenstände enthalten. Die einzelnen Maßnahmenstände gehören immer zu genau einer Funktion und können auch nicht mehrfach vorkommen. Daher ist im Entity-Relationship-Modell als Verbindungsart eine 1:(0-n) Beziehung dargestellt (siehe Abbildung 3.4).

Die Realisierung der Verbindungen der einzelnen Fehler wird am Ende dieses Kapitels (3.1.2) behandelt.

Abbildung 3.4 ist das angefertigte Datenmodell für die Entität *Fehler* mit den zugehörigen Eigenschaften und der Beziehung zu den Maßnahmenständen.

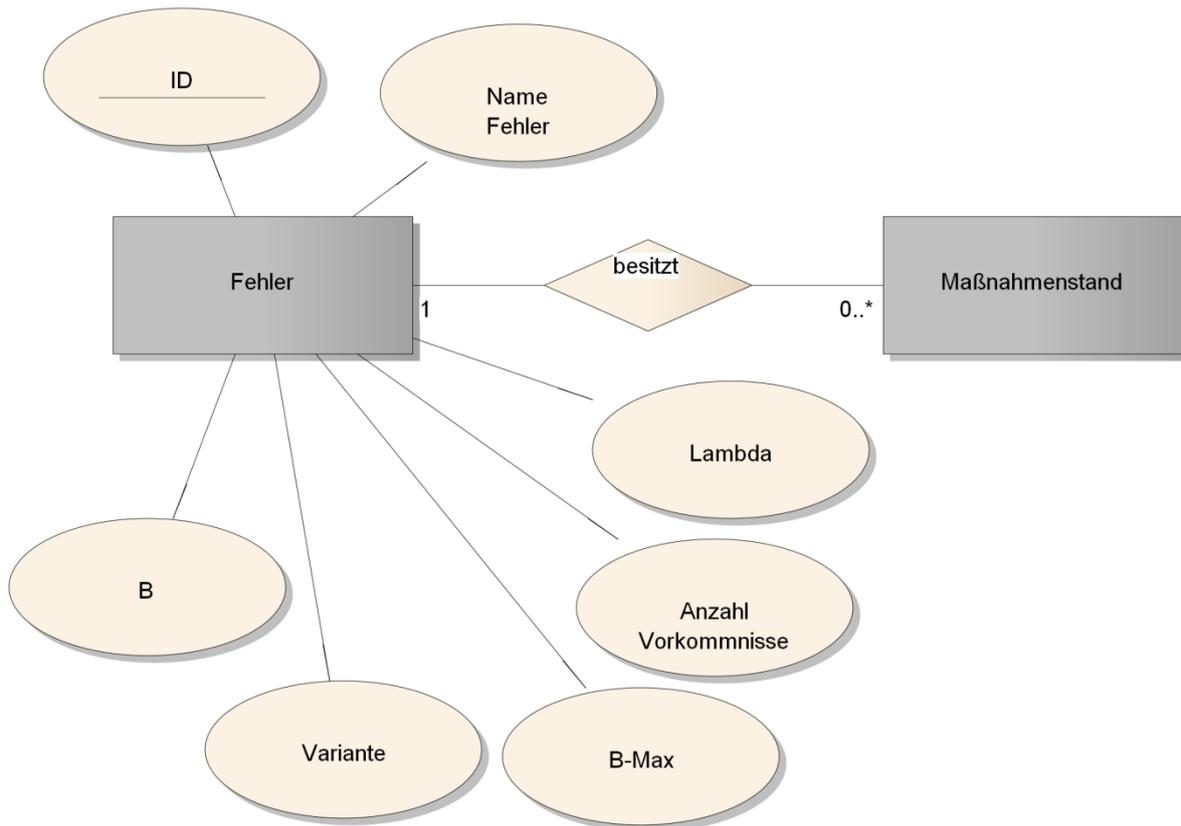


Abbildung 3.4: ERD von aktuellen FMEA-Tools für Fehler

- **Maßnahmenstand und Maßnahmen**

Zwei weitere Kernelemente herkömmlicher FMEA-Werkzeuge und somit Informationsobjekte des Datenmodells sind *Maßnahmenstand* und *Maßnahme* (siehe Kapitel 2.2.5 Maßnahmenanalyse).

Als Attribute für die Maßnahmenstände werden folgende Eigenschaften vom Tool vergeben:

- ID als Schlüsselattribut – zur eindeutigen Identifikation des Inhalts dieses Entitätstyps vom Programm hinterlegt
- Strukturvariante
- Datum – wird am Tag der Erstellung des Maßnahmenstand vom Tool hinzugefügt
- RPZ als abgeleitetes Attribut – B-Max-Wert vom übergeordneten Fehler, A und E wird beim Maßnahmenstand ergänzt.

Diese Beschreibungen sind im ERD als Attribute dargestellt (Abbildung 3.5).

Der Entität der Maßnahmen werden toolseitig folgende Beschreibungen angefügt:

- ID als Schlüsselattribut – dient wieder zur Unterscheidung der einzelnen Maßnahmen
- Name der Maßnahme – ist frei vom User zu wählen
- Strukturvariante
- Anzahl der Vorkommnisse – wird vom Tool generiert
- Entdeckung/Vermeidung – zur Unterscheidung der beiden Maßnahmenvarianten
- Datum – wird beim Anlegen einer Maßnahme von der Software angehängt.

Die beiden Entitäten *Maßnahmenstand* und *Maßnahme* werden im Entity-Relationship-Diagramm über eine 1:(0-n) Beziehung vernetzt. Einer dieser Maßnahmenstände kann null bis mehrere (n) Maßnahmen enthalten, wobei eine Maßnahme zu genau einem Maßnahmenstand gehört (siehe Abbildung 3.5). Es kann durchaus vorkommen, dass dieselbe Maßnahme bei mehreren Maßnahmenständen enthalten ist, wobei eine eindeutige Unterscheidung mittels ID immer möglich ist. Daher ergibt sich die Notation wie in Abbildung 3.5 dargestellt.

Das vollständige ERD für diese beiden Informationsobjekte und deren Beziehung zueinander zeigt Abbildung 3.5.

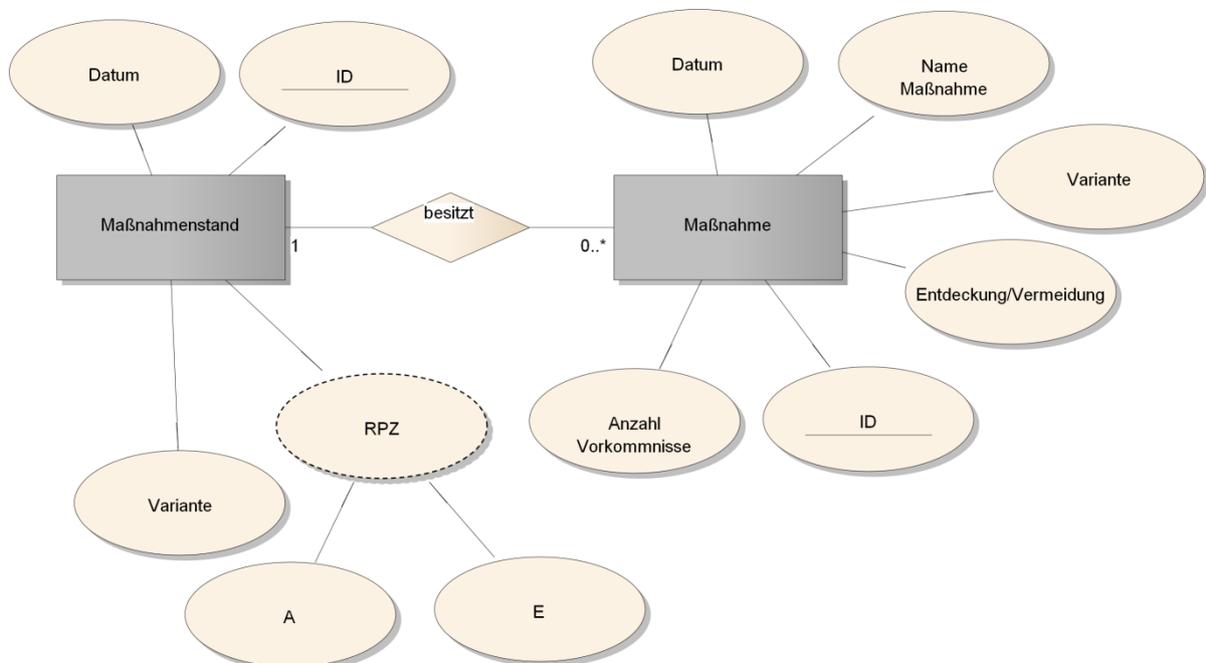


Abbildung 3.5: ERD von aktuellen FMEA-Tools für Maßnahmenstand und Maßnahme

- **Verbindungen untereinander von Strukturelementen, Funktionen und Fehlern**

Dieser Unterpunkt gilt für Strukturelemente, Funktionen und Fehler. Angefertigt sind die ERDs und Tabellen exemplarisch für das Informationsobjekt *Fehler*.

Die Arbeitsweise hinter der Benutzeroberfläche von aktuellen FMEA-Tools, beispielsweise der Programmcode oder das verwendete Datenmodell, sind nicht als Grundlage dieser Arbeit vorhanden. Da es mehrere Möglichkeiten gibt, wie Verbindungen in den Tools realisiert werden können, werden drei verschiedene verfolgt und mittels Entity-Relationship-Diagramm dargestellt. Diese drei Varianten sind:

- Verbindungsentität
- Verbindungstabelle
- Verbindungsmatrix.

Jede dieser Arten besitzt Vor- und Nachteile, welche in Tabelle 3.1 zusammengefasst sind.

**Tabelle 3.1: Vor- und Nachteile der Verbindungsvarianten**

	<b>Vorteil</b>	<b>Nachteil</b>
<b>Verbindungsentität</b>	Attribute beliebig erweiterbar, Hohe Flexibilität	Höherer Speicherbedarf als Tabelle
<b>Verbindungstabelle</b>	Nur tatsächliche Verbindungen in Tabelle	Jeder Fehler benötigt eine eigene Tabelle
<b>Verbindungsmatrix</b>	Nur eine Matrix für alle Fehler notwendig	Matrixgröße = (Anzahl Fehler) <sup>2</sup> , Eintrag notwendig, unabhängig ob Verbindung vorhanden, Hoher Speicherbedarf

### **Verbindungsentität**

Die erste Möglichkeit wie Verbindungen (von Strukturelementen, Funktionen und Fehlern) in aktuellen FMEA-Programmen realisiert sein könnten, ist deren Definition als eigenen Entitätstyp.

Jede einzelne Verbindung wird daher als eindeutig identifizierbares Informationsobjekt mit einer Schlüsseleigenschaft angesehen. Dieses Attribut wäre wie schon bei den Strukturelementen, Funktionen, Fehlern, Maßnahmenständen und Maßnahmen eine

fortlaufende Identifikationsnummer (ID). Zur Unterscheidung welche der Verbindungen bei welcher FMEA-Variante (siehe auch Kapitel 2.2 und 3.1.1) Relevanz besitzt, wird auch das Attribut *Variante* an diese Entität gekoppelt. Zur weiteren Deklaration dieses Entitätstypen dient das Start- und das Ziel-Element bei jeder Verbindung. Ist dies nicht hinterlegt, kommt es zu einem Informationsverlust und die Verbindung hat keine Bedeutung, siehe Abbildung 3.6. In den grau hinterlegten Feldern ist die ID und das Start- bzw. Ziel-Element der Verbindung (färbig) dargestellt. Abbildung 3.7 zeigt das Entity-Relationship-Diagramm mit der Entität *Verbindung* und zugehörigen Eigenschaften.

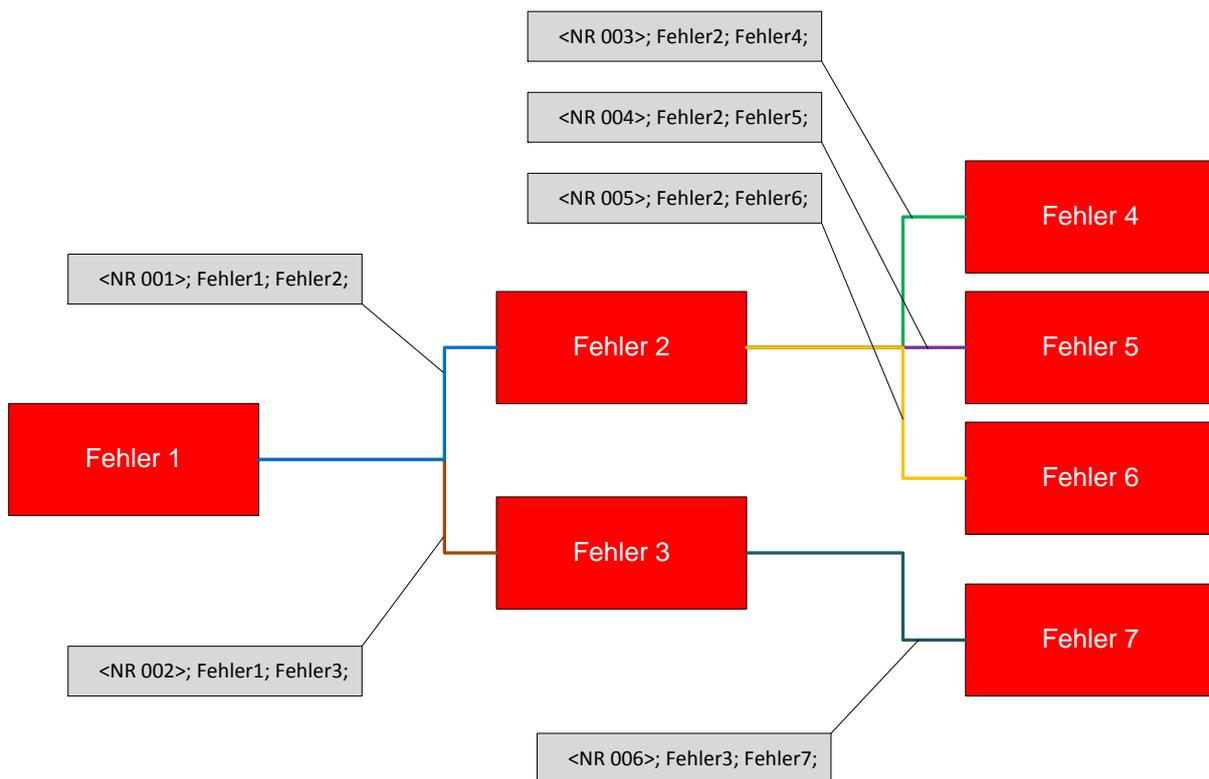


Abbildung 3.6: Beispiel für eine Verbindungsentität

Um die Arbeitsweise konventioneller Tools im Datenmodell richtig wiederzugeben ist sicher zu stellen, dass eine Verbindung immer nur den Zusammenhang von genau zwei Informationsobjekten repräsentiert, wobei ein Fehler mit anderen Fehlern vernetzt werden kann und daher null bis mehrere (n) Verbindungen besitzt. Im Entity-Relationship-Modell ist die Notation der Beziehung von den Entitäten *Fehler* und *Verbindung* somit 2:(0-n), wie in Abbildung 3.7 zu sehen ist.

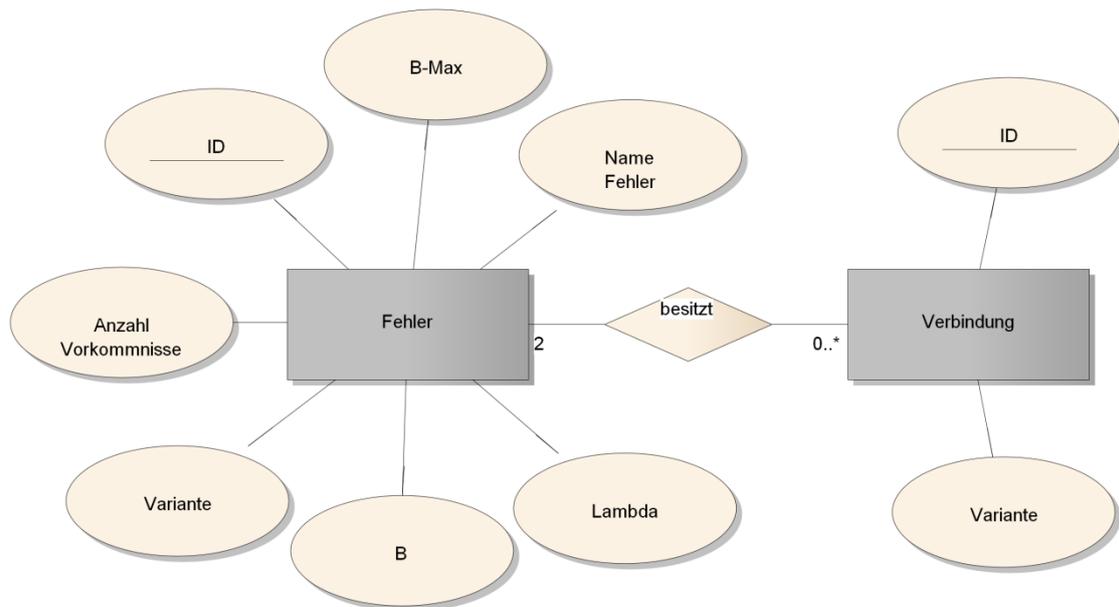


Abbildung 3.7: Variante zur Verbindung mit Entität Verbindung

### Verbindungstabelle

Die nächste Möglichkeit zur Darstellung von den Verbindungen in einem Entity-Relationship-Modell ist jedem einzelnen Fehler eine Tabelle anzuhängen, in welcher alle weiteren Fehler, zu denen ein Zusammenhang besteht, enthalten sind. Um keine Verbindung doppelt zu deklarieren ist es notwendig, entweder die Folgen oder die Ursachen in dieser Tabelle zu hinterlegen. Abbildung 3.8 zeigt eine mögliche Realisierung in einem Tool, wobei jedem Fehler eine Verbindungstabelle angehängt (grau hinterlegte Felder in Abbildung 3.8) wird. Diese Felder enthalten in diesem Beispiel die Ursachen (Verzweigungen nach rechts). Je nach Definition des Tools könnten aber genauso gut die Folgen hinterlegt werden (Verzweigungen nach links).

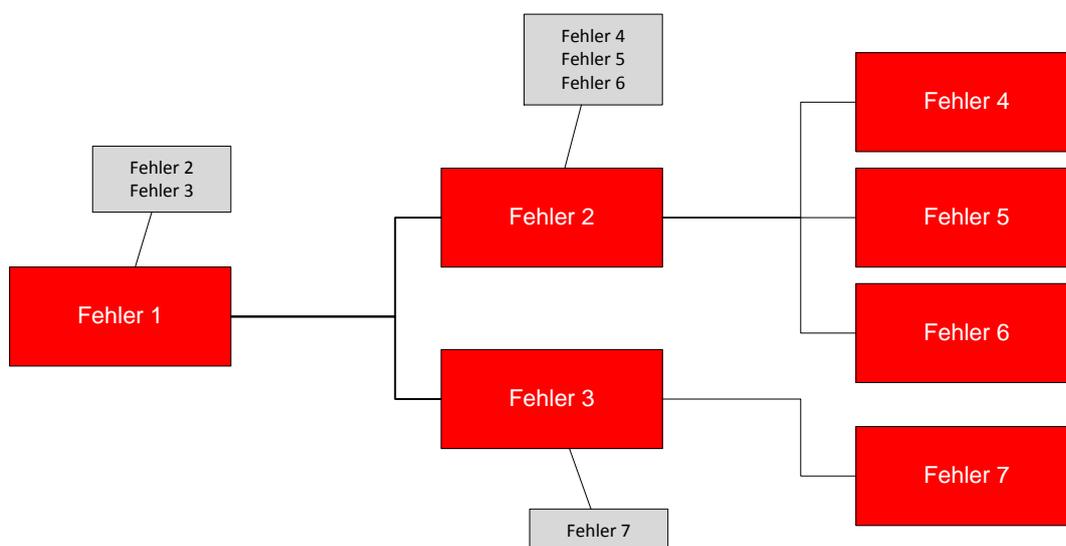


Abbildung 3.8: Beispiel für eine Verbindungstabelle

Dies wird im Entity-Relationship-Diagramm durch ein Attribut *Verbindungstabelle* realisiert. Dieses Attribut beinhaltet die Anzahl der Verbindungen und wird zu den bereits existierenden Eigenschaften angehängt (siehe Abbildung 3.9).

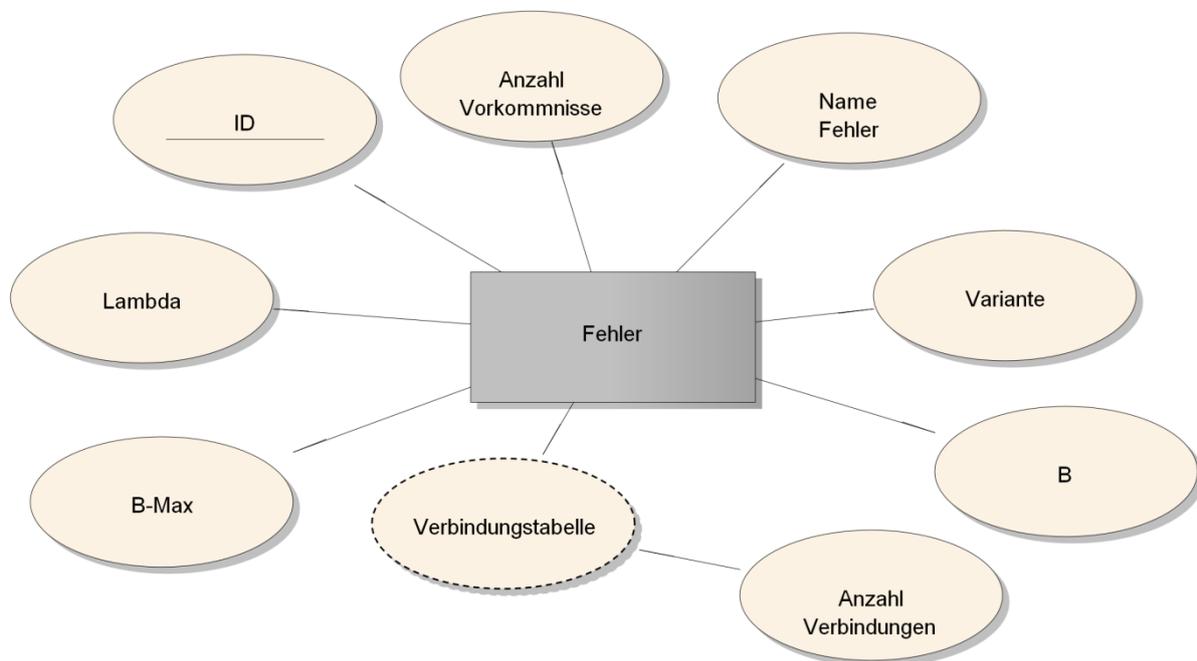


Abbildung 3.9: Variante zur Verbindung mit Verbindungstabellen

### Verbindungsmatrix

Als dritte Möglichkeit wie aktuelle FMEA-Software die Zusammenhänge der Fehler realisieren könnten, kommt eine Verbindungsmatrix zum Einsatz. Hierbei werden alle Fehler einmal horizontal und einmal vertikal in einer Tabelle angeordnet und die Verbindung der einzelnen Fehler mit null (nicht vorhanden) oder eins (vorhanden) gekennzeichnet, welche alle Zusammenhänge der einzelnen Elemente zueinander definieren. Daraus ergibt sich, dass für das gesamte Datenmodell aus Abbildung 3.13 mit dieser Verbindungsvariante insgesamt drei Matrizen erforderlich sind (eine je Entitätstyp *Strukturelement*, *Funktion*, *Fehler*).

Bei der Betrachtung der Fehlernetze aus Abbildung 3.6 oder Abbildung 3.8, entsteht eine exemplarische Verbindungsmatrix wie in Tabelle 3.2 dargestellt. Die Start-Elemente der Verbindung sind auf der vertikalen Achse aufgetragen, die Ziel-Elemente auf der horizontalen. Die Zeile eins würde bedeuten, Fehler 1 hat keine Verbindung zu den Fehlern 1, 4, 5, 6 und 7, aber eine Verbindung zu den Fehlern 2 und 3. In den weiteren Zeilen sind alle anderen Verknüpfungen hinterlegt.

Abbildung 3.10 zeigt das angefertigte Entity-Relationship-Diagramm für solche Verbindungsmatrizen, welche als beschreibende Eigenschaften die *Anzahl der Fehler*, den *Inhalt* (null oder eins; siehe Tabelle 3.2) und die FMEA *Variante* besitzen. Als Schlüsselattribut wird wieder eine Identifikationsnummer vergeben.

Tabelle 3.2: Beispiel für eine Verbindungsmatrix

		Ziel						
		Fehler 1	Fehler 2	Fehler 3	Fehler 4	Fehler 5	Fehler 6	Fehler 7
Start	Fehler 1	0	1	1	0	0	0	0
	Fehler 2	0	0	0	1	1	1	0
	Fehler 3	0	0	0	0	0	0	1
	Fehler 4	0	0	0	0	0	0	0
	Fehler 5	0	0	0	0	0	0	0
	Fehler 6	0	0	0	0	0	0	0
	Fehler 7	0	0	0	0	0	0	0

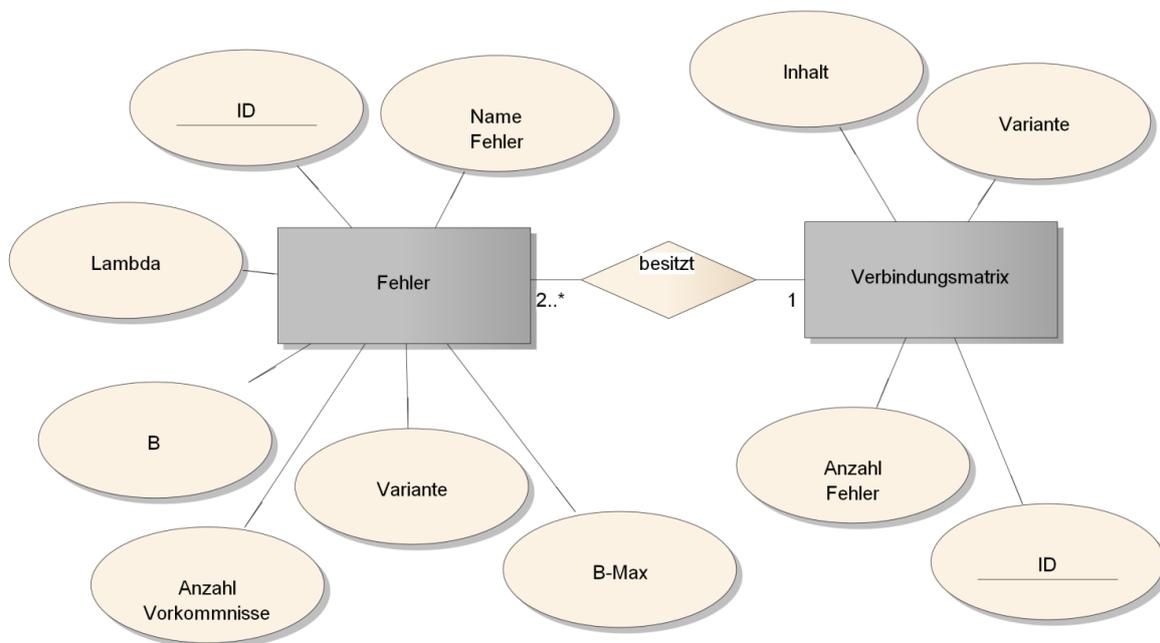


Abbildung 3.10: Variante zur Verbindung mit Verbindungsmatrix

Die Vernetzung im ERD der Entitätstypen *Fehler* und *Verbindungsmatrix* erfolgt mit einer (2-n):1 Beziehung. Fehler besitzen daher eine Verknüpfung zu genau einer Matrix, welche wiederum aus mindestens zwei bis mehreren (n) Fehlern zusammengesetzt ist, da ansonsten keine Matrix und auch keine Verbindung existieren würden.

### 3.1.3 Datenmodell

Die Datenmodelle aus Kapitel 3.1.2 werden zu einem ERM, welches die Arbeitsweise und Analysemöglichkeiten von aktuellen FMEA-Tools darstellt, zusammengefügt. Durch die verschiedenen Möglichkeiten der Realisierung von Verbindungen, entstehen drei unterschiedliche ERDs (Abbildung 3.11, Abbildung 3.12 und Abbildung 3.13).

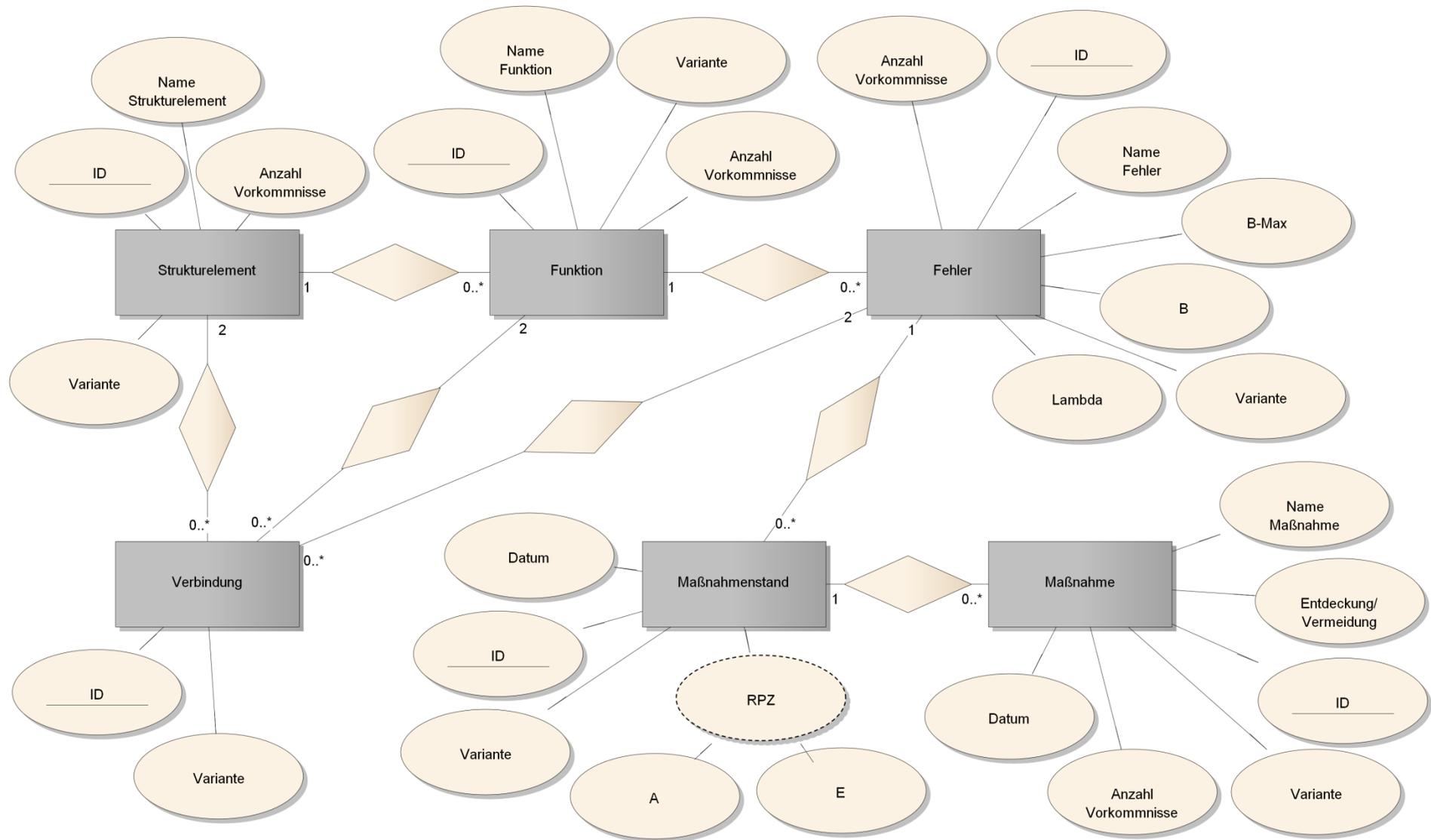


Abbildung 3.11: ER-Modell aktueller FMEA-Tools mit Verbindungsentität, vgl. [10]

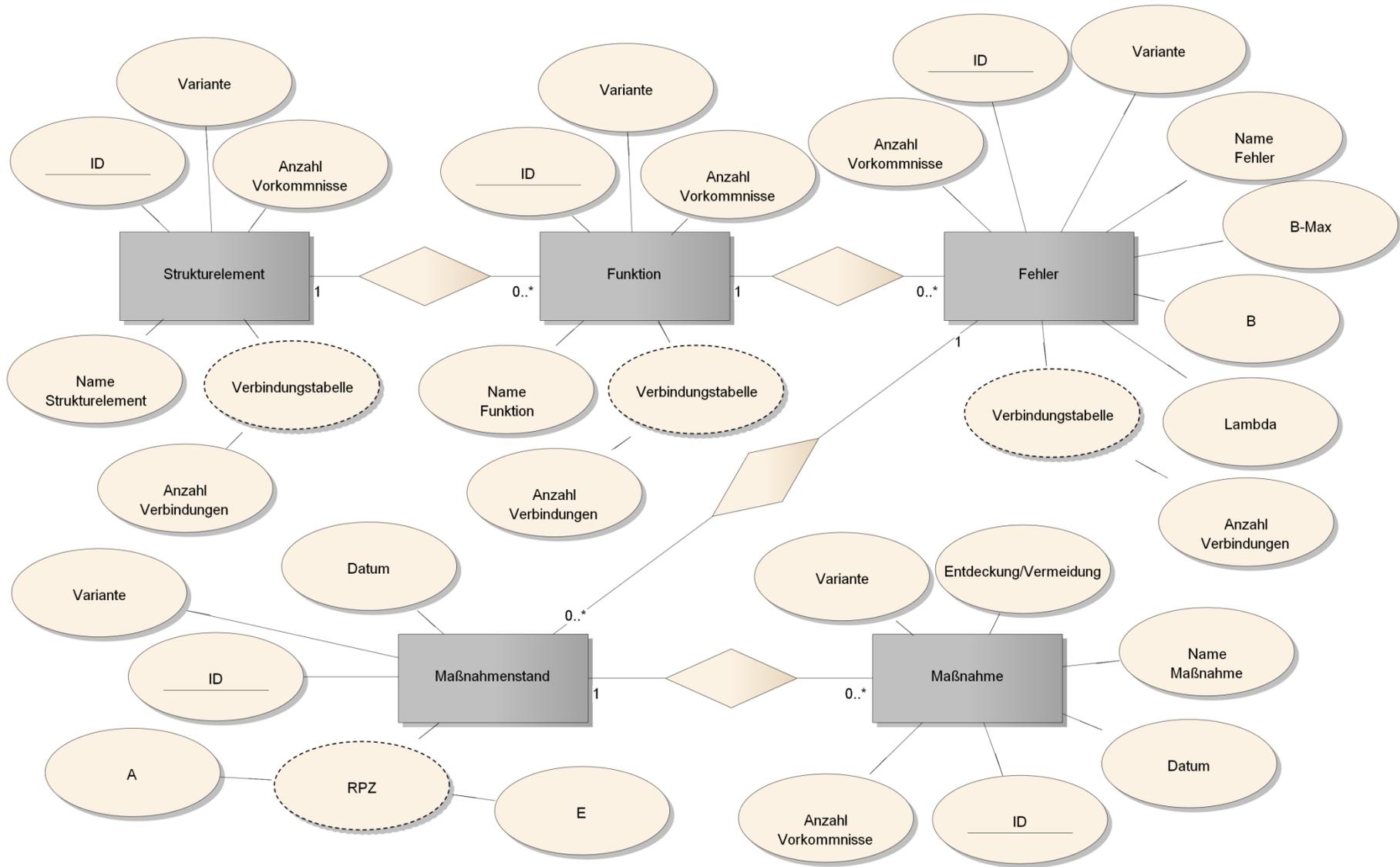


Abbildung 3.12: ER-Modell aktueller FMEA-Tools mit Verbindungstabelle

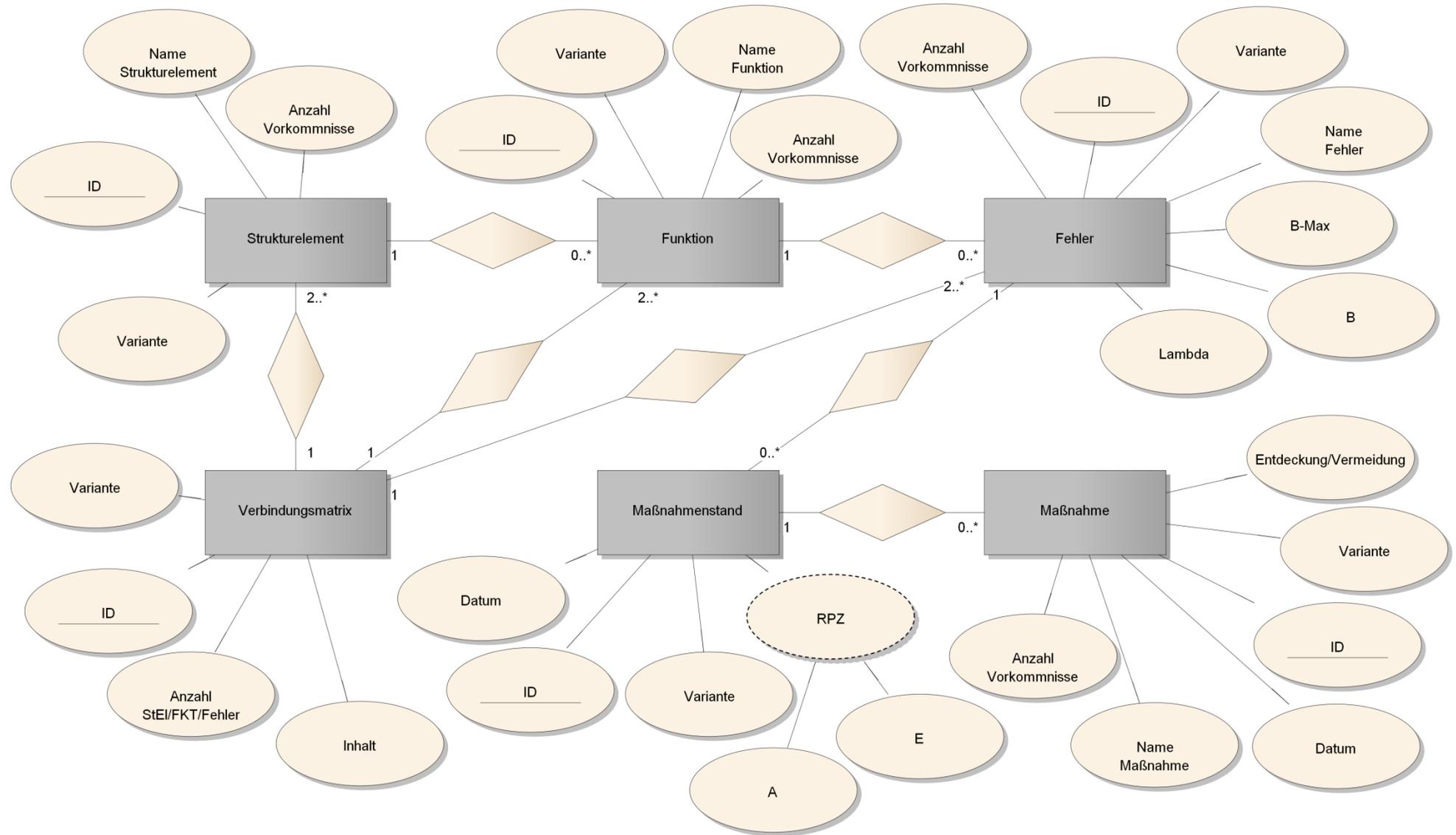


Abbildung 3.13: ER-Modell aktueller FMEA-Tools mit Verbindungsmatrix

### 3.1.4 Grenzen der Analysemethodik und der Analysetools

Im Folgenden werden die Grenzen der Analysemethodik aufgelistet:

- Bei konventionellen FMEA Tools, ist es möglich Struktur-, Funktions- und Fehlernetze zu erstellen (wie beispielsweise Abbildung 2.4, Abbildung 2.6, Abbildung 2.8, Abbildung 2.11 und Abbildung 2.12). Auch die Erstellung von Vermeidungs- bzw. Entdeckungsmaßnahmen der Fehler ist möglich. Die Darstellung eines Strukturbaums oder Funktionsnetzes mittels Blockdiagrammen über mehrere Ebenen, was erheblich zum Verständnis des Anwenders beitragen würde, ist aktuell nicht möglich. Auch eine Zuordnung der Bedeutung einzelner Verbindungen (Art oder Aufgabe der Verbindung) ist leider nicht berücksichtigt. Abbildung 2.14 zeigt, wie eine solche Beschreibung aussehen könnte. Diese dient beispielsweise dazu, Signalflüsse darstellen zu können.
- Es können immer nur gleiche Elemente aneinander gekoppelt werden. Es kann nur Fehler mit Fehler, Funktion mit Funktion und Strukturelement mit Strukturelement verbunden werden. Die Richtung der einzelnen Zusammenhänge kann ebenfalls nicht deklariert werden (Input, Output oder bidirektionale Konnektoren).
- Die Fehlerfortpflanzung lässt sich nur über weitere Fehler darstellen, obwohl in Wahrheit die Abweichung vom Soll-Zustand über mehrere Funktionen, bis zum nächsten Fehler weitergeleitet wird.
- Eine Auswahl an logischen Gattern (bool'sche Algebra) im Fehlernetz existiert nicht. Die Art zu verbinden ist aktuell ein ODER-Gatter (siehe Kapitel 2.3). Die Zuordnung von Wahrscheinlichkeiten ist nur bedingt möglich. Auf Wahrscheinlichkeitsmodelle, wie beispielsweise eine Exponential- oder Normalverteilung (siehe dazu Kapitel 2.1.2), muss hingegen komplett verzichtet werden.
- Die sogenannten „Diagnostic Coverage“-Werte (DC-Werte) lassen sich weder den Funktionen noch den Fehlern hinzufügen (siehe Kapitel 4.4).
- Diagnoselücke-Fehler, welche aus den DC-Werten abgeleitet werden, sind in den konventionellen Analyseapplikationen nicht vorhanden.
- Im Rahmen der Produktoptimierung ist es möglich, beliebige Elemente einzufügen oder zu entfernen. Die Kennzeichnung von Elementen, welche durch Optimierungen entstehen oder gelöscht werden, ist aktuell allerdings nicht durchführbar. Das bedeutet, dass die toolseitige Erkennung von nachträglichen Abwandlungen nicht vorhanden ist.

## 3.2 Fehlerbaumanalyse FTA

Der prinzipielle Ablauf dieser Analysemethode inklusive deren Möglichkeiten ist im Kapitel 2.3 beschrieben. Zum Erstellen eines Entity-Relationship-Modells wird eine aktuelle FTA-Software analysiert.

In Kapitel 3.2.1 wird auf die Darstellungs- bzw. Analysemöglichkeit konventioneller Tools eingegangen. Die sukzessive Vorgehensweise zur Erstellung des Entity-Relationship-Diagramms wird in Kapitel 3.2.2 behandelt. Die angefertigten Datenmodelle in Kapitel 3.2.3 spiegeln die Arbeitsweise von FTA-Werkzeugen wieder und wurden in Absprache mit drei Softwareherstellern angefertigt. Unter 3.2.4 werden die Grenzen herkömmlicher Analysemethoden aufgezeigt.

### 3.2.1 Darstellungs-/Analysemöglichkeit

Mit aktuellen Anwenderprogrammen ist es möglich, einen Fehlerbaum wie in Abbildung 2.13 dargestellt, zu entwerfen. Eine Kombination der verschiedenen Fehler erfolgt mit Hilfe bool'scher Algebra. Die einzelnen Typen der Fehler (Basis-, sekundäres oder externes Fehlerereignis, wie auch ein eingehender oder ausgehender Transfer; siehe Tabelle 2.2) werden ebenfalls deklariert. Eine Auswahl an logischen Gattern und unterschiedlichen Typen von Fehlern ist in Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2 ersichtlich. Jeder Fehlfunktion ist ein Wahrscheinlichkeitsmodell mit den zugehörigen Parametern zugeordnet. Als weitere beschreibende Eigenschaften werden der prozentuelle Wahrscheinlichkeitswert bzw. eine Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion samt Parametern und eine Beschreibung des Fehlers durch den Anwender des Programms vergeben.

### 3.2.2 Vorgehensweise

Mittels ERM werden zwei Ansätze zur Darstellung von FTA-Programmen realisiert. Der Unterschied von beiden Möglichkeiten ist die Anordnung der logischen Gatter. Es wird zwischen

- Logische Gatter als Attribut beim Fehler und
- Logische Gatter als eigene Entität

unterschieden.

- **Logische Gatter als Attribut beim Fehler**

Abhängig vom Typ der Fehlfunktion werden die Elemente der bool'schen Algebra an den Fehler gekoppelt. Zur Erklärung wird der Fehlerbaum aus Abbildung 2.13 herangezogen. „Normale“ Fehlerereignisse, wie beispielsweise *Leck* oder *Pumpe arbeitet nicht*, besitzen am Eingang (in dem Beispiel unterhalb des Fehlers) ein logisches Gatter. Basis-Fehlerereignisse, wie *Korrosion* oder *Pumpe defekt*, haben hingegen keine weitere Verknüpfung, da sie keinen Eingang besitzen. Das gleiche gilt auch für sekundäre Abweichungen vom Soll-Zustand wie *Steuerungsfehler* oder *Menschliches Versagen*. Alle grün hinterlegten Fehlertypen aus

Tabelle 2.2 oder Abbildung 2.13 sind als Ursache anzusehen. Sie haben somit keinen Eingang und auch kein logisches Gatter.

Um zu gewährleisten, dass die erstellten Datenmodelle für die konventionellen FTA-Tools richtig ausgeführt sind, gilt folgende Aussage: An den Ausgang eines Gatters (siehe Tabelle 2.1) muss immer ein Fehler geknüpft sein. Direkte Verbindungen von einem Fehler zum nächsten bzw. von einem Gatter zum anderen sind nicht erlaubt. Dies ist in Abbildung 3.14 dargestellt. Die Unzulänglichkeiten beim falsch erstellten Fehlerbaum links im Bild markiert ein rotes X. Auf der rechten Seite der Abbildung findet sich die korrekte Darstellung.

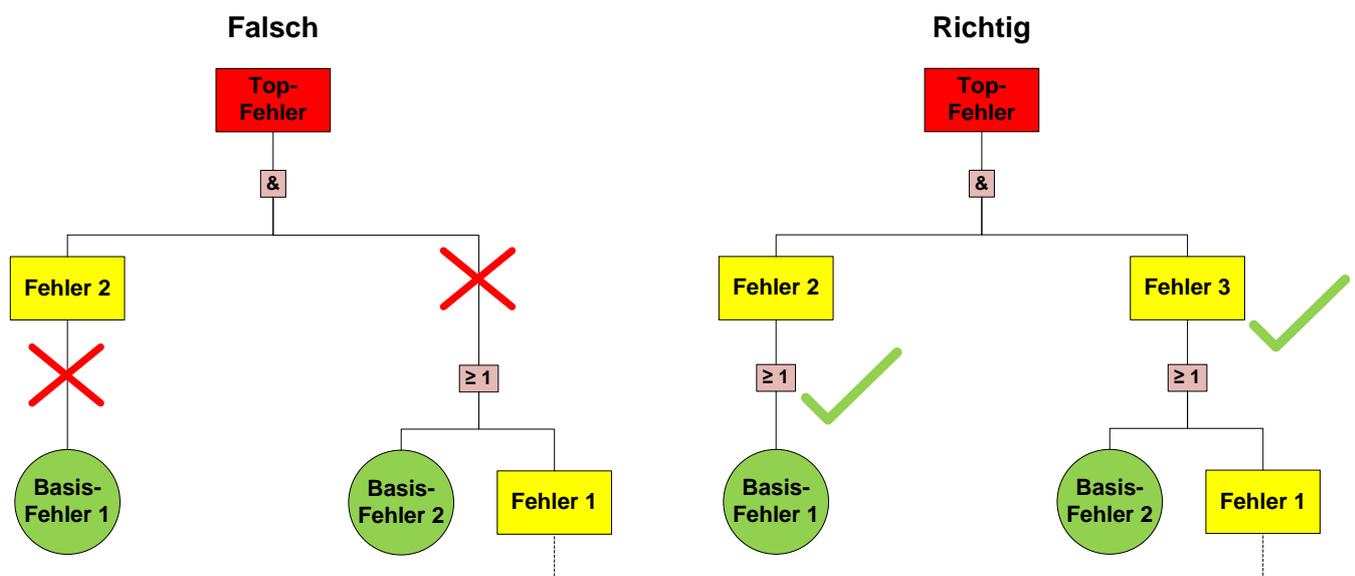


Abbildung 3.14: Richtig und Falsch erstellter Fehlerbaum

Die Vorgabe aus Abbildung 3.14 wird von den aktuellen FTA-Tools eingehalten. Eine Erstellung des linken Fehlerbaums wird vom Programm nicht zugelassen.

Die Attribute des erstellten Entity-Relationship-Diagramms für diese Möglichkeit (siehe Kapitel 3.2.3, Abbildung 3.15) die logischen Gatter im Datenmodell darzustellen sind:

- ID als Schlüsselattribut – Nummer an der eine eindeutige Unterscheidung möglich ist
- Wahrscheinlichkeit/ Fehlermodell – zur Hinterlegung der erwähnten Stochastik
- Beschreibung – dient für Anmerkungen und weitere Informationen
- Typ/ log. Gatter – zur Deklaration der Art des Fehler bzw. der zugehörigen bool'schen Algebra.

- **Logische Gatter als eigene Entität**

Die Definition aus Abbildung 3.14 und deren Erklärung gelten auch für diese Art die Arbeitsweise von FTA-Tools mittels ERD nachzuvollziehen.

Der bool'sche Operator wird als eigenes Informationsobjekt angesehen. Die beschreibenden Eigenschaften dieses Entitätstyps sind:

- ID als Schlüsselattribut
- Typ – zur Unterscheidung um welches Gatter es sich handelt (UND-, ODER-, NICHT-Gatter).

Bei dem zweiten beteiligten Informationsobjekt des Datenmodells für FTA-Software handelt es sich um den Fehler an sich. Zur Beschreibung werden folgende Attribute dargestellt:

- ID als Schlüsseleigenschaft
- Typ – deklariert die Art des Fehlers („normal“, Basic, sekundär, ...)
- Wahrscheinlichkeit/ Fehlermodell – legt Fehlerraten und Verteilungen fest
- Beschreibung – genauere Definition der Abweichung vom Soll-Zustand.

Die beiden Entitäten *Fehler* und *log. Gatter* werden mittels (2-n):(0-1) Beziehung vernetzt. Abhängig von dem Fehler-Typ steht der Eingang des Fehlers in Verbindung zu null oder einem logischen Gatter. Der bool'sche Rechenoperator besitzt mindestens zwei bis mehrere (n) Beziehungen zu Fehlern, da ansonsten der Fehlerbaum nicht nach der Definition aus Abbildung 3.14 erstellt wurde. Am Ausgang eines bool'schen Operators muss immer genau ein Fehler, am Eingang mindestens ein Fehler sein, gesamt also mindestens zwei. Bei der Betrachtung von Abbildung 2.13, ist beispielsweise das UND-Gatter an die Fehler *Titanic sinkt*, *Leck* und *Pumpe arbeitet nicht* gekoppelt. In diesem Fall wäre die Notation für die Relationship vom Operator zum Entitätstyp Fehler drei.

Abbildung 3.16 aus Kapitel 3.2.3 zeigt das Entity-Relationship-Modell für diese Herangehensweise der Realisierung von bool'scher Algebra und spiegelt die Funktionsweise aktueller FTA- Werkzeuge.

### 3.2.3 Datenmodell

Dieser Abschnitt zeigt die angefertigten Entity-Relationship-Diagramme, welche den Funktionsumfang von aktuellen FTA-Tools darstellen. In Abbildung 3.15 ist der logische Operator als Attribut an die Entität *Fehler* gekoppelt. Im Gegensatz dazu zeigt das zweite ERD aus Abbildung 3.16 das logische Gatter als eigenes Informationsobjekt.

Die angefertigten Datenmodelle beschreiben die Fehler und deren Eigenschaften. Um die Verbindungen in den FTA-Tools darzustellen, gibt es wiederum die Möglichkeiten, welche bereits unter Kapitel 3.1.2 behandelt wurden. Die nötigen Informationen können aber auch im Attribut *Beschreibung* hinterlegt werden (siehe Abbildung 3.15 und Abbildung 3.16).

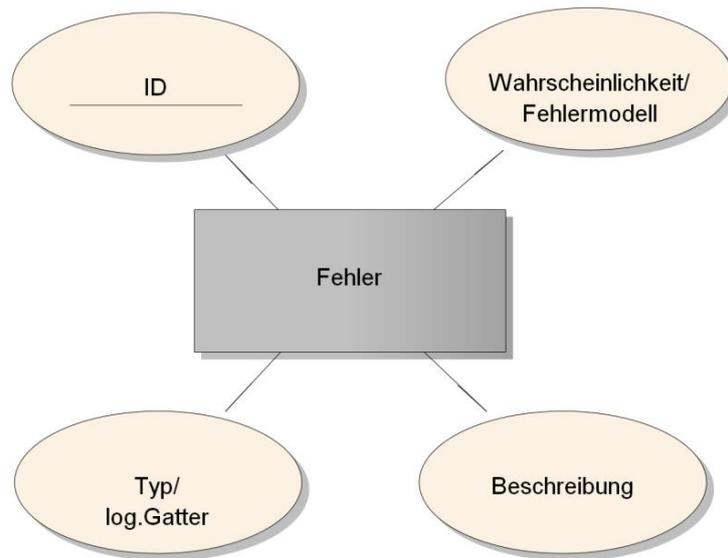


Abbildung 3.15: ER-Modell aktueller FTA-Tools mit Attribut „logisches Gatter“, [10]

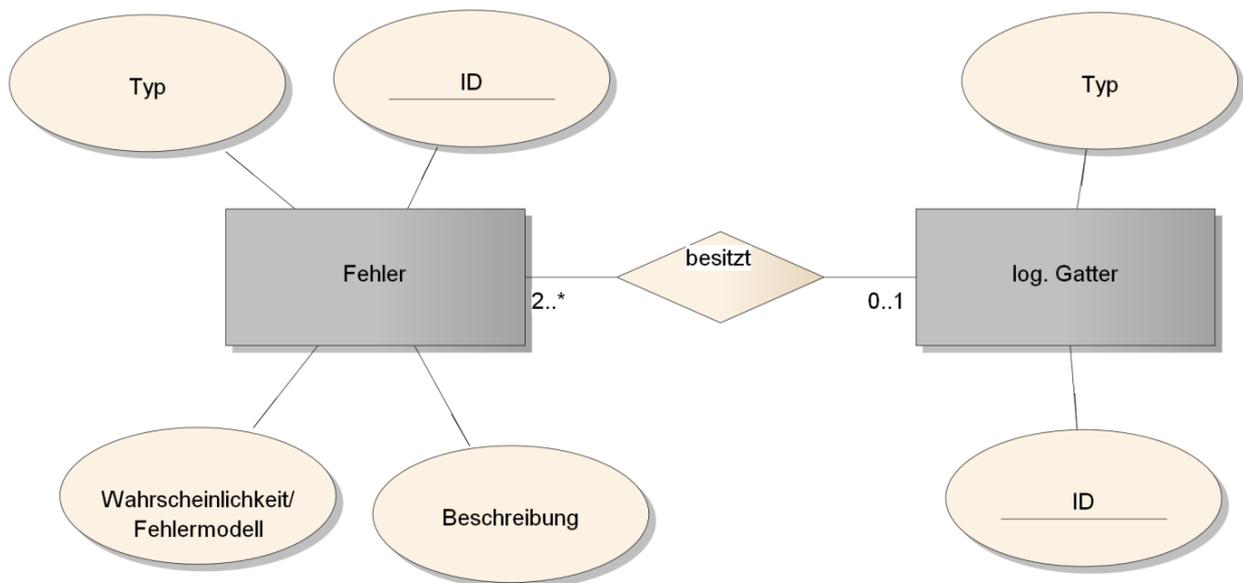


Abbildung 3.16: ER-Modell aktueller FTA-Tools mit der Entität „logisches Gatter“

### 3.2.4 Grenzen der Analysemethodik und der Analysetools

- Die Fehlfunktionen werden mit Fehlermodellen und Wahrscheinlichkeiten hinterlegt und mit Hilfe von bool'schen Gattern logisch miteinander verknüpft.
- Es ist weder eine Struktur- oder Funktionsanalyse in diesen Tools vorgesehen, daher gibt es auch keine Blockdiagramme für diese Analysearten. Eine Beschreibung der Verbindungen von Fehlern und deren Aufgaben ist ebenfalls nicht möglich. Eine

etwaige Berücksichtigung einer Fortpflanzung von Fehlern über Funktionen ist in den herkömmlichen FTA-Werkzeugen nicht vorhanden. Optimierungen können zwar nach Abschluss der Anfertigung eines Fehlerbaumes nachträglich eingefügt werden, die Tools zeigen diese aber nicht als solche an.

- Da FTA-Programme prinzipiell nur zur Darstellung von Fehlern und deren Zusammenhänge konzipiert wurden, sind diese Grenzen definitionsgemäß entstanden und keine Einschränkung der Tools als solche.

### 3.3 SysML-Blockdiagramme

In diesem Punkt werden einige Elemente der SysML-Blockdiagramme, welche für die innovative Analysemethode und deren Datenmodellierung relevant sind (siehe Kapitel 4), analysiert. Im Kapitel 3.1.1 werden diese spezifischen Eigenschaften aufgezeigt. Abschließend werden die Grenzen dieses Analyseverfahrens betrachtet (siehe Kapitel 3.1.2).

#### 3.3.1 Darstellungs-/Analysemöglichkeit

Als Beispiel für diese Art von Blockdiagrammen soll Abbildung 2.14 und Abbildung 3.17 dienen, welche zum einen die Funktionen, zum anderen die Struktur des Beispiels „Schiebetürsystem“ darstellen. Es werden alle wichtigen Möglichkeiten dieser Darstellung aufgezeigt. Diese sind:

- Anfertigen von Blockdiagrammen – für Struktur und Funktionen
- Vergabe von Ports – Jedes Element erhält diese zum Verbinden. Sie dienen in weiterer Folge zur Deklaration vom Port-Typ und der Richtung der Verknüpfung
- Art der Verbindung – es lassen sich weitere beschreibende Elemente zu jeder hinzufügen. Ebenso sind Zusammenhänge von Strukturelementen und Funktionen darstellbar (siehe Abbildung 2.14).

Die unterbrochenen und durchgezogenen Linien sind die Klassifizierung der Verbindung. Zur genaueren Beschreibung der Aufgabe sind Textfelder in den Abbildungen zu sehen (z.B. *12 V supply* oder *Door position*). Es wäre beispielsweise auch eine Erstellung einer Abbildung von einer Fehlerfortpflanzung über Funktionen möglich. Die Pfeile geben Auskunft über die Richtung der Koppelung.

Die kleinen Quadrate am Rand der Struktur- bzw. Funktionsblöcke sind als Ports anzusehen. Hier lässt sich ebenfalls weitere Information hinterlegen.

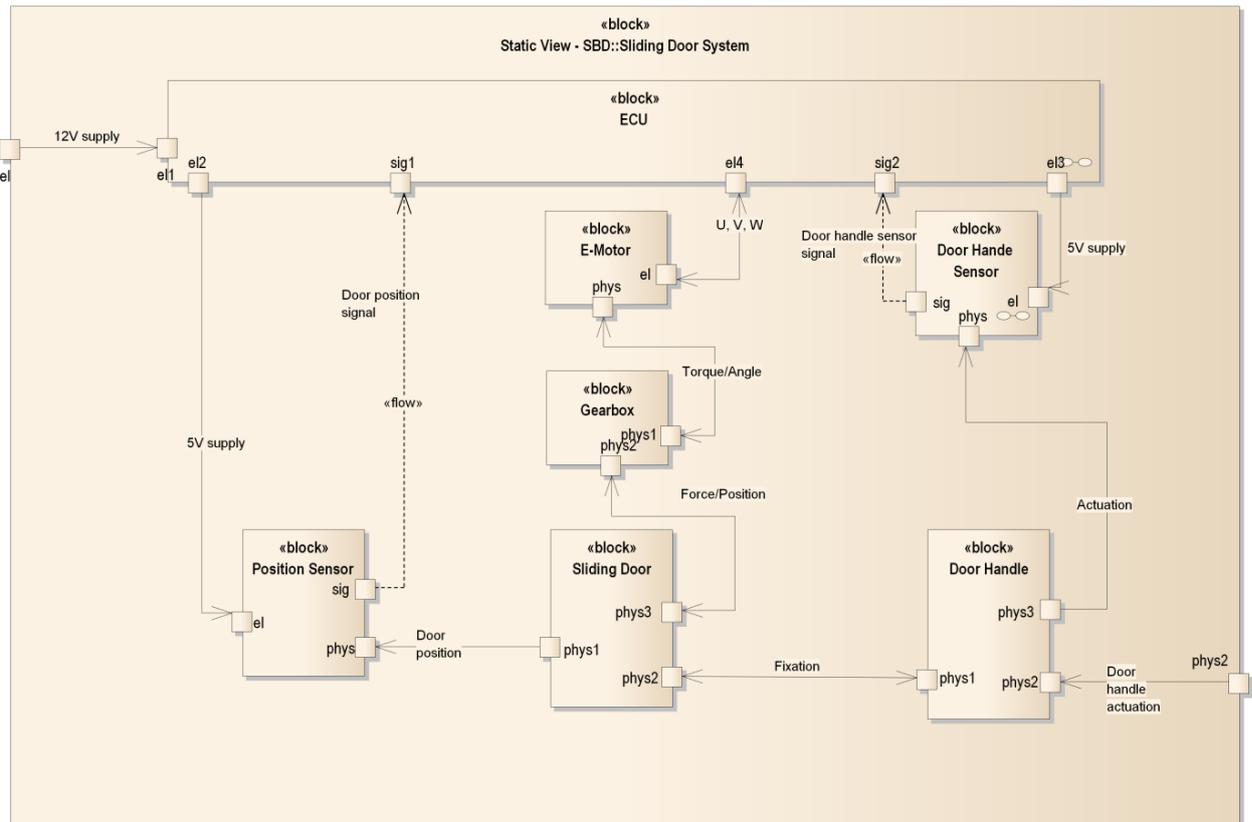


Abbildung 3.17: UML-Strukturblockdiagramm „Schiebetürsystem“, [22]

### 3.3.2 Grenzen der Modellierungssprache

- SysML bietet sehr viele Möglichkeiten, komplexe Zusammenhänge verständlich aufzuzeigen. Dies kann unter Umständen aber zu einer komplizierten und aufwendigen Erstellung von Diagrammen führen.
- Eine Zuweisung von Wahrscheinlichkeiten oder Fehlermodellen ist nicht vorgesehen. Fehlfunktionen lassen sich zwar als Klassen anlegen, eine genauere Beschreibung ist aber nicht vorhanden.
- Die Bool'sche Algebra, wie bei den Fehlerbaumanalyse-Tools, ist in SysML nicht berücksichtigt und es besteht somit auch keine Chance logische Verknüpfungen zu realisieren.
- Verbesserungen nach dem ein Blockdiagramm bereits erstellt wurde, lassen sich beliebig hinzufügen. Eine Nachverfolgung, was im Rahmen dieser Optimierungen vorgenommen wurde, wird vom Tool nicht angeführt.

# 4 Konzept und Datenmodellierung einer innovativen Analysemethodik

In diesem Kapitel wird das Datenmodell für die Darstellung der Features der innovativen Analysemethodik (Kapitel 4.1) beschrieben. Bei der Erstellung des erweiterten Datenmodells werden vier Ausbaustufen unterschieden, welche in den Kapiteln 4.2, 4.3, 4.4 und 4.5 behandelt werden (vergleiche Datenmodelle mit [10]). Abschließend ist die prinzipielle Vorgehensweise bezüglich Zugriffszeiten unter Kapitel 4.6 beschrieben.

Als Ausgangspunkt des weiterentwickelten Datenmodells der innovativen Analysemethodik dient das Entity-Relationship-Diagramm von herkömmlichen FMEA Programmen aus Abbildung 3.11. Für die nachfolgend angefertigten Datenmodelle in diesem Kapitel, werden die Attribute des ERDs für eine Standard-FMEA aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht mehr angeführt. Diese Eigenschaften sind allerdings noch vorhanden und Teil des ERMs der neuen Analysetechnik. Es wird die Möglichkeit der Realisierung von Verbindungen der Strukturelemente, Funktionen und Fehler untereinander durch einen eigenen Entitätstyp gewählt. Die Gründe hierfür liegen bei der erhöhten Flexibilität beim Hinzufügen von Attributen an das Informationsobjekt Verbindung. Die Notwendigkeit dieser Art Verbindungen im ERD darzustellen wird in Kapitel 4.2 genauer ersichtlich. Die Bewertung des Speicherbedarfs wird unter 5.1 quantitativ und unter 5.2 qualitativ durchgeführt.

Das Entity-Relationship-Modell aus Abbildung 3.11 wird in Abbildung 4.1 nochmals dargestellt, wobei nur mehr die einzelnen Informationsobjekte und die Beziehungen zueinander zu sehen sind.

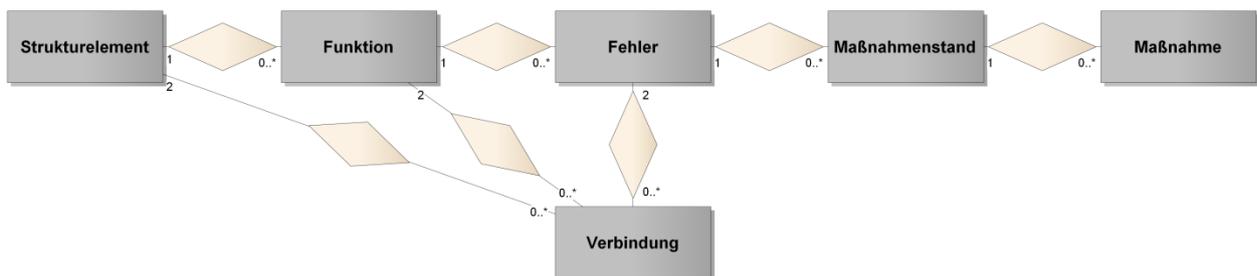


Abbildung 4.1: ERD der Entitäten-Struktur von Standard-FMEA-Tools, vgl. [10]

Die Basis der herkömmlichen Analysetechniken beruht zum Teil auf klassischen Ansätzen, welche für mechanische Produkte gut geeignet sind. Diese konventionellen Methoden bieten für komplexere mechatronische Systeme aber keine ausreichenden Lösungen, da die Anforderungen von Sicherheitsnormen nur mehr durch die Kombination verschiedener Analysemethoden erfüllt werden kann, was zu schlechter Effizienz und signifikanter Redundanz führt. Daher wird bei den aktuellen Entwicklungsprozessen für mechatronische Anwendungen eine neuartige Vorgehensweise bei der Analyse benötigt. Mit Hilfe dieser innovativen Analysetechnik ist eine erhebliche Verbesserung des Entwicklungsprozesses gewährleistet, in dem das Verhalten und die Fehlfunktionen von den verschiedensten Systemen optimiert, Situationen in der eine Gefährdung entsteht erkannt, die Auswirkung dieser Gefahren bewertet und auch Vermeidungsmaßnahmen festgelegt werden, [10], [11].

### **4.1 Konzept der innovativen Analysemethodik**

Bei der innovativen Analyseverfahren wird eine Kombination von den gängigen Methoden und Darstellungsformen (FMEA, FTA und Blockdiagramme), welche bereits im Kapitel 3 genauer betrachtet wurden, hergestellt. Dadurch soll eine ganzheitliche Struktur-, Funktions- und Fehleranalyse ermöglicht und alle komplexen Zusammenhänge von Abläufen und Fehlverhalten eines mechatronischen Systems abgebildet werden. Anstatt der aktuellen Darstellung von Strukturelementen und Funktionen als Baum bzw. Netz in modernen FMEA Tools, sollen Struktur- und Funktionsblockdiagramme dienen. Diese sind in mehrere Ebenen gegliedert um die Übersicht der Zugehörigkeit einzelner Elemente und Funktionen zu verbessern, siehe Abbildung 4.2. Bei dieser neuen Darstellung von Zusammenhängen ist in diesem Beispiel die erste Ebene das Gesamtsystem mit den zugehörigen Umgebungskomponenten inklusive deren In- und Outputs wie in diesem Beispiel CAN, Chassis und Batterie, abgebildet. In der nächsten Verfeinerungsstufe wird dem Gesamtsystem die enthaltenen Komponenten hinzugefügt. In dem Beispiel aus Abbildung 4.2 folgt somit eine Aufteilung des Beispielsystems in ein Steuergerät, einen Aktuator und in die Verkabelung in Ebene zwei. In der nächsten Detaillierungsstufe werden die hinzugefügten Subsysteme genauer betrachtet und die integrierten Systeme ersichtlich. Das Steuergerät besteht beispielsweise aus Hard- und Software. Die Subsysteme des in dieser Abbildung aufgezeigten Exempels des Aktuators sind Sensor, Mechanik und Motor. Wie sehr ein Gesamtsystem in allen Einzelheiten betrachtet werden muss, ist nach den Anforderungen an den Prozess oder das Produkt individuell zu erfassen. Dieser modulare Aufbau in den unterschiedlichen Ebenen ermöglicht eine variable Betrachtungstiefe pro Stufe. Prinzipiell steigt der Detaillierungsgrad je tiefer die betrachtete Ebene liegt. Zum Vergleich dieser neuen Ansicht mit der von herkömmlichen FMEA Programmen dient Abbildung 2.4. In Abbildung 4.2 werden die einzelnen Systeme mit Pfeilen verknüpft. Das Beispielsystem wird von dem Umgebungssystem „Batterie“ mit der notwendigen Energie versorgt. Die Mechanik und der Motor sind bidirektional miteinander gekoppelt, also erfolgt die Kommunikation dieser beiden Subsysteme in beide Richtungen. Durch diese Art der Verbindung lassen sich jegliche Zusammenhänge von den Modulen darstellen. Durch diese Methodik lassen sich in weiterer Folge beispielsweise auch Daten-, Signal-, Fehler- und Kommunikationsflüsse nachbilden.

Als Konsequenz entsteht eine präzise und apodiktische Analysemöglichkeit komplexer Vernetzungen technischer Systeme, [3], [10], [11].

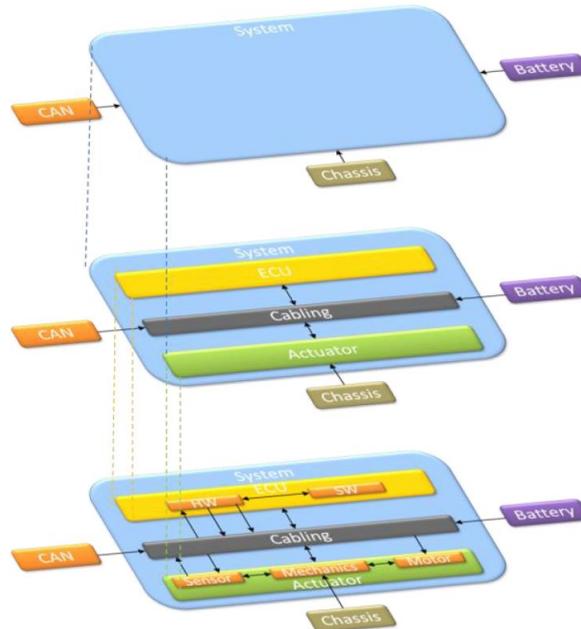


Abbildung 4.2: modularer Aufbau der Strukturelemente der innovativen Analysemethode, [10]

Eine neuartige, unkonventionelle Darstellung der Fehlerfortpflanzung ermöglicht eine Betrachtung bei erhöhter Komplexität der Vernetzung von Fehler- und Fortpflanzungsmechanismen. Neben den herkömmlichen Einfachfehlern, welche schon bei modernen FMEA Tools betrachtet werden können, besteht auch die Möglichkeit Mehrfachfehler, latente Fehler, Fehlerentdeckungslücken und eine Fehlerfortpflanzung über Funktions- und Signalfade wieder zu geben und zu taxieren. Die Berücksichtigung bool'scher Algebra und die Hinterlegung von Fehlern mit Wahrscheinlichkeitsmodellen im Bereich des Fehlernetzes ist daher unumgänglich.

Im Automobilbereich ist eine sukzessive Verbesserung des Produktes durch Optimierungsmaßnahmen, wie beispielsweise die Integration neuer, teilweise normbedingter Sicherheitsmechanismen, der Austausch von fehleranfälligen Bauteilen oder dem Hinzufügen redundanter Systeme, gängige Praxis. Eine geeignete Darstellung dieser komplexen Abänderungen unterstützt die Rekonstruktion dieser Prozesse erheblich. Generell dient eine neue, innovative Art der Darstellung solcher Maßnahmen oder der Vernetzung von Funktionen und Fehlern als Schnittstelle zwischen Technik und Qualitätssicherung, da der Zugang und die Nachvollziehbarkeit zu solch komplizierten und verzweigten Zusammenhängen erleichtert wird, [3], [10], [11], [28].

### 4.1.1 Aufbau der Datenmodellierung

Als Datenmodellierungsvariante dient das weit verbreitete Entity-Relationship-Modell (kurz ERM oder ER-Modell, deutsch Gegenstand-Beziehung-Modell), da dieses alle erforderlichen Möglichkeiten zur Darstellung des Datenmodells von FMEA und FTA Tools zur Verfügung stellt. Diese Modellierungssprache wird in Kapitel 2.5.2 charakterisiert.

Die neue, innovative Analysemethode wird schrittweise in vier Ausbaustufen modelliert um eine gewisse Analogie zu den herkömmlichen Analysetools herstellen zu können. Zur Gegenüberstellung des erarbeiteten Datenmodells der innovativen Analysemethode fungieren die ER-Modelle aus Abbildung 3.12 für die aktuelle FMEA Software und Abbildung 3.15 für die herkömmlichen FTA Programme. Als Basis des weiterentwickelten Datenmodells dient Abbildung 3.11, welches Abbildung 4.1 nochmals mit ausgeblendeten Attributen verkörpert. Die vier Ausbaustufen sind in den Kapiteln 4.2, 4.3, 4.4 und 4.5 angeführt. Die wichtigen, zu verwirklichenden Aspekte dieser Modellierungsgrade sind bei

- **Ausbaustufe 1**
  - *Strukturblockdiagramme,*
  - *Funktionsblockdiagramme,*
  - *Ports,*
  - *Neue Art der Verbindung,*
- **Ausbaustufe 2**
  - *Fehlerfortpflanzung über Funktionen,*
  - *Bool'sche Algebra,*
  - *Wahrscheinlichkeitswerte und -modelle inkl. deren Parameter,*
  - *Latente Fehler,*
- **Ausbaustufe 3**
  - *Neue graphische Darstellung inklusive Diagnoselücke-Fehler,*
  - *Thematik des Diagnosedeckungsgrads,*
- **Ausbaustufe 4**
  - *Darstellung von Optimierungen,*

wobei die detaillierten Beschreibungen der Anforderungen in den jeweiligen Kapiteln angeführt sind.

## 4.2 Ausbaustufe 1

Die erste Ausbaustufe des Datenmodells der innovativen Analysemethodik impliziert eine andere Art der Darstellung von Strukturbäumen und Funktionsnetzen der FMEA. Hierbei werden Blockdiagramme für eine Verbesserung der Übersicht und des Verständnisses abgebildet, welche den Strukturbäumen und Funktionsnetzen entsprechen. Bei der konventionellen Software wäre es auf Grund des Datenmodells und der Arbeitsweise durchaus ausführbar Blockdiagramme sowohl für Strukturelemente als auch für Funktionen zu erstellen, wobei dieser modulare Aufbau über mehrere Ebenen noch nicht realisiert ist. Die Verwirklichung erfolgt rein auf der Benutzeroberfläche und ist ohne Änderung der Verfahrensweise im Hintergrund eines Tools zu vollführen. Zusätzlich werden bei der neuen Analysetechnik den Strukturelementen und Funktionen Ports zugeordnet, welche zur Verbindung dienen. Dadurch wird die Realisierung von Schnittstellen ermöglicht, was bei aktuellen FMEA Tools nicht verwirklicht werden kann. Es besteht keine Möglichkeit Ports für die Darstellung von dieser Art von Verknüpfungen zu vergeben, obwohl bei den komplexen zu analysierenden Systemen dieser Zusammenhang verschiedenster Komponenten gegeben ist. Die Konnektoren selbst beinhalten bei der unkonventionellen Analysetechnik Informationen über beispielsweise die Aufgabe der jeweiligen Verbindung. Standard FMEA Werkzeuge erlauben keine Darstellung von Verbindungen. Die Probleme dieser Software liegen vor allem bei den unzureichenden Vernetzungsmöglichkeiten der Komponenten, welche auch eine Kennzeichnung von beispielsweise Daten- oder Signalflüssen zwischen den Systemen nicht vorsehen.

### 4.2.1 Anforderungen

- **Strukturblockdiagramme**

Zu Beginn einer FMEA wird die Strukturanalyse vollzogen (siehe Kapitel 2.2.2). Hierbei werden die einzelnen Komponenten eines Produkts, Prozesses, etc. untersucht und abgebildet. Anstatt der aktuell verwirklichten Ansicht der Strukturbäume konventioneller FMEA Tools bei der Anfertigung des Zusammenhangs von Strukturelementen, kommt bei der innovativen Analysemethode ein modularer Aufbau in mehreren Ebenen zum Einsatz. Eine andere Perspektive des Zusammenspiels von Komponenten durch eine stufenweise Gliederung und Gestaltung mit Hilfe von Blöcken ist im unteren Teil der Abbildung 4.3 repräsentiert, wobei die Pfeile eine neue Art von Verbindungen widerspiegeln. Die drei Ebenen in dem Beispiel eines Schiebetürsystems sind absolut ident mit der herkömmlichen Ausführung, nur die Art der Darstellung ist verändert.

- **Funktionsblockdiagramme**

Im zweiten Schritt bei der Erstellung einer FMEA werden den Strukturelementen Funktionen zugeordnet (siehe Kapitel 2.2.3). Die dabei entstehenden Funktionsnetze werden von aktueller Software wie in Abbildung 2.6 wiedergegeben. Bei der weiterentwickelten Methodik wird analog zur modifizierten Ansicht der Strukturbäume ebenfalls die Anfertigung mittels Blöcken gewählt. Die drei Stufen des Funktionsnetzes aus Abbildung 2.6 entsprechen den

Funktionsblockdiagrammen aus Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5. Der Zusammenhang aus diesen beiden Abbildungen zu dem unteren Teil aus Abbildung 4.3 ist gleichermaßen herzustellen, in dem jedem Strukturblock die zugehörige Funktion zugewiesen wird. Beispielsweise ist die Funktion des gesamten Schiebetürsystems die Tür auf Anfrage zu öffnen (Abbildung 4.4, links) oder des Positionssensors das Signal abhängig von der Schiebetürposition zu liefern (Abbildung 4.4, rechts). Die Komponente Sensormechnik aus Abbildung 4.5 hat die Aufgabe die Elektronik zu positionieren.

- **Ports für jede Verbindung festlegen**

Um mehr Informationen bezüglich des Verhaltens des zu analysierenden Systems und der beinhalteten Komponenten zu erhalten, werden den Strukturelementen und Funktionen Ports für die Verbindungen zugeordnet. Die Vergabe der Ports ist ein bedeutendes Kernelement der Ausbaustufe 1. Zur weiterführenden Beschreibung der einzelnen Ports dienen der Name, der Typ und die Unterscheidung, ob es sich um einen Input-, Output oder bidirektionalen Port handelt. Typunterscheidungen der Ports sind beispielsweise elektrische, digitale, analoge oder signalführende. Der Port mit dem Namen el aus Abbildung 3.17 (Seite - 53 -) wäre in diesem Sinne ein elektrischer, sig1 ein signalführender Port. Zur Erläuterung bezüglich Input-, Output- und bidirektionaler Ausführung werden die Ports el2, sig1 und el4 von dem Strukturblock ECU (Steuergerät) im oberen Drittel aus selbiger Abbildung herangezogen. Ports welche mit einer Verbindung von dem Struktur- oder Funktionsblock nach außen zu anderen Blöcken gekoppelt sind, stellen Output-Ports dar, Ports mit einer Verbindung von außen kommend nach innen führend stellen Input-Ports dar. Bei bidirektionalen Ports besteht eine Koppelung in beide Richtungen. Somit wäre laut dieser Deklaration el2 ein Output-Port, sig1 ein Input-Port und el4 ein bidirektionaler Port. Dies ist an den Pfeilen der Verbindung zu sehen. Die Richtung kann bei umgekehrter Festlegung auch entgegengesetzt ausgeführt sein, wobei bei allen Ports Konsistenz gegeben sein muss.

- **Neue Art der Verbindung**

Die zweite Neuerung ist die Möglichkeit Verbindungen auch zwischen Strukturelementen und Funktionen abzubilden. Bei konventionellen Tools sind Verknüpfungen nur bei identen Komponenten realisierbar, beispielsweise Funktion mit Funktion. Durch die oben beschriebene Vergabe von Ports bei diesen beiden Elementen der FMEA und der Koppelung von Port mit Port sind somit auch Schnittstellen zu verwirklichen. Als Beispiel wie eine solche Darstellung auf der graphischen Oberfläche der innovativen Analysemethodik ausgeführt sein könnte, dient Abbildung 2.14. Durch genauere Spezifikation der einzelnen Verbindungen, ist es bei der neuartigen Methodik vorgesehen, die Klassifikation und Aufgabe zu kennzeichnen. Die Bedeutung einer Verknüpfung in dieser Abbildung ist unter anderem mit 12 V supply, also der Spannungsversorgung im linken oberen Teil ausgeführt. Die Texte bei den Koppelungen stellen die Aufgabe dar. Bei der Klassifizierung sind Spezifikationen wie etwa Daten-, Versorgungs- oder Signalverbindungen hinterlegt. In Abbildung 2.14 sind die Signalverknüpfungen mit einer unterbrochenen Linie verwirklicht, die durchgezogene Linie, welche mit dem Wort supply gekennzeichnet ist, repräsentiert eine Versorgungsverbindung. Die Ausführungen in dieser Darstellung sind exemplarisch.

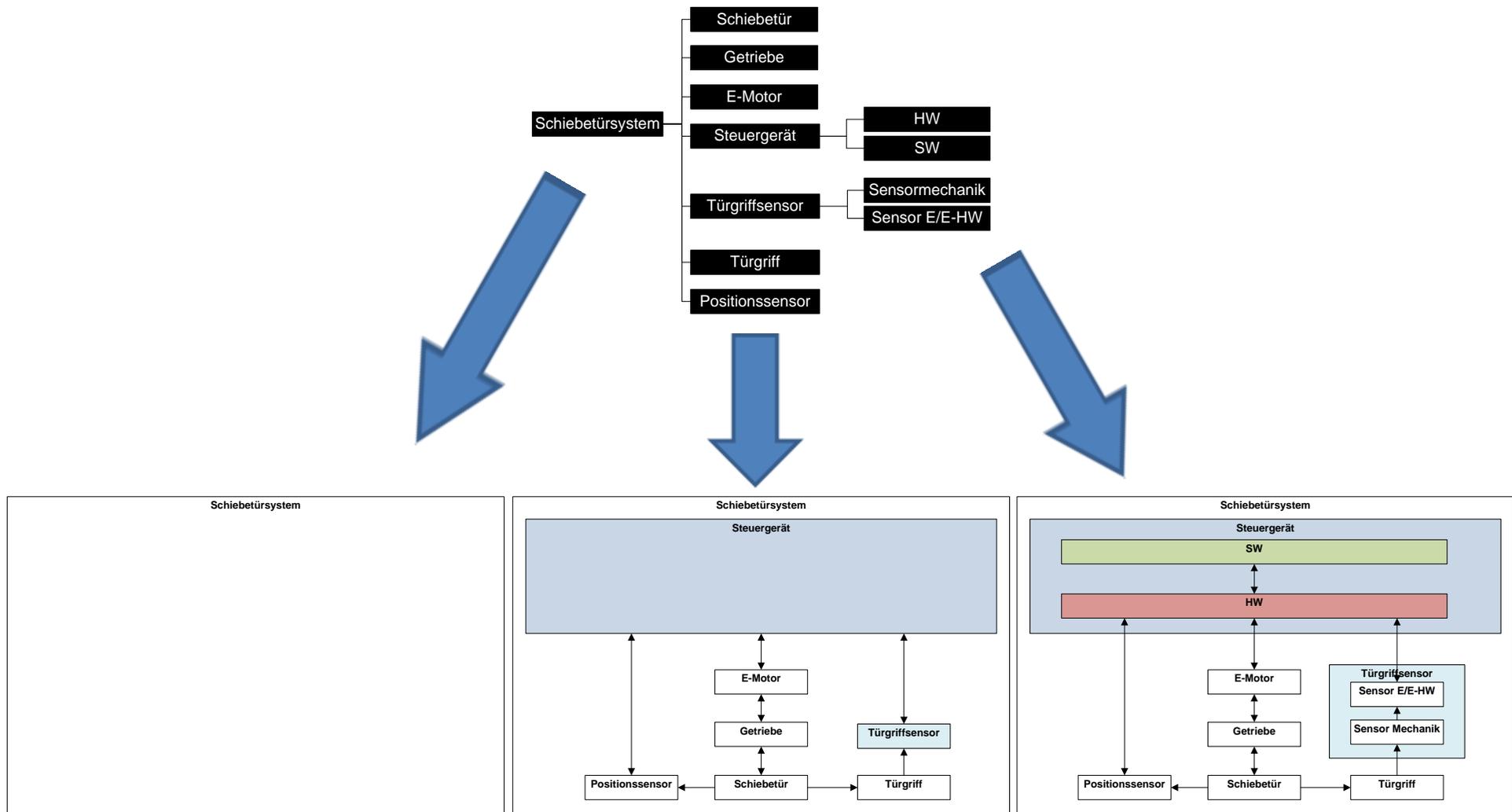


Abbildung 4.3: modularer Aufbau der Strukturblockdiagramme bei der innovativen Analysemethode, [3]

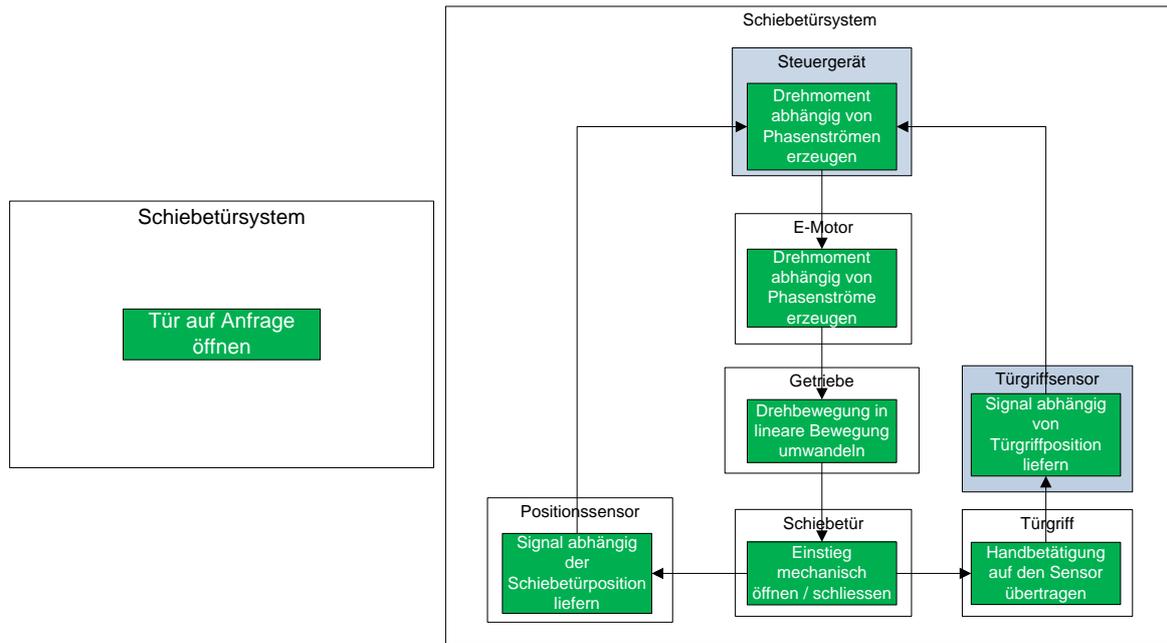


Abbildung 4.4: Funktionsblockdiagramme der ersten und zweiten Ebene, [3]

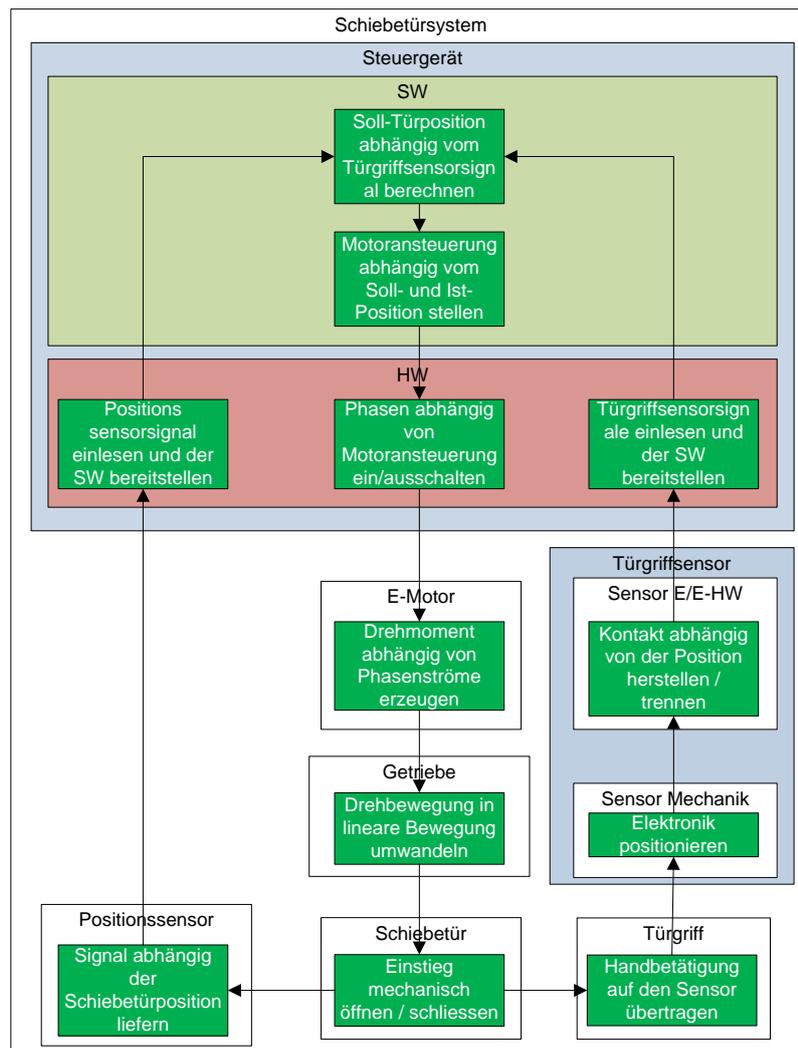


Abbildung 4.5: Funktionsblockdiagramm der dritten Ebene, [3]

## 4.2.2 Realisierung im Datenmodell

Die Realisierung der neuen Anforderungen an eine unkonventionelle Analysetechnik bedeutet auch eine Neuerung im Datenmodell. Die Änderungen im ERM sind teils gering aber dennoch sehr effektiv und durch die Farbe Orange gekennzeichnet. Grundlage für das weiterentwickelte ER-Diagramm ist Abbildung 3.11. Auf die Ansicht der vorhandenen Attribute im Datenmodell konventioneller FMEA Tools wird aus Gründen der Übersicht verzichtet (siehe Abbildung 4.1).

- **Struktur- und Funktionsblockdiagramme**

Bei der Darstellung des Zusammenhangs der Struktur bzw. Funktionen ist lediglich eine andere Ansicht notwendig. Somit ist das Datenmodell von dieser Veränderung nicht betroffen.

- **Vergabe von Ports**

Das Hinzufügen von Ports zu den Strukturelementen und Funktionen erfolgt über eine eigene Entität Port, da diese ein eigenes eindeutig identifizierbares Informationsobjekt repräsentieren. Dazu ist es unausweichlich eine ID als Schlüsselattribut (siehe Kapitel 2.5.2.1) zu vergeben, in Abbildung 4.6 gekennzeichnet durch den Unterstrich. Um die im Kapitel 4.2.1 beschriebenen Spezifikationen Name, Typ und Richtung zu berücksichtigen, sind diese als Attribut im Entity-Relationship-Modell dem Informationsobjekt angeheftet und mit Name Port, Typ und I/O/beides benannt.

Aus dem ERD in Abbildung 4.6 ist die eindeutige Zugehörigkeit eines Ports zu einem Strukturelement bzw. einer Funktion erkennbar. Die Vernetzung der Entitäten Strukturelement und Port bzw. Funktion und Port stellt sich als 1:(0-n) Beziehung dar. Somit können Strukturelemente und Funktionen mehrere Ports besitzen.

- **Neue Art der Verbindung**

Durch die weiterführenden Beschreibungen der Verbindung ist es notwendig, die Wahl für die Grundlage der unkonventionellen Analysetechnik der erstellten Datenmodelle herkömmlicher FMEA Software mittels eigener Verbindungsentität zu treffen (siehe Kapitel 3.1.3). Durch steigende Komplexität der Anforderungen an Analysewerkzeuge ist eine erhöhte Flexibilität erforderlich, welche durch die Möglichkeit des Hinzufügens frei wählbarer Attribute erreicht wird. Die Realisierung der Klassifikation und Aufgabe von Verbindungen sind durch die Attribute Klassifizierung Verbindung und Aufgabe Verbindung sichergestellt (siehe Abbildung 4.6).

Durch die Herstellung einer Beziehung von den Informationsobjekten Port und Verbindung sind Schnittstellen darstellbar. Es lassen sich somit Verknüpfungen zwischen Strukturelementen und Funktionen, welche bei den steigenden Anforderungen an Analysewerkzeugen essentiell sind, verwirklichen. Die Beziehung ist analog zu allen anderen wo die Entität Verbindung Bestandteil ist, als 2:(0-n) ausgeführt.

### 4.2.3 Datenmodell

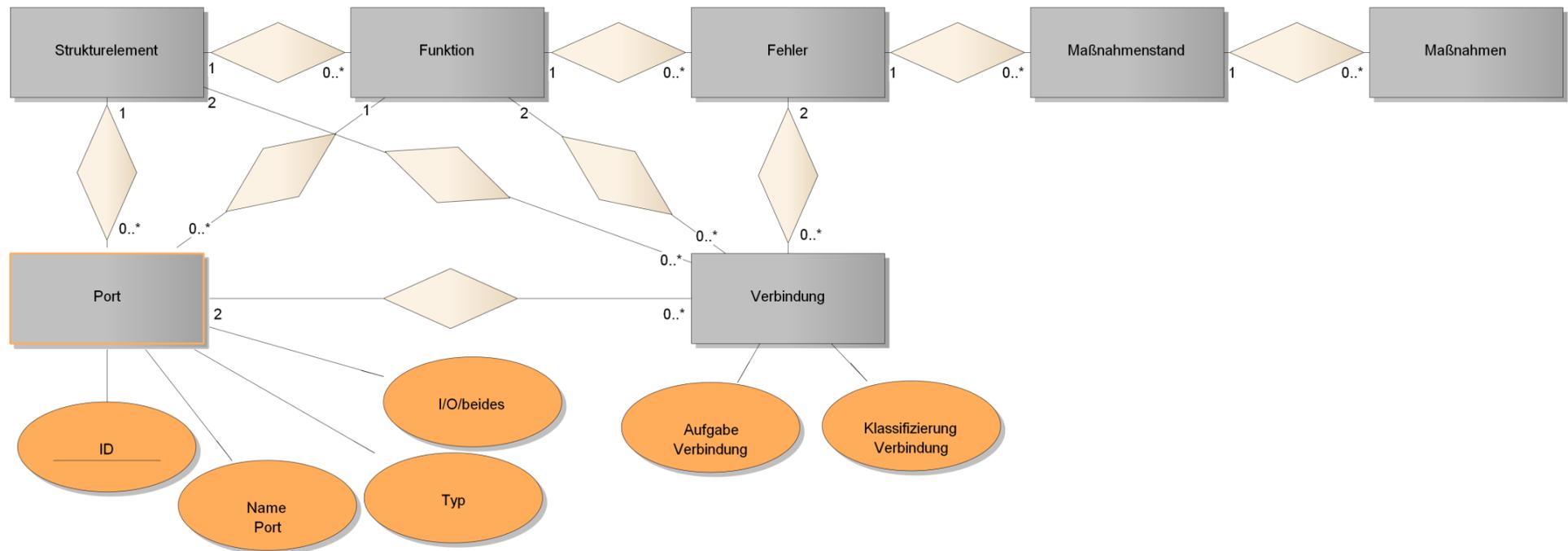


Abbildung 4.6: ER-Modell der innovativen Analysemethodik, Ausbaustufe 1, [10]

## 4.3 Ausbaustufe 2

Die zweite Ausbaustufe der innovativen Analysemethodik integriert eine Fehlerfortpflanzung über Funktionspfade im Fehlernetz, welche die reale Situation nachbilden soll. Aktuell ist weder bei konventionellen FMEA oder FTA Tools diese Darstellungsart verwirklicht. Die einzige Möglichkeit wäre die Funktionen als Fehler zu charakterisieren, was aber nicht der Realität entspricht. Ein weiterer Bestandteil dieser Ausbaustufe der innovativen Analysetechnik ist die Integration von boolescher Algebra und dem Fehlertyp. Im Fehlernetz einer FMEA werden aktuell alle Komponenten mit ODER-Gattern verknüpft, was die Berücksichtigung von Mehrfachfehlern nicht ermöglicht. Standard FTA Applikationen bieten die Gelegenheit eine ganzheitliche logische Verknüpfung des Fehlerbaums zu realisieren, was auch eine Darstellungsmöglichkeit der Latenz eines Fehlers mit sich bringt. Diese latenten Fehler sollen auch bei der neuartigen Analysemethodik zu charakterisieren sein. Bei den herkömmlichen FMEA Werkzeugen ist auf Grund der fehlenden Chance Mehrfachfehler abzubilden, auch die Latenz von Fehlfunktionen somit nicht zu repräsentieren. Da diese Fehlerart in der Realität aber durchaus vorkommt, ist eine Weiterentwicklung bzw. Zusammenführung von FTA und FMEA unausweichlich. Außerdem ermöglicht die Darstellung über Fehlernetze eine übergreifende und vollständige Visualisierung der Fehlerfortpflanzung im System. Die letzte Komponente der Ausbaustufe 2 der fortschrittlichen Art der Analyse ist das Einbeziehen von Wahrscheinlichkeitswerten und -modellen inklusive deren Parameter. Für die Fehlerart und Fehlerfolge sind Wahrscheinlichkeiten in den aktuellen FMEA Programmen inkludiert. Die Hinterlegung von Ausfall- und Reparaturrate für ein Systemelement ist ebenfalls durchführbar. Konventionelle FTA Software bietet noch mehr Möglichkeiten Verteilungsfunktionen und Wahrscheinlichkeitswerte abzubilden. Ausbaustufe 2 der neuen Analysetechnik kombiniert die herkömmliche FMEA und FTA Methodik.

### 4.3.1 Anforderungen

- ***Fehlerfortpflanzung über Funktionen***

Ein Fehler mündet nicht zwangsläufig in dem nächsten Fehler, sondern wird über Funktionen, welche genauso ablaufen wie sie sollten, weitergeleitet. Diese Funktionen sind somit keine weiteren Fehler im eigentlichen Sinn. Diese Funktionen sollen somit auch nicht als Fehler gekennzeichnet und abgebildet werden, um das Verständnis der ohnehin komplexen Zusammenhänge eines mechatronischen Systems besser nachvollziehen zu können. Eine genauere Analyse der Fehlerpfade erfordert eine Darstellung der Fehlerfortpflanzung über die Signal- bzw. Funktionspfade des Produkts. Wird Abbildung 4.7 zur Betrachtung herangezogen, wird beispielsweise der Fehler „Elektronik falsch positioniert“ über die Funktion „Kontakt abhängig von der Position herstellen/trennen“ zum Fehler „Signal geliefert ohne Anforderung“ weitergeleitet. Der Fehler „Signal geliefert ohne Anforderung“ mündet über mehrere Funktionen im Top-Fehler „Tür geöffnet ohne Anfrage“. Die Fortpflanzung über Funktionen bildet nur die herkömmlichen Mechanismen in einem System ab. Die Funktionspfade sollen bei der innovativen Analysetechnik auch ausgeblendet werden

können, für den Fall einer nicht relevanten Bedeutung für das Verständnis des Gesamtzusammenhangs.

- **Integration von bool'scher Algebra und Fehlertypen**

Um alle Funktionen herkömmlicher FTA Software in die unkonventionelle Analysemethodik zu implementieren, werden logische Gatter im Fehlernetz integriert. Abhängig vom Fehlertyp (siehe Tabelle 2.2) werden den Fehlern typabhängig logische Gatter an dessen Eingang zugefügt. Dies ist für alle Fehler zu berücksichtigen. Ist der betrachtete Fehlertyp ein Base-Event, so wird kein bool'sches Gatter beigefügt, da keine weitere Verfeinerung im Fehlernetz stattfindet und diese Art von Fehler keinen Eingang besitzt. Bei aktuellen FMEA Programmen werden Fehler oder-verknüpft. Bei der neuartigen Analysetechnik werden alle bei der FTA vorhandenen und relevanten logischen Gatter berücksichtigt (siehe Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2). An den Top-Fehler aus Abbildung 4.7 wird zum Beispiel ein ODER-Gatter gelegt. Standardmäßig bietet sich diese Art von Operator an, da in den meisten Fällen wie auch bei aktuellen FMEA eine ODER-Verknüpfung besteht (Einfachfehler). Zur Analyse von Mehrfachfehlern ist die Erweiterung des Funktionsumfangs im Bereich der logischen Operatoren des Fehlernetzes definitiv notwendig, zwei oder mehrere Fehler mit einem UND-Gatter zu verknüpfen. Im oberen Bereich der Abbildung 4.7, befindet sich der Fehler „Drehmoment ohne Ansteuerung des Steuergeräts geliefert, unentdeckt“, welcher am Eingang mit einem UND-Operator verknüpft ist. Dadurch ist das Vorkommen von zwei Fehlern erforderlich, um den beschriebenen Fehler zu erhalten (Mehrfachfehler).

- **Implementierung von Wahrscheinlichkeitswerten und -modellen inklusive deren Parameter**

Die Hinterlegung von Fehlern mit Wahrscheinlichkeitsmodellen ist ein weiteres Kernelement dieser Ausbaustufe. Die Eintrittshäufigkeit von bestimmten Fehlertypen lässt sich somit besser abbilden und beschreiben. Die Modelle dieser Verteilungen sind vom Benutzer der Software festzulegen. Die innovative Analysemethodik bietet eine Auswahl der gängigsten Wahrscheinlichkeitsverteilungen an, wie auch die konventionellen FTA Tools. Welche Modelle zur Verfügung stehen, ist von Toolherstellern frei wählbar. Einige als wichtig erachtete sind im Kapitel 2.1.2 angeführt. Eine automatisierte Berechnung von Wahrscheinlichkeiten, wie von FTA Tools bekannt, ist durch Eingabe von Eintrittshäufigkeiten bei den Ursachen gegeben. Über die logischen Gatter kann bis zum Top-Event (Folge) gerechnet werden.

- **Berücksichtigung der Latenz von Fehlern**

Als vierter Aspekt dieser Ausbaustufe wird die in realen mechatronischen Systemen vorkommende Latenz von Fehlern berücksichtigt. Diese Fehlerart führt nicht unmittelbar zu einem Ausfall von Systemkomponenten, allerdings ist sie für eine exakte und korrekte Analyse relevant. Durch die Wechselwirkung dieser latenten Fehler bzw. deren Fortpflanzung über Funktionszweige kann es zu einem kritischen Systemversagen kommen.

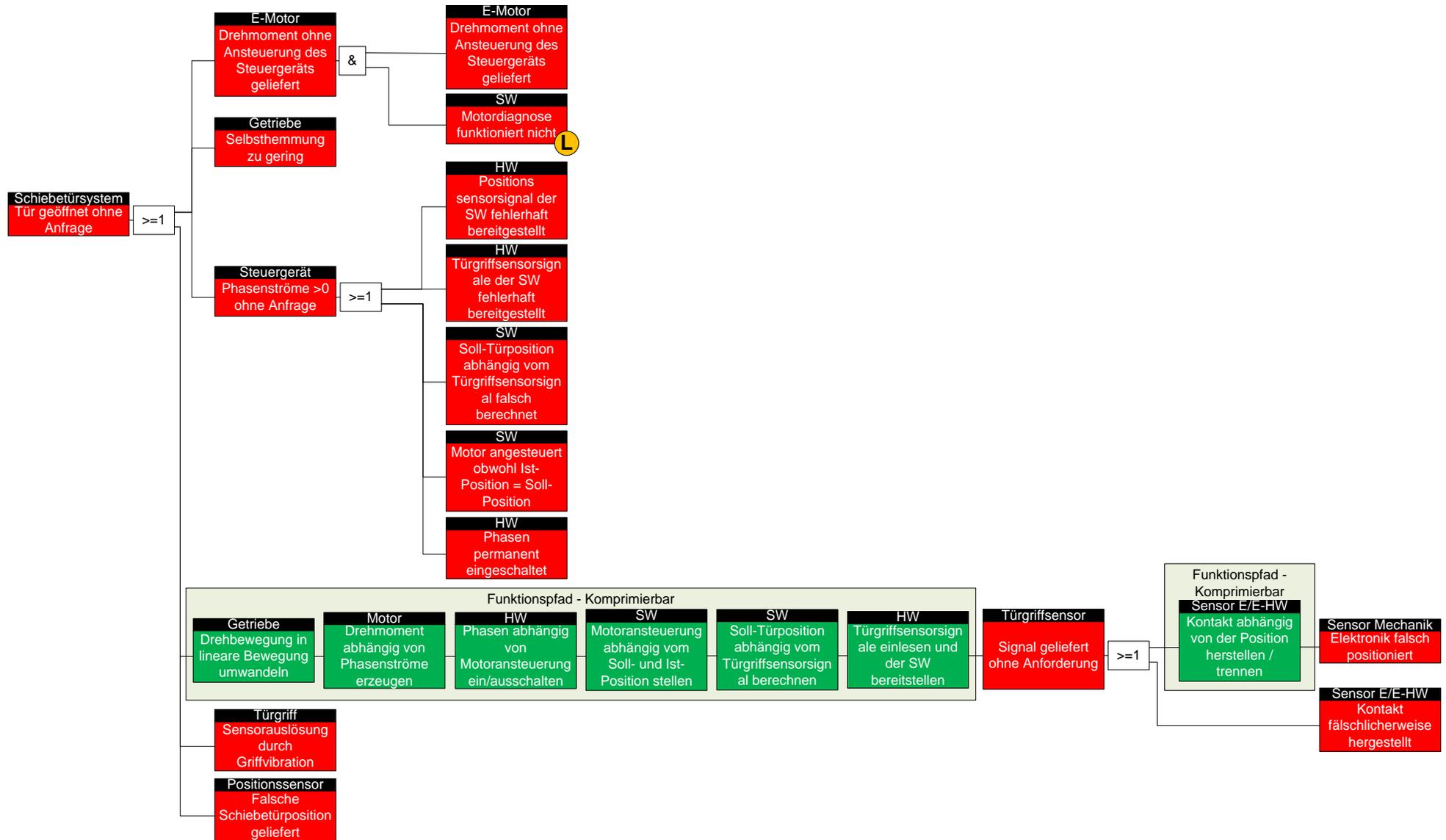


Abbildung 4.7: Fehlernetz der innovativen Analysemethodik, vgl. [3]

Dieser Fehlertyp kann immer nur in Kombination mit anderen vorkommen. Der latente Fehler „Motordiagnose funktioniert nicht“ aus Abbildung 4.7 ist mit einem gelb hinterlegten L charakterisiert. Nur im Zusammenspiel mit dem herkömmlichen Fehler „Drehmoment ohne Ansteuerung des Steuergeräts geliefert“ resultiert die Fehlfunktion „Drehmoment ohne Ansteuerung des Steuergeräts geliefert, unentdeckt“.

Ein unbemerkter Fehler ist beispielsweise das Lösen einer Schraube am Rad eines Autos. Löst sich nur eine von fünf Schrauben bleibt dies im ersten Moment meist unentdeckt, durch die Kombination mit anderen Fehlern kann dadurch aber dennoch ein relevantes Sicherheitsrisiko entstehen. Daher ist eine Unterscheidung von unbemerkten, vom System nicht detektierbaren und konventionellen Fehlern unausweichlich um eine repräsentative Gesamtanalyse des Systems zu gewährleisten.

### 4.3.2 Realisierung im Datenmodell

Die unter Kapitel 4.3.1 aufgezeigten Anforderungen werden im Datenmodell der unkonventionellen Analysetechnik berücksichtigt und eingearbeitet. Das dadurch entstehende ER-Diagramm zeigt Abbildung 4.11. Die in grün ausgeführten Neuerungen repräsentieren die Aspekte der Ausbaustufe 2.

- **Fehlerfortpflanzung über Funktionen**

Die Fortpflanzung über Funktionen ist mit Hilfe von dem mehrwertigen Attribut „Fortpflanzungstabelle (FKT) für Fehler“ realisiert, welches an die Entität Verbindung gekoppelt ist. Diese Information ist in Form einer oder mehrerer Tabellen bei der betroffenen Verbindung hinterlegt. Diese Tabelle beinhaltet alle Funktionen, über welche sich der Fehler fortpflanzt. Bei anderen Verbindungen ist diese Tabelle nicht existent, da ein Fehler direkt zu dem nächsten Fehler führt. Die Reihenfolge der Tabelleninhalte ist ebenso zu beachten, da sie auch die Reihenfolge der Funktionen repräsentiert. Ergibt sich eine Weiterleitung des Fehlers wie in Abbildung 4.8, so sind in der Fortpflanzungstabelle die IDs der Funktionen A, B und C hinterlegt.



Abbildung 4.8: Fehlerfortpflanzung über einen Funktionszweig, vgl. [10]

Fehler können bei der Komplexität der zu analysierenden, mechatronischen Systeme aber auch über mehrere Funktionspfade übertragen werden. Daher ist das beschriebene Attribut aus Abbildung 4.11 mehrwertig ausgeführt. Stellt sich der Zusammenhang der Fortpflanzung wie in Abbildung 4.9 dar, so würden zwei Tabellen hinterlegt sein. Die Einträge der ersten Tabelle sind die IDs der Funktionen A, B, und C. Die Inhalte der zweiten Tabelle sind die IDs der Funktionen D, E und F, welche den zweiten Fortpflanzungspfad repräsentieren.

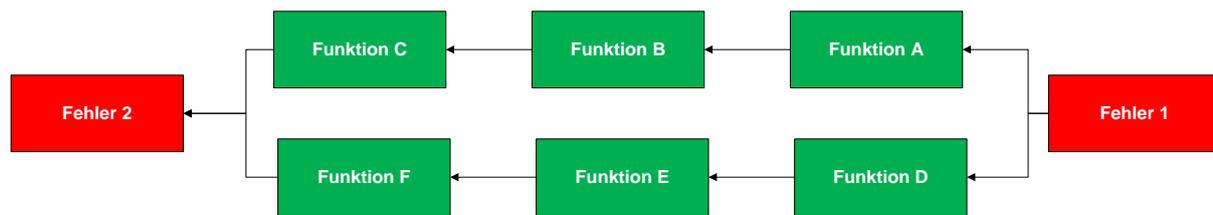


Abbildung 4.9: Fehlerfortpflanzung über mehrere Funktionszweige

Die Eingabe der betroffenen Funktionen ist manuell vom Anwender der Software zu tätigen. Eine automatisierte Erstellung der Fortpflanzung kann unter bestimmten Umständen zu einer unkorrekten Darstellung des Funktionszweiges führen. Falls die Ausbreitung des Fehlers wie in Abbildung 4.10 voranschreitet, kann dies von der Software nicht ohne weiteres wiedergegeben werden. Die Fehlfunktion entwickelt sich über den rot eingefärbten Pfad, was den Eintrag der IDs von den Funktionen A, C und D in die Fortpflanzungstabelle nach sich zieht.

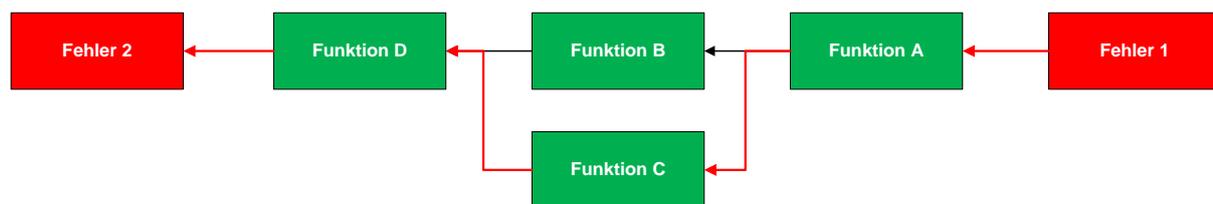


Abbildung 4.10: Fehlerfortpflanzung über bestimmten Funktionszweig

- **Integration von bool'scher Algebra und Fehlertypen**

Wie in Kapitel 3.2.2 bzw. Abbildung 3.15 beschrieben, besteht die Möglichkeit den bool'schen Operator in Form eines Attributs dem Fehler zuzuordnen. Das Attribut „Typ/log. Gatter“ aus Abbildung 4.11 beinhaltet entweder ein logisches Gatter oder eine Hinterlegung des Fehlertyps. Somit ist das Anfertigen von logisch verknüpften Fehlernetzen realisierbar.

- **Implementierung von Wahrscheinlichkeitswerten und -modellen inklusive deren Parameter**

Die Realisierung im ERM erfolgt mit dem zusammengesetzten Attribut „Wahrscheinlichkeitswert“, welches der Entität Fehler angeheftet wird. Dieses Attribut beinhaltet die Einzelattribute „Modell inkl. Parameter“ und „Wert“. Es kann somit eine komplette Wahrscheinlichkeitsverteilung als auch nur ein Absolutwert dem jeweiligen Fehler zugeordnet werden.

- **Berücksichtigung der Latenz von Fehlern**

Die Kennzeichnung eines latenten Fehlers wird im ERD mit dem Attribut „latent Flag“ vollführt. Hierbei handelt es sich um ein Bit, welches im Fall der Latenz einer Fehlfunktion auf 1 gesetzt ist, standardmäßig aber den Wert 0 besitzt.

### 4.3.3 Datenmodell

● Ausbaustufe 1

● Ausbaustufe 2

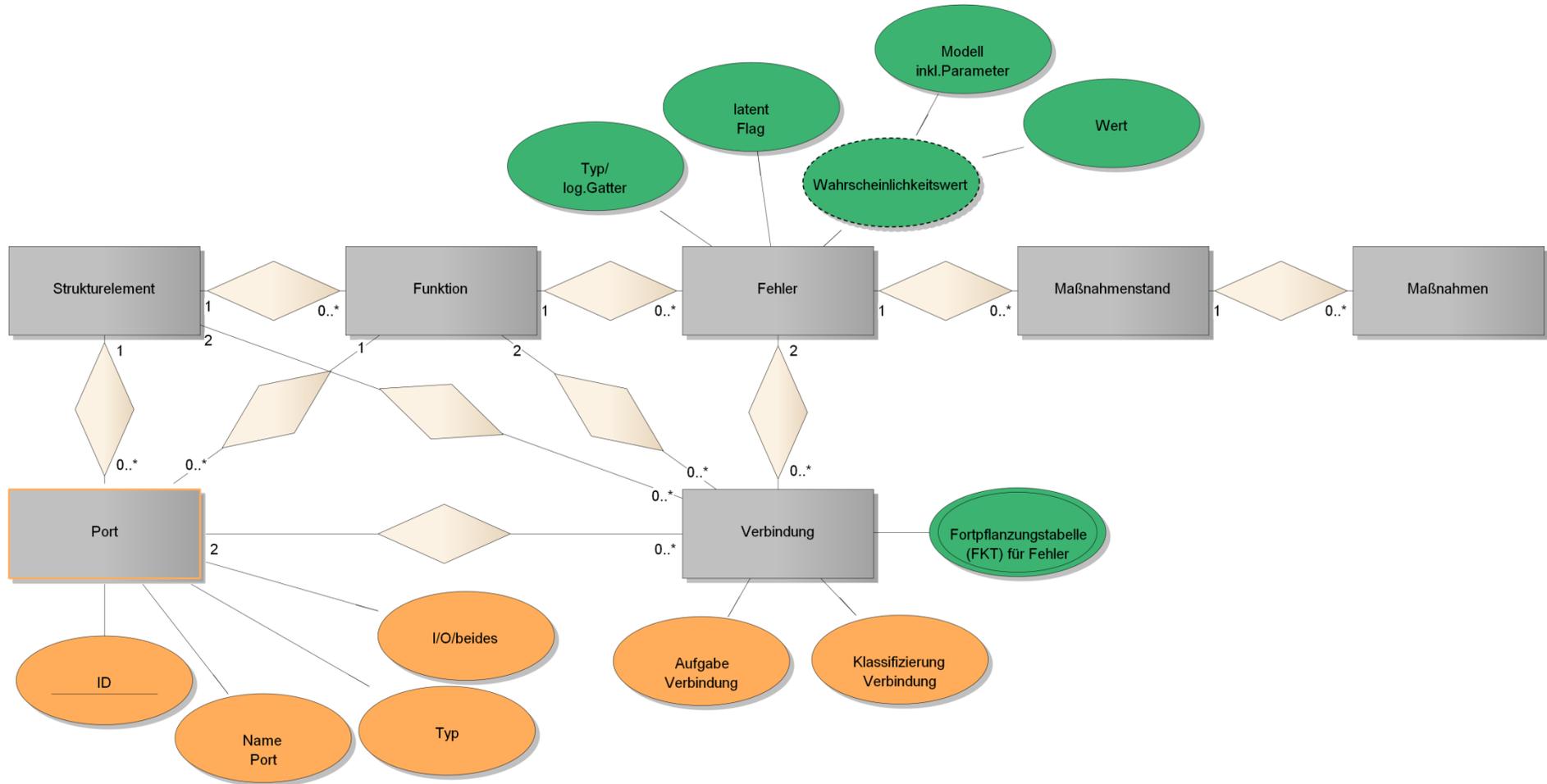


Abbildung 4.11: ER-Modell der innovativen Analysemethode, Ausbaustufe 1 und 2

### 4.4 Ausbaustufe 3

Stufe drei der unkonventionellen Analysetechnik beschäftigt sich mit einer neuen graphischen Darstellung des Zusammenspiels von Fehlern und Funktionen im Fehlernetz. Die neuartige Ausführung betrifft die Benutzeroberfläche und führt zu einem besseren Verständnis der komplizierten Verknüpfungen im Rahmen einer Analyse. Abbildung 4.12 charakterisiert eine von vielen Möglichkeiten die Zusammenhänge im Fehlernetz der innovativen Analysemethodik zu repräsentieren. Bei dieser Darstellungsart sind die Diagnoselücke-Fehler schon berücksichtigt. Dieser Diagnosedeckungsgrad (englisch diagnostic coverage, DC) stellt ein bedeutendes Kernelement dieser Ausbaustufe dar. Diese Diagnoselücken sind zwangsläufig Bestandteil von Analysen, welche die realen Zusammenhänge und Abläufe eines mechatronischen Systems wiedergeben sollen und müssen somit für das Verständnis dargestellt werden können. Durch die Möglichkeit solche Diagnoselückenfehler abzubilden, lassen sich auch daraus resultierende Fehlfunktionen wiedergeben. Der Diagnosedeckungsgrad charakterisiert keine Wahrscheinlichkeit, sondern die Güte der Diagnose.

Die neue Art der graphischen Zusammensetzung einzelner Fehlfunktionen und Sicherheitsmechanismen ist bei konventionellen Tools nicht vorhanden, da eine Berücksichtigung von Funktionen, latenten Fehlern und logischen Operatoren im Fehlernetz einer FMEA nicht vorhanden ist. Einzig die FTA inkludiert die bool'sche Algebra im Fehlerbaum. Die erneuerte Abbildung eines Fehlernetzes resultiert aber auch teilweise aus den neu erstellten Funktionen der innovativen Analysemethode. Die Thematik der Diagnosedeckungsgrade und deren Darstellung und Integration in FMEA Software ist aber sehr wohl bereits Gegenstand von Weiterentwicklungen der Toolhersteller und somit nicht nur bei der neuartigen Analysetechnik relevant.

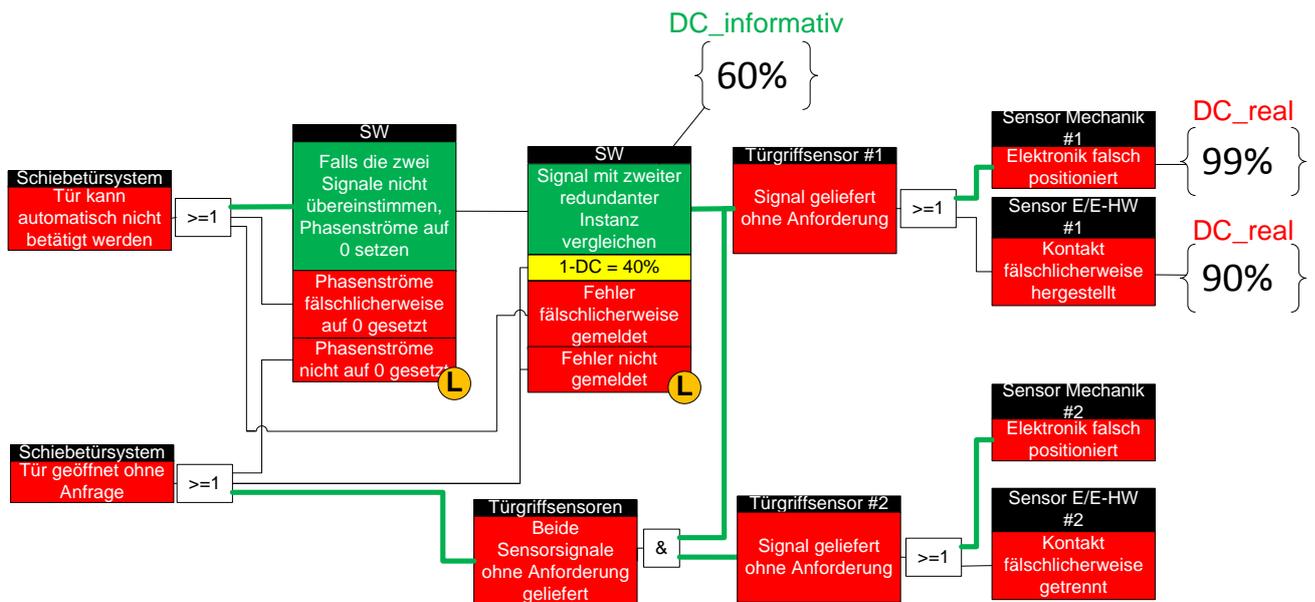


Abbildung 4.12: Beispiel zur neuen graphischen Darstellung des Fehlernetzes, vgl. [3]

#### 4.4.1 Anforderungen

- **Diagnosedeckungsgrad – Diagnostic coverage**

Der Diagnosedeckungsgrad ist einer der Hauptfaktoren dieser Ausbaustufe des Datenmodells der innovativen Analysetechnik und repräsentiert einen immens wichtigen Aspekt bei der Betrachtung von Sicherheitssystemen und -funktionen. Er beschreibt den Anteil der entdeckten, sicherheitskritischen Fehler und somit auch den unentdeckten Teil, welcher zu anderen Fehlern im System führt. Jede Funktion ist durch einen eigenen geschätzten DC-Wert gekennzeichnet. Die Fehler besitzen ebenfalls einen unabhängigen Diagnosedeckungsgrad, welcher sich aber nicht automatisiert vom Funktions-DC ableiten lässt, sondern individuell vom Ersteller der Analyse vergeben werden muss. Eine Summierung von DC-Werten beim Einsatz mehrerer Sicherheitsmechanismen ist nicht ohne weiteres durchzuführen, da sich der Gesamtdiagnosedeckungsgrad für jeden Fehler individuell zusammensetzt. Es kann eine Best- bzw. Worst-Case Summierung erfolgen, diese entspricht aber nicht der Realität. Bei der Best-Case Variante würde aus zwei Sicherheitsmechanismen mit jeweils einem DC-Wert von 50 %, der resultierende Gesamtdiagnosedeckungsgrad bei 100 % liegen, bei der Worst-Case Variante bei 50 %. Dass diese beiden Möglichkeiten aber nicht pauschal anwendbar sind, soll Abbildung 4.13 durch die qualitativ dargestellten DC-Blasen zeigen. Die äußere Umrandung repräsentiert eine ganzheitliche Abdeckung. In diesem Beispiel wäre der Diagnosedeckungsgrad von dem einen Sicherheitsmechanismus 90 %, der DC-Wert der anderen Sicherheitsfunktion liegt bei 60 %. Durch die Lage der Blasen ist die komplizierte Abschätzung der Summierung erkennbar, da keine Aussage getroffen werden kann, welcher Mechanismus welchen Bereich abdeckt. Der gesamte Deckungsgrad obliegt dem Anwender und ist somit für jeden Fall spezifisch festzusetzen – „engineers judgement“.

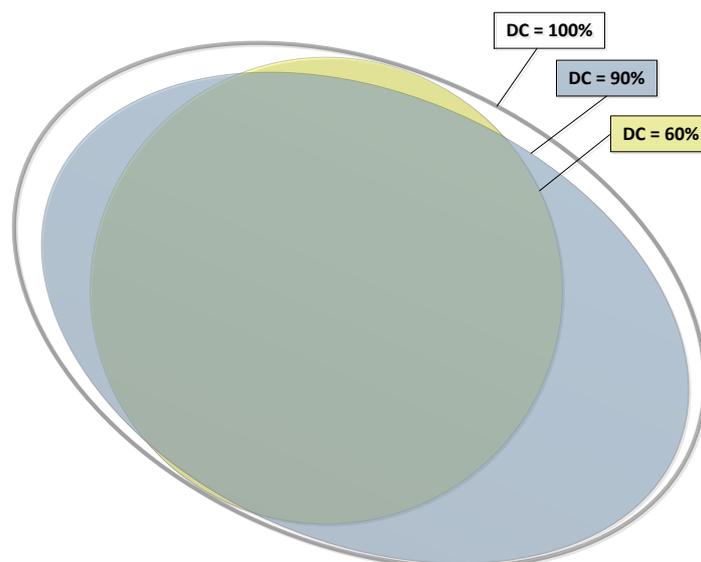


Abbildung 4.13: Diagnosedeckungsgrad – Diagnostic coverage

Die nicht zu entdeckenden Fehler sind die sogenannten Diagnoselücken. Sie entsprechen nicht den herkömmlichen Fehlern aus dem Fehlernetz und sollten somit auch nicht als solche charakterisiert werden (ähnlich wie bei den latenten Fehlern aus Kapitel 4.3.1). Daher wird bei der neuen graphischen Darstellung aus Abbildung 4.12 diese Art der Fehlfunktion mit 1-DC gekennzeichnet und gelb hinterlegt. In diesem Beispiel liegt der Wert des Diagnoselücke-Fehlers bei 40 % und resultiert aus der übergeordneten Sicherheitsfunktion, welche einen Deckungsgrad von 60 % besitzt. Dieser 1-DC Fehler wird im Fehlernetz mit seinen zugehörigen Folgen verknüpft und hat hier die idente Folge als ob ein vorhandener Fehler nicht gemeldet wird.

Häufig verwendete und weit verbreitete DC-Werte in der Automobilindustrie sind 0 %, 60 %, 90 % und 99 % für keine, geringe, mittlere und höchstwahrscheinliche Deckung.

- **Neue graphische Darstellung des Fehlernetzes**

Diese Art der Erstellung von Zusammenhängen repräsentiert ein erweitertes Fehlernetz. Der modulare Aufbau der Analysemethode und die damit verbundenen Vernetzungsarten der Systemkomponenten erlaubt eine große Zahl an unterschiedlichen Darstellungen. Insbesondere eine Beachtung der Sicherheitsfunktionen und deren Fehlfunktionen inklusive der Integration von Diagnosedeckungsgraden soll erstmals für das zu analysierende Gesamtsystem ermöglicht werden. Die grün markierten Verbindungen aus Abbildung 4.12 symbolisieren eine Fehlerfortpflanzung über einen Funktionspfad, welche in

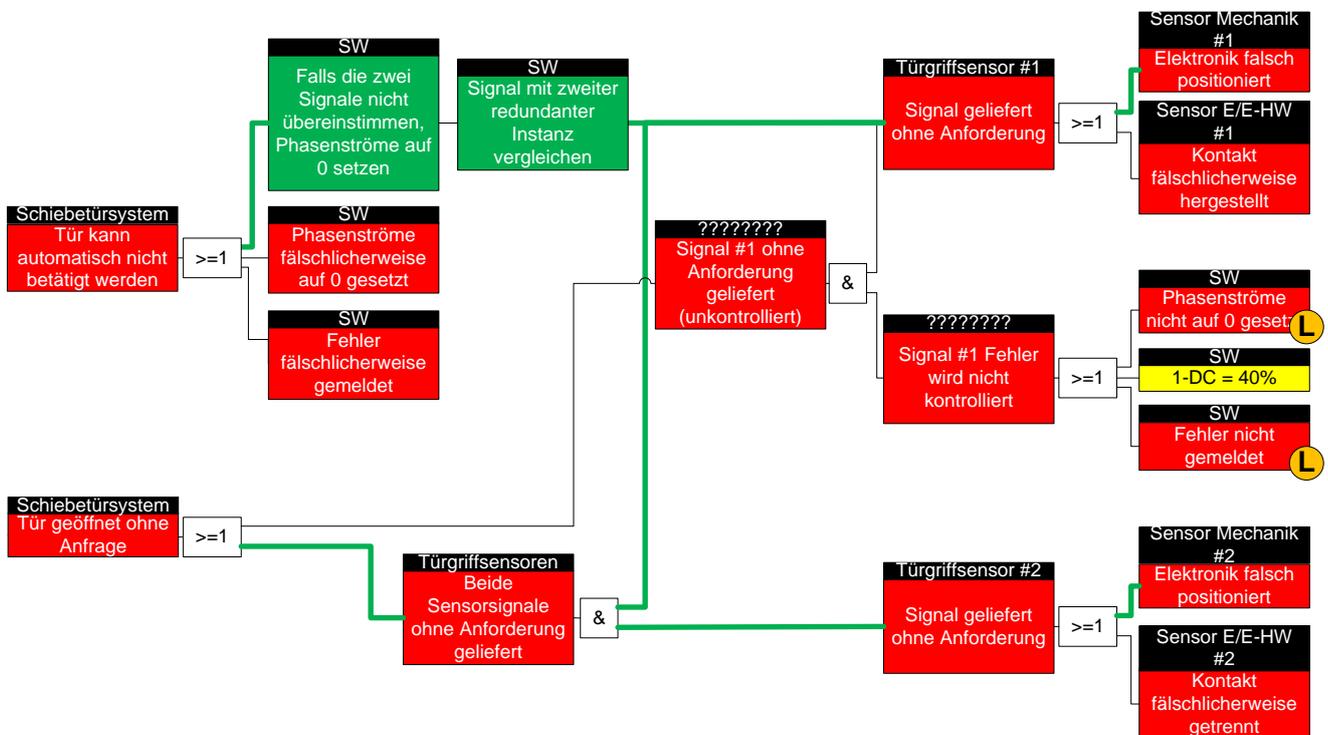


Abbildung 4.14: Fehlernetz der neuen graphischen Darstellung, vgl. [3]

dieser Ansicht komprimiert ist (siehe Kapitel 4.3.1). Die Diagnosedeckungsgrade für die Fehler „Elektronik falsch positioniert“ und „Kontakt fälschlicherweise hergestellt“ sind ebenso wie bei der Sicherheitsfunktion „Signal mit zweiter redundanter Instanz vergleichen“ dargestellt. Die Ansicht der Sicherheitsfunktionen mit den zugehörigen Fehlfunktionen als einheitlicher Block aus Abbildung 4.12 bietet einen besseren Überblick und erleichtert das Verständnis für Personen ohne täglichen intensiven Umgang mit dieser Art der Analyse. Das tatsächliche Fehlernetz, welches hinter dieser modifizierten Oberflächenansicht steckt, befindet sich in Abbildung 4.14. Hierbei ist zu erkennen wie der Anwender des Analysetools das Fehlernetz erstellen muss. Die neue Ansicht dient der leichteren Nachverfolgung von technischen Zusammenhängen für die Qualitätssicherung, ein repräsentatives und ganzheitliches Fehlernetz ist dennoch vom Moderator auszuarbeiten. Die Verknüpfungen von Sicherheitsmechanismen mit deren Fehler sind ebenfalls herzustellen. So gehört die latente Fehlfunktion „Phasenströme nicht auf 0 gesetzt“ zu dem Sicherheitsmechanismus „Falls die zwei Signale nicht übereinstimmen, Phasenströme auf 0 setzen“. Der Diagnoselücke-Fehler und der zweite latente Fehler charakterisieren Abweichungen der Sicherheitsfunktion „Signal mit zweiter redundanter Instanz vergleichen“ (vergleiche dazu Abbildung 4.12 und Abbildung 4.14). Die schwarzen Balken oberhalb der Fehler bei der Ansicht des Fehlernetzes repräsentieren das Systemelement, zu welchem die jeweilige Fehlfunktion gehört. Die Fehler „Signal #1 Fehler wird nicht kontrolliert“ und „Signal #1 ohne Anforderung geliefert (unkontrolliert)“ sind keinen Systemkomponenten zugehörig und haben daher „?????“ im schwarzen Bereich.

### 4.4.2 Realisierung im Datenmodell

Was die Anforderungen aus Kapitel 4.4.1 für Änderungen bzw. Neuerungen im Entity-Relationship-Diagramm der unkonventionellen Analysemethodik bedeuten, wird in diesem Kapitel behandelt.

- ***Diagnosedeckungsgrad – Diagnostic coverage***

Der Wert des Diagnosedeckungsgrads wird als Attribut zum einen der Entität Funktion, zum anderen der Entität Fehler zugefügt (siehe Kapitel 0, Abbildung 4.15). Bei dem eindeutig identifizierbaren Informationsobjekt Funktion ist das erwähnte Attribut mit „diagnostic coverage\_informativ“ bezeichnet, da diese Werte rein informativ vergeben werden. Der reale Deckungsgrad der Diagnose wird als beschreibende Eigenschaft an die Entität Fehler gekoppelt und ist mit „diagnostic coverage\_real“ benannt. Die unterschiedliche Bezeichnung dieser beiden DC-Werte ist bewusst gewählt um eine Verwechslung bzw. einen eventuell vermuteten Zusammenhang zu vermeiden.

- ***Neue graphische Darstellung des Fehlernetzes***

Die neue graphische Darstellung von Fehlernetzen inklusive Sicherheitsmechanismen hat als einzige Neuerung im ER-Modell das Attribut „Diagnoselücke-Flag“ bei der Entität Fehler. Analog zum „latent Flag“ ist dieses Attribut ein Bit, welches standardmäßig auf 0 gesetzt ist. Falls der betroffene Fehler eine Diagnoselücke repräsentiert, wird dieses Bit auf 1 geändert, um die Darstellung auch als solche im Fehlernetz zu ermöglichen.

### 4.4.3 Datenmodell

● Ausbaustufe 1

● Ausbaustufe 2

● Ausbaustufe 3

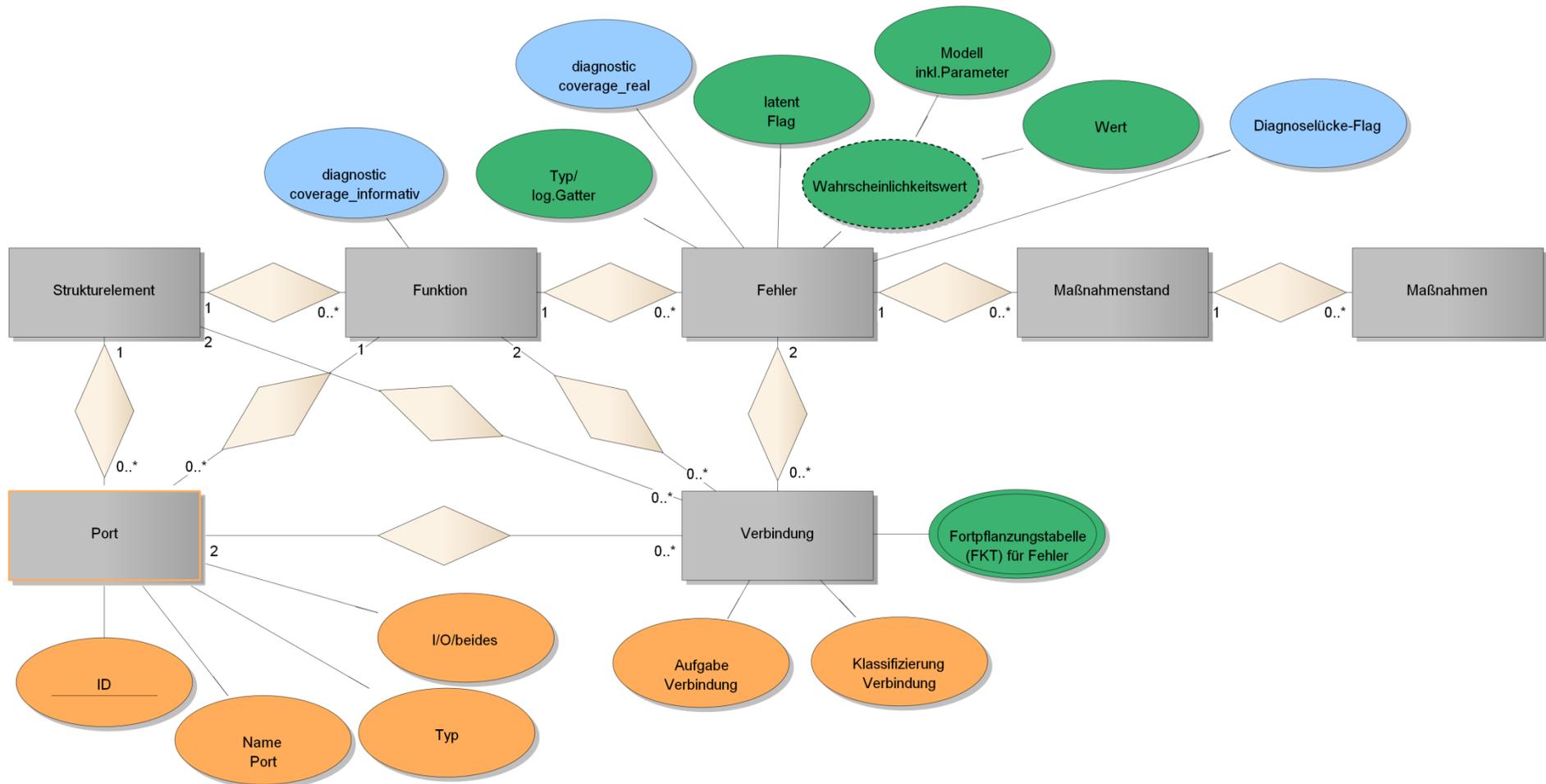


Abbildung 4.15: ER-Modell der innovativen Analysemethode, Ausbaustufe 1, 2 und 3

## 4.5 Ausbaustufe 4

Die vierte und letzte Ausbaustufe der innovativen Analysemethodik beinhaltet die Implementierung von nachträglichen Optimierungsmaßnahmen, welche auch bei aktuellen FMEA Programmen nach bereits abgeschlossenen Analysen ohne weiteren Aufwand zu bewerkstelligen sind. Alle vorhandenen Elemente einer FMEA sollen auch bei der neuartigen Art der Analyse beliebig hinzugefügt und entfernt werden können. Designoptimierungen müssen aktuell bei FMEA Werkzeugen als Maßnahmen integriert werden und können nicht direkt als solche gekennzeichnet werden. Dies soll bei der neuen Analysetechnik verbessert werden und Veränderungen müssen als solche erkennbar abgebildet werden. Bei Standard FMEA und FTA Tools ist die Rekonstruktion des Ausgangszustands aber nicht durchführbar, ohne die jeweiligen Stufen der Optimierung separat abgespeichert zu haben. Ebenso ist das Nachvollziehen bzw. die Markierung von getätigten, nachträglichen Änderungen nicht vorgesehen. Dies ist wieder nur durch gesonderte Speicherung der Optimierungsstufen zu verwirklichen.

### 4.5.1 Anforderungen

- ***Darstellung der Optimierungen***

Neue Systemelemente, welche im Rahmen von Überarbeitungen des Gesamtproduktes oder dem Austausch von bereits eingesetzten Systembestandteilen wegen einer erhöhten Fehleranfälligkeit der Komponenten, hinzukommen oder entfernt werden, müssen gekennzeichnet sein. Gleiches gilt ebenso für alle anderen Bestandteile der neuartigen Analyseart (Funktionen, Fehler, Ports und Verbindungen). Durch die stetige Veränderung bzw. Erweiterung des Entwicklungsprozesses sind auch die Analysetechniken davon betroffen und werden permanent mit Optimierungen konfrontiert. Daher gilt es auf etwaige nachträgliche Veränderungen flexibel reagieren zu können, ohne dass Information bezüglich der ursprünglichen Analyse verloren geht. Die Integration von neuen Elementen oder das Entfernen müssen ohne weiteren Aufwand realisierbar sein. Auch die Rekonstruktion vom Ausgangspunkt sollte möglich sein. Bevor eine Optimierungsmaßnahme durchgeführt wird, sollte im Tool diese Option gewählt werden, damit die Änderungen als Optimierung gekennzeichnet werden können.

Die in Abbildung 4.16 vorgenommenen Optimierungen sind mit den beiden roten Rahmen gekennzeichnet. In diesem Fall entspricht das Funktionsblockdiagramm einer Weiterentwicklung des Beispiels eines Schiebetürsystems aus Abbildung 2.14., durch das Integrieren eines zweiten Türgriffsensors werden neue Strukturelemente und Funktionen im Funktionsblockdiagramm notwendig. Somit werden auch neue Ports und Verbindungen unumgänglich. Zum einen kommt das Strukturelement „Secondary Door Handle Sensor“ hinzu, zum anderen drei neue Funktionen des Gesamtsystems (siehe Abbildung 4.16).

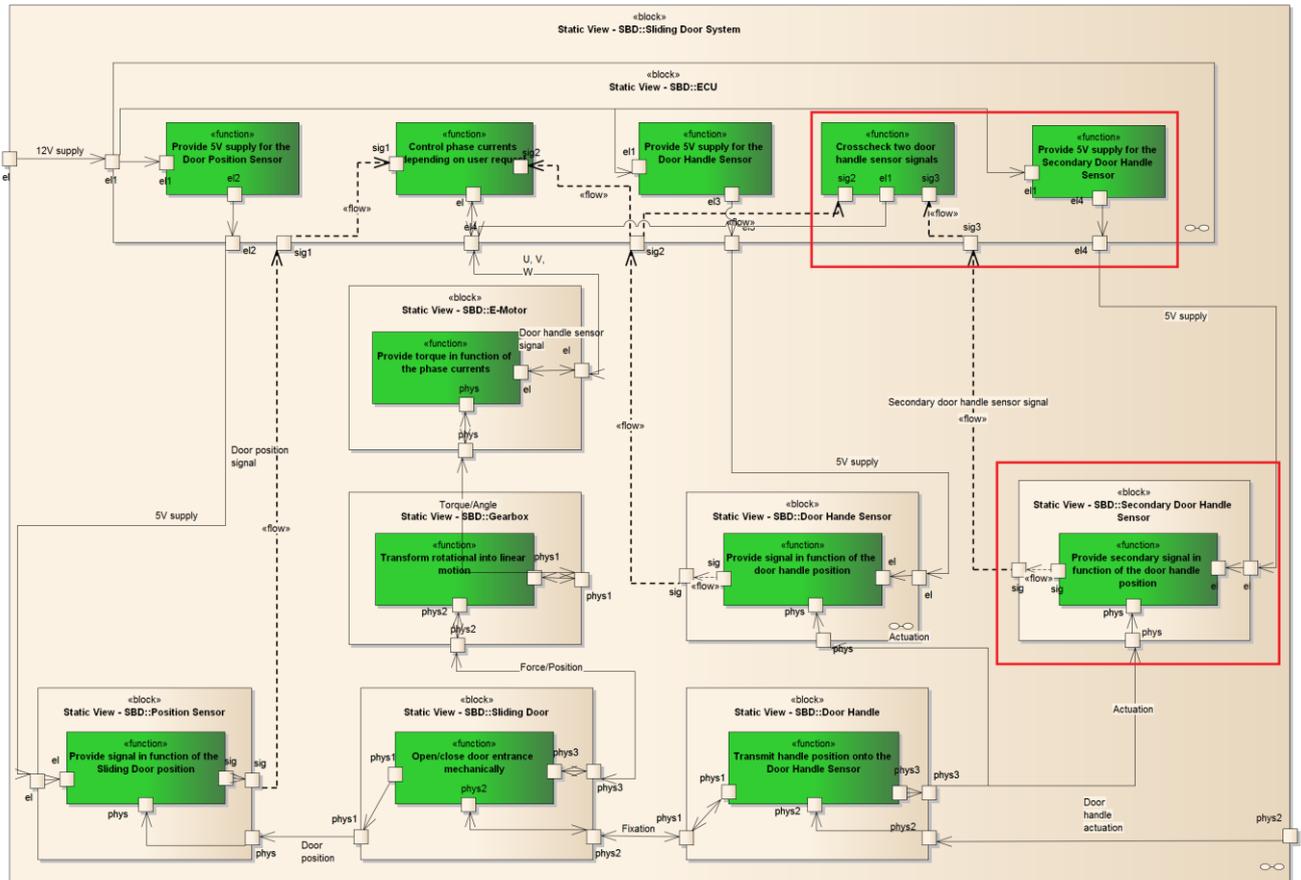


Abbildung 4.16: Funktionsblockdiagramm nach der Optimierungsmaßnahme, vgl. [22]

### 4.5.2 Realisierung im Datenmodell

- **Darstellung der Optimierungen**

Den fünf betroffenen Entitäten einer Optimierungsmaßnahme werden jeweils die Attribute „gelöscht Flag“ und „ID\_Optimierungsmaßnahme“ hinzugefügt. Bei vorhergegangener Wahl der Option Optimierung auf der Benutzeroberfläche werden alle im Rahmen von Veränderungen hinzugefügten Komponenten auch als solche definiert. Beispielsweise sind alle neu erstellten Komponenten im Rahmen der Optimierungsmaßnahme 1 auch beim Attribut „ID\_Optimierungsmaßnahme“ mit 1 hinterlegt. Dieses Attribut ist mehrwertig ausgeführt, da durch mehrere nachträgliche Veränderungen ein identes Element entstanden bzw. gelöscht werden könnte. Durch das erstellte Datenmodell lassen sich neue Komponenten ohnehin problemlos einfügen. Da keine Information im Falle einer Änderung verloren gehen soll, werden die entsprechenden Elemente nicht gelöscht, sondern mittels einem Lösungsbit aus der Benutzeroberfläche ausgeblendet und somit nur für den Anwender eliminiert, in der Datenbank des Analyseprogramms bleiben sie jedoch erhalten. Im Falle einer notwendigen Rekonstruktion des Ursprungszustandes lassen sich somit diese Komponenten wiederherstellen. Im Zusammenspiel mit der ID der Optimierung, ist genau nachzuvollziehen, welches Element im Rahmen welcher Optimierungsmaßnahme des Entwicklungsprozesses gelöscht werden musste.

### 4.5.3 Datenmodell

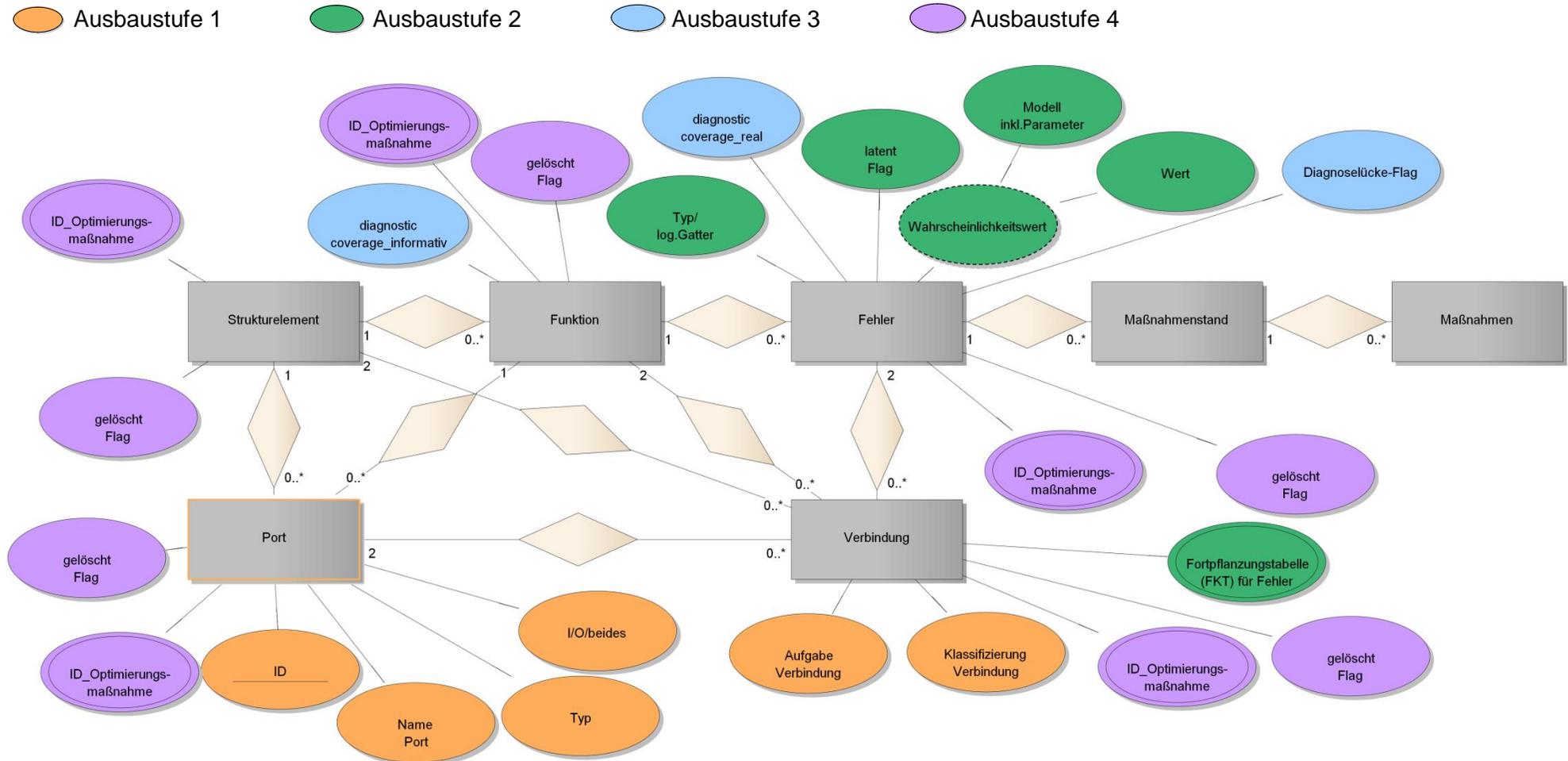


Abbildung 4.17: ER-Modell der innovativen Analysemethode, Ausbaustufe 1, 2, 3 und 4

## 4.6 Zugriffszeiten

Die Bewertung der Zugriffszeiten stellt eine enorme Herausforderung dar. Diese Thematik hängt von den unterschiedlichsten Faktoren ab und ist daher nicht für alle Arten der Verwirklichung eines Tools abzuschätzen. Da im Rahmen dieser Arbeit ein Datenmodell entwickelt wird, nicht aber die Realisierung dieses durchgeführt wird, wäre eine quantitative Aussage nicht seriös. Bei der Bewertung der benötigten Speicherressourcen von Standard Applikationen und der innovativen Analysetechnik resultiert eine Steigerung durch die Integration neuer Features um ca. 150 % des Ausgangswertes herkömmlicher Software (siehe Tabelle 5.12). Daher werden auch die Zugriffszeiten nur unmerklich größer (im Bereich von einer Sekunde). Die Faktoren, welche eng im Zusammenhang mit den Zugriffszeiten stehen sind, [24], [29], [30], [31]:

- Prozessor CPU,
  - *Anzahl Prozessoren, Kerne pro Prozessor, Taktfrequenz pro Kern,*
- Arbeitsspeicher RAM,
  - *Anzahl RAM, Geschwindigkeit, Latenz,*
- Speichermedium,
  - *Art des Speichermediums (Solid State Drive, mechanisch), Geschwindigkeit, Schnittstellen, Anzahl Speichermedien, Segmentierung, Intern, extern oder Netzwerk, Kapazität, Ausnutzung Speichermedium (voll oder leer),*
- Programmierung des Tools,
  - *Datenbanktyp, Datenstruktur, Datenformat, Version,*
- Nutzerverhalten,
  - *Anzahl der Zugriffe, Use Cases (Fehlernetz, Fehlernetz inklusive Fehlerfortpflanzung, Strukturbaum, Funktionsnetz, Variante der Analyse, gesetzten Filter), parallel ablaufende Prozesse,*
- Analyseart
  - *Vernetzungsgrad, Betrachtungstiefe, Ausbaugrad der Analyse, angefertigte Elemente (Formblatt, Ursache-Wirkung-Diagramm für Struktur und/oder Fehlernetz, statistische Auswertung, Terminverfolgung),*
- Betriebssystem,
- etc.

Eine Bewertung der Zugriffszeiten muss für jeden spezifischen Einzelfall durchgeführt werden und kann abhängig von den verwendeten Hardwarekomponenten des Systems und Ausführungen der Applikation zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.

# 5 Bewertung des Speicherbedarfs

Eine Betrachtung der unterschiedlichen Entity-Relationship-Modelle der diversen Ausbaustufen der innovativen Analysemethodik (siehe Kapitel 4.2.3, 4.3.3, 4.4.3 und 4.5.3) und die der Standard-Software für die FMEA (siehe Kapitel 3.1.3) und FTA (siehe Kapitel 3.2.3) zeigt, dass mit ein paar akkurat gesetzten Änderungen bzw. Erweiterungen die neuartige Analyseform realisiert werden kann. Um einen Zahlenwert für die Erhöhung des Datenspeichers, welche im Rahmen der unkonventionellen Analysetechnik entsteht, zu erhalten, wird in diesem Kapitel eine Abschätzung der benötigten Ressourcen vollführt. Diese wird zum einen quantitativ (Kapitel 5.1) zum anderen qualitativ (Kapitel 5.2) verifiziert. Diese Abschätzung des Speichervolumens der innovativen Analysemöglichkeit im Vergleich zu den herkömmlichen Methoden dient zur Bestätigung der Umsetzbarkeit.

## 5.1 Quantitative Speicherbewertung

Bei der quantitativen Bewertung werden allen verwendeten und in den ER-Diagrammen abgebildeten Attributen Datentypen zugeordnet. Eine Unterscheidung dieser erfolgt nach den jeweiligen Aufgaben bzw. Inhalten der Attribute. Eigenschaften, welche Zahlen beinhalten, werden beispielsweise mit „Byte“ oder „Integer“ charakterisiert. Für die Hinterlegung eines Datums wird der Datentyp „Datetime“ verwendet, für Namen „Character“. Die genutzten Datentypen sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Alle numerischen Datentypen sind „unsigned“, also ohne Vorzeichen behaftet. Der Wertebereich startet also bei null und endet bei einer positiven Zahl.

Tabelle 5.1: Datentypen, [32], [33], [34]

Datentyp	Speicherbedarf		Wertebereich/Darstellungsmöglichkeit	
	Byte	Bit	von	bis
bit	-	1	0	1
unsigned byte	1	-	0	255
unsigned short	2	-	0	65.535
unsigned int	4	-	0	4.294.967.295
float	4	-	6-stellige Gleitkommazahl	
char(n)	n	-	n = Anzahl der Zeichen	
datetime	8		Datum und Uhrzeit	

Alle mit grün hinterlegten Datentypen aus Tabelle 5.1 entsprechen positiven ganzen Zahlen in einem bestimmten Wertebereich. Der Datentyp „float“ stellt eine sechsstellige Gleitkommazahl dar (beispielsweise 17,4397), welche für Wahrscheinlichkeitswerte und Parameter der Verteilungsfunktionen eingesetzt wird. Um einen Namen bzw. einen Text zu vergeben kommt „char“ zum Einsatz. Die Anzahl der verwendeten Zeichen repräsentiert

auch die Anzahl der benötigten Bytes. Für die Hinterlegung eines Zeitstempels wird der Datentyp „datetime“ gebraucht.

### 5.1.1 Vorgehensweise

Alle verwendeten Datentypen der Attribute von Standard-FMEA Tools, der innovativen Analysemethodik und die zur Unterscheidung der Verbindungsvarianten sind in Tabelle 5.2, Tabelle 5.4 und Tabelle 5.5 dargestellt. Das Verfahren bei den verschiedenen Möglichkeiten zur Realisierung der Verbindungen wird dezidiert beschrieben. Die Ermittlung des Speicherbedarfs von herkömmlichen FMEA Werkzeugen und der unkonventionellen Analysetechnik erfolgt exemplarisch anhand der Ausbaustufe 1 der neuartigen Methode.

**Tabelle 5.2: Datentypen zur Berechnung des Speicherbedarfs der unterschiedlichen Verbindungsvarianten**

<b>Verbindungsvariante 1: Entität</b>					
<i>Attribut</i>	<i>Datentyp</i>	<i>Byte</i>	<i>Bit</i>	<i>Wertebereich</i>	
ID	int	4	-	0	4.294.967.295
Element Start	short	2	-	0	65.535
Element Ziel	short	2	-	0	65.535
<b>Verbindungsvariante 2: Tabelle</b>					
	<i>Datentyp</i>	<i>Byte</i>	<i>Bit</i>	<i>Wertebereich</i>	
Tabellenelemente Folgentabelle	short	2	-	0	65.535
Tabellenelemente Ursachentabelle	short	2	-	0	65.535
<b>Verbindungsvariante 3: Matrix</b>					
<i>Attribut</i>	<i>Datentyp</i>	<i>Byte</i>	<i>Bit</i>	<i>Wertebereich</i>	
ID Matrixelemente	short	2	-	0	65.535
Inhalt Matrix	bit	-	1	0	1

- **Verfahren zur Bewertung der Verbindungsvarianten**

Durch die alleinige Anzahl der Komponenten einer FMEA, welche Verbindungen besitzen, entstehen unzählige Möglichkeiten von Verknüpfungen. Die betroffenen Elemente der Standard-FMEA sind die Strukturelemente, Funktionen und Fehler. Die Anzahl der möglichen Verbindungen berechnet sich mit Formel 5.1, wobei m die Anzahl der vorhandenen Elemente und n die Laufvariable repräsentiert.

$$\text{Anzahl mögl. Verbindungen} = \sum_{n=1}^m (n - 1) \quad (5.1)$$

Liegt beispielsweise die Anzahl der Elemente bei  $m=4$  so ergibt sich laut Formel 5.1 für die realisierbaren Verknüpfungen ein Wert von sechs. Die genaue Berechnung ist durch Formel 5.2 angeführt. Die Korrektheit soll ebenso durch Abbildung 5.1 bestätigt werden.

$$\sum_{n=1}^{m=4} (n - 1) = 0 + 1 + 2 + 3 = 6 \quad (5.2)$$

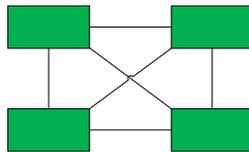


Abbildung 5.1: mögliche Verbindungen bei vier Elementen

Um die tatsächlich vorhandenen Verknüpfungen bei aktuellen FMEAs abschätzen zu können, werden sechs verschiedene, bereits erstellte Analysen betrachtet und ein prozentueller Wert aufgezeigt. Diese Prozentzahl wird nach Formel 5.3 ermittelt.

$$\text{realisierte Verbindungen (in \%)} = \frac{\text{realisierte Verbindungen}}{\text{mögliche Verbindungen}} \cdot 100 \quad (5.3)$$

Bei den zur Kalkulation herangezogenen FMEAs handelt es sich um aufwendige, komplexe Zusammenhänge. In der Regel sind Analysen nicht so aufwendig und besitzen weniger Verzweigungen und Relationen der Elemente. Die Werte aus Tabelle 5.3 stammen aus in der Industrie erstellten FMEAs (Quelle: Magna Powertrain und Werdich Engineering). Bei den Strukturelementen wird auf die Berechnung der verwendeten Verknüpfungen verzichtet, da sich diese definitiv unter den Prozentzahlen der Funktionen und Fehler befinden. Diese Tabelle gibt einen Überblick in welchen Bereich der verwirklichten Verbindungen FMEAs liegen und kann zur weiteren Abschätzung herangezogen werden.

Tabelle 5.3: realisierte Verbindungen bei FMEAs

	FMEA Nr.1	FMEA Nr.2	FMEA Nr.3	FMEA Nr.4	FMEA Nr.5	FMEA Nr.6
<b>Strukturelemente:</b>	414	127	102	205	198	118
<b>Funktionen:</b>	963	631	232	354	318	1.066
mögliche Verbindungen:	463.203	198.765	26.796	62.481	50.403	567.645
davon mit Ursachen-Folgen-Information:	72	162	161	4	110	3
davon mit Folgen-Information:	157	264	57	109	93	14
davon mit Ursachen-Information:	66	73	5	14	12	4
realisierte/mögliche Verbindungen:	0,079%	0,333%	1,433%	0,210%	0,645%	0,004%
<b>Fehlfunktionen:</b>	3.859	1.366	575	1.507	520	4.692
mögliche Verbindungen:	7.444.011	932.295	165.025	1.134.771	134.940	11.005.086
davon mit Ursachen-Folgen-Information:	1.168	365	181	182	108	338
davon mit Folgen-Information:	1.920	662	319	902	354	3.858
davon mit Ursachen-Information:	237	160	38	124	27	178
realisierte/mögliche Verbindungen:	0,060%	0,166%	0,436%	0,122%	0,442%	0,043%

Die Verbindungen mit Ursache-Folgen-Information werden verdoppelt, da eine Verknüpfung in zwei Richtungen besteht. Dieser Wert wird mit den beiden anderen Kategorien („mit Folgen-Information“ und „mit Ursachen-Information“) addiert. Dadurch entsteht die Anzahl der realisierten Verbindungen, welche in Kombination mit den möglichen Verknüpfungen durch Formel 5.3 in weiterer Folge zu den aufgezeigten Prozentwerten führt. Selbst bei diesen komplexen FMEAs mit vielen Zusammenhängen der Komponenten liegen die Werte der tatsächlich hergestellten Verbindungen unterhalb von 2 %.

Bei der Variante mit einer eigenen Entität im ER-Diagramm für die Verbindungen, siehe Abbildung 3.11, werden den Attributen „ID“, „Element Start“ und „Element Ziel“ Datentypen zugeordnet. Bei der ID handelt es sich um eine fortlaufende Nummer zur eindeutigen Identifikation. Dazu wird ein Integer vergeben, da beispielsweise 10.000 Elemente (bereits sehr hoch angesetzt und in der Realität eher nicht vorkommend) einer Anzahl möglicher Verbindungen von 49.995.000 entsprechen. Die Verwirklichung von 1 % dieser Verknüpfungen kann nicht mit dem Datentyp „Short“ nummeriert werden, da dieser nur einen Wertebereich bis 65.535 umfasst. Daher wird der Datentyp mit dem nächst höheren Wertebereich gewählt. Die beiden anderen Attribute geben die Elemente an, welche verknüpft werden. Da die Grundlage 10.000 Elemente sind, welche verknüpft werden können, ist „Short“ ausreichend. Auf die Vergabe eines Datentypen für das Attribut „Variante“ wird für den Vergleich verzichtet, da dieses bei allen drei Möglichkeiten der Verbindungsrealisierung im ER-Modell vorkommt und somit für den Vergleich nicht relevant ist. Ein Berechnungsbeispiel für den Fall, dass 4 % der möglichen 49.995.000 Verbindungen realisiert sind, stellt Formel 5.4 dar.

$$\text{Speicherbedarf} = 49.995.000 \cdot 4\% \cdot (4 \text{ Byte} + 2 \text{ Byte} + 2 \text{ Byte}) = 15.998.400 \text{ Byte} \quad (5.4)$$

Die zweite Variante der Verbindungsdarstellung im Entity-Relationship-Diagramm ist, den betroffenen Komponenten eine Verbindungstabelle anzuheften (siehe Abbildung 3.12 bzw. Kapitel 3.1.2). Nach Absprache mit unterschiedlichen Toolherstellern wird aktuell jedem Element eine Folgen- und Ursachentabelle angefügt in der die Komponenten hinterlegt sind, zu welchen eine Verbindung besteht. Somit ergibt sich eine doppelte Ausführung. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, liegt der Ausgangspunkt wieder bei 10.000 Elementen. Somit ist der Datentyp Short ausreichend für Verbindungsvariante. Das Berechnungsbeispiel aus Formel 5.5 wurde wieder für realisierte 4 % der möglichen 49.995.000 Verbindungen, welche sich aus den 10.000 Elementen ergeben, durchgeführt.

$$\text{Speicherbedarf} = 49.995.000 \cdot 4\% \cdot (2 \text{ Byte} + 2 \text{ Byte}) = 7.999.200 \text{ Byte} \quad (5.5)$$

Die dritte Möglichkeit im ER-Diagramm Verbindungen darzustellen ist eine Verbindungsmatrix, wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben. Abbildung 3.13 zeigt das Datenmodell einer FMEA mit dieser Option. Wie eine solche Verknüpfungsmatrix ausgeführt sein kann,

wird mit Hilfe von Tabelle 3.2 aufgezeigt. Wiederum ist der Ausgangspunkt 10.000 Elemente und daher ein Short zur Nummerierung der Matrixelemente (im Beispiel aus Tabelle 3.2 die ID von „Fehler 1“ bis „Fehler 7“) ausreichend. Der Inhalt einer solchen Verbindungsmatrix ist immer null oder eins und mit dem Datentyp Bit verkörpert (siehe Tabelle 3.2). Der Wert 10.000 aus dem Berechnungsbeispiel Formel 5.6 entspricht den vorhandenen Elementen, welche horizontal und vertikal bei der Matrix eingetragen werden (beispielsweise Fehler 1 bis Fehler 7 von Tabelle 3.2). Da auf beiden Achsen jeweils 10.000 vorhanden sind, ergibt sich der Inhalt mit  $10.000^2$  mal 1 Bit. Um wieder auf die Einheit Byte zu gelangen, erfolgt eine Division mit dem Faktor acht ( $1 \text{ Byte} \triangleq 8\text{Bit}$ ).

$$\text{Speicherbedarf} = (10.000 \cdot 2 \text{ Byte}) \cdot 2 + \frac{(10.000^2 \cdot 1 \text{ Bit})}{8} = 12.540.000 \text{ Byte} \quad (5.6)$$

- **Exemplarisches Verfahren zur Bewertung von Standard-FMEA Werkzeugen und der innovativen Analyseverfahren**

Die neue Darstellung der Strukturelemente und Funktionen als Blockdiagramme hat keinen Mehrbedarf an Speicherplatz zur Folge. Ein weiteres Kernelement dieser Ausbaustufe sind die Ports, welche die Darstellung von Schnittstellen zwischen Strukturelementen und Funktionen erlauben. Zur Berechnung des erforderlichen Datenspeichers werden allen Komponenten dieser beiden Informationsobjekte beispielhaft zehn Ports zugeordnet, davon je fünf Ein- bzw. Ausgangsports. Die Anzahl der somit neu entstehenden Ports ist 14.000. Die Hälfte dieser Ports sind für den Output vorgesehen, also 7.000. Einer dieser Ausgangsports wird mit fünf Eingangsports anderer Systemkomponenten verbunden. Daher ergibt sich eine Anzahl der neu hinzukommenden Verbindungen durch die Verknüpfung der Ports von 35.000. Durch Multiplikation der 14.000 Ports mit dem Speicherbedarf der Datentypen ergibt sich der daraus resultierende Wert des Datenspeichers. Die neu entstehenden Attribute werden ebenso mit dem passenden Datentyp hinterlegt und die Ermittlung des Speicherbedarfs mittels Multiplikation durchgeführt.

Da es bei Analysen mit großem Umfang einige Tausend Ports gibt, wird ein „Short“ für die Vergabe der ID dieser gewählt. Zur Unterscheidung der Art dieser Konnektoren, sind zwei „Bit“ ausreichend, da sie nur als Input-, Output- oder bidirektionale Ports fungieren können (drei Optionen bei einem Wertebereich von null bis 3). Die Typunterscheidung ist mit dem Datentyp „Byte“ mehr als ausreichend dargestellt, da es somit 256 verschiedene Möglichkeiten gibt. Der Name der einzelnen Ports wird mit 25 Zeichen begrenzt. Die beiden neu erstellten Attribute im Entity-Relationship-Modell der Ausbaustufe eins sind die Aufgabe (mit 25 Zeichen begrenzte Beschreibung) und Klassifizierung der Verbindung. Hierbei besteht die Möglichkeit aus 256 verschiedenen Typen zu wählen, da der vergebene Datentyp „Byte“ dies ohne weiteres zulässt.

Tabelle 5.4: Datentypen zur Berechnung des Speicherbedarfs von Standard-FMEAs

Entität: <b>Strukturelement</b>					
Anzahl: 400					
Attribut	Datentyp	Speicherbedarf		Wertebereich	
		Byte	Bit	von	bis
ID	short	2		0	65.535
Name Strukturelement	char(50)	50		-	-
Variante	byte	1		0	255
Anzahl Vorkommnisse	byte	1		0	255
Entität: <b>Funktion</b>					
Anzahl: 1.000					
Attribut	Datentyp	Speicherbedarf		Wertebereich	
		Byte	Bit	von	bis
ID	short	2		0	65.535
Name Funktion	char(50)	50		-	-
Variante	byte	1		0	255
Anzahl Vorkommnisse	byte	1		0	255
Entität: <b>Fehler</b>					
Anzahl: 3.900					
Attribut	Datentyp	Speicherbedarf		Wertebereich	
		Byte	Bit	von	bis
ID	short	2		0	65.535
Name Fehler	char(50)	50		-	-
Variante	byte	1		0	255
Anzahl Vorkommnisse	byte	1		0	255
B-Max	byte	1		0	255
B	byte	1		0	255
Lambda in %	byte	1		0	255
Entität: <b>Maßnahmenstand</b>					
Anzahl: 10.000					
Attribut	Datentyp	Speicherbedarf		Wertebereich	
		Byte	Bit	von	bis
ID	short	2		0	65.535
Variante	byte	1		0	255
Datum	datetime	8		-	-
A	byte	1		0	255
E	byte	1		0	255
RPZ	short	2		0	65.535
Entität: <b>Maßnahme</b>					
Anzahl: 13.000					
Attribut	Datentyp	Speicherbedarf		Wertebereich	
		Byte	Bit	von	bis
ID	short	2		0	65.535
Variante	byte	1		0	255
Datum	datetime	8		-	-
Name Maßnahme	char(50)	50		0	255
Anzahl Vorkommnisse	byte	1		0	255
Entdeckung/Vermeidung	byte	1		0	255

**Tabelle 5.5: Datentypen zur Berechnung des Speicherbedarfs der innovativen Analyseverfahren**

Entität: <b>Port</b>					
Anzahl: 14.000					
Attribut	Datentyp	Speicherbedarf		Wertebereich	
		Byte	Bit	von	bis
ID	short	2	-	0	65.535
I/O/beides	-	-	2	0	3
Typ	byte	1	-	0	255
Name Port	char(25)	25	-	-	-

Entität: <b>Verbindung</b>					
Anzahl (neu hinzugekommen): 35.000					
Attribut	Datentyp	Speicherbedarf		Wertebereich	
		Byte	Bit	von	bis
Aufgabe Verbindung	char(25)	25	-	-	-
Klassifizierung Verbindung	byte	1	-	0	255

Entität: <b>Funktion</b>					
Anzahl: 1.000					
Attribut	Datentyp	Speicherbedarf		Wertebereich	
		Byte	Bit	von	bis
diagnostic coverage_informativ	byte	1	-	0	255

Entität: <b>Fehler</b>					
Anzahl: 3.900					
Attribut	Datentyp	Speicherbedarf		Wertebereich	
		Byte	Bit	von	bis
Typ/log. Gatter & latent Flag	byte	1	-	0	255
Wahrscheinlichkeitswert	float	4	-	6-stellig	
Wahrscheinlichkeitsmodell	byte	1	-	0	255
Parameter	float	4	-	6-stellig	
diagnostic coverage_real	byte	1	-	0	255
Diagnoselücke Flag	bit	-	1	0	1

Entität: <b>Strukturelement, Funktion, Fehler, Verbindung, Port</b>					
Attribut	Datentyp	Speicherbedarf		Wertebereich	
		Byte	Bit	von	bis
ID_Optimierungsmaßnahme	short	2	-	0	65.535
gelöscht Flag	bit	-	1	0	1

### 5.1.2 Vergleich der Verbindungsvarianten

Bei der Anfertigung der Datenmodelle konventioneller FMEA Tools liegt die Unterscheidung der ER-Diagramme bei der Realisierung der Verbindungen (siehe Kapitel 3.1.2 bzw. Abbildung 3.11, Abbildung 3.12 und Abbildung 3.13). Daher werden auch bei der Speicherbewertung diese Möglichkeiten berücksichtigt und einzeln bewertet.

Die Berechnung des Speicherbedarfs der verschiedenen Verbindungsvarianten ist für 0 %, 1 %, 4 % und 10 % der realisierten Verbindungen durchgeführt und in Tabelle 5.6 angeführt. Abbildung 5.2 repräsentiert die Darstellung der erhaltenen Zahlen als Grafik.

Tabelle 5.6: Ergebnis der unterschiedlichen Verbindungsvarianten

realisierte Verbindungen	Var.1: Verbindungsentität	Var.2: Verbindungstabelle	Var.3: Verbindungsmatrix
	<i>Byte</i>	<i>Byte</i>	<i>Byte</i>
10%	39.996.000	19.998.000	12.540.000
4%	15.998.400	7.999.200	12.540.000
1%	3.999.600	1.999.800	12.540.000
0%	0	0	12.540.000

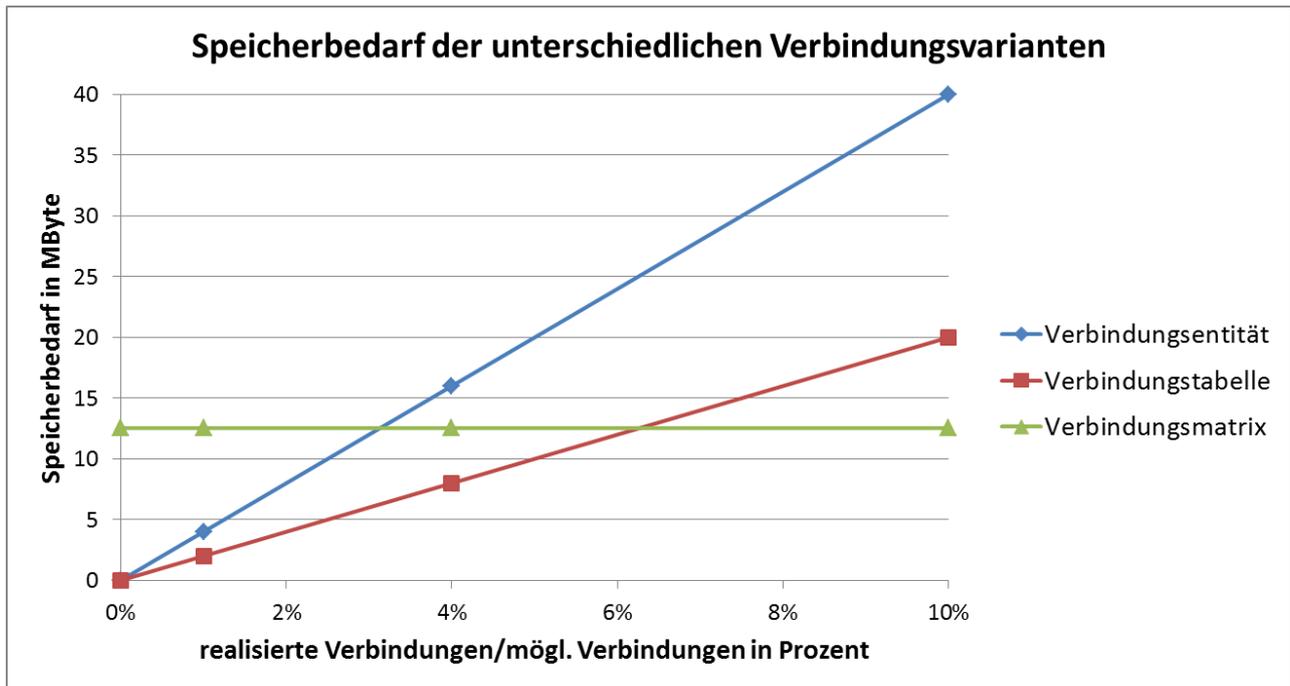


Abbildung 5.2: Ergebnis der unterschiedlichen Verbindungsvarianten

Hierbei ist die Stagnation des Speicherbedarfs bei der Möglichkeit der Verknüpfungsmatrix zu erkennen. Unabhängig von den realisierten Verbindungen ist ein Eintrag in die Matrize zwingend erforderlich, da ansonsten ein undefinierter Zustand entsteht. Da gemäß Tabelle 5.3 die tatsächlich vorhandenen Kombinationen im unteren Prozentbereich liegen (unterhalb 2 %) ist diese Realisierung speicherbedarfstechnisch von Nachteil. Beim Vergleich der anderen beiden Variante ist der Unterschied um den Faktor zwei erkennbar.

### 5.1.3 Standard FMEA

Die Speicherbedarfsabschätzung konventioneller FMEA Tools dient in weiterer Folge zur Gegenüberstellung mit dem Ressourcenbedarf der innovativen Analysetechnik. Dieser Vergleich gibt Auskunft über die Realisierbarkeit der neuartigen Methode. Zunächst werden alle in Abbildung 3.11 enthaltenen Attribute, mit Ausnahme der zur Entität Verbindung gehörenden, mit den passenden Datentypen bestückt, um in weiterer Folge einen quantitativen Wert des Speicherbedarfs zu erhalten. Auf die Möglichkeiten Verbindungen zu realisieren, wird erst im nächsten Schritt eingegangen. Abschließend werden beide Einschätzungen kombiniert und das finale Ergebnis formuliert.

- **Speicherbewertung ohne Verbindungen**

Der Speicherbedarf von Standard FMEA Tools ohne Berücksichtigung der Verbindungen liegt bei ungefähr 1,3 MB. Die Einzelergebnisse für die unterschiedlichen Entitäten sind durch Tabelle 5.7 repräsentiert.

**Tabelle 5.7: quantitative Speicherbewertung konventioneller FMEA Software ohne Berücksichtigung der Verbindungen**

Entität:	<b>Strukturelement</b>	Entität:	<b>Maßnahmenstand</b>
Speicherbedarf:	21.600 Byte	Speicherbedarf:	150.000 Byte
Entität:	<b>Funktion</b>	Entität:	<b>Maßnahme</b>
Speicherbedarf:	54.000 Byte	Speicherbedarf:	819.000 Byte
Entität:	<b>Fehler</b>	Speicherbedarf	1.266.900 Byte
Speicherbedarf:	222.300 Byte	gesamt	

- **Speicherbewertung inklusive Verbindungen**

Die zur Ermittlung des Speicherbedarfs erforderlichen Prozentwerte der realisierten Verbindungen aus Tabelle 5.8, sind eine Kombination aus den Zahlen der sechs verschiedenen FMEAs aus Tabelle 5.3. Die Annahme dieser Werte ist eher konservativ, um die Korrektheit der Abschätzung zu gewährleisten.

**Tabelle 5.8: quantitative Speicherbewertung konventioneller FMEA Software inkl. Berücksichtigung der Verbindungen**

Entität: <b>Strukturelement</b>			
Anzahl: 400			
Anzahl mögl. Verbindungen: 79.800			
realisierte Verbindungen	Var.1: Verbindungsentität	Var.2: Verbindungstabelle	Var.3: Verbindungsmatrix
10,0%	63.840 Byte	31.920 Byte	21.600 Byte
Entität: <b>Funktion</b>			
Anzahl: 1.000			
Anzahl mögl. Verbindungen: 499.500			
realisierte Verbindungen	Var.1: Verbindungsentität	Var.2: Verbindungstabelle	Var.3: Verbindungsmatrix
1,0%	39.960 Byte	19.980 Byte	129.000 Byte
Entität: <b>Fehler</b>			
Anzahl: 3.900			
Anzahl mögl. Verbindungen: 7.603.050			
realisierte Verbindungen	Var.1: Verbindungsentität	Var.2: Verbindungstabelle	Var.3: Verbindungsmatrix
0,5%	304.122 Byte	152.061 Byte	1.916.850 Byte
<b>Speicherbedarf aller vorkommenden Attribute exkl. Verbindungen</b>			
1.266.900 Byte			
<b>Speicherbedarf inkl. Attributen &amp; Verbindungen</b>			
	Var.1: Verbindungsentität	Var.2: Verbindungstabelle	Var.3: Verbindungsmatrix
gesamt:	1.674.822 Byte	1.470.861 Byte	3.334.350 Byte

Die erhaltenen Endwerte des Speicherbedarfs herkömmlicher FMEA Tools in Abhängigkeit der Realisierung von Verbindungen, liegen bei der Variante der Verbindungsentität bei ca. 1,7 MB, bei der Verbindungstabelle bei ca. 1,5 MB und bei der Verbindungsmatrix bei ungefähr 3,3 MB. Die Majorität dieser Werte (jeweils 1,2 MB) resultiert aus dem Ressourcenverbrauch aller Attribute. Die Art der Umsetzung von Verknüpfungen ist somit nicht dermaßen relevant wie erwartet (mit Ausnahme der Variante mit den Verbindungsmatrizen). Nach Absprache mit namhaften Toolherstellern ist aktuell die Ausführung mit Verbindungstabellen bei den Analysewerkzeugen realisiert. Daher bildet dieser Wert die Referenz für den Vergleich mit der innovativen Methodik.

### 5.1.4 Innovative Analysemethodik Ausbaustufe 1

Bei der unkonventionellen Analysetechnik ist die Grundlage das ER-Modell aus Abbildung 3.11 mit der Verbindungsrealisierung in Form einer eigenen Entität. Die Bewertung der erforderlichen Speicherressourcen wurde in Kapitel 5.1.3 bereits ausgeführt. Der dadurch resultierende, benötigte Speicherbedarf dieser Variante liegt bei ca. 1,7 MB. Der exakte Wert ist in Tabelle 5.8 enthalten. Zu dieser Zahl wird sukzessive der Speicherbedarf von den einzelnen Ausbaustufen der neuen Methode addiert. Die Anzahl der zur Berechnung herangezogenen Informationsobjekte (Strukturelemente, Funktionen, Fehler, Maßnahmenstände, Maßnahmen und Verbindungen) bleibt aus Gründen der Vergleichbarkeit unverändert (siehe Tabelle 5.7).

Das Resultat ist in Tabelle 5.9 dargestellt. Der gesamte Speicherbedarf von Ausbaustufe 1 der neuartigen Methodik liegt bei ca. 3,3 MB. Die Speicherbedarfserhöhung steht in Relation zu dem Wert für die Variante zwei der Verbindungsverwirklichung aus Tabelle 5.8.

**Tabelle 5.9: quantitative Speicherbewertung der innovativen Analysemethode, Ausbaustufe 1**

Entität:	<b>Port</b>	<b>gesamter Speicherbedarf</b>
Anzahl:	14.000	<b>Ausbaustufe 1</b>
Speicherbedarf:	395.500 Byte	3.260.322 Byte
Entität:	<b>Verbindung</b>	<b>Speicherbedarfserhöhung um</b>
Anzahl:	35.000	121,7 %
Speicherbedarf:	1.190.000 Byte	1.789.461 Byte

### 5.1.5 Innovative Analysemethodik Ausbaustufe 2

Das Ergebnis der Ermittlung des Speicherbedarfs von Ausbaustufe 2 der innovativen Analysemethode ist in Tabelle 5.10 erfasst. Nach Integration der Funktionen dieses Innovationslevels ergibt sich ein gesamter Speicherbedarf von ungefähr 3,7 MB. Dies entspricht einer Erhöhung um ca. 2,3 MB bzw. 154,4 % im Vergleich zum erforderlichen Speicher herkömmlicher FMEA Tools mit den Verbindungstabellen. Durch das Ergebnis wird

die Realisierbarkeit der neuen Analysemethode im Bezug auf den Speicherbedarf aufgezeigt.

**Tabelle 5.10: quantitative Speicherbewertung der innovativen Analysemethode, Ausbaustufe 1 und 2**

Entität:	<b>Fehler</b>	<b>gesamter Speicherbedarf</b>
Anzahl:	3.900	<b>Ausbaustufe 1 &amp; 2</b>
Speicherbedarf:	101.400 Byte	3.741.722 Byte
Entität:	<b>Verbindung</b>	<b>Speicherbedarfserhöhung um</b>
Anzahl:	38.000	154,4 %
Speicherbedarf:	380.000 Byte	2.270.861 Byte

### 5.1.6 Innovative Analysemethodik Ausbaustufe 3

Der durch die Integration der Funktionen von Ausbaustufe 3 der innovativen Analysemethodik erhaltene Wert des Speicherbedarfs liegt bei 3,7 MB. Durch die Implementierung der Anforderung aus diesem Ausbaugrad entsteht eine nicht relevante Erhöhung der benötigten Speicherressourcen im Vergleich zu der vorangegangenen Stufe. Tabelle 5.10 zeigt eine Speichrerhöhung um 154,4 % für den zweiten Entwicklungsgrad. Für die dritte Stufe der Entwicklung einer unkonventionellen Analysetechnik zeigt Tabelle 5.11 mit einer Speicherbedarfserhöhung von 154,7 % nur geringfügig Steigerung. Dieser Wert repräsentiert die Zunahme des Speicherverbrauchs im Vergleich zu dem der konventionellen FMEA Tools mit der Realisierung der Verbindungen als Tabelle.

**Tabelle 5.11: quantitative Speicherbewertung der innovativen Analysemethode, Ausbaustufe 1, 2 und 3**

Entität:	<b>Funktion</b>	<b>gesamter Speicherbedarf</b>
Anzahl:	1.000	<b>Ausbaustufe 1, 2 &amp; 3</b>
Speicherbedarf:	1.125 Byte	3.746.747 Byte
Entität:	<b>Fehler</b>	<b>Speicherbedarfserhöhung um</b>
Anzahl:	3.900	154,7 %
Speicherbedarf:	3.900 Byte	2.275.886 Byte

### 5.1.7 Innovative Analysemethodik Ausbaustufe 4

Der resultierende Speicherbedarf der innovativen Analysemethode aus Tabelle 5.12 inklusive aller vier Ausbaustufen beträgt 3,8 MB. Durch diesen vergleichsweise geringen Wert wird die Umsetzbarkeit der neuen Analysetechnik im Bezug auf die Speicherressourcen bestätigt. Der hinzukommende Speicherbedarf im Vergleich zur Standard FMEA mit der Variante der Verbindungstabelle beträgt ungefähr 2,3 MB oder 156 %. Die unkonventionelle Technik zur Analyse komplexer Systeme integriert aber auch die herkömmliche FTA

Methodik. Würde auch dieser Bedarf an Speicherkapazitäten berücksichtigt, würde die Steigerung noch geringer ausfallen.

**Tabelle 5.12: quantitative Speicherbewertung der innovativen Analysemethode, Ausbaustufe 1, 2, 3 und 4**

Entität:	<b>Str-El, Funktion, Fehler, Port, Verb.</b>	<b>gesamter Speicherbedarf</b>
Anzahl:	8.409	<b>Ausbaustufe 1, 2, 3 &amp; 4</b>
Speicherbedarf:	8.049 Byte	3.765.156 Byte
	<b>Optimierungsmaßnahmen</b>	<b>Speicherbedarfserhöhung um</b>
Anzahl:	1.000	156,0 %
Speicherbedarf:	10.000 Byte	2.294.295 Byte

## 5.2 Qualitativer Vergleich bestehender Tools mit der innovativen Analysemethode

Eine Betrachtung der Entity-Relationship-Modelle herkömmlicher FMEA bzw. FTA Tools und die der Entwicklungsstufen der innovativen Analysemethodik zeigt, dass mit geringen, gezielt durchgeführten Änderungen der konventionellen Technik, eine neuartige und ganzheitliche Art der Analyse realisiert werden kann. Da die entwickelte Methodik auf den Grundelementen der Standard FMEA basiert und nur durch die gezielte Positionierung hinzukommender Features abgewandelt wird, siehe Abbildung 3.11 und Abbildung 4.17, ist eine gute Vergleichbarkeit vorhanden. Abbildung 5.3 stellt den qualitativen Vergleich von Standardanalysemethoden mit dem innovativen Konzept dar. Hierzu werden Punkte von null bis zehn vergeben, wobei zehn für den größten und null für den geringsten Speicherbedarf bzw. Analyseumfang steht. Als Vergleichskriterien werden der geschätzte Speicherbedarf für FTA und SysML Blockdiagramme verwendet. Die benötigten Speicherressourcen von Standard FMEA Applikationen und der innovativen Analysemethodik sind in Kapitel 5.1 quantifiziert. Der zweite zur Gegenüberstellung verwendete, in Abbildung 5.3 aufgezeigte Aspekt ist die Darstellungsmöglichkeit bzw. der Analyseumfang der beschriebenen Techniken. Der Anstieg des erforderlichen Speicherbedarfs relativiert sich angesichts des wachsenden Analyseumfangs und dessen Darstellungsmöglichkeiten, [10], [11].

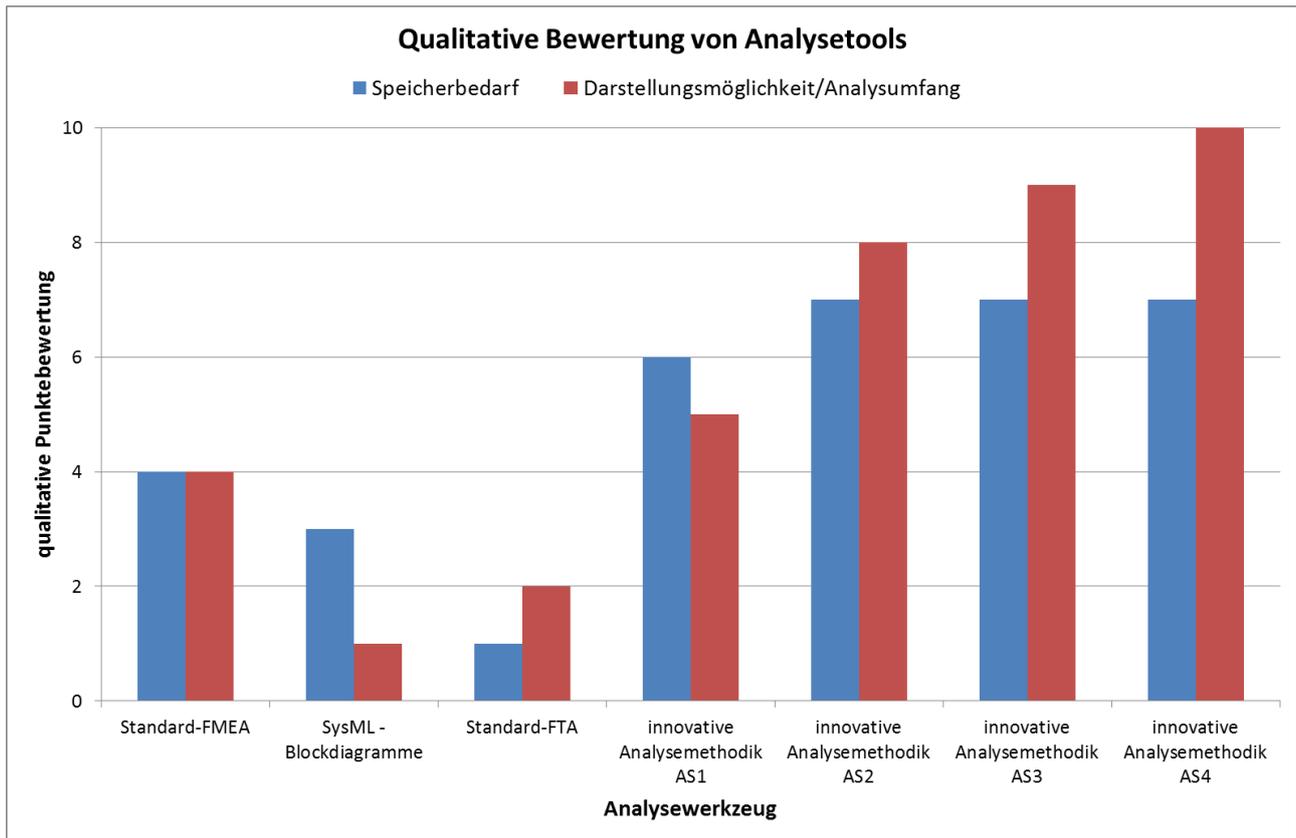


Abbildung 5.3: qualitativer Vergleich von bestehenden Analysewerkzeugen mit der innovativen Technik, [10]

Die qualitative Bewertung des Speicherbedarfs und des Analyseumfangs bzw. der Darstellungsmöglichkeiten von herkömmlichen Tools und der innovativen Analysemethode zeigt eine erhebliche Steigerung des Umfangs der Analyse bei der neuartigen Technik, obwohl der Bedarf an Speicherressourcen annähernd stagniert. Durch die Zusammenführung der Werte von FMEA, FTA und SysML-Blockdiagrammen würde für den Speicherbedarf acht, bei der Darstellungsmöglichkeit sieben von zehn möglichen Punkten resultieren. Der Vergleich mit Ausbaulevel vier der unkonventionellen Analysetechnik bestätigt einen Anstieg der Darstellungsmöglichkeit und eine Senkung des benötigten Speicherbedarfs. Die Verminderung der benötigten Speicherressourcen entsteht, da nicht jede Komponente eines Gesamtsystems einzeln definiert werden muss, sondern die grundlegenden Beschreibungen wie beispielsweise die ID nur einmal hinterlegt wird. Durch die Zusammenführung der Funktionen von den drei Standard Tools im Rahmen der innovativen Analysemethode und der Erweiterung um zusätzliche Möglichkeiten entsteht beim Analyseumfang ein Wert von zehn, welcher um drei höher liegt als die Summierung der einzelnen Werte der Standard Applikationen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Entwicklung und Realisierung neuer, immer komplexer werdender Antriebstechnologien und Fahrzeugkonzepte haben eine steigende Elektrifizierung des Antriebsstranges als Konsequenz. Der hohe Vernetzungsgrad der Systeme und Komponenten der Antriebsstränge verlangt nach einer innovativen Analysemöglichkeit in der Entwicklung mechatronischer Module. Die konventionellen Analysetechniken stoßen an deren Grenzen und erzeugen somit eine erhöhte Gefahr, essenzielle Sicherheits-, Funktions- und Ausfallmechanismen nicht korrekt erfassen zu können und somit die notwendigen, gezielt eingesetzten Maßnahmen nicht in Gang setzen zu können. Die exakte Analyse und Abbildung von sicherheitskritischen Komponenten ist auf Grund der steigenden Qualitätsrichtlinien und -vorgaben unumgänglich. Es dürfen keine riskanten Diagnoselücken durch die Analysetechnik entstehen bzw. Zusammenhänge einzelner Einheiten im System verloren gehen. Die neu gewonnenen Möglichkeiten und Darstellungen von Elementen bei der Entstehung von mechatronischen Bauteilen durch die innovative Analysemethodik sind zwingend erforderlich. Diese unkonventionelle Art der Analyse mit dem zugehörigen Datenmodell zeigt durch eine gezielte Weiterentwicklung der bereits bestehenden Applikationen eine Reihe an neue Features auf, mit welchen das Gesamtsystem und dessen erhöhte Komplexität ganzheitlich dargestellt werden kann. Insbesondere die Datenmodellierung und deren Bewertung im Hinblick auf die damit entstehenden Speicherressourcen verdeutlicht die Machbarkeit der praktischen Umsetzung mit einem kalkulierbaren Aufwand. Alle neu entstandenen Möglichkeiten, welche das Datenmodell der innovativen Analysemethodik bietet, sind optional. Eine herkömmliche Nutzung der unkonventionellen Analyseart für Anwendungen mit geringeren Anforderungen an die Betrachtungstiefe ist ebenso gewährleistet wie eine progressive Verwendung.

Ausblickend wäre die Anwendung der innovativen Analysemethodik an einem Beispielsystem von großem Interesse. Da aber aktuell noch kein Tool mit allen neuen Features entwickelt wurde, ist dies leider nicht möglich und eine Aussage über die unkonventionelle Technik der Analyse im täglichen Einsatz wäre somit unseriös. Die Weiterentwicklung der herkömmlichen FMEA Applikationen geht laut Toolherstellern bereits in die Richtung der in dieser Arbeit erwähnten perspektivischen Möglichkeiten, Systeme inklusive deren Umgebung und vollen Funktionsumfang zu betrachten. Die Verwirklichung der innovativen Analysemethodik in einem Tool für den Endnutzer wird aber noch einige Zeit in Anspruch nehmen.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Mercedes Modelle (Modell 170 S oben links; Modell S-Klasse 2012 oben rechts; Modell S-Klasse 1990 unten), [4], [5], [6] .....	- 1 -
Abbildung 2.1: Einteilung der Zuverlässigkeitsanalysen, [1] .....	- 3 -
Abbildung 2.2: Möglichkeiten der Fehlerbaumanalyse, [12] .....	- 5 -
Abbildung 2.3: „best practice“ Reihenfolge zur Erstellung einer FMEA nach dem DGQ Band, [18] .....	- 8 -
Abbildung 2.4: Strukturbaum einer FMEA für ein Schiebetürsystem, [3] .....	- 9 -
Abbildung 2.5: Schematische Darstellung eines Funktionsnetzes mit Ursachen- und Folge-Funktionen .....	- 10 -
Abbildung 2.6: Funktionsnetz einer FMEA für ein Schiebetürsystem, [3] .....	- 11 -
Abbildung 2.7: Funktionsnetz einer FMEA für ein Schiebetürsystem; fokussiert auf Funktion „Signal abhängig von Türgriffposition liefern“, vgl. [3] .....	- 12 -
Abbildung 2.8: Funktionsnetz einer FMEA für ein Schiebetürsystem; fokussiert auf Funktion „Drehmoment abhängig von Phasenströmen erzeugen“, vgl. [3] .....	- 12 -
Abbildung 2.9: Schematische Darstellung eines Fehlernetzes mit Ursachen und Folgen .....	- 13 -
Abbildung 2.10: Ishikawa-Diagramm .....	- 14 -
Abbildung 2.11: Fehlernetz einer FMEA für ein Schiebetürsystem; fokussiert auf Fehler „Signal geliefert ohne Anforderung“, vgl. [3] .....	- 14 -
Abbildung 2.12: Fehlernetz einer FMEA für ein Schiebetürsystem, [3] .....	- 15 -
Abbildung 2.13: Fehlerbaum anhand des Beispiels „Titanic“ .....	- 20 -
Abbildung 2.14: UML-Funktionsblockdiagramm „Schiebetürsystem“, [22] .....	- 21 -
Abbildung 2.15: Vergleich der Elemente von UML- und ERM-Modellen, [23] .....	- 22 -
Abbildung 2.16: Entität (Entitätstyp) .....	- 24 -
Abbildung 2.17: Attribut am Beispiel „StudentIn“ .....	- 25 -
Abbildung 2.18: Schlüsselattribut am Beispiel „StudentIn“ .....	- 25 -
Abbildung 2.19: mehrwertiges Attribut am Beispiel „StudentIn“ .....	- 26 -
Abbildung 2.20: abgeleitetes Attribut am Beispiel „StudentIn“ .....	- 26 -
Abbildung 2.21: Entität inklusive Attributen am Beispiel „StudentIn“ .....	- 27 -
Abbildung 2.22: 1:1 Beziehung am Beispiel „StudentIn“ .....	- 27 -
Abbildung 2.23: Erläuterung 1:1 Beziehungstyp, [27] .....	- 28 -
Abbildung 2.24: 1:n Beziehung am Beispiel „StudentIn“ .....	- 28 -
Abbildung 2.25: Erläuterung 1:n Beziehungstyp, [27] .....	- 29 -
Abbildung 2.26: n:m Beziehung am Beispiel „StudentIn“ .....	- 29 -
Abbildung 2.27: Erläuterung n:m Beziehungstyp, [27] .....	- 29 -
Abbildung 2.28: min-max-Notation bei Beziehungstypen am Beispiel „StudentIn“ .....	- 30 -
Abbildung 2.29: Datenmodell am Beispiel „StudentIn“ .....	- 31 -
Abbildung 3.1: Vererbung der Bedeutung (B-Max) eines Fehlers .....	- 33 -
Abbildung 3.2: ERD von aktuellen FMEA-Tools für Strukturelemente .....	- 35 -
Abbildung 3.3: ERD von aktuellen FMEA-Tools für Funktionen .....	- 36 -

Abbildung 3.4: ERD von aktuellen FMEA-Tools für Fehler .....	- 37 -
Abbildung 3.5: ERD von aktuellen FMEA-Tools für Maßnahmenstand und Maßnahme ..	- 38 -
Abbildung 3.6: Beispiel für eine Verbindungsentität .....	- 40 -
Abbildung 3.7: Variante zur Verbindung mit Entität Verbindung .....	- 41 -
Abbildung 3.8: Beispiel für eine Verbindungstabelle .....	- 41 -
Abbildung 3.9: Variante zur Verbindung mit Verbindungstabellen .....	- 42 -
Abbildung 3.10: Variante zur Verbindung mit Verbindungsmatrix .....	- 43 -
Abbildung 3.11: ER-Modell aktueller FMEA-Tools mit Verbindungsentität, vgl. [10].....	- 44 -
Abbildung 3.12: ER-Modell aktueller FMEA-Tools mit Verbindungstabelle .....	- 45 -
Abbildung 3.13: ER-Modell aktueller FMEA-Tools mit Verbindungsmatrix .....	- 46 -
Abbildung 3.14: Richtig und Falsch erstellter Fehlerbaum .....	- 49 -
Abbildung 3.15: ER-Modell aktueller FTA-Tools mit Attribut „logisches Gatter“, [10].....	- 51 -
Abbildung 3.16: ER-Modell aktueller FTA-Tools mit der Entität „logisches Gatter" .....	- 51 -
Abbildung 3.17: UML-Strukturblockdiagramm „Schiebetürsystem“, [22] .....	- 53 -
Abbildung 4.1: ERD der Entitäten-Struktur von Standard-FMEA-Tools, vgl. [10] .....	- 54 -
Abbildung 4.2: modularer Aufbau der Strukturelemente der innovativen Analyse- methode, [10] .....	- 56 -
Abbildung 4.3: modularer Aufbau der Strukturblockdiagramme bei der innovativen Analyse- methode, [3] .....	- 60 -
Abbildung 4.4: Funktionsblockdiagramme der ersten und zweiten Ebene, [3] .....	- 61 -
Abbildung 4.5: Funktionsblockdiagramm der dritten Ebene, [3] .....	- 61 -
Abbildung 4.6: ER-Modell der innovativen Analyse- methode, Ausbaustufe 1, [10] .....	- 63 -
Abbildung 4.7: Fehlernetz der innovativen Analyse- methodik, vgl. [3] .....	- 66 -
Abbildung 4.8: Fehlerfortpflanzung über einen Funktionszweig, vgl. [10] .....	- 67 -
Abbildung 4.9: Fehlerfortpflanzung über mehrere Funktionszweige .....	- 68 -
Abbildung 4.10: Fehlerfortpflanzung über bestimmten Funktionszweig .....	- 68 -
Abbildung 4.11: ER-Modell der innovativen Analyse- methode, Ausbaustufe 1 und 2 .....	- 69 -
Abbildung 4.12: Beispiel zur neuen graphischen Darstellung des Fehlernetzes, vgl. [3] ..	- 70 -
Abbildung 4.13: Diagnosedeckungsgrad – Diagnostic coverage .....	- 71 -
Abbildung 4.14: Fehlernetz der neuen graphischen Darstellung, vgl. [3] .....	- 72 -
Abbildung 4.15: ER-Modell der innovativen Analyse- methode, Ausbaustufe 1, 2 und 3....	- 74 -
Abbildung 4.16: Funktionsblockdiagramm nach der Optimierungsmaßnahme, vgl. [22] ..	- 76 -
Abbildung 4.17: ER-Modell der innovativen Analyse- methode, Ausbaustufe 1, 2, 3 und 4	- 77 -
Abbildung 5.1: mögliche Verbindungen bei vier Elementen .....	- 81 -
Abbildung 5.2: Ergebnis der unterschiedlichen Verbindungsvarianten .....	- 86 -
Abbildung 5.3: qualitativer Vergleich von bestehenden Analysewerkzeugen mit der innovativen Technik, [10] .....	- 91 -
Abbildung A.1: Entity-Relationship-Modell der innovativen Analyse- methodik, Ausbaustufe 1, 2, 3, und 4 inkl. Attribute der Standard-FMEA .....	VII

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Änderungen im Antriebsstrang im Zuge der Hybridisierung bzw. Elektrifizierung, [10].....	- 2 -
Tabelle 2.1: Symbole der Fehlerbaumanalyse nach DIN 25424, Teil 1, [12].....	- 18 -
Tabelle 2.2: Symbole der Fehlerarten und logischen Gattern .....	- 19 -
Tabelle 2.3: Tabelle als Datenschema.....	- 23 -
Tabelle 2.4: gefülltes Datenschema.....	- 23 -
Tabelle 3.1: Vor- und Nachteile der Verbindungsvarianten.....	- 39 -
Tabelle 3.2: Beispiel für eine Verbindungsmatrix .....	- 43 -
Tabelle 5.1: Datentypen, [32], [33], [34].....	- 79 -
Tabelle 5.2: Datentypen zur Berechnung des Speicherbedarfs der unterschiedlichen Verbindungsvarianten.....	- 80 -
Tabelle 5.3: realisierte Verbindungen bei FMEAs .....	- 81 -
Tabelle 5.4: Datentypen zur Berechnung des Speicherbedarfs von Standard-FMEAs ....	- 84 -
Tabelle 5.5: Datentypen zur Berechnung des Speicherbedarfs der innovativen Analyse­methode.....	- 85 -
Tabelle 5.6: Ergebnis der unterschiedlichen Verbindungsvarianten.....	- 86 -
Tabelle 5.7: quantitative Speicherbewertung konventioneller FMEA Software ohne Berücksichtigung der Verbindungen .....	- 87 -
Tabelle 5.8: quantitative Speicherbewertung konventioneller FMEA Software inkl. Berücksichtigung der Verbindungen .....	- 87 -
Tabelle 5.9: quantitative Speicherbewertung der innovativen Analyse­methode, Ausbaustufe 1 .....	- 88 -
Tabelle 5.10: quantitative Speicherbewertung der innovativen Analyse­methode, Ausbaustufe 1 und 2 .....	- 89 -
Tabelle 5.11: quantitative Speicherbewertung der innovativen Analyse­methode, Ausbaustufe 1, 2 und 3.....	- 89 -
Tabelle 5.12: quantitative Speicherbewertung der innovativen Analyse­methode, Ausbaustufe 1, 2, 3 und 4.....	- 90 -

# Literaturverzeichnis

- [1] P. Göhner, B. Bertsche, U. Jensen, W. Schinköthe und H.-J. Wunderlich: „Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme“, Springer-Verlag, 2009, ISBN 978-3-540-85089-2.
- [2] M. Werdich: „FMEA – Einführung und Moderation“, 2. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, 2012, ISBN 978-3-8348-1787-7.
- [3] A. Schnellbach und M. Werdich: „*FMEA Evolution*“, FMEA-Forum, Osnabrück, Deutschland, 2012.
- [4] „autogaleria.hu“, [Online]. Available: <http://www.autogaleria.hu/kl.php?kid=55909-Mercedes-170S-Cabriolet-A-1949-1951>. [Zugriff am 25 Februar 2015].
- [5] „automativ.de“, [Online]. Available: <http://www.automativ.de/wp-content/uploads/2012/01/mercedes-s-klasse-mj2012-img-1.jpg>. [Zugriff am 25 Februar 2015].
- [6] „Mercedes-Benz Deutschland“, [Online]. Available: [http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc\\_germany\\_website/de/home\\_mpc/passengercars/home/world/entertainment/pictures.flash.html](http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/passengercars/home/world/entertainment/pictures.flash.html). [Zugriff am 20 März 2015].
- [7] M. Tschöke: „*Informationsreihe MTZ Wissen – Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs*“, *Motortechnische Zeitschrift MTZ 05/2012, 73. Jahrgang*, Springer.
- [8] A. Kamper, D. Vallée und A. Schnettler: „Elektromobilität – Grundlagen einer Zukunftstechnologie“, Springer Verlag, 2013, ISBN 978-3-642-31986-0.
- [9] H. Wallentowitz und A. Freialdenhoven: „Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges – Technologien, Märkte und Implikationen“, 2. Auflage, Springer Verlag, 2011, ISBN 978-3-8348-9910-1.
- [10] M. Ernst, P. Dallinger, J. Fabian, M. Hirz und A. Schnellbach: „*Innovative Analyseverfahren in der Entwicklung mechatronischer Systeme am Beispiel elektrifizierter Antriebsstränge*“, e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, 3.2015, Springer Verlag, 2015, DOI 10.1007/s00502-015-0292-7.

- [11] M. Ernst, P. Dallinger, M. Hirz, J. Fabian und A. Schnellbach: „*Potentiale einer innovativen Analysemethodik und deren Datenmodellierung*“, FMEA konkret, 2/2014, M. Werdich, 2014, ISSN 2198-6827.
- [12] H. Brüggemann und P. Bremer: „Grundlagen Qualitätsmanagement“, Vieweg+Teubner Verlag, 2012, ISBN 978-3-8348-1309-1.
- [13] K. Pickard: „Erweiterte qualitative Zuverlässigkeitsanalyse mit Ausfallprognose von Systemen“, Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2009, ISBN 3-936100-31-4.
- [14] ISO: „26262:2011, Road Vehicles – Functional Safety“, International Standard Organisation, 2011.
- [15] QS-9000: „FMEA - Fehler-Möglichkeiten- und -Einfluss-Analyse“, 3. Auflage, Carwin Ltd., 2001.
- [16] D. H. Müller, T. Tietjen und A. Decker: „FMEA-Praxis“, 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, 2011, ISBN 978-3-446-40267-6.
- [17] VDA: „Bd. 4 (Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz) Teil 3 (Produkt- und Prozess-FMEA)“, 2. Auflage, 2006.
- [18] DGQ: „Bd. 13-11 FMEA – Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse“, 4. Auflage, 2008.
- [19] C. A. Ericson: „Fault Tree Analysis Primer“, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2011, ISBN 978-1-4664-4610-6.
- [20] M. Hause, A. Korff: „*Überblick über SysML für Automobil-Systementwickler*“, ATZelextronik, 03.2007, Vieweg Verlag, 2007, ISSN 2192-8878.
- [21] M. Eigner, D. Roubanov und R. Zafirov: „Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung“, Springer-Verlag, 2014, ISBN 978-3-662-43815-2.
- [22] A. Schnellbach und M. Werdich: „*New analysis method for safety related systems*“, 4. EUROFORUM-Jahrestagung ISO 26262, Stuttgart, Deutschland, 2012.
- [23] M. Unterstein und G. Matthiessen: „Anwendungsentwicklung mit Datenbanken“, 5. Auflage, Springer Verlag, 2013, ISBN 978-3-642-39002-9.
- [24] R. Steiner: „Grundkurs Relationale Datenbanken“, 7. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, 2009, ISBN 978-3-8348-0710-6.
- [25] S. Kleuker: „Grundkurs Datenbankentwicklung“, 2. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, 2011, ISBN 978-3-8348-1481-4.

- [26] A. Kemper und A. Eickler: „Datenbanksysteme: Eine Einführung“, 9. Auflage, Oldenbourg Verlag, 2013, ISBN 978-3-486-72139-3.
- [27] A. Gadatsch: „Grundkurs Geschäftsprozess-Management“, 7. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, 2012, ISBN 978-3-8348-2427-1.
- [28] M. Hillenbrand: „Funktionale Sicherheit nach ISO 26262 in der Konzeptphase der Entwicklung von Elektrik/Elektronik Architekturen von Fahrzeugen“, KIT Scientific Publishing, 2012, ISBN 978-3-86644-803-2.
- [29] R. Brause: „Kompendium der Informationstechnologie“, Springer Verlag, 2005, ISBN 3-540-20911-5.
- [30] J. Schäuuffele und T. Zurawka: „Automotive Software Engineering“, 4. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, 2010, ISBN 978-3-8348-0364-1.
- [31] W. Gaus: „Dokumentations- und Ordnungslehre“, 5. Auflage, Springer Verlag, 2005, ISBN 978-3-540-23818-8.
- [32] R. Kaiser: „C++ mit dem C++ Builder 2007“, 2. Auflage, Springer Verlag, 2008, ISBN 978-3-540-69575-2.
- [33] G. Büchel: „Praktische Informatik – Eine Einführung“, 2. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, 2012, ISBN 978-3-8348-1874-4.
- [34] M. Eigner, F. Gerhardt, T. Gilz und F. Mogo Nem: „Informationstechnologie für Ingenieure“, Springer Verlag, 2012, ISBN 978-3-642-24892-4.

# A.Anhang

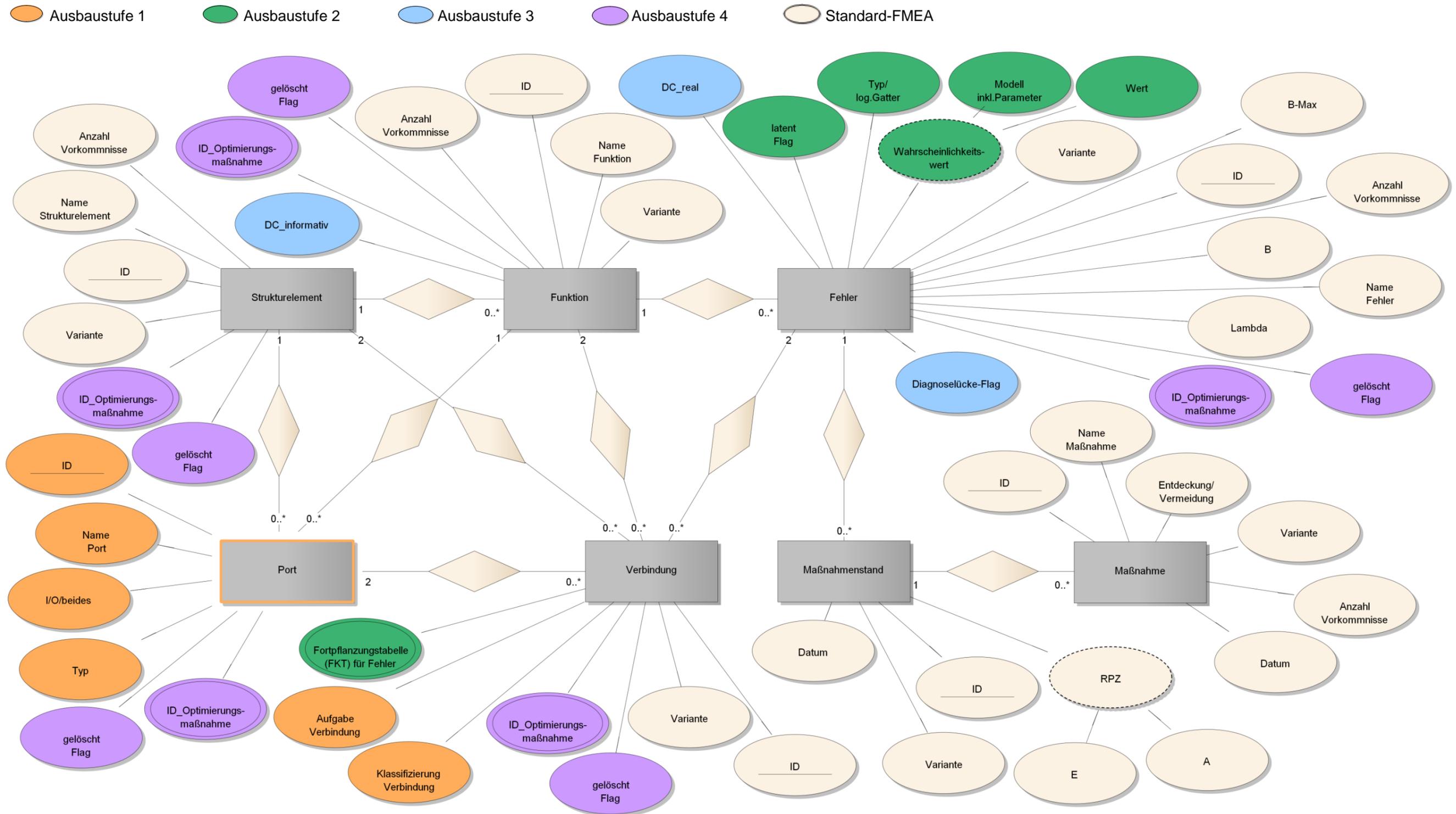


Abbildung A.1: Entity-Relationship-Modell der innovativen Analysemethodik, Ausbaustufe 1, 2, 3, und 4 inkl. Attribute der Standard-FMEA