

Hochschule: Technische Hochschule Ulm, Hochschule für angewandte Wissenschaften Neu-Ulm

Bachelorarbeit mit Titel:

Softwareunterstützung für die FMEA-Methode

Autor: Alexander Verkhov

Adresse Autor: Von-Hünefeld-Straße 24, 89231 Neu-Ulm

- 1. Betreuerin:** Frau Prof. Dr.-Ing. Lisa Ollinger
- 2. Betreuer:** Herr Prof. Dr.-Ing. Hartwig Baumgärtel

Abgabedatum: 08.05.2024

Eigenständigkeitserklärung

Diese Abschlussarbeit wurde von mir selbständig verfasst. Es wurden nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet. Alle wörtlichen und sinngemäßen Zitate sind in dieser Arbeit als solche kenntlich gemacht.

Unterschrift:



I. Abstract

Diese Arbeit konzentriert sich auf die Implementierung und Optimierung der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) im Kontext der Industriestandards des VDA und des AIAG und deren Anwendung in den fortschrittlichen Produktionsumgebungen der Industrie 4.0. Durch eine detaillierte Analyse der bestehenden FMEA-Methoden und der Anforderungen der modernen Industrie wurde ein integrativer Ansatz entwickelt, der FMEA-Verfahren in Graph-Datenbanken überführt. Die wichtigsten Ergebnisse zeigen, dass durch die Nutzung von Softwareunterstützung und Graph-Datenbanken die Effizienz der FMEA-Prozesse gesteigert und die Fehlerbehandlung automatisiert werden kann. Diese Ergebnisse bedeuten für die Industrie 4.0 eine signifikante Verbesserung der präventiven Qualitätssicherung, indem sie die Reaktionsfähigkeit auf Fehler erhöhen und die Einbindung menschlicher Intelligenz in automatisierte Prozesse ermöglichen.

This thesis addresses the implementation and optimization of Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) within the framework of the VDA and AIAG FMEA standards, and its application in advanced manufacturing settings of Industry 4.0. Through an in-depth analysis of existing FMEA methods and the requirements of modern industry, an integrative approach is developed that translates FMEA processes into graph databases. The key findings indicate that the use of software support and graph databases can enhance the efficiency of FMEA processes and automate exception handling. These results signify a substantial improvement in preventive quality assurance for Industry 4.0 by enhancing responsiveness to faults and facilitating the integration of human intelligence into automated processes.

II. Inhaltsverzeichnis

Eigenständigkeitserklärung	2
I. Abstract.....	3
II. Inhaltsverzeichnis	4
1. Einleitung.....	7
1.1 Aufgabenbeschreibung/Motivation	8
1.2 Zielsetzung	9
1.3 Vorgehensweise	10
2. Grundlagen zu FMEA	11
2.1 Ziele der FMEA.....	11
2.2 FMEA-Anwendungsfälle.....	13
2.3 FMEA-Arten	14
2.3.1 DFMEA und Einführung in die Beispiel-DFMEA	17
System-DFMEA.....	17
Komponenten-DFMEA.....	18
FMEA-Ergänzung für Monitoring und Systemreaktion (FMEA-MSR) und Einführung in die Beispiel-FMEA-MSR.....	20
2.3.2 PFMEA und Einführung in die Beispiel-PFMEA.....	22
2.4 Zusammenhänge zwischen den FMEA-Arten	25
2.5 Zeitplanung bei FMEA	25
2.6 Vorgehensweise bei FMEA	26
2.6.1 Schritt 1: Planung und Vorbereitung.....	30
2.6.2 Schritt 2: Strukturanalyse	32
Strukturanalyse in der DFMEA.....	33
Strukturanalyse in der PFMEA.....	34
2.6.3 Schritt 3: Funktionsanalyse	37
2.6.4 Schritt 4: Fehleranalyse	41
2.6.5 Schritt 5: Risikoanalyse.....	44
2.6.6 Schritt 6: Optimierung	46

II. Inhaltsverzeichnis

FMEA-MSR	48
2.6.7 Schritt 7: Ergebnisdokumentation.....	53
3. Softwareunterstützung für die FMEA.....	55
3.1 Kommerziell verfügbare spezialisierte FMEA-Software	55
3.2 Potenziale der FMEA-Softwareunterstützung.....	57
3.2.1 Versteckte Informationen in einer FMEA	57
3.2.2 Ausnutzung von Ähnlichkeitseffekten	58
3.2.3 Verarbeitung und Anpassung von FMEA-Informationen	59
3.3 FMEA in der Industrie 4.0.....	59
3.3.1 Nutzen der FMEA für Industrie 4.0	60
3.3.2 Einbindung der FMEA in Industrie 4.0	61
3.4 FMEA im Kontext von Skill-Based Engineering	62
3.4 FMEA als Repräsentation von Wissen	63
3.4 Datenbanken für FMEA.....	67
3.4.1 SQL-Datenbanken	68
3.4.2 NoSQL-Datenbanken.....	70
3.3 Graphische Datenbanken als Werkzeug	72
3.3.1 Wissensgraphen	74
3.3.2 Ontologien	75
3.3.3 Einführung in OWL und RDFS	76
3.3.4 Einführung in TURTLE und SPARQL	77
3.3.5 Einführung in Inferenz.....	78
4. Wissensgraph für FMEA nach VDA & AIAG Handbuch	80
4.1 Ontologie für FMEA nach VDA & AIAG Handbuch	80
4.1.1 Schritt 1: Bestimmung der Domäne und ihres Anwendungszwecks	80
4.1.2 Schritt 2: Wiederverwendung bestehender Ontologien.....	81
4.1.3 Schritt 3: Herausarbeitung wichtiger Begriffe der Domäne	83
Wichtige Begriffe aus FMEA-Schritt 1	83
Wichtige Begriffe aus FMEA-Schritt 2	84
Wichtige Begriffe aus FMEA-Schritt 3	85

II. Inhaltsverzeichnis

Wichtige Begriffe aus FMEA-Schritt 4	86
Wichtige Begriffe aus FMEA-Schritt 5	87
Wichtige Begriffe aus FMEA-Schritt 6	87
Wichtige Begriffe aus FMEA-MSR	89
Wichtige Begriffe aus FMEA-Schritt 7	89
4.1.4 Schritt 4: Festlegung der Klassen und Klassenhierarchie sowie deren Attribute.....	90
Hierarchie, Attribute und Beziehungen aus FMEA-Schritt 1	90
Hierarchie, Attribute und Beziehungen aus FMEA-Schritt 2	94
Hierarchie, Attribute und Beziehungen aus FMEA-Schritt 3	96
Hierarchie, Attribute und Beziehungen aus FMEA-Schritt 4	97
Hierarchie, Attribute und Beziehungen aus FMEA-Schritt 5	98
Hierarchie, Attribute und Beziehungen aus FMEA-Schritt 6	100
Hierarchie, Attribute und Beziehungen aus FMEA-MSR	101
4.1.5 Vergleich der obersten Konzeptebenen der FMEA-Ontologie nach VDA & AIAG FMEA-Handbuch mit der nach VDA 96.....	103
4.1.6 Erweiterung der FMEA-Ontologie um weitere Informationen.....	104
4.2 Überführung der Ontologie in einen Wissensgraphen	105
4.2.1 VBA-Programm für die Füllung des Wissensgraphen mit Individuen.....	105
4.2.2 Beispiel des Hinzufügens von Individuen	106
4.3 Erstellung einer FMEA-Graph-Datenbank.....	108
4.4 Inferenzregeln.....	110
4.5 Einige Anwendungsfälle für die FMEA-Graph-Datenbank	111
5. Exception Handling mithilfe von FMEA	113
5.1 Definition der PFMEA-MSR	115
5.2 Erstellung einer Beispiel-PFMEA-MSR	115
5.3 Übersetzung der PFMEA-MSR-Ergebnisse in Betriebsarten.....	121
6. Evaluation.....	126
6.1 Evaluation des FMEA-Wissensgraphen	126
6.1.1 Detaillierte Klassenhierarchie.....	126
6.1.2 Erweiterte Eigenschaften in Unterklassen	128

1. Einleitung

6.1.3 Effektive Nutzung von Klassen und Eigenschaften	131
6.1.4 Komplexitätsmanagement.....	133
6.1.5 Vergleich mit anderen Wissensgraphen	134
6.1.6 Kosten	136
6.2 Zusätzliche Bewertung des Konzepts der PFMEA-MSR für das Exception Handling	136
7. Zusammenfassung und Ausblick.....	139
III. Quellenverzeichnis.....	142
IV. Abkürzungsverzeichnis	147
V. Abbildungsverzeichnis	149
VI. Tabellenverzeichnis	152
VII. Anhang.....	153
VII.I Entwicklung der FMEA	153
VII.I.I Einführung	153
VII.I.II Grenzen.....	157
Bestimmung der RPZ.....	157
Beschreibung der Zusammenhänge	158
Dokumentation der Risiken	159
Konzentration auf Einfachfehler	161
VII.II Weiterentwicklung	161
VII.II.I VDA-Band vier (1986).....	162
VII.II.II Weiterentwicklung in den 1990er Jahren	164

1. Einleitung

Die Qualität eines Produkts kann nicht allein durch Prüfungen sichergestellt werden, sondern muss in alle Phasen seiner Konzeption, Entwicklung, Planung und Produktion integriert werden. Dieser präventive Ansatz nimmt insbesondere vor dem Hintergrund einer

dynamisierten Produkt- und Prozessentwicklung eine stetig wachsende Bedeutung ein.¹ Kundenerwartungen treiben eine stetig wachsende Produkt- und Variantenvielfalt an, was Hersteller dazu zwingt, Innovationszyklen zu verkürzen. Eine frühzeitige Produktablösung gewährleistet diese Vielfalt, führt jedoch ebenso zu einer Verkürzung des Produktlebenszyklus und reduziert den Zeitraum, in welchem mit einem Produkt Gewinne realisiert werden können.² Dadurch ist eine beschleunigte Produktentwicklung bei konstanter Qualität notwendig.

In Anbetracht dieser Herausforderungen ist eine Steigerung der Produktivität und der Effizienz in Fertigung und Entwicklung unumgänglich. Ein Schlüssel hierzu liegt in der nachhaltigen Verknüpfung und Vernetzung von Maschinen, die auch als *Industrie 4.0* bekannt ist.³ Doch die hieraus resultierende Beeinflussung zahlreicher Parameter birgt auch eine erhöhte Fehleranfälligkeit und schwer abschätzbare Risiken. Da die Vernetzung ebenso die Kosten für Fehlerbehebungen in die Höhe treibt, können Fehlentwicklungen massive Auswirkungen auf die erhofften Betriebsergebnisse haben. Hieraus ergibt sich eine gesteigerte Anforderung an Qualitätsmethoden, die zur Erstellung fehlerfreier, hochqualitativer Produkte essenziell sind.⁴

1.1 Aufgabenbeschreibung/Motivation

Eine prominente Methode der präventiven Qualitätssicherung ist die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA). Sie dient dazu, potenzielle Fehler in Produkten, Prozessen oder Systemen zu identifizieren und zu bewerten, um präventive Maßnahmen für deren Vermeidung oder Reduktion zu initiieren. In komplexen Projekten, bei denen mehrere Abteilungen, Fachdisziplinen oder unterschiedliche Unternehmen involviert sind, wird die Koordination und Management der FMEA-Aktivitäten besonders herausfordernd. In diesem Kontext kann die Softwareunterstützung eine entscheidende Rolle spielen. Moderne Softwarelösungen bieten nicht nur eine strukturierte Umgebung für die Datenerfassung und -analyse, sondern auch eine Reihe von zusätzlichen Funktionen, die den Prozess der FMEA-Betreuung erheblich erleichtern und beschleunigen können. Diese Funktionen können von der automatischen Generierung von Berichten und Dashboards über die integrierte

¹ Vgl. Hans-Joachim Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA* (Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2021), 3.

² vgl. Thorsten Tietjen und André Decker, *FMEA-Praxis: Einstieg in die Risikoabschätzung von Produkten, Prozessen und Systemen* (Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2020), 1ff.

³ Vgl. Armin Roth, Hrsg., *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0* (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016), 3ff, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48505-7>; vgl. Tietjen und Decker, *FMEA-Praxis*, 1ff.

⁴ Vgl. Tietjen und Decker, *FMEA-Praxis*, 2f.

1.2 Zielsetzung

Risikobewertung bis hin zur nahtlosen Kommunikation und Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Teams reichen.⁵

Der neueste FMEA-Standard nach VDA & AIAG FMEA-Handbuch hat sich im Vergleich zu den vorangegangenen Standards maßgeblich verändert. Gründe für die Veränderung des Standards liegen u.a. in der Anpassung des Standards an neue Produkte sowie Produktionssysteme. Aus diesem Grund wurde im neuesten FMEA-Standard die FMEA-Ergänzung für Monitoring und Systemreaktion definiert, die die Kritikalität von Fehlern mithilfe von Systemreaktionen verringert. Industrie 4.0 ist ein bedeutsamer Trend der heutigen Industrie, der menschliche Subjektivität und Intelligenz mit der Effizienz, der künstlichen Intelligenz und der Präzision von Fertigungsanlagen vereint.⁶ Diese Arbeit befasst sich damit, die Softwareunterstützung für FMEA zu untersuchen und eine mögliche Ausgestaltung der präventiven Qualitätssicherung für Industrie 4.0-Systeme zu erarbeiten. Es wird insbesondere eine Schnittstelle zwischen der neuen FMEA-Ergänzung und automatisierter Fertigung fokussiert.

1.2 Zielsetzung

In dieser Arbeit werden zwei wesentliche Ziele verfolgt:

1. Analyse der benötigten logischen Zusammenhänge der FMEA für die Ausarbeitung von Softwareunterstützung
2. Untersuchung von Erweiterungsmöglichkeiten der bisherigen FMEA-Anwendungsfälle im Kontext der Industrie 4.0

Der erste Block der Arbeit befasst sich mit der FMEA als Methode und untersucht Potenziale der Softwareunterstützung für FMEA. Es soll ein Ansatz präsentiert werden, das herausgearbeitete Potenzial der Softwareunterstützung umzusetzen. Der zweite Block thematisiert die Weiterverwendung der Daten aus FMEA für die Datenbanken von Industrie 4.0-Systemen, wobei der konkrete Anwendungsfall auf einen Orchestration Agent untersucht wird. Die Ergebnisse von FMEA sollen dabei für automatisierte Fehlerbehandlungsroutinen (Exception Handling Routinen) verwendbar sein. Das bedeutet, dass die FMEA-Ergebnisse für die Steuerungssoftware eines Produktionsprozesses abrufbar sein müssen. Um dies zu gewährleisten wird eine Graph-Datenbankstruktur für die Ergebnisse der FMEA gewählt, die als Wissensgraph in die Wissensdatenbank von Steuerungssystemen importiert werden kann. Somit thematisiert die Arbeit auch die Erstellung von Wissensgraphen, die für FMEA nach VDA & AIAG FMEA-Handbuch anwendbar sind.

⁵ Vgl. Tietjen und Decker, *FMEA-Praxis*, 4f.

⁶ Vgl. Leng u. a., „Industry 5.0“, 279f.

1.3 Vorgehensweise

Für die Realisation dieses Vorhabens wird zunächst die FMEA-Methode schrittweise analysiert und auf beispielhafte Problemstellungen angewendet (Kapitel 2. Grundlagen zu FMEA). Im Anschluss daran erfolgt eine Betrachtung der Softwareunterstützung für FMEA mit Herausarbeitung von nicht realisierten Potenzialen (Kapitel 3. Softwareunterstützung für die FMEA). Um diese umzusetzen, wird ein FMEA-Wissensgraph für FMEA nach VDA & AIAG FMEA-Handbuch konzipiert und in eine Graph-Datenbank geladen. Dafür wird eine Ontologie erstellt, mit der durch ein für diese Arbeit erstelltes Programm FMEA-Formblätter automatisiert in einen Wissensgraphen übersetzt werden können (Kapitel 4. Wissensgraph für FMEA nach VDA & AIAG Handbuch). Ferner wird der Anwendungsfall der FMEA für Exception Handling untersucht, indem eine neue FMEA-Methode mit dazugehöriger Softwareunterstützung aus dem bestehenden Standard hergeleitet wird. Dabei wird ein möglicher Ansatz der Einbindung dieser Methode in den Kontext von Industrie 4.0-Systemen präsentiert (Kapitel 5. Exception Handling mithilfe von FMEA). Der daraus entstandene Wissensgraph wird anhand von speziellen Kennzahlen für Wissensgraphen bewertet (Kapitel 6. Evaluation) und Optimierungspotenziale sowie mögliche zukünftige Entwicklungen von diesem aufgezeigt (Kapitel 7. Zusammenfassung und Ausblick).

2. Grundlagen zu FMEA

Um das Verbesserungspotenzial in FMEA zu identifizieren, ist es notwendig, einen genaueren Blick auf die FMEA als Methode der vorbeugenden Qualitätssicherung sowie auf die verfügbare Softwareunterstützung dafür zu werfen. Seit ihrer erstmaligen Anwendung hat sich die FMEA erheblich weiterentwickelt, verändert und auf zahlreiche Branchen ausbreitet.⁷ Obwohl FMEA-Standards als ein universeller Ansatz zur Anwendung der FMEA betrachtet werden können, werden sie aufgrund der Vielfalt der Branchen in unterschiedlichen Ausprägungen angewendet.⁸ Es ist nicht in allen Branchen immer zweckmäßig, stets den neuesten FMEA-Standard zu verwenden.⁹ Aus diesem Grund ist es von großer Bedeutung, dass Softwarelösungen flexibel auf unternehmens- oder branchenspezifische Änderungen der FMEA-Standards reagieren können. Um diese Flexibilität sicherzustellen, ist es notwendig, die Logik der FMEA-Vorgehensweise genau zu betrachten.

Die FMEA ist eine bereits mehrfach standardisierte Methode. Im Jahr 2019 erschien der aktuelle FMEA-Standard des Verbands der Automobilindustrie (VDA) und der Automotive Industry Action Group (AIAG). Dabei handelt es sich um die erste Ausgabe des *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monitoring & Systemreaktion*.¹⁰ Diese Ausgabe ersetzt die vierte Ausgabe des AIAG FMEA-Handbuchs aus den USA und des Kapitels *Produkt- und Prozess-FMEA* des vierten Bands der VDA-Ausgabe aus Deutschland.¹¹

2.1 Ziele der FMEA

Die vorrangige Zielsetzung der FMEA besteht in der Qualitätsverbesserung durch Risikominimierung. Obwohl die genaue Definition von *Qualität* produktabhängig ist, kann sie allgemein als die Übereinstimmung zwischen den Anforderungen und der erbrachten Leistung betrachtet werden.¹² Die DIN EN ISO 8402 definiert Qualität als „die Gesamtheit von Merk-

⁷ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 2.

⁸ Vgl. Ekbert Hering und Alexander Schloske, *Fehlermöglichkeiten- und Einflussanalyse: Methode zur vorbeugenden, systematischen Qualitätsplanung unter Risikogesichtspunkten*, essentials (Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019), 5, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-25763-7>.

⁹ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monitoring & Systemreaktion*, 1. Aufl. (Berlin, 2021), 214.

¹⁰ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 146.

¹¹ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monitoring & Systemreaktion*, 15.

¹² Vgl. Angela M. Wicks und Christopher J. Roethlein, „A Satisfaction-Based Definition of Quality“, *The Journal of Business and Economic Studies* 15, Nr. 1 (Spring 2009): 82-97, 110-111, <https://www.proquest.com/docview/235806523/abstract/E7F2B19ADF574A2CPQ/1>.

2.1 Ziele der FMEA

malen [...] einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen“.¹³ Für technische Produkte bedeutet dies, dass *Qualität* als die Eignung eines Erzeugnisses verstanden werden kann, festgelegte und vorausgesetzte Anforderungen interner und externer Kunden zu erfüllen. Das Produkt mit der höchsten Qualität ist demnach dasjenige, welches die meisten Kundenanforderungen erfüllt. Eine konsequente Ausrichtung an den Kundenanforderungen kann somit wesentlich dazu beitragen, die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit zu steigern.¹⁴

Da der Begriff *Qualität* auch auf Dienstleistungen ausgedehnt wurde, umfasst das moderne Qualitätsmanagement alle Funktionen und Prozesse im Unternehmen. Das Erkennen von mangelnder Prozessqualität als Verschwendung erhöht die Priorität von *Qualität* innerhalb der Unternehmensziele und somit auch die Bedeutung der Qualitätssicherungsmethoden. *Qualität* ist für ein Unternehmen allerdings ein distales Ziel, welches durch vielfältige und voneinander unabhängige Prozesse beeinflusst wird und nur teilweise durch FMEA beeinflussbar ist.¹⁵ Im Folgenden konzentriert sich die Betrachtung daher auf proximale Unternehmensziele, welche die Qualität positiv beeinflussen und von einer FMEA direkt unterstützt werden können.

Der Beitrag der FMEA zur Qualitätssteigerung ergibt sich vorrangig durch die Minimierung von Risiken.¹⁶ Im technischen Kontext werden unter einem Risiko gemäß der ISO 9001 die möglichen Auswirkungen eines Vorfallrisikos auf ein erwartetes Ergebnis verstanden. Ein Vorfallrisiko entsteht durch das Vorhandensein eines potenziellen Fehlers und die sich daraus ergebenden möglichen Folgen.¹⁷ Daraus lässt sich ableiten, dass ein Risiko die Kombination aus einem potenziellen Fehler und den resultierenden möglichen Folgen dieses Fehlers darstellt. Dieser Sachverhalt könnte mit einer Formel übersichtlich dargestellt werden:

$$\text{Risiko} = \text{potenzieller Fehler} + \text{Folgen dieses potenziellen Fehlers}$$

Die Minimierung eines Risikos bezieht sich demzufolge auf die Analyse der Ursache für den möglichen Fehler, der dieses Risiko hervorruft.¹⁸ Bevor jedoch eine Fehlerursache ermittelt werden kann, muss der Fehler zunächst erkannt werden. Ein primäres Ziel der FMEA besteht daher in der frühzeitigen Fehlererkennung. Die FMEA soll potenzielle Fehlerquellen

¹³ Vgl. Ingrid Vogg und Steffen Fleßa, *Qualitätsmanagement in der ambulanten Versorgung* (Wiesbaden: Gabler, 2011), 23, <https://doi.org/10.1007/978-3-8349-6474-8>.

¹⁴ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 2f.

¹⁵ Vgl. Pfeufer, 2f.

¹⁶ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 16.

¹⁷ Vgl. Holger Grosser, „Risikobasierter Ansatz“, ISO9001, zugegriffen 12. November 2023, <https://iso9001.info/iso-9001-2015-2/risikobasierter-ansatz/>.

¹⁸ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 15f.

2.2 FMEA-Anwendungsfälle

und Schwachstellen in Design, Produkt oder Prozess identifizieren, bevor diese zu einem Problem werden. Dadurch, dass sie zu einer fehlerfreien Produkteinführung beiträgt, unterstützt die FMEA indirekt auch die Reduktion von Garantie- und Kulanzkosten sowie die Steigerung der Kundenzufriedenheit.¹⁹ Ein weiteres Hauptziel der FMEA ist die Priorisierung von Fehlern. Die Priorisierung der Fehler nach ihrer Relevanz und Dringlichkeit wird benötigt, um Ressourcen effizient einzusetzen und die gravierendsten Fehler zuerst zu adressieren.²⁰

Die Einhaltung von Normen ist ebenfalls ein Ziel vieler FMEA. Viele Branchen fordern die Durchführung einer FMEA als Bestandteil zur Erfüllung von Qualitäts- oder Sicherheitsstandards. In sicherheitskritischen Bereichen, wie bspw. der Fahrzeugtechnik, sind FMEA häufig als Einhaltungsbeleg für Zulassungsvorgaben gefordert.²¹ Für die Automobilindustrie sind das primär die Vorgaben des Verbands der Automobilindustrie e. V. (VDA) und der Automotive Industry Action Group (AIAG) im AIAG & VDA FMEA Handbook.²²

Des Weiteren verfolgt die FMEA das Ziel, den Aufbau einer Wissensbasis in Unternehmen zu unterstützen.²³ Durch die Erstellung einer umfassenden Dokumentation der Analysen kann das daraus gewonnene Wissen effizienter für die Durchführung zukünftiger Projekte oder Produktiterationen genutzt werden. Angesichts der wachsenden Produkt- und Prozesskomplexität und der zunehmenden Menge an in einer Wissensbasis gespeicherten Informationen, gewinnt das Wissensmanagement stetig an Bedeutung.²⁴

2.2 FMEA-Anwendungsfälle

Aus den Zielen der FMEA resultieren die Anwendungsfälle, die Unternehmen zur Durchführung einer FMEA nach VDA & AIAG FMEA-Handbuch veranlassen. Es gibt drei Fälle, in denen eine FMEA mit jeweils unterschiedlicher Planung oder unterschiedlichen Fokus angewendet wird:

¹⁹ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 2f.

²⁰ Vgl. Konrad Wälder und Olga Wälder, *Methoden zur Risikomodellierung und des Risikomanagements* (Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017), 7, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-13973-5>.

²¹ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 3.

²² Vgl. o.V., „Details“, zugegriffen 26. September 2023, <https://www.aiag.org/store/publications/details?ProductCode=FMEAAV-1>.

²³ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 2.

²⁴ Vgl. Gilbert Probst, Steffen Raub, und Kai Romhardt, *Wissen managen: Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen* (Wiesbaden: Gabler Verlag, 2012), 7f, <https://doi.org/10.1007/978-3-8349-4563-1>.

2.3 FMEA-Arten

Der erste Fall ist die Einführung einer neuen Konstruktion, einer neuen Technologie oder eines neuen Prozesses. Die Planung der FMEA umfasst dabei die gesamte Konstruktion, die gesamte Technologie und den gesamten Prozess.²⁵

Der zweite Fall ist die neue Anwendung einer bestehenden Konstruktion oder eines bestehenden Prozesses. In diesem Fall umfasst die Planung die bestehende Konstruktion oder den bestehenden Prozess in einer neuen betrieblichen Umgebung, Anwendung, an einem neuen Standort oder mit einem anderen Nutzungsprofil. Die FMEA soll sich dabei auf die Umgebungseinflüsse auf die bestehende Konstruktion oder den bestehenden Prozess konzentrieren.²⁶

Der dritte Fall sind technische Änderungen an einer bestehenden Konstruktion oder an einem bestehenden Prozess. Auslöser für diesen Fall können Rückrufe von Produkten, Fehlermeldungen aus der Praxis oder geänderte Anforderungen sein. Dabei kann eine Überarbeitung der ursprünglichen FMEA benötigt werden.²⁷

2.3 FMEA-Arten

In diesen Anwendungsfällen werden nicht alle betrieblichen Aspekte auf einmal betrachtet. Es erfolgt eine gesonderte Betrachtung mithilfe der sog. FMEA-Arten. Dabei wird zwischen zwei wesentlichen FMEA-Arten, die auch als FMEA-Ansätze verstanden werden können, unterschieden:

- Die Analyse der Produktfunktionen (Design-FMEA)
- Die Analyse der Prozessschritte (Prozess-FMEA)²⁸

Um die FMEA-Arten anschaulich voneinander abzugrenzen und das FMEA-Vorgehen zu erläutern, wird im Folgenden ein realistisches Beispiel anhand einer Baugruppe mit verschiedenen Subsystemen aus der Automobilindustrie angeführt. Dafür wird die Neuentwicklung einer Turbolader-Baugruppe betrachtet, die der Abgasturbolader-Baugruppe aus BMW-Dieselmotoren mit dem Code N57D30B ähnelt. Zunächst wird dafür das Abgasturbolader-System betrachtet, welches als Vorbild für dieses Beispiel dient.

Der Motor mit dem Code N57D30B verfügt über zwei parallel geschaltete Abgasturbinen, die auch als Turbolader bezeichnet werden. Diese beiden Abgasturbinen werden verwen-

²⁵ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 21.

²⁶ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 21.

²⁷ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 21.

²⁸ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 21ff.

2.3 FMEA-Arten

det, um den Luftdurchsatz in den Brennraum variabel zu steigern und somit mehr Motorleistung zu erzeugen.²⁹ Dafür wird der so genannte Ladedruck, eine Anhebung des Drucks vor Motoreinlass, auf einen Wert oberhalb des Umgebungsdrucks erstellt. Das für diese Druckerhöhung eingesetzte Aggregat wird im Allgemeinen als Lader, und in diesem konkreten Anwendungsfall als Turbolader bezeichnet.³⁰ Die beiden Turbolader im N57D30B werden abhängig von der Belastung stufenweise aktiviert und bei geringerer Belastung deaktiviert. Ein solches Luftzuführungssystem wird als *Registeraufladung* bezeichnet. Dabei ist eine Turbine eine Hochdruck- und die andere eine Niederdruck-Turbine. Der Aktivierungs- und Deaktivierungsvorgang der Abgasturbinen wird durch eine Abgasklappe vor der Hochdruckturbine gesteuert.³¹ Die Unterdruckdose spielt eine entscheidende Rolle bei der Regelung des Abgasstroms des Niederdruck-Turboladers mithilfe des sog. Wastegate.³² Der Hochdruck-Turbolader ist als Turbolader mit variabler Turbinengeometrie (VTG) ausgeführt.³³ Unter einer VTG wird die Anordnung verstellbarer Turbinenleitschaufeln verstanden, die die Anpassung des effektiven Turbinenquerschnitts an den jeweiligen Ladedruckbedarf steuert. Daher wird für diesen Turbolader keine Unterdruckdose benötigt.³⁴ Die Turbolader werden von dem Hersteller BorgWarner Inc. hergestellt und an BMW geliefert.³⁵ Im Folgenden ist eine Abbildung der Abgasturbolader-Baugruppe in einem N57D30B zu sehen, die aus dem Teilekatalog von BMW stammt:

²⁹ Vgl. o. V., „Doppelt aufgeladen: So funktioniert ein Biturbo - LeasingTime.de Magazin“, zugegriffen 12. November 2023, <https://www.leasingtime.de/blog/736-doppelt-aufgeladen-so-funktioniert-ein-biturbo>.

³⁰ Vgl. Helmut Pucher und Karl Zinner, *Aufladung von Verbrennungsmotoren: Grundlagen, Berechnungen, Ausführungen* (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012), 7ff, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-28990-3>.

³¹ Vgl. Pucher und Zinner, 178ff.

³² Vgl. Pucher und Zinner, 161ff; Vgl. o. V., „Unterdruckdosen – Steuerung eurer Wastegates“, BAR-TEK, zugegriffen 18. November 2023, <https://www.bar-tek-tuning.de/produkte/motoren-teile/turbolader/druckdosen/>.

³³ Vgl. *BMW M57/N57 Turboladerkunde I Ist das wirklich ein BiTurbo??? oder doch Registeraufladung?*, 2022, <https://www.youtube.com/watch?v=3OJxiDE77o4>.

³⁴ Vgl. Pucher und Zinner, *Aufladung von Verbrennungsmotoren*, 167ff.

³⁵ Vgl. Jan Rosenow, „Borg-Warner setzt BMW-Motoren unter Druck“, »kfz-betrieb«, 30. November 2017, <https://www.kfz-betrieb.vogel.de/borg-warner-setzt-bmw-motoren-unter-druck-a-667418/>.

2.3 FMEA-Arten

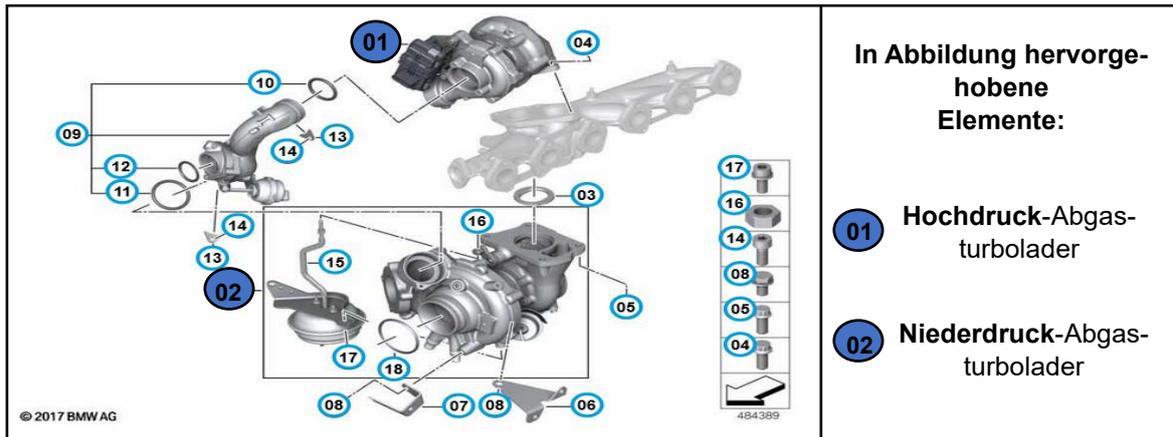


Abbildung 1: Abgasturbolader-Baugruppe N5D30B³⁶

Die in Abbildung 1 dargestellte Turbolader-Baugruppe beinhaltet zwei Abgasturbolader (Nr. 01 und Nr. 02) sowie Verschraubungen, Dichtungen, Halterungen und Verbindungsrohre, die für den Verbau dieser notwendig sind. Auf der rechten Seite sind die Abgasturbolader hervorgehoben, da diese Elemente im weiteren Verlauf dieses Kapitels thematisiert werden. Bei dem Turbolader Nr. 01 handelt es sich um einen Hochdruck-Abgasturbolader, der als Turbolader mit einer VTG ausgeführt ist. Der Niederdruck-Abgasturbolader Nr. 02 besitzt keine VTG. Der Abgasstrom von diesem Turbolader wird durch die Unterdruckdose Nr. 15 gesteuert.³⁷

Im weiteren Verlauf wird eine exemplarische Turbolader-Baugruppe mit Registeraufladung thematisiert, die auf dem in Abbildung 1 gezeigten Modell basiert. Sie umfasst einen prototypischen Hochdruck-Abgasturbolader, bezeichnet als Turbolader 01, inspiriert von Abgasturbolader Nr. 01 in Abbildung 1, sowie einen Niederdruck-Abgasturbolader, benannt als Turbolader 02, angelehnt an Abgasturbolader Nr. 02 aus Abbildung 1. Wie bereits aus der Erläuterung dieses Beispiels hervorgeht, besitzt die Turbolader-Baugruppe multiple verschiedene Komponenten. Diese besitzen unterschiedliche Funktionen, Eigenschaften und Anforderungen. Somit werden diese Teile auf unterschiedliche Arten gefertigt, getestet und montiert. Dadurch sind die Risiken sehr vielfältig und in nur einer Analyse nicht in vollem Umfang erfassbar. Die Risiken könnten bspw. von einem Ausfall des Turboladers 01 aufgrund eines elektrischen Fehlers auf Gesamtfahrzeugebene bis hin zu einer fehlerhaften Luftzufuhr zum Turbolader 02 aufgrund einer Fehlmontage des Turboladers 01 reichen. Aufgrund dieser Vielfalt an Risiken werden mehrere FMEA auf unterschiedlichen Ebenen

³⁶ Vgl. BMW AG, „Turbolader“, Teilegeschäft, Leebmann24.de, 2017, https://www.leebsmann24.de/bmw-ersatzteile/view/btdetail/?series=f15&typ=ks61&og=01&hg=11&bt=11_5088.

³⁷ Vgl. Pucher und Zinner, *Aufladung von Verbrennungsmotoren*, 161ff.

2.3.1 DFMEA und Einführung in die Beispiel-DFMEA

mit verschiedenen Schwerpunkten ausgeführt.³⁸ Im folgenden Verlauf dieser Arbeit entsteht auf Basis dieses Beispiels eine Design-FMEA(DFMEA) und eine Prozess-FMEA (PFMEA).

2.3.1 DFMEA und Einführung in die Beispiel-DFMEA

Die DFMEA wird angewendet, um sicherzustellen, dass vor der Produktionsfreigabe für ein Produkt alle potenziellen Fehlerarten und die entsprechenden Fehlerursachen oder Fehlermechanismen weitestgehend betrachtet und behandelt wurden.

Die DFMEA konzentriert sich auf die spezifischen Funktionen eines Systems, Subsystems oder einer Komponente. Sie zielt darauf ab, die Beziehungen zwischen den Funktionselementen sowohl innerhalb als auch außerhalb der definierten Systemgrenzen zu analysieren. Dieser Prozess hilft, potenzielle Schwachstellen im Design oder in der Konstruktion zu erkennen. Anschließend werden die daraus resultierenden Fehlerrisiken identifiziert. Ziel ist es, diese Risiken durch gezielte Maßnahmen zu minimieren.³⁹ Eine DFMEA würde sich, auf das Beispiel bezogen, demnach auf die funktionellen Fehlerrisiken der Turbolader-Baugruppe beziehen. Betrachtet werden somit alle möglichen konstruktionsbedingten Fehler, die zu einer Fehlfunktion der Turbolader-Baugruppe führen können.

Ein Problem bei der Analyse von Konstruktionsfehlern besteht darin, dass sie auf verschiedenen Abstraktionsebenen und zu unterschiedlichen Zeitpunkten auftreten können.⁴⁰ Beispielsweise könnte eine Fehlfunktion des Turboladers 01 den Verbrennungsprozess des gesamten Motors beeinträchtigen, was zu weiteren Schäden führen kann. Eine ganzheitliche Betrachtung des Motors ist nützlich, um Fehler in den funktionalen Wechselwirkungen auf der Ebene des Gesamtfahrzeugs zu identifizieren. Sollen jedoch alle Fehler und Ursachen gefunden werden, die innerhalb des Turboladers 01 zu einem Defekt dieses führen können, so müsste das Bauteil auf Komponentenebene untersucht werden. Um diese Ebenen voneinander abzugrenzen, wurden die Subtypen der DFMEA eingeführt.⁴¹

System-DFMEA

Ein Subtyp der DFMEA ist die System-DFMEA. Diese besteht aus Komponenten und Teilsystemen, die als Systemelemente dargestellt und analysiert werden. In System-DFMEA

³⁸ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 21f.

³⁹ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 20f; Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 21.

⁴⁰ Vgl. Lars Uwe Dittmann, *OntoFMEA: Ontologiebasierte Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*, 1. Aufl, Gabler Edition Wissenschaft : Information - Organisation - Produktion (Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl, 2007), 38ff.

⁴¹ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 21.

Komponenten-DFMEA

können Schnittstellen und Wechselwirkungen zwischen Systemen, Teilsystemen, der Umgebung und den Kunden analysiert werden. Was als System, Teilsystem oder Komponente betrachtet wird, hängt vom Standpunkt oder von der Verantwortlichkeit des FMEA-Teams ab. Systeme, Teilsysteme und Komponenten werden deshalb in der Analyse unabhängig von der Betrachtungsebene als *Systemelement* oder *Element* bezeichnet.⁴²

In einer System-DFMEA, bei der die Risiken auf Gesamtfahrzeugebene betrachtet werden, könnte die gesamte Turbolader-Baugruppe als System mit der Funktion der Ladedruckerzeugung analysiert werden. Die Fehlfunktion der Turbolader-Baugruppe wäre die Nichterfüllung der eigentlichen Funktion. Das betrachtete System wird für die bessere Übersichtlichkeit in der folgenden Abbildung dargestellt:



Abbildung 2: Beispiel Betrachtungssystem System-DFMEA

Eine mögliche Fehlerfolge in diesem Zusammenhang wäre eine unetwaige Luftzufuhr für den Verbrennungsprozess aufgrund des nicht erzeugten Ladedrucks. Weiterführende Betrachtungen würden sich auf die konkrete Fehlerursache des fehlenden Ladedrucks beziehen. Dieser könnte beispielsweise aufgrund einer fehlerhaften Ansteuerung des Hochdruck-Turboladers 01 geschehen. Wodurch diese fehlerhafte Ansteuerung konkret hervorgerufen wird, benötigt jedoch detailliertere Analysen der Bauteilstruktur des Hochdruck-Turboladers 01. Diese detaillierte Aufschlüsselung ist jedoch nicht Teil einer System-DFMEA, da dabei eine andere Abstraktionsebene gewählt wird.

Komponenten-DFMEA

Wodurch die fehlerhafte Ansteuerung des Hochdruck-Turboladers 01 konkret hervorgerufen wird, wäre Gegenstand der sog. Komponenten-DFMEA. Die Komponenten-DFMEA ist ein weiterer Subtyp der DFMEA. Diese DFMEA können Teil eines Subsystems oder einer System-DFMEA sein. Bei dieser Unterart steht die Betrachtung von den einzelnen Komponenten eines Systems im Vordergrund.⁴³

⁴² Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 21ff.

⁴³ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 22.

Komponenten-DFMEA

In einer Komponenten-DFMEA des Turboladers werden also die Risiken analysiert, die mit jeder einzelnen Komponente des Turboladers in Verbindung stehen. Eine solche DFMEA würde sich damit befassen, welche Komponenten des Turboladers welchen Defekt an diesem hervorrufen können.

Es erfolgt demnach eine Verschiebung der Systemgrenzen des Betrachtungssystems von einer System- zu einer Komponenten-DFMEA. Wird das Beispiel mit der Turbolader-Baugruppe fortgeführt, so könnte ein Betrachtungsobjekt für die Komponenten-DFMEA die Verstellungseinheit der VTG sein. Das beispielhaft betrachtete System in der Komponenten-DFMEA wird durch einen demontierten Hochdruck-Turbolader, der in Abb.1 skizziert ist, demonstriert.

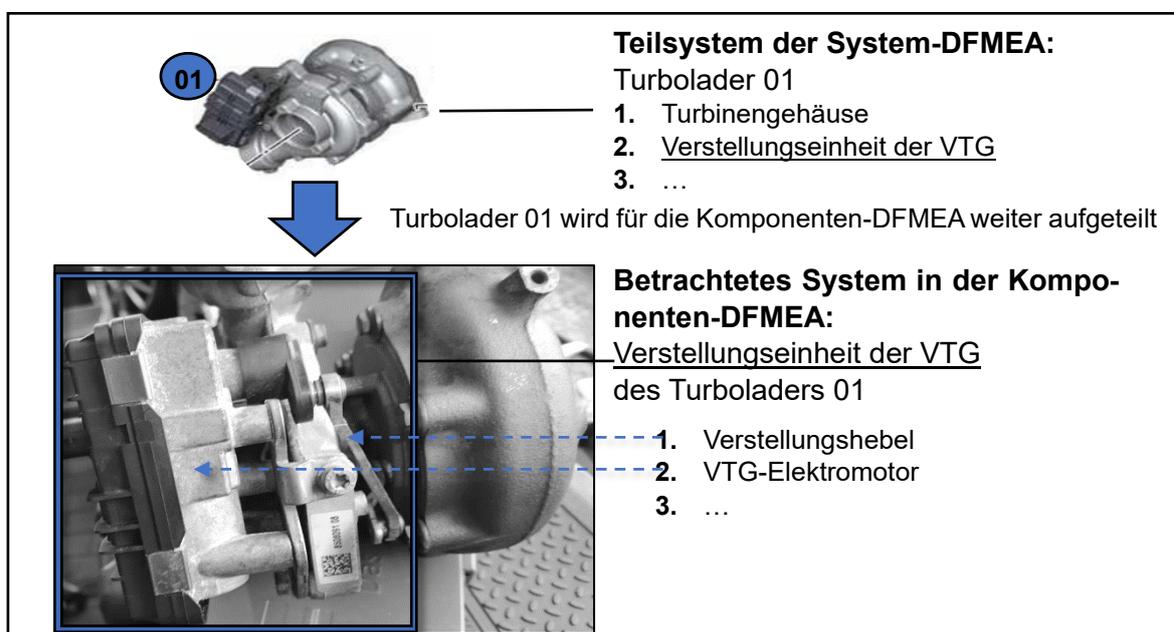


Abbildung 3: Beispiel Verschiebung der Betrachtungselemente von System- zu Komponenten-DFMEA⁴⁴

Die Verstellung der VTG innerhalb des Turboladers erfolgt über die VTG-Verstellungseinheit. Das betrachtete System in diesem Beispiel ist demnach wie folgt aufgebaut:



Abbildung 4: Beispiel Betrachtungssystem Komponenten-DFMEA

⁴⁴ Vgl. BMW AG, „Turbolader“.

FMEA-Ergänzung für Monitoring und Systemreaktion (FMEA-MSR) und Einführung in die Beispiel-FMEA-MSR

Eine mögliche Folge der Fehlfunktion wäre somit die fehlerhafte Ansteuerung der Turbinenleitschaufeln mit der Folge, dass die Anpassung der Turbinengeometrie an den Ladedruckbedarf nicht erfolgt. Wie in Abbildung 3 gezeigt, wird der Turbolader 01 als Teilsystem der System-DFMEA der Turbolader-Baugruppe weiter in Komponenten unterteilt. Dennoch lässt sich die Verstellungseinheit der VTG selbst in weitere Unterkomponenten bzw. Untersysteme, wie bspw. das VTG-Steuergerät und die Verstellungshebel aufteilen. Weiterführende Komponenten-DFMEA-Betrachtungen würden demnach die Untersysteme der Verstellungseinheit der VTG betrachten und dasselbe Vorgehen wählen, wie es in Abbildung 3 dargestellt ist. Die Konkretisierung würde erfolgen, bis die Fehlerursache mit Maßnahmen behandelt werden kann, sofern das die Herstellungsvorgabe fordert.⁴⁵

FMEA-Ergänzung für Monitoring und Systemreaktion (FMEA-MSR) und Einführung in die Beispiel-FMEA-MSR

Die FMEA für Monitoring und Systemreaktion (FMEA-MSR) ist eine Ergänzung der DFMEA für automatisierte und geregelte Systeme sowie Assistenzsysteme. Die FMEA-MSR stellt eine Verbindung zwischen der Funktionalen Sicherheit und der FMEA her. In einer FMEA-MSR wird die Wirkung des Monitorings in Verbindung mit der anschließenden Systemreaktion für ein System oder Produkt bewertet.⁴⁶ Die FMEA-MSR wird angewendet, wenn in der zuvor durchgeführten FMEA für dieses oder ein ähnliches Produkt bereits funktionale Risiken ermittelt wurden.⁴⁷ Daher bezieht sich die FMEA-MSR immer auf bereits erstellte FMEA. Diese Methode berücksichtigt, in welchem Maße Fehler vom System erkannt oder Fehlerfolgen vom Endbenutzer entdeckt werden können. Ein weiterer zentraler Aspekt der FMEA-MSR sind die technischen Möglichkeiten zur Risikominimierung durch Monitoring oder automatisierte Fehlerreaktion.⁴⁸

Eine FMEA-MSR könnte sich sowohl auf das Risiko in der System-DFMEA als auch auf das Risiko in der Komponenten-DFMEA beziehen. Mit Bezug auf das Beispielerisiko aus der System-DFMEA, bei dem die gesamte Turbolader-Baugruppe als defekt angenommen wird, könnte eine Risikominimierung die automatische Anpassung der Kraftstoff-Einspritzmengen für den Verbrennungsprozess sein. Wird das vorangegangene Risikobeispiel aus der Komponenten-DFMEA mit der defekten VTG-Ansteuerung aufgegriffen, so würde die

⁴⁵ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monitoring & Systemreaktion*, 21f.

⁴⁶ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 71; Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monitoring & Systemreaktion*, 127f.

⁴⁷ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monitoring & Systemreaktion*, 128.

⁴⁸ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 127.

FMEA-Ergänzung für Monitoring und Systemreaktion (FMEA-MSR) und Einführung in die Beispiel-FMEA-MSR

FMEA-MSR eine Systemreaktion fokussieren, um den Ladedruckbedarf im VTG-Turbolader so zu behalten, dass die VTG-Ansteuerung für den Prozess umgangen wird. Ggf. könnte auch eine Systemreaktion sowohl die Risiken aus der System-DFMEA als auch aus der Komponenten-DFMEA adressieren. Ein reales Beispiel für eine solche automatisierte Systemreaktion auf Fehler im Ladedrucksystem ist die folgende Warnmeldung in einem BMW X5 xDrive40d mit einem N57D30B-Motor, in dem die Turbolader-Baugruppe aus Abbildung 1 verbaut ist:

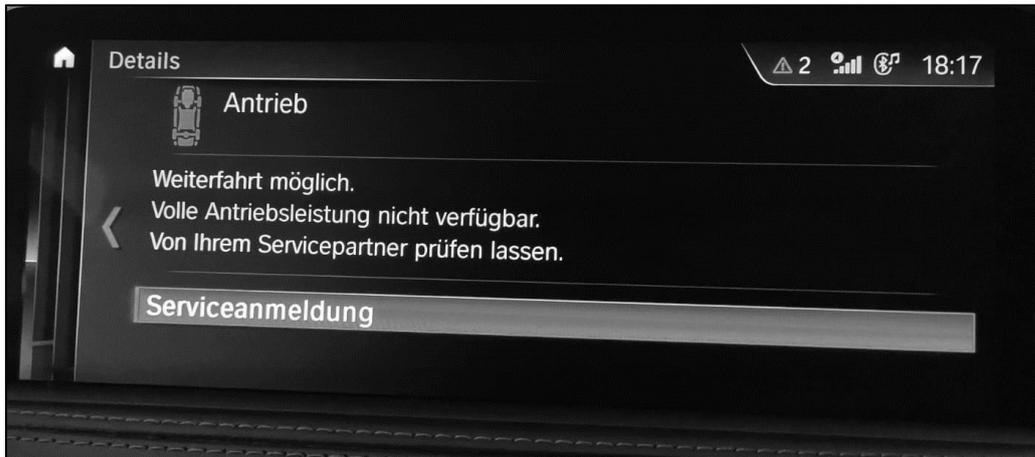


Abbildung 5: Warnmeldung bei Fehler im Ladedrucksystem

Bei einer Fehlfunktion einer Komponente innerhalb des Ladedruckerzeugungssystems, wird die Motorleistung gedrosselt und dem Endnutzer über den Bordcomputer die Warnmeldung aus Abbildung 5 ausgegeben. Zusätzlich werden Einträge im Fehlerspeicher des Fahrzeugs für weitere Diagnosen hinterlegt. Die Warnmeldung an dem konkreten Fahrzeug wurde durch die folgenden im Fehlerspeicher gespeicherten Fehlermeldungen hervorgerufen:

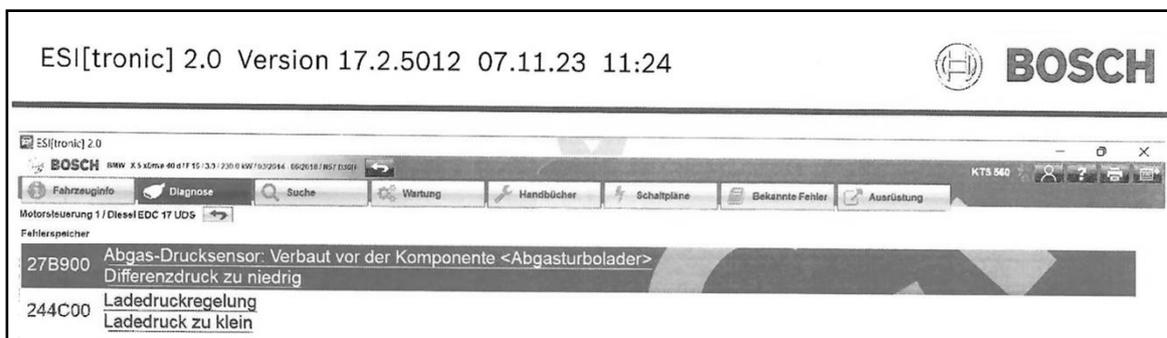


Abbildung 6: Fehlerspeichereintrag bei Fehler in Ladedrucksystem

Die Fehlermeldung, die die beschriebene Systemreaktion hervorruft, besitzt den Code **244C00** und die Beschreibung **Ladedruckregelung: Ladedruck zu klein**. Durch die Reduk-

2.3.2 PFMEA und Einführung in die Beispiel-PFMEA

tion der Motorleistung sowie die Warnmeldung wird verhindert, dass die mangelnde Luftzufuhr Folgeschäden auf Gesamtfahrzeugebene verursacht. Das Monitoring ist in diesem Fall die Warnmeldung, die den Endnutzer dazu auffordert, das Fahrzeug von einem Servicepartner prüfen zu lassen. Mithilfe des Monitorings wird der möglichen Anwenderfehler, die Systemreaktion versehentlich zu ignorieren, verhindert. Dadurch wird die Bedeutung eines beliebigen potenziellen Fehlers im Ladedruckerzeugungssystem auf Gesamtfahrzeugebene gesenkt. In der Beispiel-FMEA-MSR wird die beschriebene, reale Systemreaktion als Vorbild für eine Systemreaktion verwendet, die ebenfalls auf Fehler im Ladedrucksystem reagiert. Die gesamte DFMEA setzt sich aus System-DFMEA, Komponenten-DFMEA und FMEA-MSR zusammen. Das Ergebnis der gesamten DFMEA ist ein im Hinblick auf Gewährleistung der Produktfunktionen optimiertes Produkt.⁴⁹ Die gesamte Beispiel-DFMEA wird sich somit auf die Optimierung fiktiver, aber dennoch realitätsnaher Produkte mit dem Vorbild von realen Komponenten beziehen. In einer DFMEA werden Risiken, die von Fehlern im Herstellungsprozess selbst hervorgerufen werden, nicht betrachtet. Das ist der wesentliche Unterschied zu der Prozess-FMEA.⁵⁰

2.3.2 PFMEA und Einführung in die Beispiel-PFMEA

Im Gegensatz zur DFMEA, fokussiert die PFMEA mögliche Fehler bei der Herstellung, Montage und den logistischen Prozessen, damit Produkte produziert werden, die den Konstruktionsvorgaben entsprechen. Die in einer DFMEA untersuchten funktionsbezogenen Fehler unterscheiden sich von den prozessbezogenen Fehlern in einer PFMEA.⁵¹ In der PFMEA werden die potenziellen Fehler in den Abläufen bei der Herstellung eines Systems analysiert.⁵² Die PFMEA besitzt im Gegensatz zur DFMEA keine Subtypen, dennoch werden mehrere PFMEA für verschiedene Ebenen der Herstellungs- und Montageprozesse sowie für logistische Prozesse erstellt. In der PFMEA werden mögliche Fehlerarten untersucht, die aus Prozessabweichungen entstehen können.⁵³

Auf das vorangegangene Beispiel der Turbolader-Baugruppe könnte sich die PFMEA auf die Montage der Turbolader-Baugruppe beziehen. Das betrachtete Produkt wäre, wie in Abbildung 2, die Turbolader-Baugruppe. Das Fokuselement ist hierbei jedoch nicht mehr eine Produktfunktion, sondern ein Prozess, der der Produkterstellung dient. Der zu untersuchende Fehler würde sich demnach ebenfalls auf den Prozess für die Produkterstellung

⁴⁹ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 20.

⁵⁰ Vgl. Pfeufer, 10.

⁵¹ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monitoring & Systemreaktion*, 22.

⁵² Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 10.

⁵³ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monitoring & Systemreaktion*, 22.

2.3.2 PFMEA und Einführung in die Beispiel-PFMEA

beziehen. In diesem Beispiel wäre das ein Montagefehler. Das in der Beispiel-PFMEA betrachtete Beispielsystem könnte wie folgt visualisiert werden:

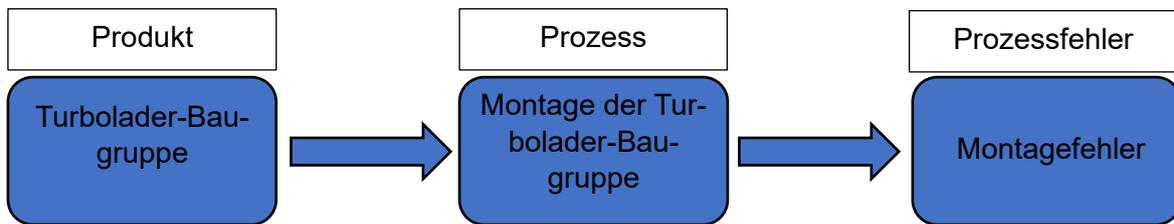


Abbildung 7: Beispiel Betrachtungssystem PFMEA

Auch in diesem Beispiel würde der Montagefehler, wie auch der funktionelle Fehler in der DFMEA, so häufig konkretisiert werden, bis der Fehlerursache entgegengewirkt werden kann. Das Gesamtergebnis einer PFMEA ist ein optimierter Produkterzeugungsprozess, der das Auftreten unerwünschter Fehler in der Produktherstellung und -montage sowie deren Auswirkungen eindämmt.⁵⁴

Um das Beispielsystem für die Beispiel-PFMEA jedoch kontextuell einordnen zu können, muss zunächst bekannt sein, wie Turbolader grundsätzlich in der Motorfertigung montiert werden. Die Turbolader werden in der Regel zusammen mit dem Abgaskrümmen an den Motorblock montiert.⁵⁵ Der Abgaskrümmen ist die erste Komponente der Abgasanlage und besitzt die Hauptfunktion, die Abgasströme aus den Auslasskanälen des Motors zusammenzuführen. Mithilfe eines Abgaskrümmers können Abgase aus mehreren Auslasskanälen somit in eine Abgasanlage münden.⁵⁶ Um das Beispiel möglichst simpel zu halten, wird sich die Beispiel-PFMEA lediglich auf den Montageprozess einer Turbolader-Baugruppe an den Abgaskrümmen im ausgebauten Zustand beziehen. Die nachfolgende Montage des Abgaskrümmers an den Motorblock wird in der Beispiel-PFMEA nicht thematisiert. Als Vorbild-Komponenten für die Beispiel-DFMEA dienen die Turbolader-Baugruppe aus der Beispiel-DFMEA sowie der Abgaskrümmen und die Verschraubungen und Dichtungen aus dem N57D30B:

⁵⁴ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 22.

⁵⁵ Vgl. ПРОИЗВОДСТВО АВТОМОБИЛЕЙ BMW - Производственный процесс на заводе двигателей, 2022, <https://www.youtube.com/watch?v=iky1sY5R0M0>.

⁵⁶ Vgl. Stefan Pischinger und Ulrich Seiffert, Hrsg., *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021), 630ff, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-25557-2>.

2.3.2 PFMEA und Einführung in die Beispiel-PFMEA

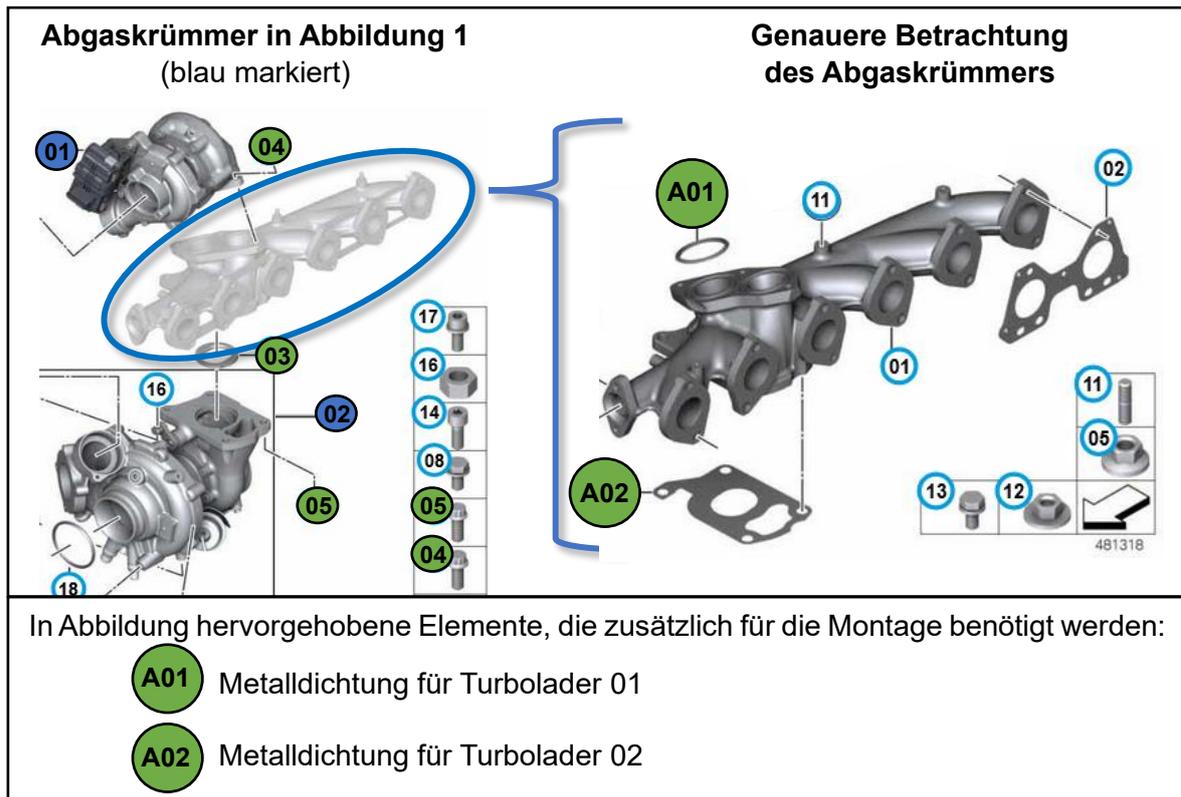


Abbildung 8: Genauerer Blick auf Abgaskrümmervorbild für Beispiel-PFMEA⁵⁷

Wie in Abbildung 8 auf der linken Seite dargestellt ist, wird die Turbolader-Baugruppe an zwei Stellen an den Abgaskrümmers montiert: am Turbolader 01 und am Turbolader 02. Dazu werden die Verschraubungen mit der Nr. 04 für den Turbolader 01 und die Verschraubungen Nr. 05 für den Turbolader 02 verwendet. Des Weiteren wird ein Metall-Dichtring mit der Nr. 03 benötigt, um den Turbolader 02 zu montieren. Weitere benötigte Komponenten sind zudem die Metalldichtung Nr. A01 für Turbolader 01 und die Metalldichtung Nr. A02 für den Turbolader 02. Diese gehen aus der genauen Betrachtung des Abgaskrümmers hervor, die auf der rechten Seite dargestellt ist.

Die Beispiel-PFMEA wird die Optimierung eines fiktiven, aber realitätsnahen Montageprozesses darstellen. Dafür werden für die Beispiel-PFMEA Komponenten ausgewählt, die auf dem System aus Abbildung 8 basieren. Diese besitzen folgende Nomenklatur:

Tabelle 1: Nomenklatur Beispiel-PFMEA

Basis in Abb.8	Metall-Dichtring Nr. 03	Schraube Nr. 04	Schraube Nr. 05	Metalldichtung Nr. A01	Metalldichtung Nr. A02
Name in Beispiel-PFMEA	Dichtring 03	Schraube 04	Schraube 05	Dichtung 01	Dichtung 02

⁵⁷ Vgl. BMW AG, „Turbolader“; Vgl. o. V., „Abgaskrümmers-AGR - BMW X5 F15 X5 40dX SAV (KS61) - BMW Ersatzteile - leebmann24.de“, zugegriffen 25. Dezember 2023, https://www.leebmann24.de/bmw-ersatzteile/view/btdetail/?series=f15&typ=ks61&og=01&hg=11&bt=11_5428.

2.4 Zusammenhänge zwischen den FMEA-Arten

Obwohl die DFMEA und die PFMEA unterschiedliche Betrachtungsweisen für ein Risiko haben, gibt es Wechselwirkungen zwischen den beiden FMEA-Arten. Diese Wechselwirkungen können sowohl innerhalb als auch außerhalb eines Unternehmens vorhanden sein. Besonders die Analyse der Bedeutung von Fehlerfolgen sollte mit Kunden und Lieferanten abgestimmt werden und sowohl bei DFMEA als auch bei PFMEA identisch sein.⁵⁸ Darüber hinaus können Risiken der DFMEA die Risiken in der PFMEA beeinflussen.⁵⁹

Auf die vorangegangenen Beispielsysteme bezogen, könnte folgende Situation entstehen: Aus der Beispiel-DFMEA wird das Betrachtungssystem der System-DFMEA in Abb.2 gewählt, bei dem das Produkt die Turbolader-Baugruppe ist. Die Funktion davon wäre die Verdichtung der Ansaugluft und die dazugehörige Fehlfunktion der Sachverhalt, dass die Ansaugluft nicht verdichtet wird. Selbst nach einer unendlichen Anzahl an Komponenten-DFMEA könnte die Analyse keine Prozessfehler, wie bspw. die Fehlmontage der Turbolader-Baugruppe erfassen. Daraus würde eine unvollständige Betrachtung relevanter Risiken in FMEA entstehen. Die Risiken aus der Fehlmontage werden hingegen in der Beispiel-PFMEA behandelt.

Um alle Risiken vollständig zu betrachten und sowohl das Prozess- als auch das Produktdesign zu optimieren, wird demnach ein Informationsfluss von der DFMEA zur PFMEA benötigt. Damit dieser Informationsfluss in der FMEA vollständig erfassbar ist, müssen Schnittstellen zwischen DFMEA und PFMEA definiert werden. Erst die Definition der Schnittstellen ermöglicht eine sinnvolle Arbeitsteilung in der FMEA.⁶⁰

2.5 Zeitplanung bei FMEA

Entscheidend für die erfolgreiche Umsetzung eines FMEA-Projekts ist die rechtzeitige Durchführung. Da die FMEA eine präventive und keine reaktive Methode ist, werden alle FMEA grundsätzlich vor Realisierung eines Produktes oder Prozesses durchgeführt. Damit sinkt die Häufigkeit späterer Änderungen. Die FMEA sollte des Weiteren anhand eines Projektplans durchgeführt und auf Grundlage des Analysestatus der FMEA zu den Projektmeilensteinen bewertet werden. Um den Analysestatus von FMEA zu bewerten, wird Unternehmen empfohlen, die beabsichtigten Reifegrad für ihre FMEA anhand von entwicklungsprojektbezogenen Meilensteinen zu definieren. Die FMEA-Zeitplanung könnte demnach mit

⁵⁸ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 70; Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 22f.

⁵⁹ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 67ff.

⁶⁰ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 23ff.

2.6 Vorgehensweise bei FMEA

Bezug auf die Phasen in der Reifegradabsicherung für Neuteile (RGA) nach VDA vorgenommen werden.⁶¹

Tabelle 2: FMEA-Zeitplanung mit Bezug auf RGA-Phasen⁶²

Phasen der Reifegradabsicherung (RGA)		DFMEA	PFMEA
RG 0	Innovationsfreigabe für Serienentwicklung		
RG 1	Anforderungsmanagement für Vergabeumfang	<ul style="list-style-type: none"> ▪ FMEA-Planung in Konzeptphase vor Beginn der Produktentwicklung starten ▪ Informationsfluss von DFMEA zu PFMEA ▪ DFMEA und PFMEA müssen im selben Zeitraum durchgeführt werden, damit Produkt- und Prozessdesign synchron optimiert werden 	
RG 2	Festlegung der Lieferkette und Vergabe der Umfänge	Beginn der DFMEA, wenn das Designkonzept hinlänglich bekannt ist.	Beginn der PFMEA, wenn das Produktionskonzept hinlänglich bekannt ist.
RG 3	Freigabe technische Spezifikationen	Abschluss der DFMEA-Analyse vor Freigabe der Designspezifikationen.	
RG 4	Produktionsplanung abgeschlossen		Abschluss der PFMEA-Analyse vor endgültigen Prozessentscheidungen.
RG 5	Serienwerkzeugfallende Teile und Serienanlagen verfügbar	Abschluss der DFMEA-Maßnahmen vor Beginn der Fertigungsmittelauswahl für die Produktion.	
RG 6	Produkt- und Prozessfreigabe		Abschluss der PFMEA-Maßnahmen vor Produktionsprozess und Produktzulassung.
RG 7	Projektabschluss, Verantwortungsübergabe an Serie, Start Requalifikation	Neubeginn der DFMEA- und PFMEA-Planung, wenn bestehende Designs oder Prozesse geändert werden.	

2.6 Vorgehensweise bei FMEA

Der aus der Norm 9001 der International Organization for Standardization (ISO) und dem Standard 16949 der International Automotive Task Force (IATF) bekannte prozessorientierte Ansatz wurde in die Vorgehensweise zur FMEA-Durchführung übernommen. Dazu wurde das systematische Vorgehen im FMEA-Handbuch des VDA und AIAG für alle FMEA-Arten in sieben Schritte aufgeteilt:⁶³

⁶¹ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 8ff; Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 24f.

⁶² Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 25.

⁶³ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 15ff.

2.6 Vorgehensweise bei FMEA

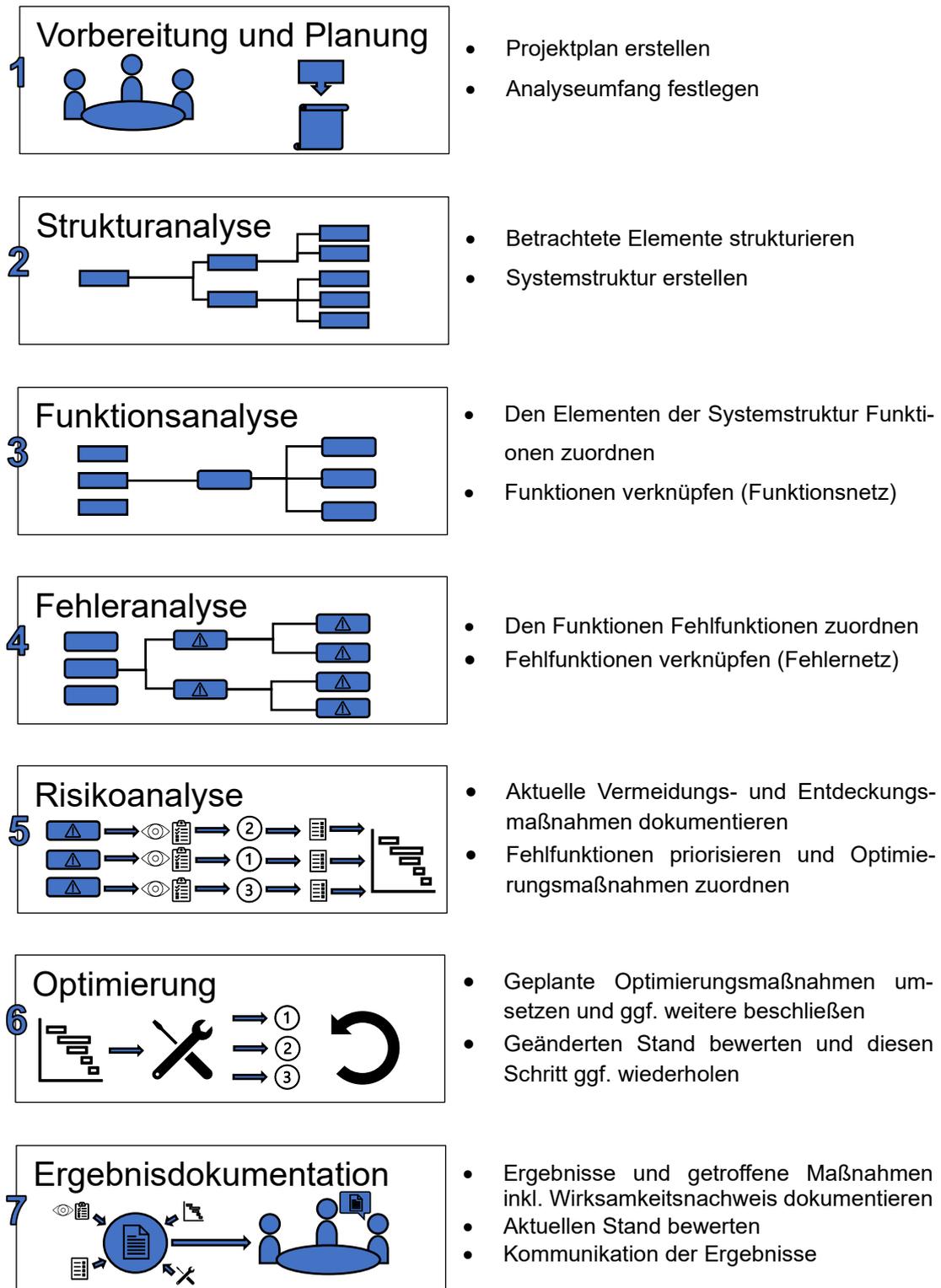


Abbildung 9: 7 Schritte der FMEA nach VDA & AIAG FMEA-Handbuch⁶⁴

Dieses Kapitel behandelt die genannten Schritte detaillierter und erläutert diese anhand der Erstellung der Beispiel-DFMEA und der Beispiel-PFMEA.

⁶⁴ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 215ff; Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeit- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 15ff.

2.6 Vorgehensweise bei FMEA

Als zentrales Hilfsmittel, welches vom VDA und AIAG für die FMEA definiert wird, sind sogenannte FMEA-Formblätter.⁶⁵ In FMEA-Formblättern wird die gesamte FMEA-Methode dokumentiert.⁶⁶ Die Formblätter für die DFMEA und die PFMEA sind nahezu identisch und besitzen den folgenden inhaltlichen Aufbau:

PLANUNG UND VORBEREITUNG (SCHRITT 1)											
Unternehmen:		Thema:		FMEA-ID:							
Standort:		FMEA-Startdatum:		Verantwortung:							
Kunde:		FMEA-Revisionsdatum:		Vertraulichkeitsstufe:							
Modelljahr(e) bzw. Programm(e):		Interdisziplinäres Team:									
FORTLAUFENDE VERBESSERUNG	STRUKTURANALYSE (SCHRITT 2)			FUNKTIONSANALYSE (SCHRITT 3)							
Thema Nr.	1. Nächsthöhere strukturelle Ebene	2. Strukturelles Fokuselement bzw. -prozess	3. Nächstniedrigere strukturelle Ebene	1. Funktion Nächsthöhere Ebene	2. Funktion Fokuselement bzw. -prozess	3. Funktion nächstniedrigere Ebene					
FEHLERANALYSE (SCHRITT 4)				RISIKOANALYSE (SCHRITT 5)							
1. Fehlerfolgen (FF) für nächsthöhere Ebene oder Endnutzer		Bedeutung (B) der FF	2. Fehlerart (FA) des Fokuselements bzw. -prozesses	3. Fehlerursache (FU) auf nächstniedrigerer Ebene		Vorhandene Vermeidungsmaßnahme (VM) für FU	Auftreten (A) der FU	Vorhandene Entdeckungsmaßnahmen für FU oder FA	Entdeckung (E) der FU/FA	FMEA Aufgabenpriorität (AP)	
OPTIMIERUNG (SCHRITT 6)											
FMEA Vermeidungsmaßnahme	FMEA Entdeckungsmaßnahme	Name des Verantwortlichen	Geplantes Fertigstellungsdatum	Status	Ergriffene Maßnahmen mit Nachweis	Fertigstellungsdatum	Bedeutung (B)	Auftreten (A)	Entdeckung (E)	FMEA Aufgabenpriorität (AP)	Bemerkungen
Farbliche Codierung											
Bezug zu nächsthöherer Ebene		Bezug zu Fokusebene		Bezug zu nächstniedrigerer Ebene		Bezug zu Bewertung					

Abbildung 10: Allgemeines FMEA-Formblatt⁶⁷

Lediglich das Formblatt für die FMEA-MSR unterscheidet sich in den Schritten fünf (Risikoanalyse) und sechs (Optimierung) von dem Formblatt aus Abb. 8. Da es sich bei der FMEA-MSR um eine Erweiterung der DFMEA handelt, würde nur bei der DFMEA das Formblatt

⁶⁵ Vgl. Dittmann, *OntoFMEA*, 37.

⁶⁶ Vgl. Dittmann, 57.

⁶⁷ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 160ff.

2.6 Vorgehensweise bei FMEA

um einige Felder erweitert werden. In der folgenden Abbildung wird die Erweiterung mit dem Formblatt der FMEA-MSR dargestellt. Die Felder, die in der FMEA-MSR zusätzlich berücksichtigt werden, sind dunkelblau hinterlegt und die aus dem herkömmlichen DFMEA-Formblatt aus Abb. 8 behalten ihre Formatierung aus Abbildung 8 bei:

FMEA-MSR Ergänzung zu RISIKOANALYSE (SCHRITT 5)								
Grund für die Häufigkeit	Häufigkeit (H) der FU	Vorhandene Monitoring-Maßnahme	Vorhandene Systemreaktion	Monitoring (M)	Schwerwiegendste Fehlerfolge nach Systemreaktion	Bedeutung (B) der FF nach FMEA-MSR	Bedeutung (B) der FF vor DFMEA und FMEA-MSR	FMEA-MSR Aufgabenpriorität (AP) vor Maßnahmen

FMEA-MSR Ergänzung zu OPTIMIERUNG (SCHRITT 6)													
FMEA-MSR Vermeidungsmaßnahme	Monitoringmaßnahme	Systemreaktion	Schwerwiegendste Fehlerfolge nach Systemreaktion	Bedeutung (B) der FF nach FMEA-MSR	Name des Verantwortlichen	Geplantes Fertigstellungsdatum	Status	Beschlossene Maßnahme mit Nachweis	Fertigstellungsdatum	Häufigkeit (H)	Monitoring (M)	Bedeutung (B) der FF vor DFMEA und FMEA-MSR	FMEA-MSR Aufgabenpriorität (AP) nach Maßnahmen

Abbildung 11: Formblatt Ergänzung FMEA-MSR⁶⁸

Wie in Abbildung 8 und Abbildung 9 dargestellt, sind jedem Schritt der FMEA-Vorgehensweise bestimmte Felder zugeordnet, die nach diesem ausgefüllt werden. FMEA-Formblätter haben eine tabellarische Struktur. Pro Themengebiet wird jeweils eine FMEA gemacht, daher liegen die Daten pro FMEA immer in langen Tabellen. Das Formblatt dient neben der Dokumentation auch der Kommunikation mit internen und externen Kunden. Grundsätzlich ist die Erstellung der FMEA direkt im Formblatt möglich, ohne die Gliederung in Betrachtungseinheiten und in Funktionsschritte durchzuführen. Dabei besteht jedoch die Gefahr, dass nur bekanntes Wissen analysiert wird oder dass eine Vermischung von Fehler und Fehlerursache erfolgt.⁶⁹

In diesem Kapitel wird thematisiert, wie die FMEA-Methode durchgeführt und in den Formblättern dokumentiert wird. Da die Methode jedoch sehr umfangreich ist, können in dieser

⁶⁸ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 180ff.

⁶⁹ Vgl. Hering und Schloske, *Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*, 8f.

2.6.1 Schritt 1: Planung und Vorbereitung

Arbeit nicht alle Einzelheiten der FMEA-Vorgehensweise erläutert werden. Für die Untersuchung der Anforderungen an die Softwareunterstützung spielen die Daten und deren Bedeutung eine tragende Rolle. Die Vorgehensweise wird also primär anhand der Felder in den Formblättern erläutert. Ein besonderer Fokus wird dabei auf die Datenflüsse innerhalb der einzelnen Schritte der FMEA gelegt, da diese Datenflüsse die Anforderungen an Softwareunterstützung für die FMEA maßgeblich prägen.

2.6.1 Schritt 1: Planung und Vorbereitung

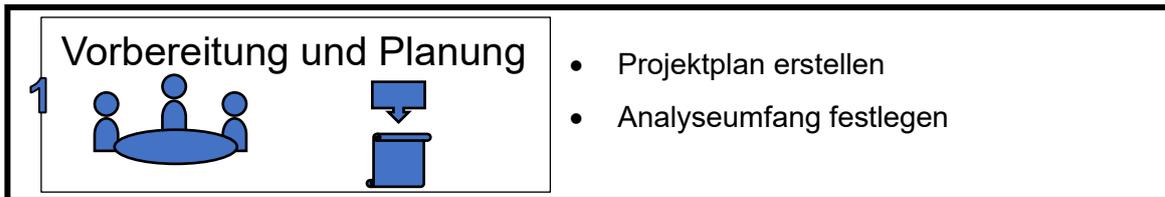


Abbildung 12: Vorbereitung und Planung Einleitung

Das Ziel des ersten Schrittes ist bei allen FMEA-Arten identisch. Der erste Schritt aus zwei groben Zielen: Die Erstellung eines Projektplans und die Festlegung des Analyseumfangs (Abbildung 12).⁷⁰ Um diese groben Ziele zu erreichen, müssen diese Zeile zunächst weiter unterteilt werden. Das Vorgehen im ersten Schritt setzt sich aus den folgenden fünf Hauptzielen der Planung und Vorbereitung zusammen:

- Festlegung des Analyseumfangs
- Projektplan mit den sog. 5Z:
 - **Z**weck: Warum wird die FMEA durchgeführt?
 - **Z**eitplan: Bis wann muss die FMEA abgeschlossen sein?
 - Team**z**usammensetzung: Welche Teammitglieder werden benötigt?
 - Aufgaben**z**uweisung: Welche Aufgaben sind durchzuführen?
 - Werk**z**euge: Womit wird die FMEA durchgeführt?
- Analysegrenzen: Was soll in die Analyse aufgenommen werden?⁷¹
- Ermittlung möglicher Basis-FMEA einschließlich der Lessons Learned
- Ergebnis ist die Schaffung einer Ausgangsbasis für die Strukturanalyse⁷²

Die notwendigen Arbeitsunterlagen für den ersten Schritt der FMEA-Methode sind demnach folgende:

1. Einzuhaltende Spezifikationen und Projektterminpläne
2. Vorhergehende FMEA sowie Basis- und Familien-FMEA

⁷⁰ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 15.

⁷¹ Vgl. Pfeufer, 19ff.

⁷² Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 31.

2.6.1 Schritt 1: Planung und Vorbereitung

3. Nachweis über Erfahrungen aus Vergleichserzeugnissen und Vorgängerprodukten
4. Gesetzliche und behördliche Vorgaben
5. Spezifische FMEA-Bewertungstabellen

Die Arbeitsunterlagen müssen dem aktuellen Stand entsprechen.⁷³ Entsprechen die Arbeitsunterlagen nicht dem aktuellen Stand, wird die FMEA nicht auf aktuellen Daten basieren. Dadurch nimmt die Qualität der gesamten FMEA ab, da alle nachfolgenden Schritte auf den Ergebnissen des ersten Schritts aufbauen.⁷⁴ Nach dem ersten Schritt, kann die Kopfzeile des FMEA-Formblatts aus Abb. 8 folgendermaßen ausgefüllt werden:⁷⁵

Tabelle 3: Schritt 1 Formblatt mit Erläuterung

PLANUNG UND VORBEREITUNG (SCHRITT 1)					
Unternehmen:	Name des für die FMEA verantwortlichen Unternehmens	Thema:	Name des Projekts (System, Teilsystem und/oder Bauteil)	FMEA-ID:	Vom verantwortlichen Unternehmen festgelegte Kennzeichnung
Standort:	Geografischer Standort	FMEA-Startdatum:	Startdatum	Verantwortung:	Name des FMEA-Verantwortlichen
Kunde:	Name des bzw. der Kunden oder Produktfamilie	FMEA-Revisionsdatum:	Letztes Revisionsdatum	Vertraulichkeitsstufe:	Unternehmensintern, geschützt, vertraulich
Modelljahr(e) bzw. Programm(e):	Kundenanwendung oder Modell bzw. Ausführung	Interdisziplinäres Team:	Teammitgliedsliste erforderlich		

Die einzelnen Eingabefelder des FMEA-Formblatts würden bei der DFMEA sowie bei der PFMEA in den meisten Fällen gleich ausgefüllt werden. Unterschiedlich wären lediglich das Thema und das Interdisziplinäre Team. Das Thema der FMEA ist ein Aspekt, der sich von DFMEA zu PFMEA unterscheidet. Bei DFMEA wird, wie in Abb.8 dargestellt, ein Projekt thematisiert, das ein System, Teilsystem oder Bauteil dargestellt. Bei PFMEA handelt es sich bei Feld „Thema“ um Projekte, die einen oder mehrere Prozesse beinhalten.⁷⁶ Dementsprechend sind die auszuwählenden FMEA-Team-Mitglieder von DFMEA und PFMEA unterschiedlich: Bei der DFMEA übernehmen Entwickler und Konstrukteure die Rolle von Verantwortlichen für das FMEA-Projekt. Bei PFMEA sind die FMEA-Verantwortlichen meistens Prozessplaner und die Arbeitsvorbereitung.⁷⁷

⁷³ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 20.

⁷⁴ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 31ff.

⁷⁵ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 169ff.

⁷⁶ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 169ff.

⁷⁷ Vgl. Pfeufer, 21f.

2.6.2 Schritt 2: Strukturanalyse

Eine Gegenüberstellung der Projektpläne mit den 5Z von der Beispiel-DFMEA und der Beispiel-PFMEA könnte dabei folgendermaßen aussehen:

Tabelle 4: Gegenüberstellung 5Z in Beispiel-DFMEA und Beispiel-PFMEA⁷⁸

5Z-Element	Beispiel-DFMEA	Beispiel-PFMEA
Zweck	Betrachtung der Neuentwicklung einer Turbolader-Baugruppe. Forderungen an das Produkt sind hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit zu minimalen Kosten.	Betrachtung der Neuentwicklung eines Montageprozesses für eine Turbolader-Baugruppe an einen ausgebauten Abgaskrümmen. Forderungen an das Produkt "Turbolader-Baugruppe" sind hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit zu minimalen Kosten.
Zeitplan	Die DFMEA ist in 8 Wochen abzuschließen	Die PFMEA ist in 10 Wochen mit Freigabe des Produkt- und Produktionsprozesses abzuschließen
Teamzusammensetzung	Projektleiter, Konstrukteur, Versuchsplaner, FMEA-Methodiker	Projektleiter, Prozessplaner, Fertigungsplaner, Versuchsplaner, FMEA-Methodiker
Aufgabenzuweisung	Aufgaben ergeben sich aus der Funktionsbeschreibung der Teammitglieder	Aufgaben ergeben sich aus der Funktionsbeschreibung der Teammitglieder
Werkzeuge	Die DFMEA wird in Teamsitzungen und einer Editor-Software durchgeführt. Werkzeuge für die Maßnahmen werden bei Bestimmung dieser festgelegt.	Die PFMEA wird in Teamsitzungen und einer Editor-Software durchgeführt. Werkzeuge für die Maßnahmen werden bei Bestimmung dieser festgelegt.

2.6.2 Schritt 2: Strukturanalyse

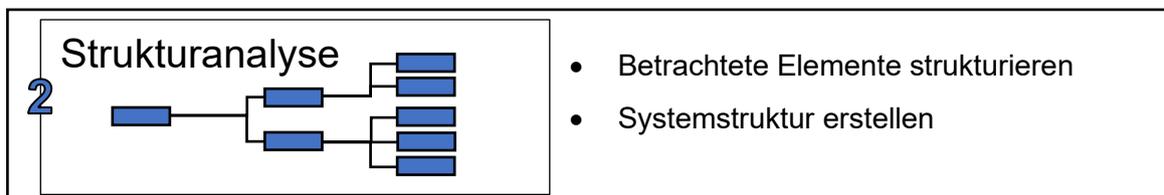


Abbildung 13: Strukturanalyse Einleitung

Die Hauptziele des zweiten Schrittes der FMEA-Durchführung die Strukturierung der betrachteten Elemente und die Erstellung einer Systemstruktur (Abbildung 13). Auf Basis der Ergebnisse aus dem ersten Schritt der FMEA teilt das FMEA-Team das betrachtete System oder Systemelement in Strukturebenen ein.⁷⁹ Das Ergebnis des zweiten Schritts ist eine Grafik des Betrachtungsumfangs, die als Ausgangsbasis für die Funktionsanalyse dient. Der zweite Schritt ist das Kernstück der FMEA, da die Strukturanalyse die Beziehungen von Systemelementen und Teilsystemen enthält.⁸⁰ Da die DFMEA und PFMEA Systeme

⁷⁸ Vgl. Pfeufer, 83ff.

⁷⁹ Vgl. Pfeufer, 17ff.

⁸⁰ Vgl. Pfeufer, 23.

aus unterschiedlichen Perspektiven betrachten, gibt es signifikante Unterschiede zwischen den FMEA-Arten bei der Strukturanalyse.⁸¹

Strukturanalyse in der DFMEA

Die DFMEA ist eine Analyse der Produktfunktionen, bei der konstruktive Schnittstellen, Wechselwirkungen und Komponentenabstände untersucht werden.⁸² Daher sind Block-/Boundary-Diagramme und Strukturbäume wesentliche Hilfsmittel für die DFMEA. Ein Block-/Boundary-Diagramm ist eine Grafik, die physische und logische Wechselwirkungen zwischen Produktkomponenten darstellt.⁸³ Strukturbäume sind ebenfalls Grafiken, die Systemelemente hierarchisch anordnen und die Abhängigkeiten über Strukturverbindungen darstellen. Die verständlich strukturierte Illustration des gesamten Systems wird dadurch sichergestellt, dass jedes Systemelement nur einmal vorhanden ist.⁸⁴

Prinzipiell besitzen Strukturbäume für DFMEA den folgenden Aufbau:

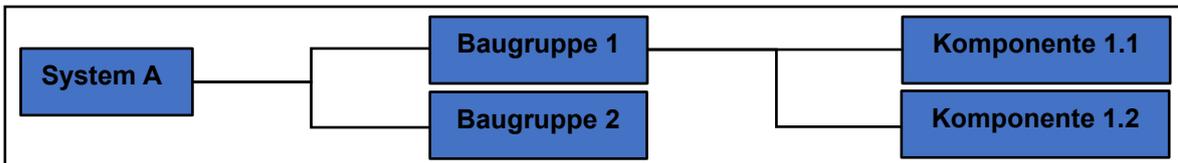


Abbildung 14: Aufbau Strukturbaum DFMEA⁸⁵

Ein Strukturbaum nach Vorbild der Abbildung 14 für das vorangegangene Beispiel mit der Turbolader-Baugruppe könnte aus den Abbildungen von Abbildung 1 bis Abbildung 4 zusammengefasst werden:

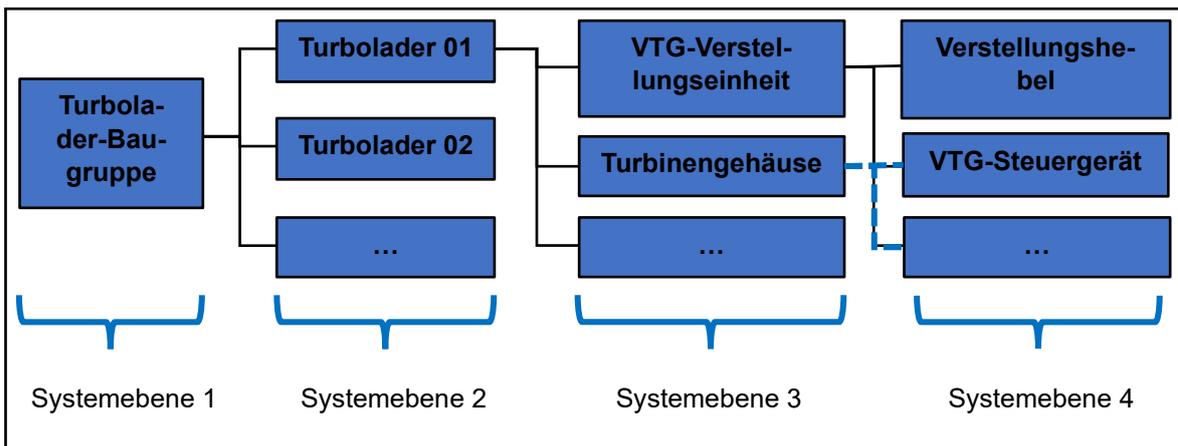


Abbildung 15: Beispiel Strukturbaum Turbolader-Baugruppe

⁸¹ Vgl. Pfeufer, 24ff; Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monitoring & Systemreaktion*, 21ff.

⁸² Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 24.

⁸³ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monitoring & Systemreaktion*, 35.

⁸⁴ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 39.

⁸⁵ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 25.

Strukturanalyse in der PFMEA

Die drei Punkte stehen für weitere Unterkomponenten derselben Systemebene, in die die einzelnen Systemelemente unterteilt werden könnten. Die blaue, gestrichelte Linie zwischen dem Systemelement „Turbinengehäuse“ aus Strukturebene 3 und dem Systemelement „VTG-Steuergerät“ auf Systemebene 4 soll darstellen, dass sich auch mehrere Systemelemente der nächsthöheren Ebene auf dasselbe Systemelement der nächstniedrigeren Ebene beziehen können. Wie aus Abbildung 1 und Abbildung 3 hervorgeht, befindet sich das VTG-Steuergerät tatsächlich auf dem Turbinengehäuse und könnte in der Strukturanalyse als Teil des Turbinengehäuses dargestellt werden. Nachdem die Strukturanalyse vollzogen wurde, kann der Teil der Strukturanalyse im FMEA-Formblatt ausgefüllt werden.⁸⁶ Für den beispielhaften Strukturbaum der Turbolader-Baugruppe aus Abb. 11 könnte der Abschnitt für die System-DFMEA folgendermaßen ausgefüllt werden:

Tabelle 5: Schritt 2 Beispiel-DFMEA ausgefüllt

DFMEA-STRUKTURANALYSE (SCHRITT 2)		
1. Nächsthöhere strukturelle Ebene	2. Strukturelles Fokuselement bzw. -prozess	3. Nächstniedrigere strukturelle Ebene
Turbolader-Baugruppe	Turbolader 01	VTG-Verstellungseinheit

In diesem Kapitel werden sowohl für PFMEA als auch für DFMEA hohe Abstraktionsebenen gewählt, da weitere Detaillierungen das Vorgehen in der FMEA nicht verändern würden.

Strukturanalyse in der PFMEA

Die PFMEA ist eine Analyse der Prozessschritte. Dabei werden das Zusammenwirken, die Eigenschaften und Merkmale von Teilprozessen unter verschiedenen Prozesseinflussgrößen untersucht.⁸⁷ Bei der PFMEA sind Strukturbäume und Prozessflussdiagramme hilfreiche Werkzeuge, um den physischen Prozessfluss darzustellen.⁸⁸ Die Strukturbäume in PFMEA unterscheiden sich jedoch von denen, die in einer DFMEA zum Einsatz kommen. Das Prozesselement ist die oberste Ebene im Strukturbaum und kann als Endergebnis aller erfolgreich abgeschlossenen Prozessschritte angesehen werden. Die Prozessschritte stehen im Fokus der Analyse und werden von den „4M Ursachenelementen“ beeinflusst, die Mensch, Maschine, Material und Mitwelt umfassen. Die „4M“ sind dabei ein Akronym für Mensch, Maschine, Material und Mitwelt, die im Kontext der Strukturanalyse Einflussgrößen

⁸⁶ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monitoring & Systemreaktion*, 40.

⁸⁷ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 27; Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monitoring & Systemreaktion*, 85ff.

⁸⁸ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 27.

auf die Prozessschritte darstellen und somit die Prozessursachenelemente bilden. Die Prozessursachenelemente sind die niedrigste Ebene der Strukturbäume von PFMEA.⁸⁹ Daher würde ein Strukturbaum für PFMEA grundsätzlich folgende Struktur aufweisen:

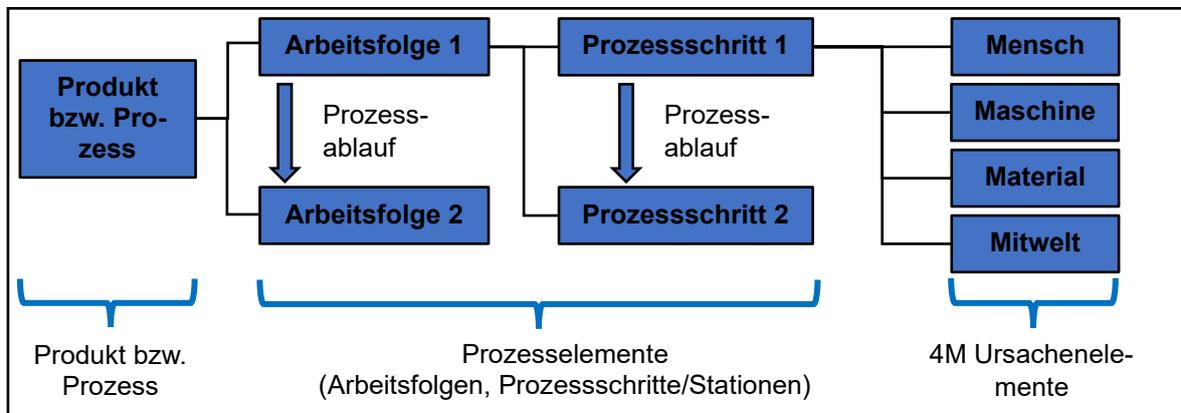


Abbildung 16: Aufbau Strukturbaum PFMEA⁹⁰

Der Strukturbaum der PFMEA beinhaltet keine Bauteilstrukturen, sondern Prozessstrukturen (Abbildung 16). Auch diese können unterschiedliche Abstraktionsebenen aufweisen. In Abbildung 17 werden die Prozessstrukturen somit in Arbeitsfolgen (AFO) (Prozesselemente einer höheren Abstraktionsebene) und Prozessschritte (PSR) (Prozesselemente der nächstniedrigeren Abstraktionsebene) betitelt. Diese Prozessstrukturen basieren auf Bauteilen, die aus der Strukturanalyse der DFMEA hervorgehen. Dadurch entsteht ein Datenfluss von der DFMEA zur PFMEA. Der Datenfluss von der DFMEA zur PFMEA, der Informationen über Bauteilstrukturen einschließt, beeinflusst maßgeblich die Qualität und Genauigkeit der PFMEA-Analyse.⁹¹ Für die Beispiel-DFMEA wird ein Montageprozess der Abgasturbolader-Baugruppe an den ausgebauten Abgaskrümmern betrachtet. Dieses Beispiel wurde gewählt, da die reale Turbolader-Baugruppe, die als Vorbild für die Beispiel-DFMEA und die Beispiel-PFMEA dient, mit dem Abgaskrümmern zusammen an den Motor montiert wird.⁹²

Für die Montage des Turboladers an den Abgaskrümmern werden folgende Prozesse benötigt:

1. Arbeitsvorbereitung: Bereitstellung der Materialien an den Montagearbeitsplatz
2. Montageprozess: Der Montageprozess der Turbolader-Baugruppe an den Abgaskrümmern selbst

⁸⁹ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 87f.

⁹⁰ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 87; Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 28.

⁹¹ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 25.

⁹² Vgl. *ПРОИЗВОДСТВО АВТОМОБИЛЕЙ BMW - Производственный процесс на заводе двигателей*.

3. Abtransport: Abtransport der montierten Komponenten für die Motormontage

Zu der Strukturanalyse in der PFMEA gehören aber auch die 4M Ursachenelemente: Mensch, Maschine, Mitwelt und Material. Diese werden für jeden kritischen ausgeführt und untersucht. In der hier vorgestellten Beispiel-PFMEA wird der Montageprozess als kritischer Prozess betrachtet. Das 4M-Ursachenelement Mensch wäre somit der Monteur, die Maschine aus den 4M wären die Montagewerkzeuge, das 4M-Ursachenelement Material wären die Dichtungen und Schrauben und die Mitwelt könnten Temperatur, Feuchtigkeit und Staub sein. Der sich daraus ergebende Strukturbaum wäre daher wie folgt aufgebaut:

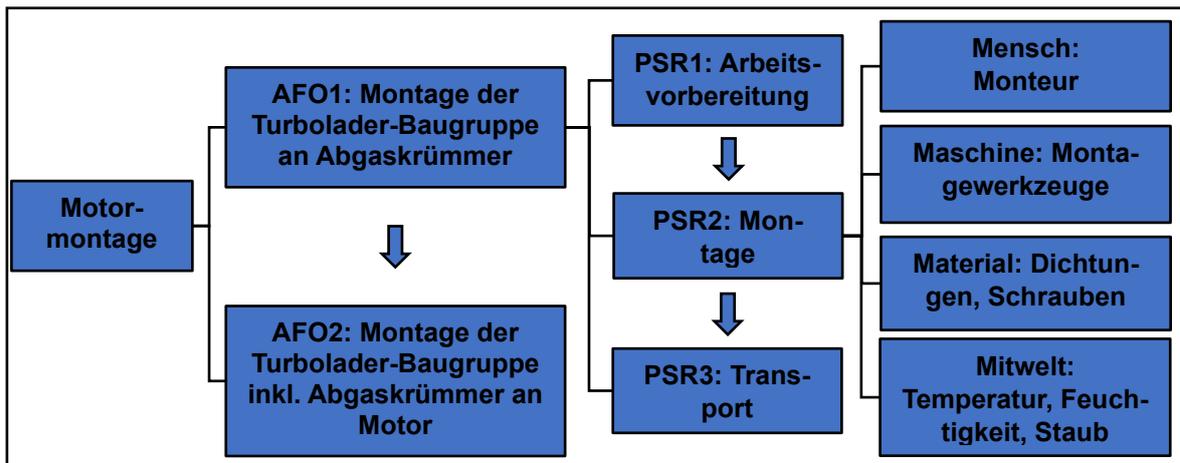


Abbildung 17: Strukturbaum Beispiel-PFMEA⁹³

In der weiterfolgenden Analyse wird das kritische Prozessursachenelement ausgewählt, welches im folgenden Schritt auf potenzielle Fehler untersucht werden soll. Das bildet auch den wesentlichen Unterschied der Strukturanalyse in DFMEA und PFMEA. Bei der PFMEA ist das niedrigste Strukturelement immer ein Prozessursachenelement.⁹⁴ In dieser Beispiel-PFMEA werden die Prozessursachenelemente Mitwelt und Material nicht ausgewählt, da diese Elemente schon in der Analyse der Arbeitsvorbereitung (PSR1) erfolgskritisch wären:

Tabelle 6: Schritt 2 Beispiel-PFMEA Formblatt ausgefüllt

PFMEA-STRUKTURANALYSE (SCHRITT 2)		
1. Nächsthöhere strukturelle Ebene	2. Strukturelles Fokuselement bzw. -prozess	3. Nächstniedrigere strukturelle Ebene (Prozessursachenelement)
AFO1: Montage Turbolader-Baugruppe an Abgaskrümmern	PSR2: Montage	Mensch: Monteur
AFO1: Montage Turbolader-Baugruppe an Abgaskrümmern	PSR2: Montage	Maschine: Montagewerkzeuge

⁹³ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monitoring & Systemreaktion*, 87.

⁹⁴ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 88.

2.6.3 Schritt 3: Funktionsanalyse

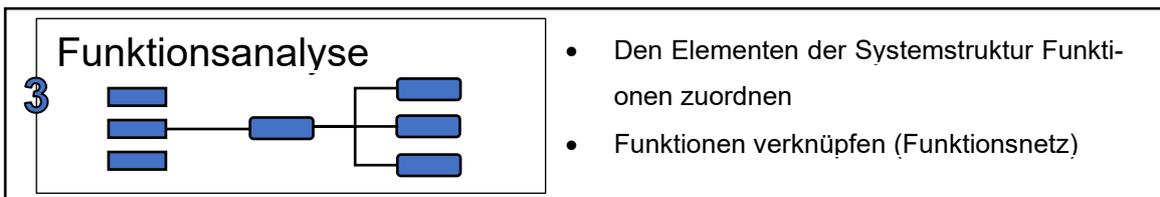


Abbildung 18: Funktionsanalyse Einleitung

Ist die Strukturanalyse fertiggestellt, so werden den Strukturelementen im dritten Schritt Funktionen zugeordnet und anschließend verknüpft (Abbildung 18). Eine Funktion beschreibt den vorgesehenen Zweck eines Objekts bzw. Systemelements. Es können einem Systemelement auch mehrere Funktionen zugeordnet sein. Für die FMEA-Dokumentation sollte die Beschreibung einer messbaren Funktion eine Teilsatzstruktur aufweisen, bei der ein Substantiv und ein darauffolgendes Verb enthalten sind. Ferner sollte das Verb in der Funktionsbeschreibung im Präsens stehen und die gesamte Funktionsbeschreibung eindeutig sein.⁹⁵

Als Hilfsmittel für die Ermittlung der Funktionen definiert das VDA & AIAG FMEA-Handbuch Funktionsbäume (oder Funktionsnetze) und Parameterdiagramme.⁹⁶ Ein Parameterdiagramm ist die grafische Darstellung der Umgebung eines Produkts und zeigt auf, welche Faktoren die Umwandlung von Input in Output beeinflussen. Diese kommen sowohl bei der DFMEA als auch bei der PFMEA zum Einsatz und weisen nur geringfügige Unterschiede auf.⁹⁷ Ein Funktionsbaum bzw. ein Funktionsnetz ist dasselbe wie ein Strukturbaum, nur dass dabei Funktionen zu den Strukturelementen enthalten sind.⁹⁸ Um die Darstellung fokussiert und klar zu halten, konzentriert sich dieser Abschnitt ausschließlich auf Funktionsbäume. Die Strukturelemente für die Erweiterung des Strukturbaums werden aus dem DFMEA-Formblatt in Tabelle 5 ausgewählt:

⁹⁵ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 42.

⁹⁶ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 31ff; Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 47ff.

⁹⁷ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 31ff; Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 47ff.

⁹⁸ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 47f.

2.6.3 Schritt 3: Funktionsanalyse

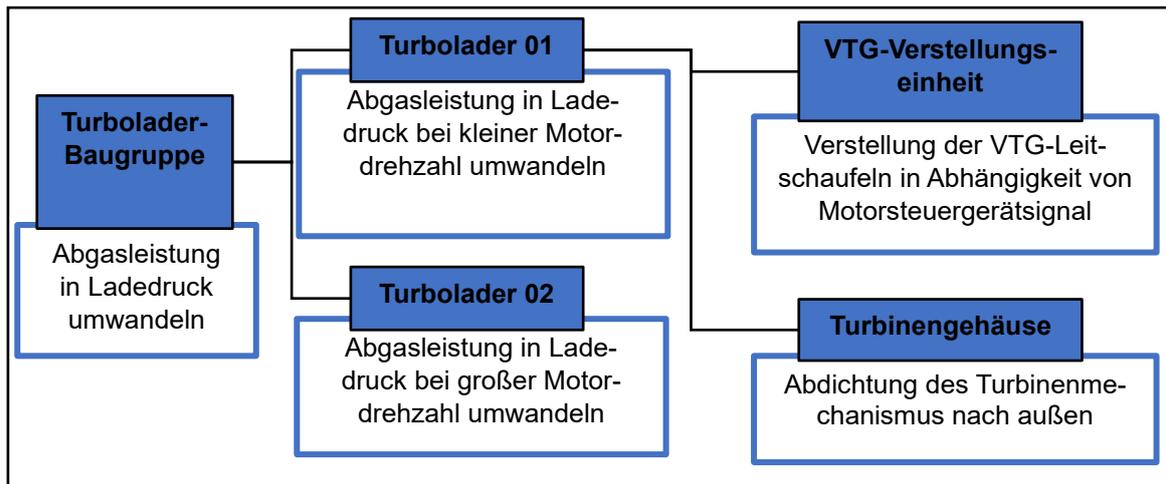


Abbildung 19: Funktionsbaum Beispiel-DFMEA⁹⁹

Das DFMEA-Formblatt kann für den dritten Schritt demnach folgendermaßen ausgefüllt werden:

Tabelle 7: Schritt 3 Beispiel-DFMEA in Formblatt ausgefüllt

DFMEA-FUNKTIONSANALYSE (SCHRITT 3)		
1. Funktion Nächsthöhere Ebene	2. Funktion Fokuselement bzw. -prozess	3. Funktion nächstniedrigere Ebene
Abgasleistung in Ladedruck umwandeln	Abgasleistung in Ladedruck bei kleiner Motordrehzahl umwandeln	Verstellung der VTG-Leitschaufeln in Abhängigkeit von Motorsteuergerätsignal

Der dritte Schritt erfolgt bei der PFMEA analog zur DFMEA und der Funktionsbaum kann aus den Strukturelementen in der Tabelle 6 erstellt werden. Der einzige Unterschied zwischen DFMEA- und PFMEA-Funktionsanalyse besteht darin, dass die Funktionen auf mehreren Ebenen definiert werden. Es erfolgt eine Unterscheidung in Funktionen im eigenen Werk, Funktionen im belieferten Werk und Funktionen beim Endnutzer. Dabei werden die Funktionen für den Endnutzer von der DFMEA zur PFMEA und innerhalb der PFMEA von der Schnittstelle mit dem Endnutzer an alle niedrigeren Elemente im Strukturpfad vererbt. Die Funktionen, die das belieferte Werk betreffen, werden innerhalb der PFMEA ausschließlich von der Schnittstelle zwischen beliefertem und eigenem Werk zu allen untergeordneten Strukturelementen entlang des gleichen Strukturpfads weitergeleitet.¹⁰⁰ Um unnötige Komplexität zu vermeiden, wird für die Beispiel-PFMEA angenommen, dass kein beliefertes Werk existiert und die Erzeugnisse des eigenen Werks direkt an den Endkunden

⁹⁹ Vgl. Pucher und Zinner, *Aufladung von Verbrennungsmotoren*, 80ff.

¹⁰⁰ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 94ff.

2.6.3 Schritt 3: Funktionsanalyse

veräußert werden. Für den Endnutzer hat der Gesamtmotor die Funktion, dass eine bestimmte Antriebsleistung bereitgestellt wird. Diese Funktion würde, da sie sich auf dem gleichen Strukturpfad befindet, als Funktion von *AFO1* für den Endnutzer definiert werden. Um daraus den Funktionsbaum erstellen zu können, müssen jedoch die Tätigkeiten bei der Montage genauer definiert werden. Ein detailliertes Montageverfahren für die Komponenten aus Tabelle 1 könnte Schritte wie folgende umfassen:

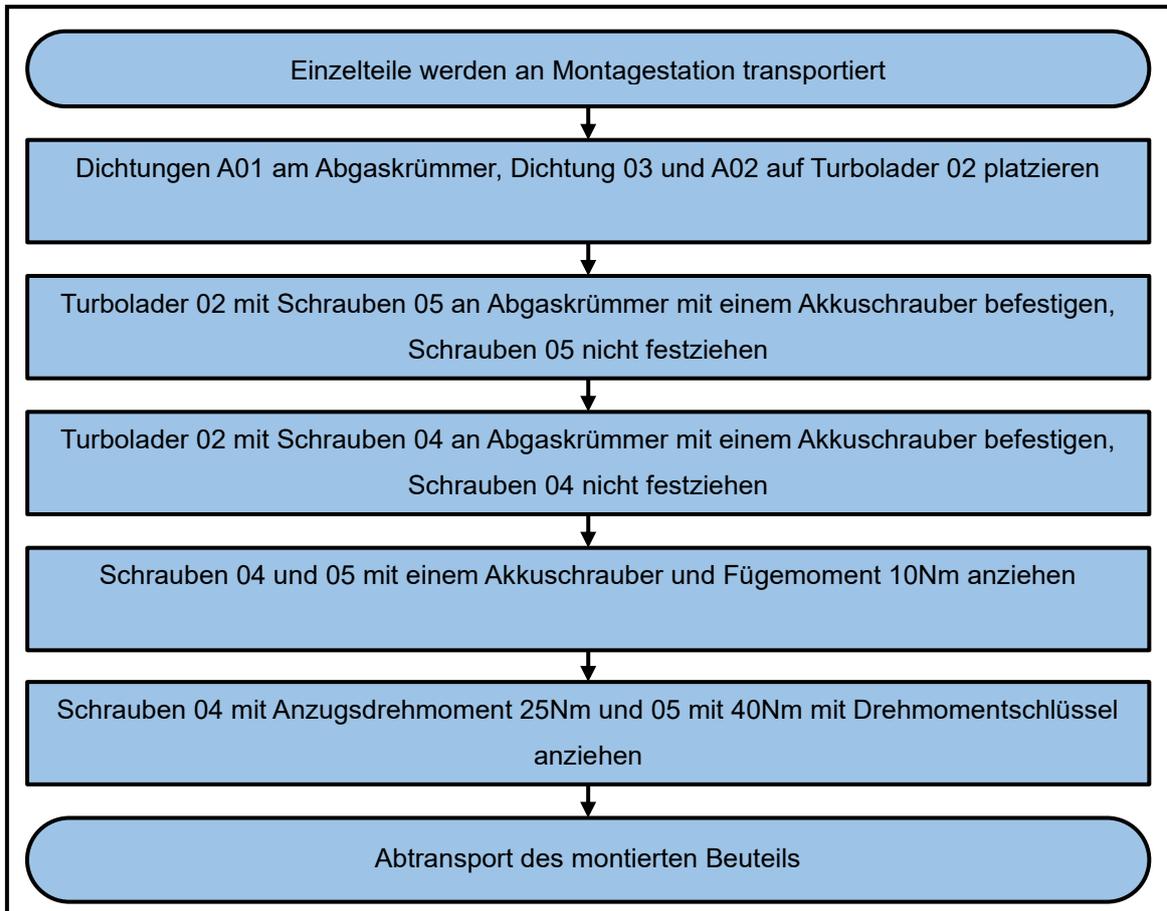


Abbildung 20: Prozessdiagramm Montagetätigkeiten

Eine Teilung der Werkzeuge und der Tätigkeiten des Monteurs aus Abbildung 20 führt zu dem folgenden PFMEA-Funktionsbaum:

2.6.3 Schritt 3: Funktionsanalyse

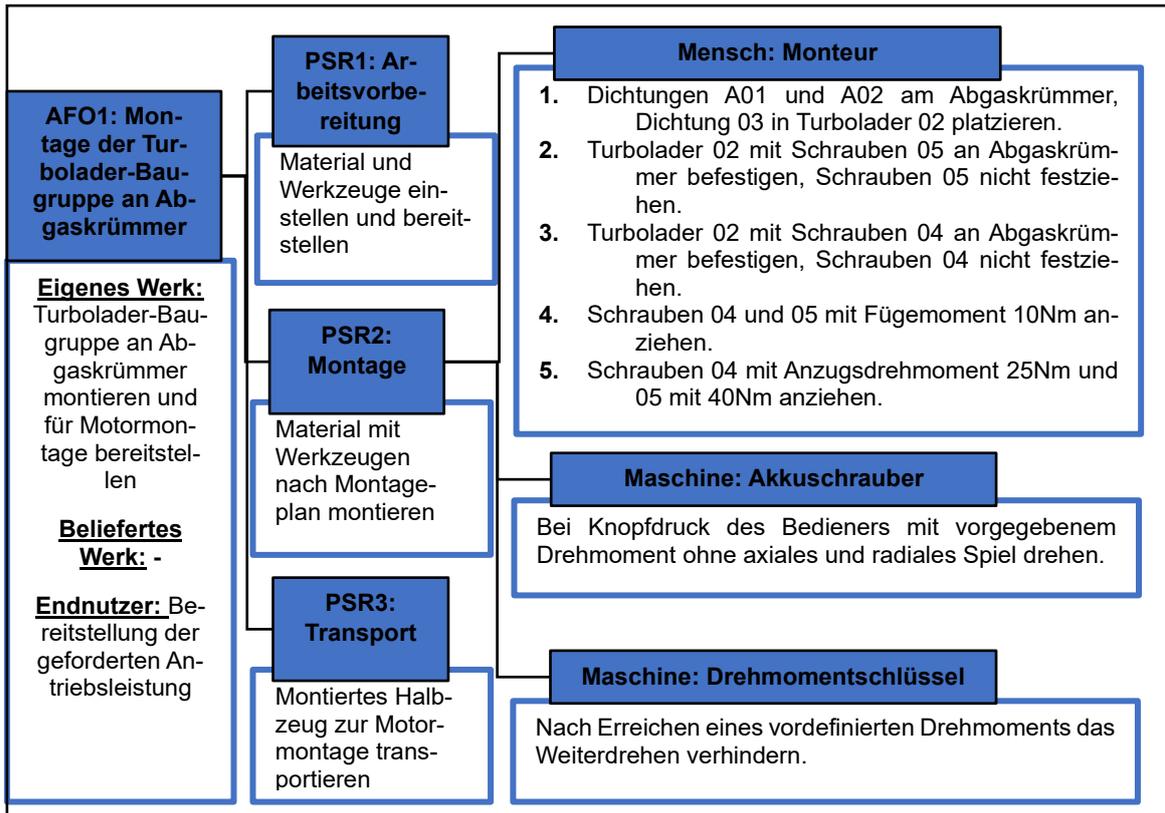


Abbildung 21: Funktionsbaum Beispiel-PFMEA

Dem Monteur sind mehrere Funktionen zugeordnet und das 4M-Element Maschine wurde in zwei Teile unterteilt (Abbildung 21). Da die Montage mit zwei Maschinen, dem Akkuschauber und dem Drehmomentschlüssel erfolgt und beide unterschiedliche Funktionen haben, müssen in der Funktionsanalyse auch zwei Maschinen definiert werden.¹⁰¹ Dementsprechend würden die Pfade aus dem Funktionsbaum untersucht und diejenigen im PFMEA-Formblatt dokumentiert werden, die in der Fehleranalyse betrachtet werden sollen. Hier wird exemplarisch der Pfad zum Drehmomentschlüssel ausgewählt:

Tabelle 8: Schritt 3 Beispiel-PFMEA Formblatt ausgefüllt¹⁰²

PFMEA-FUNKTIONSANALYSE (SCHRITT 3)		
1. Funktion Nächsthöhere Ebene	2. Funktion Fokuselement bzw. -prozess (quantitativer Wert optional)	3. Funktion nächstniedrigere Ebene (Prozessursachenelement oder -merkmal)
<p>Eigenes Werk: Turbolader-Baugruppe an Abgaskrümmern montieren und für Motormontage bereitstellen</p> <p>Beliefertes Werk: -</p> <p>Endnutzer: Bereitstellung der geforderten Antriebsleistung</p>	Material mit Werkzeugen nach Montageplan montieren	Drehmomentschlüssel verhindert das Weiterdrehen nach Erreichen des vordefinierten Drehmoments von 25Nm

¹⁰¹ Vgl.-Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 93.

¹⁰² Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 94.

2.6.4 Schritt 4: Fehleranalyse

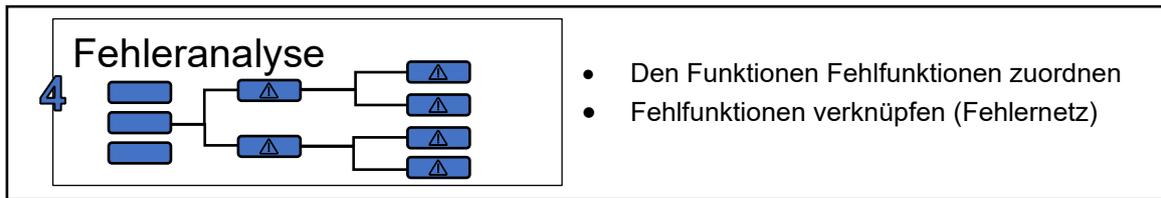


Abbildung 22: Fehleranalyse Einleitung

Die wichtigsten Ziele der Fehleranalyse die Zuordnung der Fehlfunktionen zu den Funktionen aus dem dritten Schritt sowie die Verknüpfung dieser in einem Fehlernetz (Abbildung 22). Das Fehlernetz ist dabei eine Erweiterung des Funktionsnetztes um die Fehlfunktionen zu den einzelnen Funktionen und Systemelementen. Als Fehlfunktion wird dabei die Nichterfüllung der im dritten Schritt der FMEA definierten Funktion betrachtet.¹⁰³ Dabei werden die Fehler in Fehlerfolge, Fehlerart und Fehlerursache kategorisiert. Die Fehlerfolge ist dabei die Fehlfunktion auf der nächsthöheren Strukturebene des Betrachtungselements, die Fehlerart die Fehlfunktion auf der Ebene des Betrachtungselements und die Fehlerursache die Fehlfunktion des Elements auf der nächstniedrigeren Strukturebene.¹⁰⁴

Eine Abstufung der Fehlerfolgen (FF), Fehlerarten (FA) und Fehlerursachen (FU) könnte von Gesamtfahrzeugebene bis auf Merkmalsebene für die Beispiel-DFMEA den folgenden Aufbau haben:

Tabelle 9: Mögliche Abstufung der Fehler für Beispiel-DFMEA

Analyseebene	System-DFMEA	System-DFMEA	Komponenten-DFMEA	Analyseebene	Beispielfehler
Obersystem	FF			Gesamtfahrzeug	Gesetzliche Abgasnormen für Neuzulassung nicht erfüllt
System	FA	FF		Turbolader- Baugruppe	Abgasleistung nicht umgewandelt
Systemelement	FU	FA	FF	Turbolader 01	Abgasleistung bei kleiner Motordrehzahl nicht umgewandelt
Teilsystemelement		FU	FA	VTG-Verstellungseinheit	VTG-Leitschaufeln nicht verstellt
Bauteilelement			FU	VTG-Elektromotor	Kommunikation zwischen VTG-Elektromotor und Motorsteuergerät wurde unterbrochen

¹⁰³ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 99f.

¹⁰⁴ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 54f.

2.6.4 Schritt 4: Fehleranalyse

Aus dieser Abstufung kann ein Fehlernetz erstellt werden, das eine Erweiterung des Strukturbauums darstellt. Die Erweiterung des Funktionsnetzes um die Fehlerarten für die Beispiel-DFMEA mit dem Pfad *Turbolader-Baugruppe – Turbolader 01 – VTG-Verstellungseinheit* würde demnach wie folgt aussehen:

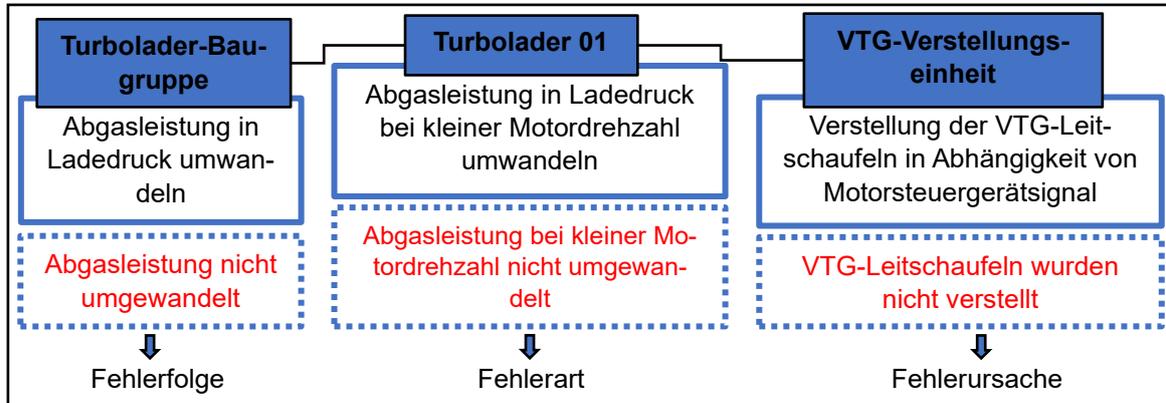


Abbildung 23: Fehlernetz Beispiel-DFMEA

Dieses Fehlernetz wird im FMEA-Formblatt entsprechend der Strukturelemente und der Funktionen aus der Struktur- und Funktionsanalyse dokumentiert:

Tabelle 10: Schritt 4 Beispiel-DFMEA Formblatt ausgefüllt¹⁰⁵

DFMEA-FEHLERANALYSE (SCHRITT 4)		
1. Fehlerfolgen (FF) für nächsthöhere Ebene oder Endnutzer	2. Fehlerart (FA) des Fokuselements bzw. -prozesses	3. Fehlerursache (FU) auf nächstniedrigerer Ebene
Abgasleistung nicht umgewandelt	Abgasleistung bei kleiner Motordrehzahl nicht umgewandelt	VTG-Leitschaufeln nicht verstellt

Bei der PFMEA wird analog vorgegangen: Den Funktionen aus dem dritten Schritt werden Fehlfunktionen zugeordnet, die entsprechend den Strukturebenen in Fehlerfolge, Fehlerart und Fehlerursache kategorisiert werden. Der einzige Unterschied zur DFMEA stammt aus der Funktionsanalyse und besteht darin, dass die Fehlerfolgen in drei Kategorien eingeteilt werden: Fehlerfolgen für das eigene Werk, für das belieferte Werk und für den Endnutzer. Die Fehlerfolgen für den Endnutzer und für das belieferte Werk sind Fehlerfolgen, die in diesem Beispiel aus höheren Strukturebenen stammen und niedrigeren Systemelementen auf dem Fehlerpfad zugeordnet werden. Die Risiken für den Endnutzer sind identisch mit denen in der DFMEA, weil die Nichterfüllung von Prozessanforderungen zu einer Nichterfüllung von Designanforderungen führt.¹⁰⁶

Der in der Struktur- und Funktionsanalyse betrachtete Pfad *AFO1 - PSR2 – Maschine* würde den folgenden Fehlerbaum erzeugen:

¹⁰⁵ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 93.

¹⁰⁶ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 94ff.

2.6.4 Schritt 4: Fehleranalyse

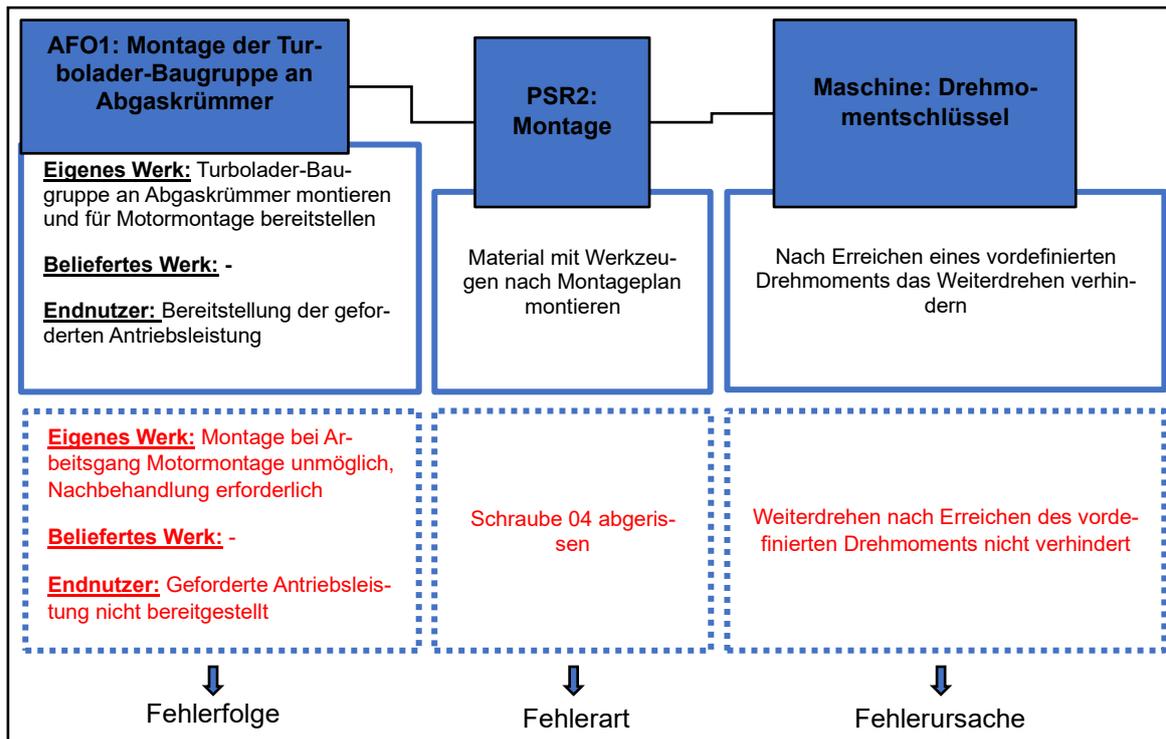


Abbildung 24: Fehlerbaum Beispiel-PFMEA

Die Dokumentation dieses Fehlerbaums lässt das nachfolgende Fragment des DFMEA-Formblatts entstehen:

Tabelle 11: Schritt 4 Beispiel-PFMEA ausgefüllt¹⁰⁷

PFMEA-FEHLERANALYSE (SCHRITT 4)		
1. Fehlerfolgen (FF) für nächsthöhere Ebene oder Endnutzer	2. Fehlerart (FA) des Fokuselements bzw. -prozesses	3. Fehlerursache (FU) auf nächstniedrigerer Ebene
<p>Eigenes Werk: Montage bei Arbeitsgang Motormontage erfordert Nachbehandlung</p> <p>Beliefertes Werk: -</p> <p>Endnutzer: Geforderte Antriebsleistung nicht bereitgestellt</p>	Schraube 04 abgerissen	Weiterdrehen nach Erreichen des vordefinierten Drehmoments nicht verhindert

Das Ergebnis des vierten Schritts ist bei DFMEA und PFMEA ein Fehlernetz aus zahlreichen Fehlerbäumen, welches die Fehlerarten, Fehlerfolgen und Fehlerursachen mit ihren Zuordnungen zu Systemelementen, Funktionen und Strukturebenen beinhaltet. Für die folgenden Schritte der FMEA müssen die Fehlfunktionen vollständig und korrekt dokumentiert sein.¹⁰⁸

¹⁰⁷ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 102.

¹⁰⁸ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 105.

2.6.5 Schritt 5: Risikoanalyse

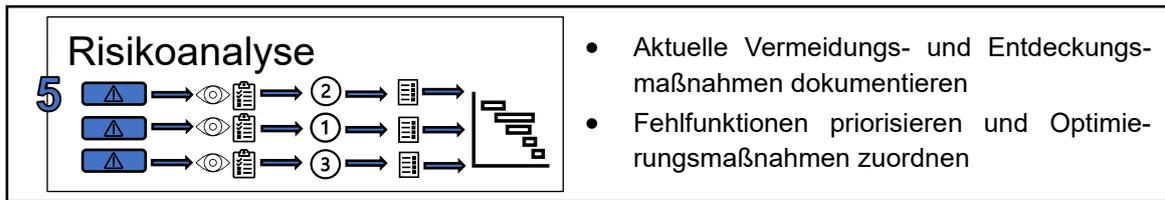


Abbildung 25: Risikoanalyse Einleitung

Die wesentlichen Ziele der Risikoanalyse die Dokumentation der aktuellen Optimierungsmaßnahmen, die bereits vor Durchführung der FMEA existent sind, die Zuordnung dieser zu den Fehlfunktionen und die anschließende Bewertung der daraus resultierenden Risiken (Abbildung 25).

Die Optimierungsmaßnahmen in einer FMEA ohne FMEA-MSR lassen sich in vorhandene Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen aufteilen. Die *vorhandenen Vermeidungsmaßnahmen (VM)* beschreiben, wie die Ursache einer potenziellen Fehlerart vermieden wird. Vermeidungsmaßnahmen beziehen sich auf die Leistungsanforderung und beeinflussen in Kombination mit der Fehlerart die Bewertung für das *Auftreten (A)*. Mit den *vorhandenen Entdeckungsmaßnahmen (EM)* wird das Vorhandensein einer Fehlerart oder einer Fehlerursache überprüft, bevor das Betrachtungsobjekt zur Produktion freigegeben wird. In Kombination mit der Fehlerart bestimmen diese den Wert für die *Entdeckung (E)*. Die Wirksamkeit der vorhandenen Optimierungsmaßnahmen sollte nicht angenommen, sondern durch Tests bestätigt werden.

Die schwerwiegendste Fehlerfolge einer Fehlerart führt zu der *Bedeutung (B)* einer Fehlfunktion.¹⁰⁹ Die Werte für *A*, *E* und *B* sind ganzzahlige Werte zwischen eins und zehn, die auf Basis von im VDA & AIAG FMEA-Handbuch definierten Bewertungskatalogen gebildet werden. Aus diesen drei Werten wird die *Aufgabepriorität (AP)* ermittelt. Sie kann *H (hoch)*, *M (mittel)* und *N (niedrig)* sein. Auf Basis der Risikobewertung kann das Team entscheiden, ob Maßnahmen zur Risikoreduktion notwendig sind.¹¹⁰

Für die Fehlerursache *VTG-Leitschaufeln nicht verstellt* in der Beispiel-DFMEA wäre die vorhandene Vermeidungsmaßnahme die Systemauslegung gemäß Simulation und Toleranzberechnung. Da der VTG-Turbolader nur geringfügige Änderungen an einer vorherigen Konstruktion mit bewährten Technologien und Materialien darstellt und die Anwendung, der Betriebszyklus oder die Betriebsbedingungen ähnlich sind und die Vermeidungsmaßnahme Mängel im Produkt aufdecken, aber nur begrenzt Hinweise auf die Leistung geben kann,

¹⁰⁹ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 59ff.

¹¹⁰ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 63ff.

2.6.5 Schritt 5: Risikoanalyse

wird das Auftreten A mit dem Wert fünf bewertet. Eine hohe Bewertung für A sagt aus, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache hoch ist.¹¹¹

Als Entdeckungsmaßnahme wird eine Funktionsprüfung des Turboladers 01 gewählt. Dabei wird die Funktionsprüfung als bewährte Testmethode für die Verifizierung der Funktionalität des gesamten *Turboladers 01* angenommen. Das Ergebnis dieses Tests ist eine qualitative Aussage darüber, ob der gesamte *Turbolader 01* funktionsfähig ist oder nicht. Dadurch würde diese Funktionsprüfung unter die Kategorie *OK-NOK-Test* im VDA & AIAG FMEA-Handbuch fallen und *E* mit vier bewertet werden. Eine hohe Bewertung für *E* bedeutet eine geringe Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerart oder der Fehlerursache.¹¹²

Die schwerwiegendste Fehlerfolge auf der nächsthöheren Strukturebene ist die Nichtumwandlung der Abgasleistung (Tabelle 10). Diese würde einen immensen Verlust der Antriebsleistung nach sich ziehen. Diese Fehlerfolge wäre eine Einschränkung einer für den normalen Fahrbetrieb über die Lebensdauer notwendige Hauptfunktion, die mit der Zahl sieben bewertet wird.¹¹³ Des Weiteren muss bei der Bedeutung geprüft werden, ob es auf diesem Fehlerpfad gravierende Fehlerfolgen gibt, da die Bedeutung der schwerwiegendsten Fehlerfolge im gesamten Fehlerpfad analysiert werden soll.¹¹⁴ Die gravierendste Fehlerfolge ist die Nichterfüllung einer fiktiven gesetzlichen Abgasnorm (Tabelle 10). Diese muss mit dem Wert neun für *B* bewertet werden, da diese Fehlerfolge eine Nichteinhaltung von gesetzlichen oder behördlichen Vorgaben darstellt.¹¹⁵

Die Kombination aus den Werten für *A*, *B* und *E* erzeugt eine *AP* mit der Bewertung *H* und bedeutet somit eine hohe Aufgabenpriorität für dieses Risiko. Eine Dokumentation der Werte aus der Risikoanalyse lässt das folgende Fragment der Beispiel-DFMEA entstehen:

Tabelle 12: Schritt 5 Beispiel-DFMEA

Übertrag	DFMEA-RISIKOANALYSE (SCHRITT 5)				
Bedeutung (B) der FF	Vorhandene Vermeidungsmaßnahme (VM) für FU	Auftreten (A) der FU	Vorhandene Entdeckungsmaßnahmen für FU oder FA	Entdeckung (E) der FU/FA	FMEA-Aufgabenpriorität (AP)
9	Systemauslegung gemäß Simulation und Toleranzberechnung	4	FA: Funktionsprüfung des Turboladers 01 FU: -	5	H

Das Vorgehen bei der PFMEA ist identisch mit dem der DFMEA. Der einzige Unterschied besteht darin, in der PFMEA Prozess-Risiken statt Design-Risiken bewertet werden.

¹¹¹ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 67.

¹¹² Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 69.

¹¹³ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 64.

¹¹⁴ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 63.

¹¹⁵ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 64.

2.6.6 Schritt 6: Optimierung

Dadurch unterscheiden sich die Entdeckungs- und Vermeidungsmaßnahmen und die Bewertungskataloge für A, B und E.¹¹⁶ Die vorhandene Vermeidungsmaßnahme, die das Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlfunktion *Weiterdrehen nach Erreichen des vordefinierten Drehmoments nicht verhindert* aus Tabelle 11 verhindern soll, ist eine monatliche Funktionsprüfung aller Betriebsmittel. Die Vermeidungsmaßnahme wird als hocheffektiv in der Vermeidung der Fehlerursache angenommen und würden laut VDA & AIAG FMEA-Handbuch unter die Art der technischen Vermeidungsmaßnahmen fallen. Daraus resultiert eine Bewertung von drei für A.¹¹⁷ Als vorhandene Entdeckungsmaßnahme für den Fehler *Schraube 04 abgerissen* aus Tabelle 11 wird eine Sichtprüfung definiert. Es wird zudem angenommen, dass diese Sichtprüfung die abgerissene *Schraube 04* nachweislich immer entdeckt. Somit sieht der Bewertungskatalog die Bewertung eins für E vor.¹¹⁸

Da die Fehlerfolgen bei der PFMEA in drei Kategorien unterteilt sind, werden die Fehlerfolgen je Kategorie einzeln bewertet und die schwerwiegendste Fehlerfolge der einzelnen Fehlerpfade daraus in die Risikobewertung aufgenommen.¹¹⁹ Auch hier wird die schwerwiegendste Fehlerfolge die Nichteinhaltung der Abgasnorm auf Ebene des Endnutzers angenommen und somit B mit neun bewertet. Mit diesen Werten für A, B und E entsteht eine AP mit der Bewertung N und die Aufgabenpriorität dieses Risikos wird als niedrig eingestuft. Aus dieser Bewertung kann das nachstehende Formblatt-Fragment der Beispiel-PFMEA erzeugt werden.

Tabelle 13: Schritt 5 Beispiel-PFMEA

Übertrag	PFMEA-RISIKOANALYSE (SCHRITT 5)				
Bedeutung (B) der FF	Vorhandene Vermeidungsmaßnahme (VM) für FU	Auftreten (A) der FU	Vorhandene Entdeckungsmaßnahmen für FU oder FA	Entdeckung (E) der FU/FA	FMEA-Aufgabenpriorität (AP)
9	Monatliche Funktionsprüfung der Betriebsmittel	3	FA: - FU: Sichtprüfung	1	N

2.6.6 Schritt 6: Optimierung



Abbildung 26: Optimierung Einleitung

¹¹⁶ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 105.

¹¹⁷ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 113.

¹¹⁸ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 115.

¹¹⁹ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 108ff.

2.6.6 Schritt 6: Optimierung

Sofern die Bewertung für ein Risiko im fünften Schritt ausreichend hohe Aufgabenprioritäten aufweist, werden im sechsten Schritt weitere Optimierungsmaßnahmen für dieses Risiko definiert. Die Optimierung erfolgt anhand der Definition neuer Entdeckungs- und Vermeidungsmaßnahmen oder der Erweiterung der bereits vor der FMEA vorhandenen Maßnahmen. Nach Umsetzung dieser Maßnahmen wird der Stand erneut bewertet. Diese Schritte sind in der PFMEA und in der DFMEA mit Ausnahme der FMEA-MSR identisch.¹²⁰ Da die Optimierungsmaßnahmen in einer FMEA ohne FMEA-MSR nur Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen umfassen, können darin auch nur die Werte für *A* und *E* optimiert werden. Die FMEA-MSR wird bei automatisierten und geregelten Systemen verwendet, um die Werte für *B* zu minimieren und Systemreaktionen zu erstellen, die schwerwiegendere Fehlerfolgen abwendet.¹²¹

Das Risiko aus der Beispiel-PFMEA besitzt eine niedrige *AP* und wird somit nicht weiter optimiert. Das Risiko aus der Beispiel-DFMEA weist hingegen eine hohe *AP* auf und sollte somit weiter optimiert werden. Da die Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen in einer FMEA ohne FMEA-MSR nur das Auftreten und die Entdeckung optimieren können, könnte hier aufgrund der höheren Bewertung für *E* in Tabelle 12 eine weitere Entdeckungsmaßnahme durchgeführt werden. Das könnte bspw. ein stichprobenartiger Degradationstest sein. Dadurch könnte der Wert für *E* auf vier gesenkt werden, da die Fehlfunktion sowie die Fehlerursache mit höherer Wahrscheinlichkeit entdeckt wird. Dabei besteht jedoch das Problem, dass die *AP* unverändert bleibt und sich erst bei einer Verringerung von *A* auf drei verändern würde. Somit wird diese Maßnahme verworfen und dieser Sachverhalt wie folgt dokumentiert:

Tabelle 14: Schritt 6 Beispiel-DFMEA

DFMEA-OPTIMIERUNG (SCHRITT 6)											
FMEA-Vermeidungsmaßnahme	FMEA-Entdeckungsmaßnahme	Name des Verantwortlichen	Geplantes Fertigstellungsdatum	Status	Ergriffene Maßnahmen mit Nachweis	Fertigstellungsdatum	Bedeutung (B)	Auftreten (A)	Entdeckung (E)	FMEA Aufgabenpriorität (AP)	Bemerkungen
-	FA: Degradationstest: Zerstörende Untersuchung FU: -	Heinz Konstrukteur	03.05.2012	Verworfen	-	-	9	4	5	H	FMEA-Maßnahme wird verworfen, da der Einfluss auf AP zu gering ist.

¹²⁰ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 75ff.

¹²¹ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 71.

Eine genauere Betrachtung der Risikobewertung legt nahe, dass sich hier aufgrund der hohen Bewertung für *B* die Durchführung einer FMEA-MSR anbietet. Die wichtige Frage ist also, wie die Bedeutung der schwerwiegendsten Fehlerfolge auf diesem gesamten Fehlerpfad minimiert oder gar abgewendet werden kann. Zunächst wird dafür ein automatisiertes System auf dem Fehlerpfad benötigt, welches Fehler erkennen und Systemreaktionen durchführen kann.

FMEA-MSR

Das Element auf der Bauteilelementebene ist der *VTG-Elektromotor* mit dem dazugehörigen Beispielfehler *Kommunikation zwischen VTG-Elektromotor und Motorsteuergerät wurde unterbrochen* (Tabelle 9). Da die VTG-Verstellung durch das Motorsteuergerät vorgenommen wird und das Motorsteuergerät den Kommunikationsfehler speichert, ist dieses System reaktionsfähig.¹²² Auf Basis dieses Systems kann also eine Beispiel-FMEA-MSR erstellt werden, die den gesamten Fehlerpfad bis zu der Fehlerfolge *Gesetzliche Abgasnormen für Neuzulassung nicht erfüllt* blockiert.

Die Durchführung einer FMEA-MSR setzt die Durchführung einer DFMEA bis zum sechsten Schritt für die in einer FMEA-MSR betrachteten Komponenten voraus. Der Prozess der DFMEA-Erstellung für die Betrachtungselemente in der DFMEA-MSR wird somit nicht erneut erklärt. Der erste Schritt der FMEA-MSR würde eine zu **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** identische Tabelle erstellen und wird deshalb nicht ausgeführt. Bis auf die Erweiterung der DFMEA-MSR-Bewertung entspricht das Formblatt der FMEA-MSR dem der DFMEA, die Ergebnisse der DFMEA bis zum sechsten Schritt würden wie folgt dokumentiert sein:

¹²² Vgl. Pucher und Zinner, *Aufladung von Verbrennungsmotoren*, 165ff.

Tabelle 15: DFMEA für Beispiel-FMEA-MSR

DFMEA-STRUKTURANALYSE (SCHRITT 2)											
1. Nächsthöhere strukturelle Ebene		2. Strukturelles Fokuselement bzw. -prozess		3. Nächstniedrigere strukturelle Ebene							
VTG-Verstellungseinheit		VTG-Elektromotor		Stecker von VTG-Elektromotor							
DFMEA-FUNKTIONSANALYSE (SCHRITT 3)											
1. Funktion Nächsthöhere Ebene		2. Funktion Fokuselement bzw. -prozess		3. Funktion nächstniedrigere Ebene							
Verstellung der VTG-Leitschaukeln in Abhängigkeit von Motorsteuersignale		Signal von Motorsteuergerät verarbeiten und Signal an den VTG-Elektromotor für die Verstellung bereitstellen		Signalübertragung zwischen Motorsteuergerät und VTG-Elektromotor							
DFMEA-FEHLERANALYSE (SCHRITT 4)											
1. Fehlerfolgen (FF) für nächsthöhere Ebene oder Endnutzer		Bedeutung (B) der FF	2. Fehlerart (FA) des Fokuselements bzw. -prozesses	3. Fehlerursache (FU) auf nächstniedrigerer Ebene							
Nächsthöhere Ebene:	Keine Verstellung der VTG-Leitschaukeln bei Motorsteuersignale	9	Kein Signal an den VTG-Elektromotor	Signal vom Motorsteuergerät wird aufgrund schlechter Verbindung zu VTG-Elektromotor nicht übertragen							
Endnutzer:	Nichteinhaltung der Abgasnorm										
DFMEA-RISIKOANALYSE (SCHRITT 5)											
Vorhandene Vermeidungsmaßnahme (VM) für FU	Auftreten (A) der FU	Vorhandene Entdeckungsmaßnahmen für FU oder FA		Entdeckung (E) der FU/FA	FMEA-Aufgabenpriorität (AP)						
Systemauslegung gemäß Simulation und Toleranzberechnung	5	Entdeckungsmaßnahme der FU:	Auslesen des Fehlerspeichers	4	H						
		Entdeckungsmaßnahme der FA:									
DFMEA-OPTIMIERUNG (SCHRITT 6)											
FMEA Vermeidungsmaßnahme	FMEA Entdeckungsmaßnahme	Name des Verantwortlichen	Geplantes Fertigstellungsdatum	Status	Ergriffene Maßnahme mit Nachweis	Fertigstellungsdatum	Bedeutung (B)	Auftreten (A)	Entdeckung (E)	FMEA Aufgabenpriorität (AP)	Bemerkungen
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Für die Reduktion von B wird eine FMEA-MSR durchgeführt

Der Ergänzung der DFMEA durch die FMEA MSR stellt in erster Linie eine erweiterte Risikoanalyse und eine erweiterte Optimierung dar. Während die AP in der DFMEA anhand von

A, *B* und *E* erfolgt, werden in der FMEA-MSR die Parameter *H* (*Häufigkeit*), *M* (*Monitoring*) und *B* (*Bedeutung wie in der DFMEA*) für die Bewertung der *AP* verwendet. Die Werte für *H*, *B* und *M* sind auch ganzzahlige Werte zwischen eins und zehn und der Wertebereich der *AP* ist auf *hoch* (*H*), *mittel* (*M*) und *niedrig* (*N*) begrenzt.¹²³ Um Verwechslungen aufgrund gleicher Abkürzungen vorzubeugen, werden im Text *H* und, *M* als Parameter für die Risikobewertung verwendet, während dem Wertebereich von *AP* die Werte *hoch* (*H*) und *mittel* (*M*) zugeordnet werden. Auch bei der FMEA-MSR erfolgt die Bewertung ausschließlich durch vordefinierte Bewertungskataloge.¹²⁴

Die *Häufigkeit* (*H*) steht für die geschätzte Auftretenshäufigkeit der Fehlerursache in Betriebssituationen beim Endkunden. Die Schätzung der Auftretenshäufigkeit muss dabei auf Begründungen basieren, die als Grund für die Häufigkeit für jedes einzelne Risiko dokumentiert werden. Die Kombination der *Fehlerursache* mit dem *Grund für die Häufigkeit* erzeugt den Wert für *H*.¹²⁵ Für die Beispiel-FMEA-MSR wird angenommen, dass der *Grund für die Häufigkeit* in Kundenreklamationen dokumentiert ist, in denen von Einzelfällen des Auftretens der Kommunikationsstörung aus Tabelle 15 berichtet wird. Dadurch wird *H* als extrem niedrig eingeschätzt und muss mit drei bewertet werden. Eine hohe Zahl für *H* sagt aus, dass die Fehlerursache häufig auftritt.¹²⁶

Das *M* ist ein Maß für die Fähigkeit, einen Fehler im Kundenbetrieb zu erkennen und darauf zu reagieren. Die Bewertung für *M* bezieht demnach sich auf die Summe der Möglichkeiten von Sensoren, Logiken und menschlicher Wahrnehmung einen Fehler zu entdecken und diesem vor Eintritt von dessen Fehlerfolge entgegenzuwirken.¹²⁷ Dadurch wird die Bewertung für *M* von einer Kombination aus der Fehlerart, einer Monitoring-Maßnahme und einer Systemreaktion gebildet. Für die Beispiel-FMEA-MSR wird angenommen, dass die Reaktion auf das Monitoring eine menschliche Reaktion ist und die dafür vorhandenen Monitoring-Maßnahmen das *Anzeigen der Motorkontrolllampe* und ein *Eintrag in den Fehlerspeicher* sind. Mit dieser Maßnahme kann dem Endnutzer zwar der fehlerhafte Zustand angezeigt, aber die Fehlerfolge nicht vermieden werden. Dadurch gilt die Monitoring-Maßnahme als unwirksam und wird mit zehn für *M* bewertet. Ein hoher Wert für *M* sagt aus, dass die Monitoring-Maßnahme unwirksam oder die Systemreaktion nicht effektiv ist, um die Fehlerfolge zu minimieren.¹²⁸

¹²³ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monitoring & Systemreaktion*, 139ff.

¹²⁴ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 140ff.

¹²⁵ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 142f.

¹²⁶ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 143.

¹²⁷ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 144.

¹²⁸ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 147.

Bei der Betrachtung von *B* erfolgt bei der FMEA-MSR eine Gegenüberstellung der Bewertung der Fehlerfolge aus der DFMEA und der Bewertung der schwerwiegendsten Fehlerfolge nach der Systemreaktion, die in der FMEA-MSR definiert wurde.¹²⁹ In der Beispiel-FMEA-MSR wird angenommen, dass es vor Durchführung der FMEAMSRS keine Systemreaktion gibt, die die Fehlerfolge verhindern kann und somit *die schwerwiegendste Fehlerfolge nach Systemreaktion* der Fehlerfolge aus der DFMEA entspricht. Dementsprechend sind die Bewertungen der Fehlerfolgen identisch. Diese Konstellation der Bewertungen für *H*, *M* und *B* erzeugt eine *AP*, die als *hoch (H)* klassifiziert wird.¹³⁰ Die Risikoanalyse der Beispiel-FMEA-MSR würde wie folgt dokumentiert werden:

Tabelle 16: Schritt 5 Beispiel-FMEA-MSR

FMEA-MSR Ergänzung zu RISIKOANALYSE (SCHRITT 5)								
Grund für die Häufigkeit	Häufigkeit (H) der FU	Vorhandene Monitoring-Maßnahme	Vorhandene Systemreaktion	Monitoring (M)	Schwerwiegendste Fehlerfolge nach Systemreaktion	Bedeutung (B) der FF nach bisherigen Maßnahmen für Monitoring und Systemreaktion	Bedeutung (B) der FF nach DFMEA	FMEA-MSR Aufgabenpriorität (AP) vor Maßnahmen
Begründung: Kundenreklamationen	3	Anzeigen der Motorkontrolllampe Eintrag in den Fehler-speicher	-	10	Nichteinhaltung der Abgasnorm	9	9	H

Aufbauend auf dem in der Risikoanalyse ermittelten Ist-Zustand wird, wie auch bei der DFMEA, die Optimierung vorgenommen. Dabei werden FMEA-MSR-Vermeidungsmaßnahmen, Monitoring-Maßnahmen und Systemreaktionen definiert und umgesetzt. Die FMEA-MSR-Vermeidungsmaßnahmen sind eine Möglichkeit, dem Grund für die Häufigkeit bspw. durch Änderungen an der Komponentenauslegung entgegenzuwirken. Die neuen Monitoring-Maßnahmen und Systemreaktionen haben das Ziel, die Fehlerfolgen im Feld durch zusätzliche Überwachungen und Reaktionen zu minimieren.¹³¹

Für die Beispiel-FMEA-MSR werden zusätzliche Monitoring-Maßnahmen definiert, die das Auftreten der Fehlerart *Kein Signal an den VTG-Elektromotor* vor dem Auftreten der Fehlerfolge *Nichteinhaltung der Abgasnorm* erkennen und anzeigen sollen. Die Erkennung für

¹²⁹ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 140f.

¹³⁰ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 150.

¹³¹ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 152ff.

das System erfolgt anhand einer Antwortprüfung des VTG-Steuergeräts vor dem Motorstart. Zusätzlich wird dem Endnutzer eine Fehlermeldung angezeigt, die ihn auf einen Fehler im Antriebsstrang hinweist und diesen auffordert, einen Service-Partner für die Behebung des Defekts aufzusuchen. Die Systemreaktion, die bei Fehlererkennung hervorgerufen wird, ist die Reduktion der Motorleistung, mit der auch die vom *Turbolader 01* umzuwandelnde Abgasleistung durch Minimierung des Abgasdrucks reduziert wird.¹³² Dadurch wird angenommen, dass der Kohlenstoffmonoxid- und Stickoxid-Ausstoß so weit minimiert wird, dass die fiktive Abgasnorm erfüllt wird. Die schwerwiegendste Fehlerfolge, die nach dieser Systemreaktion hervorgerufen werden kann, ist der *Verlust der Antriebsleistung*. Diese Fehlerfolge stellt die Einschränkung einer für den normalen Fahrzeugbetrieb notwendigen Hauptfunktion dar und wird mit einer B von sieben bewertet.¹³³ Dieser Teil der Optimierung würde wie folgt dokumentiert werden:

Tabelle 17: Schritt 6 Beispiel-FMEA-MSR (Teil 1 von 2)

FMEA-MSR Ergänzung zu OPTIMIERUNG (SCHRITT 6) Teil 1				
FMEA-MSR Vermeidungsmaßnahme	Monitoring-Maßnahme	Systemreaktion	Schwerwiegendste Fehlerfolge nach Systemreaktion	Bedeutung (B) der FF nach FMEA-MSR
-	Einführung einer Antwortprüfung vor Motorstart Anzeigen einer zusätzlichen Fehlermeldung für Endnutzer	Reduktion der Motorleistung, sodass Verstellung nicht notwendig wird	Verlust der Antriebsleistung	7

Wie in der DFMEA wird gefordert, dass den Maßnahmen *Verantwortliche, Status, Beschlossene Maßnahmen mit Nachweisen* sowie *Termine* der geplanten und tatsächlichen Fertigstellung zugewiesen werden. Nachdem die geplanten Maßnahmen umgesetzt wurden und deren Wirksamkeit nachgewiesen ist, muss eine erneute Bewertung der Risiken durchgeführt werden.¹³⁴ In der Beispiel-FMEA-MSR wird angenommen, dass die geplanten Maßnahmen durchgeführt werden und der Fehler mit einer geschätzten diagnostischen Abdeckung von über 99,9% erkannt wird und die Systemreaktion immer innerhalb der Fehlertoleranzzeit hervorgerufen wird. Damit wird die Bewertung für *M* auf eins und die *AP* auf *niedrig (N)* reduziert.¹³⁵

¹³² Vgl. Pucher und Zinner, *Aufladung von Verbrennungsmotoren*, 334ff.

¹³³ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monitoring & Systemreaktion*, 141.

¹³⁴ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 152ff.

¹³⁵ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 148ff.

2.6.7 Schritt 7: Ergebnisdokumentation

Tabelle 18: Schritt 6 Beispiel-FMEA-MSR (Teil 2 von 2)

FMEA-MSR Ergänzung zu OPTIMIERUNG (SCHRITT 6) Teil 2							
Name des Verantwortlichen	Geplantes Fertigstellungsdatum	Status	Beschlossene Maßnahme mit Nachweis	Fertigstellungsdatum	Häufigkeit (H)	Monitoring (M)	FMEA-MSR Aufgabenpriorität (AP) nach Maßnahmen
Warren Watchful	10.02.2013	Abgeschlossen	Antwortprüfung und zusätzliche Fehlermeldung eingeführt und Reduktion der Motorleistung als Systemreaktion implementiert	10.03.2013	3	1	N

Nach erfolgreicher Umsetzung der Maßnahmen in der FMEA-MSR wird die Fehlerfolge *Nichteinhaltung der Abgasnorm* mithilfe von einer Systemreaktion abgewendet. Da diese Fehlerfolge die höchste Bewertung für *B* im gesamten Fehlerpfad besitzt, muss *B* nach der Abwendung dieser Fehlerfolge entlang des gesamten Fehlerpfads verändert werden. Auch in PFMEA, die auf diesem Fehlerpfad aufbauen, muss das Risiko angepasst werden.¹³⁶

2.6.7 Schritt 7: Ergebnisdokumentation



Abbildung 27: Ergebnisdokumentation Einleitung

Nach erfolgter Optimierung müssen bei allen FMEA-Arten die Ergebnisse und die getroffenen Maßnahmen dokumentiert, der letzte Stand bewertet und die Ergebnisse intern und ggf. extern kommuniziert werden (Abbildung 27). Die Planung und die Ergebnisse werden dabei in einem Bericht zusammengefasst. Das Layout des Berichts kann zwar unternehmensspezifisch sein, sollte aber auf technische Fehlerrisiken hinweisen. Die Dokumentation ist ein Teil des Entwicklungsplans und der Projektmeilensteine und kann laut dem VDA & AIAG FMEA-Handbuch folgende Aspekte beinhalten:

1. Angaben zum finalen Status der Ziele (5Z) zu den im ursprünglichen Projektplan aus dem ersten Schritt der FMEA
2. Eine Beschreibung des Betrachtungsumfangs und eine Hervorhebung mit neuen Inhalten
3. Eine Beschreibung der Herleitung der Funktionen
4. Eine Zusammenfassung der Fehler mit den höchsten Risiken und deren Bewertung

¹³⁶ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 63ff.

2.6.7 Schritt 7: Ergebnisdokumentation

5. Eine Zusammenfassung der Maßnahmen inkl. Status, die beschlossen oder geplant sind
6. Eine Beschreibung des zeitlichen Ablaufs für die fortlaufende Verbesserung der FMEA. Diese umfasst die folgenden Punkte:
 - Die Vorgehensweise zum Abschluss offener Maßnahmen.
 - Die Vorgehensweise zur Überprüfung und Überarbeitung der FMEA während der Serienfertigung.
 - Die Vorgehensweise zur Erfassung von Lessons Learned in den Familien-FMEA für die Wiederverwendung bei künftigen Analysen.¹³⁷

¹³⁷ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 79f.

3. Softwareunterstützung für die FMEA

Nachdem die Vorgehensweise bei FMEA verdeutlicht wurde, thematisiert dieses Kapitel die Möglichkeiten der Softwareunterstützung für den FMEA-Standard nach VDA & AIAG FMEA-Handbuch. Die wichtigsten Funktionen für eine Unterstützungssoftware für das Risikomanagement sind die Effizienzsteigerung der Risikomanagementprozesse und die Qualität der Risikomanagementinformationen.¹³⁸ Die FMEA ist als technischer Risikomanagementprozess keine Ausnahme und kann im Allgemeinen durch Softwareunterstützung effizienter durchgeführt werden.

Ein FMEA-Formblatt kann mit jedem Programm, welches Tabellenbearbeitung ermöglicht, erstellt und gepflegt werden. Da das Betriebssystem Windows weltweit den größten Marktanteil besitzt, kann für FMEA-Erstellung und Pflege das von Microsoft angebotene Microsoft Excel eingesetzt werden.¹³⁹ Spezialisierte FMEA-Software erleichtert und beschleunigt die FMEA-Erstellung und -Pflege jedoch durch erweiterte Datenkonnektivität und mehr Front-End-Funktionen.¹⁴⁰ Folgende Aspekte kann spezialisierte Software direkt positiv beeinträchtigen:

1. Systematische Bearbeitung der FMEA-Aufgaben
2. Benutzerführung und Hilfestellungen bei der Bearbeitung der FMEA
3. Durchführung aller erforderlichen Vorarbeiten und Analysen
4. Unterstützung in der Bearbeitung (z.B. beim Einfügen, Löschen, Kopieren etc.)
5. Zugriffsmöglichkeiten auf bereits erstellte FMEA durch Vernetzung von Einzelarbeitsplätzen mit systematischem Zugriffsschutz
6. Nutzung vorhandener Produktdaten (z.B. CAD-Konstruktionsdaten)
7. Standardisierung durch Standardmodule von FMEA¹⁴¹

Es existieren bereits zahlreiche kommerziell verfügbare und in der Industrie etablierte Softwarelösungen, die alle diese Aspekte vereinen.

3.1 Kommerziell verfügbare spezialisierte FMEA-Software

Kommerziell verfügbare Softwaretools unterstützen den Prozess der FMEA-Erstellung nach VDA & AAIG FMEA-Handbuch in vollem Umfang, unterscheiden sich jedoch ein wenig

¹³⁸ Vgl. Werner Gleißner und Frank Romeike, „Anforderungen an die Softwareunterstützung für das Risikomanagement“, *Controlling und Management* 49, Nr. 2 (April 2005): 154, <https://doi.org/10.1007/BF03255004>.

¹³⁹ o. V., „Betriebssysteme - Marktanteile weltweit bis Januar 2024“, Statista, zugegriffen 5. April 2024, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/157902/umfrage/marktanteil-der-genutzten-betriebssysteme-weltweit-seit-2009/>.

¹⁴⁰ o.V., „DataLyzer FMEA Software | DFMEA, Prozessablauf, PFMEA und Produktlenkungsplan“, 21. April 2022, <https://datalyzer.com/de/produkte/fmea-software/>.

¹⁴¹ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 112f.

3.1 Kommerziell verfügbare spezialisierte FMEA-Software

in der Umsetzung. Für diese Arbeit wurden die *e1ns FMEA* und die *DataLyzer FMEA Software* getestet und werden somit als Beispiele angeführt. Beide Softwarelösungen unterstützen denselben Gesamtprozess, wie er auch nach RGA für Neuteile gefordert wird:¹⁴²

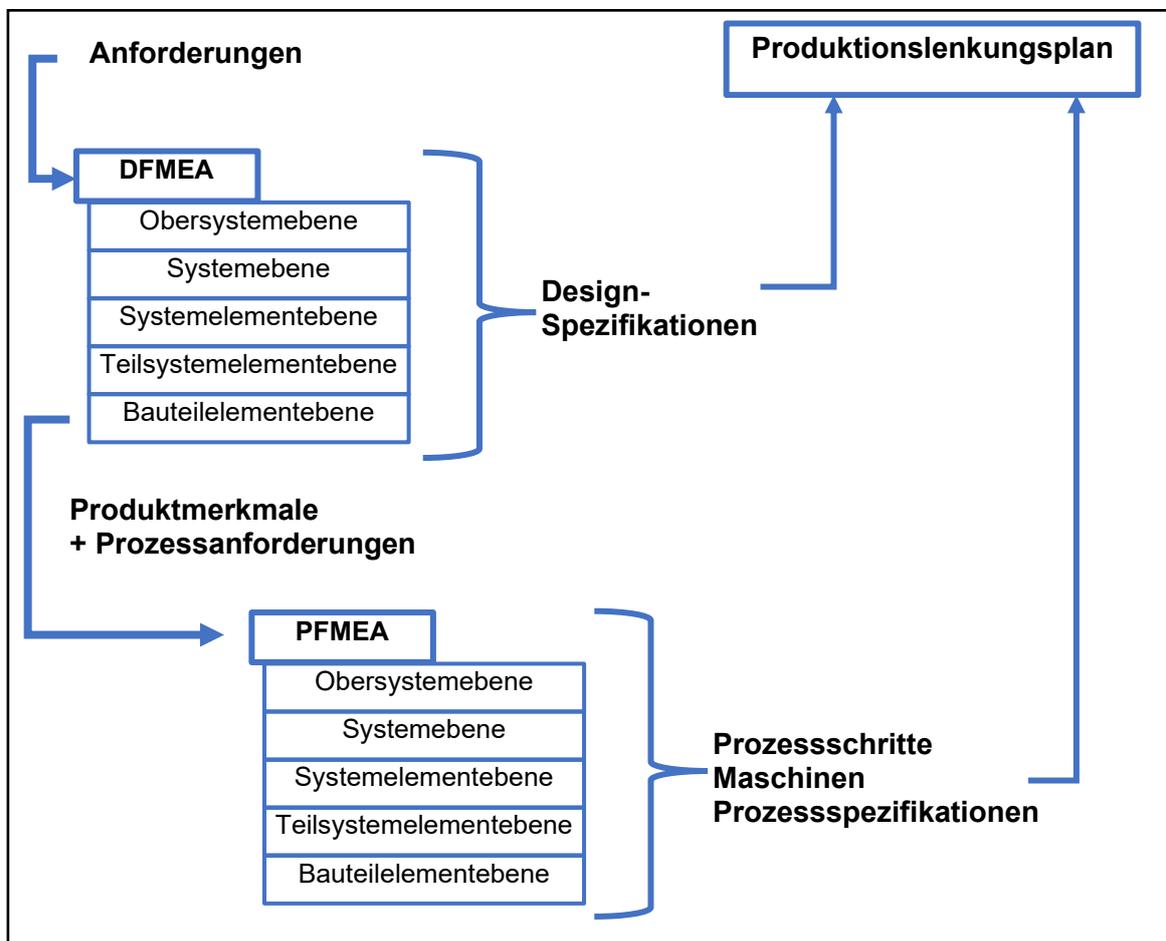


Abbildung 28: Gesamtprozess FMEA-Software¹⁴³

Aus den Anforderungen entstehen die DFMEA auf den unterschiedlichen Abstraktionsebenen (Abbildung 28). Aus diesen lassen sich wiederum die Designspezifikationen ableiten. Das Ergebnis der DFMEA ist ein Produkt, welches optimiert wurde, um die funktionalen Anforderungen an ein Produkt sicherzustellen. Die Produktmerkmale dieses Produkts werden mit Prozessanforderungen verknüpft und erzeugen den wichtigsten Input für die PFMEA. In der PFMEA werden die Prozessschritte, Maschinen und Prozessspezifikationen bestimmt, die hinsichtlich der Fertigung ein optimales Produkt erzeugen.¹⁴⁴ Die Ergebnisse aus DFMEA und PFMEA münden am Ende in den Produktionslenkungsplan.

¹⁴² Vgl. o.V., „DataLyzer FMEA Präsentation“, o. J., 1ff; Vgl. o. V., „e1ns FMEA Präsentation“, o. J., 1ff.

¹⁴³ Vgl. o. V., „e1ns FMEA Präsentation“; Vgl. o.V., „DataLyzer FMEA Präsentation“.

¹⁴⁴ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 21ff.

3.2 Potenziale der FMEA-Softwareunterstützung

Die Softwarelösung *e1ns FMEA* wird als Teil der *e1ns Lösungspakete* im Modul *e1ns AIAG/VDA* von der PeakAvenue GmbH angeboten. Diese Softwarelösung wurde im großen FMEA-Software-Vergleich der Zeitung FMEA KONKRET zum Testsieger ernannt.¹⁴⁵ Die *e1ns FMEA* ist eine Cloud-Lösung, die sich durch ihre Methoden- und Schnittstellenvielfalt sowie durch ihre Benutzerführung bei der FMEA und FMEA-MSR auszeichnet.¹⁴⁶ *DataLyzer FMEA Software* bietet weniger Benutzerführung und weniger Methoden für die FMEA-Erstellung, so sind bspw. Parameterdiagramme nicht in der Softwarelösung enthalten. Auch *DataLyzer International* bietet eine komplette Advanced Product Quality Planning (APQP)-Software an und vereinfacht die Integration von CAD-Daten mithilfe von *Ballooning Software*. Hervorgehoben wird auch der Export in Excel, der in jedem Stadium der FMEA möglich ist.¹⁴⁷

3.2 Potenziale der FMEA-Softwareunterstützung

Obwohl die Softwarelösungen den gesamten FMEA-Prozess abdecken, ist das Potenzial von FMEA mit diesen Lösungen nicht komplett ausgereizt. Die offenen Potenziale befinden sich nicht in der direkten Unterstützung der FMEA, sondern im Kontext, in dem FMEA eingesetzt werden. Eine weit verbreitete Schwachstelle bei der Produktentwicklung ist die Form der Wissensrepräsentation in Berichten und Checklisten, die außerhalb vom Entwicklungsprojekt nicht wiederverwendet und nur für Qualitätsaudits neu aufgearbeitet werden. Gründe dafür liegen im Projektmanagement, welches dem präventive Risikomanagement keine ausreichend hohe Bedeutung zuweist, um die Daten regulär aufzuarbeiten.¹⁴⁸ Die Aufarbeitung von Daten ist sehr zeitaufwändig, wenn alle im Rahmen der FMEA ermittelten Ergebnisse schwer auffindbar und schwer nachvollziehbar sind. Dieser Sachverhalt führt zu einer geringeren Bereitschaft, sich mit den Daten und insbesondere mit der Datenqualität auseinander zu setzen.

3.2.1 Versteckte Informationen in einer FMEA

Im Rahmen der FMEA gibt es viele versteckte Informationen, die nur mit viel Aufwand herausgelesen werden können. Eine versteckte Information wäre z.B., welche konkreten Maßnahmen ein Risiko beeinflussen. In einer FMEA ist diese Information versteckt, da pro Ri-

¹⁴⁵ o. V., „e1ns FMEA“, zugegriffen 3. April 2024, <https://forms.zohopublic.eu/plato/form/ENDemoRegistrationforUSCloud/formperma/0NwQ04NOWXX-ZceyNAS1LQIJFyl8KgKouuVbsUb8XvQ>.

¹⁴⁶ Vgl. PeakAvenue GmbH, „FMEA in der Cloud - PeakAvenue“, zugegriffen 3. April 2024, <https://www.peakavenue.de/software/e1ns-engineering/fmea-in-der-cloud>.

¹⁴⁷ Vgl. o.V., „DataLyzer FMEA Software | DFMEA, Prozessablauf, PFMEA und Produktlenkungsplan“.

¹⁴⁸ Vgl. Dr. Martin Paping, „Sieben typische Schwachstellen in der Produktentwicklung“, o. J., 1ff.

3.2.2 Ausnutzung von Ähnlichkeitseffekten

siko nur die Maßnahmen dokumentiert werden, die entweder die Fehlfunktion oder die unmittelbare Fehlerursache einer Fehlerfunktion adressieren. In Realität werden die Risiken jedoch von allen Maßnahmen entlang eines gesamten Fehlerpfads beeinflusst. Wird beispielsweise die Fehlerursache für einen Fehler auf einer niedrigeren Abstraktionsebene durch Maßnahmen verhindert, so werden alle Fehlfunktionen und Fehlerursachen, die daraus resultieren, ebenfalls indirekt verhindert. Dieser Sachverhalt ist jedoch nicht übersichtlich in einem FMEA-Formblatt darstellbar und würde eine andere Wissensrepräsentationsform als das FMEA-Formblatt erfordern. Besonders bei FMEA-MSR kann dieser Effekt stark von Vorteil sein, da bei diesen Fehlerfolgen eines gesamten Fehlerpfads durch eine Systemreaktion blockiert oder verändert werden. Werden nur die Informationen verarbeitet, die in einem FMEA-Formblatt dokumentiert sind, ist dieser Sachverhalt nur mit hohem Zeitaufwand aufdeckbar. Neben indirekten Maßnahmen werden für FMEA Parameterdiagramme, Struktur-, Funktions- und Fehlernetze erzeugt, die außerhalb der FMEA nicht erneut betrachtet werden. Dabei beinhalten diese Methoden Struktur- und Beziehungsinformationen, auf deren Basis die gesamte FMEA aufgebaut ist.

3.2.2 Ausnutzung von Ähnlichkeitseffekten

Häufig ähneln sich Bauteile oder Bauteilstrukturen, weshalb die Auswahl von Basis- und Familien-FMEA die Arbeit erleichtert.¹⁴⁹ Mit steigender Anzahl von Entwicklungsprojekten wird die Auswahl ähnlicher Komponenten und Maßnahmen erschwert, besonders wenn sich diese verteilt in einem FMEA-Formblatt, in CAD-Daten und in Maßnahmenplänen befinden. Eine Lösung dafür könnte eine automatisierte Erkennung der Ähnlichkeiten unterschiedlicher Bauteile und Projekte sein.

Jede FMEA beinhaltet Maßnahmen, die der Risikominimierung dienen.¹⁵⁰ Auch diese Maßnahmen haben häufig Ähnlichkeiten. Welche Maßnahmen durchgeführt werden, ist von der Verfügbarkeit von Umsetzungswerkzeugen in einem Unternehmen abhängig. Die Umsetzungswerkzeuge sowie die Bauteilinformationen könnten Indikatoren sein, um Ähnlichkeiten zwischen Maßnahmen zu erkennen. Dadurch könnten Fehlerbehandlungsmaßnahmen schneller beschlossen und optimiert werden. Sind die Beziehungen zwischen den Strukturelementen, Risiken und Maßnahmen in einer FMEA bekannt, können Auswirkungen neuer Komponenten, Maßnahmen und Prozesse simuliert werden. Die Simulationsergebnisse können insbesondere genutzt werden, um Wirksamkeiten von Maßnahmen festzustellen und Fehlerausbreitungen zu prognostizieren.

¹⁴⁹ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 33ff.

¹⁵⁰ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), 59ff.

3.2.3 Verarbeitung und Anpassung von FMEA-Informationen

Sowohl die *e1ns FMEA* als auch die *DataLyzer FMEA* bieten Komplettlösungen für die Produktentwicklung an, um die Weiterverwendung der Daten zu unterstützen und sicherzustellen.¹⁵¹ Die Problematik, dass Daten aus der Produktentwicklung aber nur in der Produktentwicklung bleiben und in späteren Stadien des Produktlebenszyklus (PLZ) nicht erneut aufgearbeitet werden, besteht damit nach wie vor.¹⁵² Die Daten in einer FMEA könnten entlang des gesamten PLZ verwendet und mit Informationen aus der Teilefertigung verfeinert oder auf Wirksamkeit untersucht werden. Dazu wird jedoch eine Vernetzung der Daten entlang des gesamten PLZ benötigt, die einen ganzheitlichen und produktzentrierten Informationsaustausch ermöglicht. Dadurch könnten FMEA-Informationen auch direkt in der Produktion und vom Projekt- oder Risikomanagement abgefragt werden, ohne eine aufwändige Informationssuche in Berichten oder Formblättern zu betreiben. Einen solchen Ansatz bietet bspw. das *Bosch Semantic Stack*, welches mit der Vereinfachung datengetriebener Entscheidungen, verbesserter Datentransparenz und Wiederverwendung von Produktwissen wirbt.¹⁵³ Ein besonderer Vorteil des *Bosch Semantic Stack* für den FMEA-Anwendungsfall ist die Ausgestaltung digitaler Zwillinge (DT) mithilfe des *aspect model*. Dabei werden DT anhand ihrer Aspekte, also anhand der Informationen und Funktionen der DT aus multiplen Datenquellen beschrieben.¹⁵⁴ Diese Aspekte können direkt in FMEA für die Funktions- und Strukturanalyse verwendet werden. Zudem können die Aspekte von DT durch die Informationen aus der FMEA wie Fehlerarten, Maßnahmen und Systemreaktionen ergänzt werden, woraus ein umfassenderer DT resultiert. Wird die FMEA als Repräsentation von Wissen in einen solchen Ansatz eingebaut, könnte die Wiederverwendung der FMEA-Daten über den gesamten PLZ sichergestellt und die Aktualisierung und Pflege der FMEA-Daten erleichtert und beschleunigt werden.

3.3 FMEA in der Industrie 4.0

Die FMEA-Informationen können auch für die theoretischen Konzepte der Industrie 4.0 von Bedeutung sein. Die Ansätze der Industrie 4.0 sind nur dann realisierbar, wenn eine fehler- und störungsfreie Automatisierung in allen Prozessen mit hoher Verfügbarkeit erreicht wird.¹⁵⁵ Dabei wird die Verfügbarkeit (engl. *availability*) als die Fähigkeit eines Systems oder

¹⁵¹ Vgl. o.V., „DataLyzer FMEA Software | DFMEA, Prozessablauf, PFMEA und Produktlenkungsplan“; Vgl. o. V., „e1ns FMEA“.

¹⁵² Vgl. Dr. Martin Paping, „Sieben typische Schwachstellen in der Produktentwicklung“, 1.

¹⁵³ Vgl. o. V., „Bosch Semantic Stack“, Bosch Connected Industry, zugegriffen 6. April 2024, <https://www.bosch-connected-industry.com/de/de/portfolio/bosch-semantic-stack/>.

¹⁵⁴ Vgl. Clemens Hug, „Präsentation Bosch Semantic Stack“, 23. April 2024, 30.

¹⁵⁵ Vgl. Vogel-Heuser, Birgit und Bauernhansl, Thomas, *Handbuch Industrie 4.0. Bd. 1: Produktion*, 2., erweiterte und bearbeitete Auflage, Bd. 1, Springer Reference Technik (Berlin; [Heidelberg]: Springer Vieweg, 2017), 3, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-45279-0>.

3.3.1 Nutzen der FMEA für Industrie 4.0

einer Komponente, in einem funktionsfähigen oder betriebsbereiten Zustand zu sein, definiert.¹⁵⁶ Die Steigerung der Verfügbarkeit ist eine wichtige Zielsetzung der FMEA-MSR, wenn die Verfügbarkeit von Design-Funktionen bei Endnutzern von Produkten betrachtet wird. Die PFMEA thematisiert die Verfügbarkeit von Fertigungsprozessen, indem kritische Prozessschritte identifiziert und optimiert werden. Besonders bei additiven Fertigungsverfahren können FMEA direkt zur Prozessplanung und -simulation eingesetzt werden, um die Kritikalität bestimmter Vorgänge vor der Durchführung zu überprüfen und zu simulieren.¹⁵⁷

In den letzten Jahren entwickelt sich Industrie 4.0 in eine Richtung, in der Künstliche Intelligenz (KI) den Produktionsarbeitern dient, während sie gleichzeitig eng mit ihnen in einer Vielzahl von Human-in-the-Loop-Szenarien wie der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) interagiert. Gleichzeitig zielen KI-Anwendungsfälle zunehmend darauf ab, die Nachhaltigkeit der Produktion zu steigern, um sicherzustellen, dass der Produktionssektor zu strategischen Zielen beiträgt. Nachhaltigkeit und Menschenzentrierung treiben den Übergang von digitalen Fertigungssystemen der Industrie 4.0 laut einigen Quellen zur Ära der Industrie 5.0.¹⁵⁸ Da die sogenannte Industrie 5.0 jedoch nicht existiert, wird in dieser Arbeit lediglich der Begriff Industrie 4.0 verwendet, bei der Nachhaltigkeit und Menschenzentrierung als zusätzliche Ziele definiert werden.¹⁵⁹

Das Aufkommen von Industrie 4.0-Systemen erhöht die funktionale Raffinesse und die Integrationskomplexität von KI-Systemen in der Fertigung. Es fordert auch eine Evolution der KI in einer menschenzentrierten Dimension, in der KI-Systeme auf vertrauenswürdige und zuverlässige Weise operieren.¹⁶⁰

3.3.1 Nutzen der FMEA für Industrie 4.0

Die FMEA kann für Industrie 4.0 in zahlreichen Aspekten von Bedeutung sein. FMEA unterstützt eine Erhöhung der Systemzuverlässigkeit durch die systematische Identifikation, Bewertung und Vermeidung von Fehlern. In einer Industrie 4.0-Umgebung, wo MRK und der

¹⁵⁶ Vgl. Tieling Zhang, Wei Long, und Yoshinobu Sato, „Availability of Systems with Self-Diagnostic Components—Applying Markov Model to IEC 61508-6“, *Reliability Engineering & System Safety* 80, Nr. 2 (Mai 2003): 136f, [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(03\)00004-8](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(03)00004-8).

¹⁵⁷ Vgl. Maximilian Vogt, Adrian Rips, und Claus Emmelmann, „Augmented Reality in der additiven Produktion: FMEA als Werkzeug zur Erstellung von aufwandsgerechten AR-Inhalten für die Mensch-Maschine-Interaktion in der digitalen Produktion“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 115, Nr. 11 (1. November 2020): 800ff, <https://doi.org/10.3139/zwf-2020-1151114>.

¹⁵⁸ Vgl. John Soldatos, Hrsg., *Artificial Intelligence in Manufacturing: Enabling Intelligent, Flexible and Cost-Effective Production Through AI* (Cham: Springer Nature Switzerland, 2024), vif, <https://doi.org/10.1007/978-3-031-46452-2>.

¹⁵⁹ Jonas Völker, „Warum es Industrie 5.0 nicht gibt“, *atpinfo.de* (blog), 26. April 2024, <https://atpinfo.de/kolumne/warum-es-industrie-5-0-nicht-gibt/> Vgl.

¹⁶⁰ Vgl. Soldatos, *Artificial Intelligence in Manufacturing*, vif.

3.3.2 Einbindung der FMEA in Industrie 4.0

Einsatz von KI zunehmend relevant sind, kann die FMEA bei der Sicherstellung der Funktionsfähigkeit der Technologien und der Minimierung der Fehlfunktionen eingesetzt werden. Industrie 4.0 hat einen weiteren Fokus auf Menschenzentrierung und somit auf die Sicherheit und das Wohlbefinden der Mitarbeiter.¹⁶¹ FMEA kann genutzt werden, um spezifische Risiken zu identifizieren, die aus der Interaktion zwischen menschlichen Operatoren und automatisierten Systemen entstehen könnten. Die daraus resultierenden Erkenntnisse können zur Gestaltung sicherer und ergonomischer Arbeitsplätze beitragen. Durch die frühzeitige Erkennung von Fehlern und die Vermeidung von Ausschuss und Nacharbeit trägt die FMEA zur effizienteren Nutzung von Ressourcen bei und unterstützt somit die Nachhaltigkeitsziele der Industrie 4.0.

Industrie 4.0-Systeme stellen eigene einzigartige Anforderungen an Transparenz und Sicherheit. Somit müssen Hersteller von KI-Systemen sicherstellen, dass ihre KI-Systeme die notwendige Transparenz und Erklärbarkeit für regulatorische Konformität aufweisen. In der Europäischen Union (EU) ist bspw. das KI-Gesetz relevant.¹⁶² In einem zunehmend regulierten Umfeld, wie es die Industrie 4.0 darstellt, unterstützt die FMEA die Einhaltung von Normen und Sicherheitsvorschriften. Durch die systematische Analyse und Dokumentation von Risikomanagementprozessen kann die FMEA somit auch in diesem Kontext dazu beitragen, dass Unternehmen den regulatorischen Anforderungen gerecht werden.

3.3.2 Einbindung der FMEA in Industrie 4.0

Um die potenzielle Unterstützung der FMEA für die Industrie 4.0 zu realisieren, muss eine mögliche Einbindung der FMEA in das Konzept der Industrie 4.0 betrachtet werden. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass KI-Systeme das Produktlebenszyklusmanagement (PLM) unterstützen. Somit muss eine Anbindung der FMEA an KI-Systeme erfolgen, um diese in das Konzept der Industrie 4.0 einzubinden. Für KI-Systeme führt das Konzept der Industrie 4.0 zu einem Bedarf an der Einführung neuer Lernparadigmen, die das Zusammenspiel zwischen Menschen und KI-Akteuren fördern. Solche Paradigmen umfassen beispielsweise aktives Lernen und intelligente Multi-Agenten-Systeme (MAS). Sie ermöglichen Ergebnisse, die die Geschwindigkeit von KI-Systemen mit der Glaubwürdigkeit menschlicher Urteile kombinieren.

Ebenso werden Lösungen der Industrie 4.0 wie digitale Zwillinge derzeit transformiert, um den Kontext der menschlichen Arbeiter zu berücksichtigen, d. h., sie entwickeln sich zu

¹⁶¹ Vgl. Leng u. a., „Industry 5.0“, 279ff.

¹⁶² Vgl. o. V., „KI-Gesetz: erste Regulierung der künstlichen Intelligenz“, Themen | Europäisches Parlament, 8. Juni 2023, <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20230601STO93804/ki-gesetz-erste-regulierung-der-kunstlichen-intelligenz>; Vgl. Soldatos, *Artificial Intelligence in Manufacturing*, vii.

3.4 FMEA im Kontext von Skill-Based Engineering

menschenzentrierten digitalen Zwillingen.¹⁶³ Die FMEA kann somit in die Entwicklung digitaler Zwillinge eingebunden werden, um Simulationen von Fehlern und deren Auswirkungen auf virtuelle Modelle durchzuführen. Dies kann eine präzisere Vorhersage und Vermeidung von Fehlern in der realen Produktion ermöglichen. Multi-Agenten-Systeme (MAS) sind Netzwerke von autonomen Einheiten (auch *Agenten* genannt), die jeweils ihre eigenen Überzeugungen, Fähigkeiten und Ziele haben und in der Lage sind, in einer Umgebung unabhängig voneinander oder in Kooperation zu handeln.¹⁶⁴ In Szenarien, in denen verschiedene KI-Systeme und Roboter als Agenten interagieren, kann die FMEA dazu verwendet werden, komplexe Interaktionen und potenzielle Fehlerquellen zu analysieren. Dies kann entscheidend sein, um eine sichere und effiziente Zusammenarbeit zu gewährleisten.

MRK-Anwendungsfälle werden normalerweise in hochdynamischen Umgebungen eingesetzt, die Menschen, Roboter und KI-Systeme umfassen, die miteinander interagieren. Die Implementierung fortgeschrittener und automatisierter Logik in einer solchen Umgebung erfordert neue Wege zur Darstellung von Prozessen, die die komplexen Wechselbeziehungen zwischen den verschiedenen Akteuren erfassen. Dafür muss jedoch die Repräsentationsform von Wissen und die Modellierung entsprechend gestaltet werden.¹⁶⁵ Liegen die Beziehungen und Wechselwirkungen in der FMEA also in für KI weiter verarbeitbarer Form vor, so können mit Hilfe von KI-Fehleranalysen durchgeführt und prädikative Wartungsstrategien empfohlen werden.

3.4 FMEA im Kontext von Skill-Based Engineering

Das Konzept von Industrie 4.0 ist bisher für viele Unternehmen jedoch nur theoretischer Natur. Viele Unternehmen haben nicht die Ebene der Industrie 4.0 erreicht und kämpfen mit Schnittstellenproblemen zwischen Informations- und Produktionstechnik. Zudem besteht eine Lücke zwischen der Steuerungsebene und Automatisierungsebenen zur Überwachung des Produktionsplans. Die grundlegende technische Voraussetzung für Fortschritte in Bezug auf Flexibilität und Anpassungsfähigkeit, die im Konzept der Industrie 4.0 verankert sind, ist die Vernetzung von Produktionsressourcen innerhalb einer Fabrik und über Unternehmensgrenzen hinweg.¹⁶⁶

Eine Methode, die bei der Realisation der theoretischen Konzepte von Industrie 4.0 entscheidend sein kann, ist das sog. *Skill-based Engineering*. *Skill-Based Engineering* ist eine

¹⁶³ Vgl. Soldatos, *Artificial Intelligence in Manufacturing*, vi.

¹⁶⁴ Vgl. Werner Dilger, „Multiagentensysteme“, 2004, 4ff.

¹⁶⁵ Vgl. Soldatos, *Artificial Intelligence in Manufacturing*, vi.

¹⁶⁶ Vgl. Andreas Lober u. a., „Flexible Skill-Based Production Systems through Novel OPC UA Design Approaches“, *IFAC-PapersOnLine* 56, Nr. 2 (2023): 1, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1529>.

3.4 FMEA als Repräsentation von Wissen

Methode, die individuelle Komponenten eines Automatisierungssystems als Objekte mit benannten Diensten (*Skills*) beschreibt. Als *Skill* kann dabei die Fähigkeit einer Komponente (z. B. eines Greifers) verstanden werden, eine bestimmte Funktion auszuführen (z. B. Greifen oder Freigeben). Der *Skill* ist somit die abstrahierte Form mehrerer Signale, die von Sensoren erzeugt und von Aktoren verwendet werden. Da Automatisierungssysteme immer komplexer werden, ist diese Abstraktion der Signale von zunehmender Bedeutung, um die Anlagenplanung, Entwicklung und Wartung solcher Systeme effizient zu verwalten.¹⁶⁷ Da eine FMEA Fehlfunktionen aus Funktionen ableitet, können über die FMEA *Skills*, die ebenfalls Funktionen sind, anhand ihrer Risiken bewertet und priorisiert werden. Bei FMEA-MSR können bestimmte *Skills* zudem durch andere ersetzt, oder in einem bestimmten Kontext nicht ausgeführt werden, um Risiken zu minimieren. Voraussetzung dafür wäre jedoch, dass ein skill-basiertes Steuerungssystem vorhanden ist und dass Informationen aus FMEA in vollem Umfang für dieses Steuerungssystem abrufbar sind.

3.4 FMEA als Repräsentation von Wissen

Um alle thematisierten Potenziale in einer FMEA realisieren zu können, müssen die Informationen aus dem FMEA-Formblatt weiterverarbeitet werden. Die finale Form, die eine FMEA für die Integration in den gesamten PLZ und skill-basierte Steuerungssysteme benötigt, ist also eine maschinell abfragbare Repräsentation von Wissen. Wissen ist im Allgemeinen als sinnvolle Vernetzung von Informationen und deren Beziehungen zueinander definiert. Die sinnvolle Vernetzung kann als eine zweckgerichtete Verknüpfung der Informationen verstanden werden. Damit die Informationen auffindbar und abfragbar sind, müssen diese zunächst gespeichert werden. Eine notwendige Voraussetzung für die Speicherung ist die Bestimmung eines Klassifizierungsschemas, mit dem die Informationen in einem multidimensionalen Raum mit Kriterien charakterisiert und geordnet werden.¹⁶⁸ Eine sinnvolle Softwareunterstützung für FMEA mit darauffolgender PLM-Software könnte demnach wie folgt aufgebaut sein:

¹⁶⁷ Vgl. Milan Vathoopan, Kirill Dorofeev, und Alois Zoitl, „31 Skill-Based Engineering of Automation Systems: Use Case and Evaluation“, in *31 Skill-Based Engineering of Automation Systems: Use Case and Evaluation* (De Gruyter Oldenbourg, 2021), 555ff, <https://doi.org/10.1515/9783110745979-033>.

¹⁶⁸ Vgl. Bodendorf, Freimut, *Daten und Wissen* (Berlin: Springer, 2006), 1ff.

3.4 FMEA als Repräsentation von Wissen

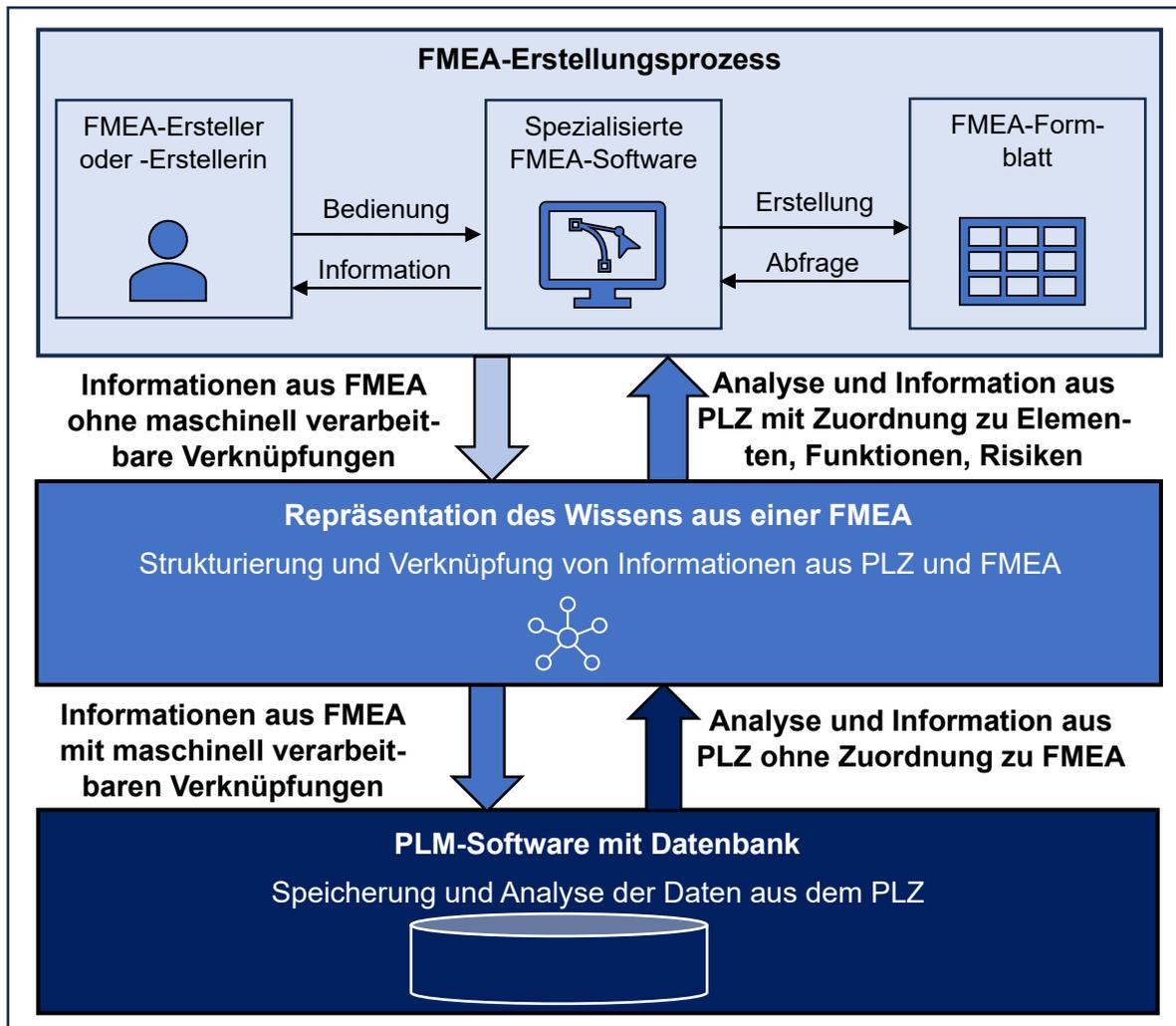


Abbildung 29: Möglicher Aufbau Softwareunterstützung für FMEA mit PLM-Software

Der FMEA-Erstellungsprozess könnte mithilfe von spezialisierter Software erfolgen (Abbildung 29 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Nach FMEA-Erstellung wird das Wissen aus der FMEA primär in FMEA-Formblättern gespeichert. Dieses Wissen ist jedoch nicht maschinell weiter verarbeitbar. Somit könnte die Repräsentation von Wissen als Ebene dienen, um das Wissen aus der FMEA zu sammeln und in eine maschinell weiter verarbeitbare Form zu bringen. Diese maschinell weiter verarbeitbare Form des Wissens kann von PLM-Software direkt abgefragt und z.B. für die Einbindung der FMEA-Informationen für die Produktion eingesetzt werden. Andererseits könnte das Wissen in der FMEA auch um Informationen aus dem PLZ erweitert werden. Beispiele dafür könnten aufgetretene Fehler sein, die eine Überarbeitung oder Aufarbeitung der FMEA anstoßen könnten und direkt den Elementen, Funktionen und Risiken in der FMEA zugeordnet werden. Damit

3.4 FMEA als Repräsentation von Wissen

kann der Such- und Aufarbeitungsaufwand reduziert werden.¹⁶⁹ Nach Zuordnung dieser Informationen aus dem PLZ können diese Informationen für die FMEA-Erstellungssoftware bereitgestellt und dem FMEA-Ersteller oder der -Erstellerin angezeigt werden.

Neben dem Anwendungsfall für PLM-Software, kann FMEA außerdem für den Wissensaufbau skill-basierter Steuerungssysteme verwendet werden.¹⁷⁰ Das intelligente skill-basierte Steuerungssystem, welches in dieser Arbeit betrachtet wird, besitzt den folgenden Aufbau:

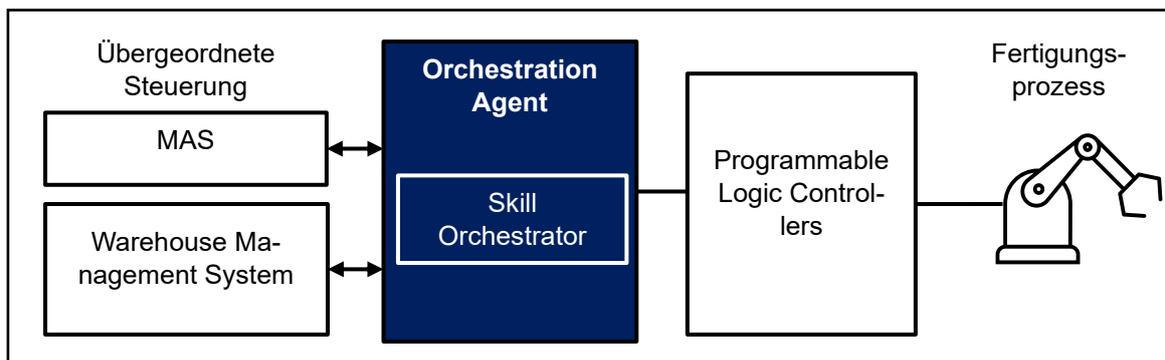


Abbildung 30: intelligentes skill-basiertes Steuerungssystem mit Orchestration Agent¹⁷¹

Die zentrale Komponente ist der sog. *Orchestration Agent (OA)*. Dieser fungiert als Vermittler zwischen der *übergeordneten Steuerung* und dem *einfachen skill-basierten Steuerungssystem*. Der OA enthält u.a. einen *Skill Orchestrator*, der die Skills des *Fertigungsprozesses* koordiniert und aktiviert. *Programmable Logic Controllers (PLCs)* sind für die Ausführung der Basisautomatisierungsprozesse verantwortlich und implementieren grundlegende Skills, die vom OA koordiniert werden (Abbildung 30). Diese grundlegenden Fähigkeiten sind essenziell für die Steuerung und Ausführung spezifischer Aktionen innerhalb der automatisierten Systeme. Ein weiterer wichtiger Bestandteil ist das *Warehouse Management System (WMS)*, das mit dem OA interagiert, um Aufträge zu erteilen und aktuelle Informationen über den Zustand und Fortschritt der Produktion zu liefern. Dies hilft dabei, die Lagerhaltung und den Materialfluss effizient zu gestalten.

Des Weiteren werden DT integriert, um eine präzise Simulation und Analyse der Produktionsprozesse zu ermöglichen. Sie sind entscheidend für die Vorhersage und Optimierung der Produktion, indem sie ein virtuelles Abbild der realen Produktionsumgebung bieten, welches in Echtzeit aktualisiert und analysiert wird. Zuletzt unterstützt die semantische Modellierung und Systemkonfiguration die Definition und das Verständnis der Beziehungen und Funktionen innerhalb des Produktionssystems. Semantische Technologien ermöglichen eine effizientere Konfiguration und Anpassung des Systems, was besonders in sich

¹⁶⁹ Vgl. Kap. 3.1 Kommerziell verfügbare spezialisierte FMEA-Software

¹⁷⁰ Vgl. Kap. 3.4 FMEA im Kontext von Skill-Based Engineering

¹⁷¹ Vgl. Lober u. a., „Flexible Skill-Based Production Systems through Novel OPC UA Design Approaches“, 3.

3.4 FMEA als Repräsentation von Wissen

schnell ändernden Produktionsumgebungen von Vorteil ist. Zusammen bilden diese Komponenten ein umfassendes System, das speziell darauf ausgelegt ist, den Herausforderungen moderner Produktionsumgebungen zu begegnen.¹⁷² Dadurch beinhaltet der OA alle benötigten Informationen, um eine FMEA zu aktualisieren und anhand von in der Fertigung aufgetretenen Fehlern zu validieren. Ein möglicher Aufbau der Softwareunterstützung für FMEA mit dem OA könnte demnach wie folgt aussehen:

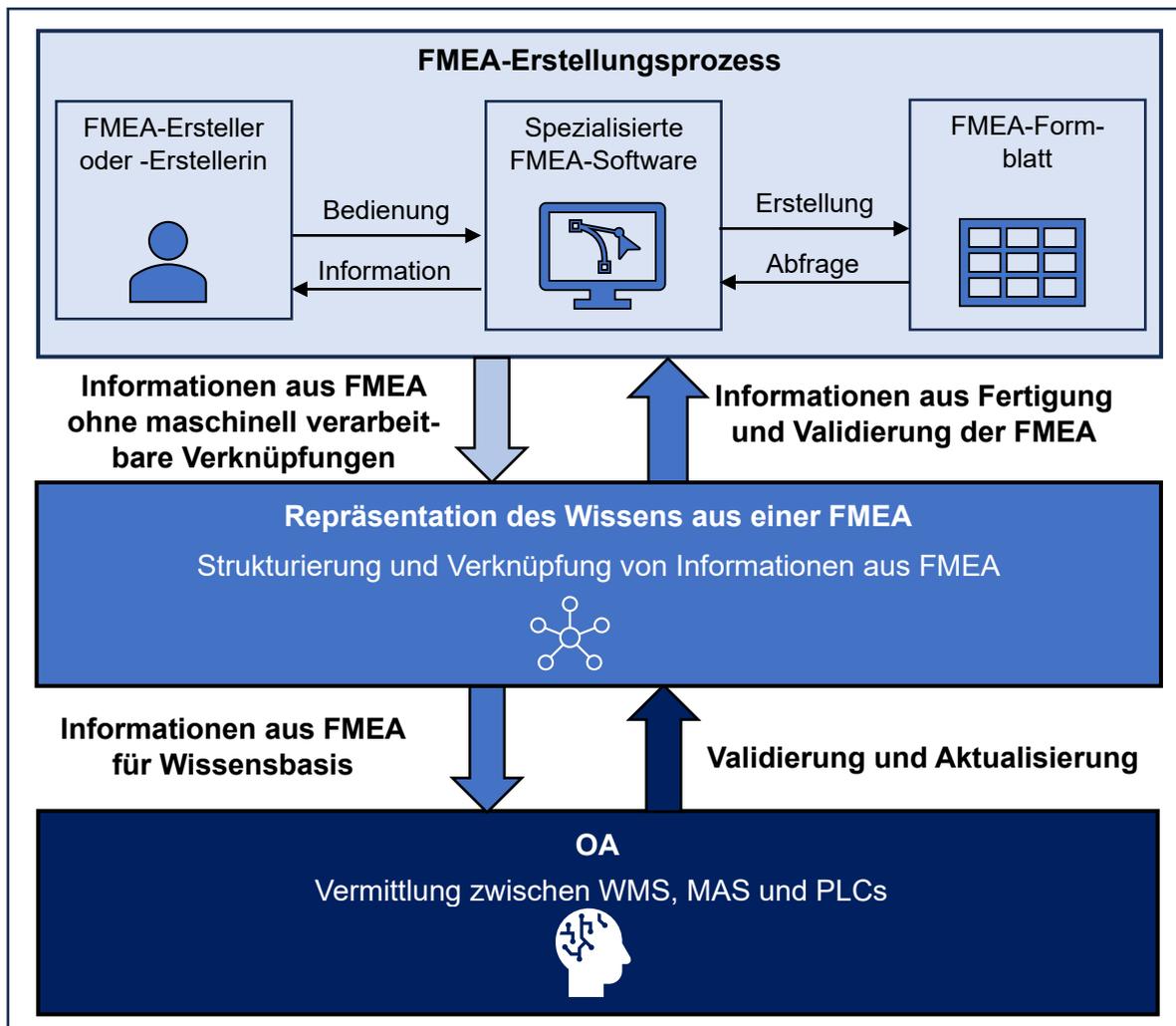


Abbildung 31: Möglicher Aufbau Softwareunterstützung für FMEA mit OA

Die Repräsentation des Wissens aus einer FMEA benötigt sowohl in der Ausgestaltungsform mit PLM-Software als auch mit dem OA eine Form, in der alle Informationen der FMEA mit deren Beziehungen darstellbar und abrufbar sind.

¹⁷² Vgl. Lober u. a., 1ff.

3.4 Datenbanken für FMEA

Dieses Wissen wird für die effiziente elektronische Datenverarbeitung in Datenbanken gespeichert und von sogenannten Datenbankmanagementsystem (DBMS) verwaltet.¹⁷³ Die Zusammensetzung aus Datenbank und DBMS wird als Datenbanksystem bezeichnet. Ein Datenbanksystem ist eine Software zur applikationsunabhängigen Beschreibung, Speicherung und Abfrage von Daten. In einem kompletten rechnergestützten Informationssystem kommt noch eine Anwendungssoftware zum Einsatz, die Benutzern und Benutzerinnen die iterative Speicherung von Informationen, das Senden von Anfragen und das Erhalten von Antworten erlaubt. Die Anwendungssoftware ermöglicht Benutzerführung, den Einsatz von Zugriffsrechten, Datenmanipulation und eine Dialoggestaltung. Häufig ist diese mit einem Kommunikationsnetz, wie bspw. mit dem Internet verbunden, um neben unternehmensspezifischen Auswertungen webbasierte Interaktion zu ermöglichen.¹⁷⁴ Die Architektur und Komponenten eines solchen Informationssystem lässt sich wie folgt skizzieren:

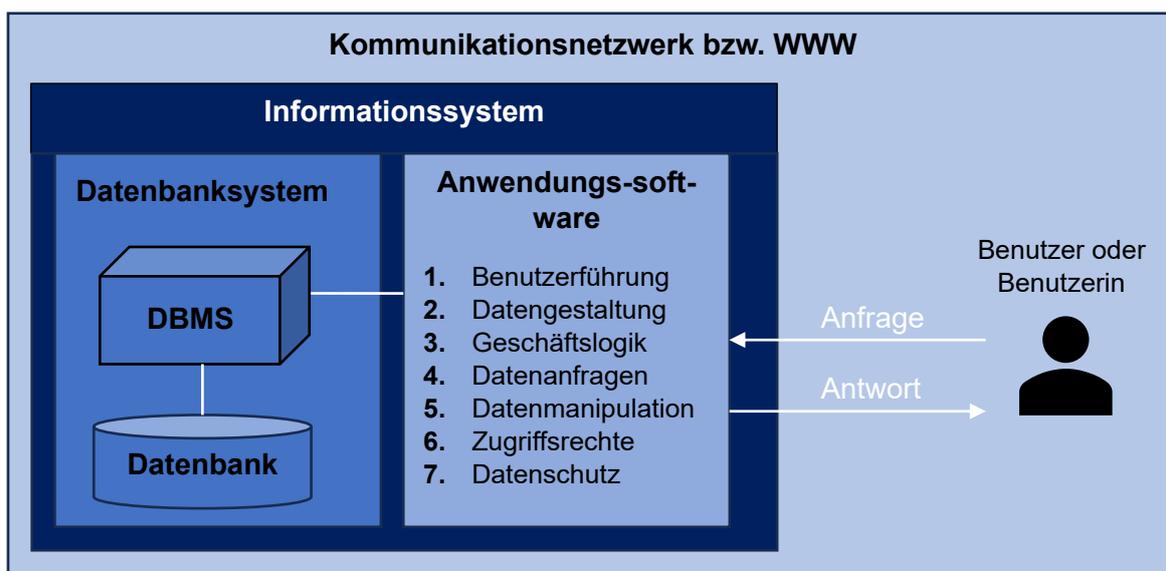


Abbildung 32: Architektur und Komponenten eines Informationssystems¹⁷⁵

In der Praxis kommen oft Datenbanken zum Einsatz, die mit der Abfragesprache *Structured Query Language* (SQL) abfragbar und manipulierbar sind und somit als SQL-Datenbanken bezeichnet werden. Besondere Anforderungen entstehen, wenn webbasierte Dienstleistungen mit heterogenen Datenbeständen in möglichst geringer Zeit erfolgen sollen. Für diese

¹⁷³ Vgl. o. V., „Was ist eine Datenbank?“, zugegriffen 6. April 2024, <https://www.oracle.com/de/database/what-is-database/>.

¹⁷⁴ Vgl. Michael Kaufmann und Andreas Meier, *SQL- & NoSQL-Datenbanken: 9. erweiterte und aktualisierte Auflage* (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2023), 2ff, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-67092-7>.

¹⁷⁵ Vgl. Kaufmann und Meier, 2f.

3.4.1 SQL-Datenbanken

Anforderungen kommen vermehrt NoSQL-Datenbanken (Nicht mit SQL abfragbare Datenbanken) zum Einsatz.¹⁷⁶ Der wesentliche Unterschied zwischen SQL- und NoSQL-Datenbanken liegt in deren Aufbau und Funktionsweise.

3.4.1 SQL-Datenbanken

SQL-Datenbanken verwenden das Relationenmodell. Dabei werden Daten oder Informationen in tabellarischen Datensammlungen hinterlegt und abgerufen. Die Tabellen für SQL-Datenbanken beinhalten *Merkmale* oder *Attribute*, die jedem Eintrag in der Datenbank einen bestimmten Datenwert aus einem vordefinierten Wertebereich zuordnet. In jeder Tabelle müssen einige der zu einem Eintrag zugeordneten *Attribute* einen sog. *Identifikationsschlüssel* bilden können. Dieser ist ein Merkmal oder eine minimale Merkmalskombination, die eine Zeile (auch Tupel genannt) eindeutig identifiziert. Neben der eindeutigen Identifikation in der eigenen Tabelle, werden diese auch häufig verwendet, um Tabellen untereinander zu referenzieren.¹⁷⁷ Am besten lässt sich der Identifikationsschlüssel anhand eines Beispiels erläutern: Sollen *Attribute* wie Produktname, Produktionsstandort und Preis zu jedem Produkt speicherbar sein, so könnte jedem Produkt eine eindeutige Produktnummer als *Identifikationsschlüssel* zugeordnet werden. Ein daraus entstehendes Relationenmodell hätte dann folgenden Aufbau:

Tabelle 19: Beispiel SQL-Datenbank

<u>Produktnummer</u>	Produktname	Produktionsstandort	Preis [€]
10	Turbolader 01	München	700,00
20	Turbolader 02	München	900,00

Jede Tabelle im Relationenmodell entspricht einer Menge von Tupeln oder Datensätzen desselben Typs. Dieses Mengenkonzept ermöglicht es, Abfrage- und Manipulationsmöglichkeiten mengenorientiert anzubieten. Die wichtigste Abfrage- und Manipulationssprache für Tabellen ist SQL.¹⁷⁸

Aufgrund des FMEA-Formblatts in einer tabellarischen Struktur bietet sich also an, eine SQL-Datenbank für die Informationen aus dem FMEA-Formblatt in Betracht zu ziehen. Dabei besteht jedoch das Problem, dass für die Darstellung der Einflüsse auf viele unterschiedliche Parameter entweder sehr große Tabellen oder viele kleine Tabellen definiert

¹⁷⁶ Vgl. Kaufmann und Meier, 3.

¹⁷⁷ Vgl. Kaufmann und Meier, 4f.

¹⁷⁸ Vgl. Kaufmann und Meier, 5ff.

3.4.1 SQL-Datenbanken

werden und stetig angepasst werden müssen.¹⁷⁹ Als Beispiel dafür wird die FMEA-MSR aus dem Kapitel *FMEA-MSR* verwendet. Der Ausgangspunkt wäre der sechste Schritt der DFMEA, der zu der Tabelle 14 geführt hat und nun durch eine FMEA-MSR mit den Maßnahmen aus Tabelle 16 erweitert werden muss. Die Fehlerfolge, die damit blockiert wird, ist die *Nichteinhaltung der Abgasnorm* und das *B* in allen im Fehlerpfad befindlichen Fehlern muss somit reduziert werden. Zudem soll für das DBMS hinterlegt werden, dass genau dieses Maßnahmenpaket das *B* von neun auf sieben reduziert hat. Das betrifft jedoch nicht nur diese konkrete FMEA, sondern alle FMEA, in denen die Nichteinhaltung der Abgasnorm aufgrund einer Fehlfunktion in der Strukturebene *VTG-Verstellungseinheit* von *Turboladers 01* aufgetreten ist. Zudem muss der Wert für *B* in jeder FMEA den maximalen Wert entlang des gesamten Fehlerpfads haben. Somit muss zusätzlich ermittelt werden, welches *B* nun entlang von welchem Fehlerpfad den höchsten Wert hat.¹⁸⁰

Basierend auf der Annahme, dass das FMEA-Formblatt als Grundlage für die Datenbank dient und nur um Identifikationsschlüssel erweitert wurde, könnte der folgende mehrstufiger Ansatz verwendet werden:

1. Ermittlung aller Fehlerpfade, die den *Turbolader 01* und die *VTG-Verstellungseinheit* in den Strukturebenen sowie die Fehlerfolge *Nichteinhaltung der Abgasnorm* beinhalten und Erstellung von allgemeinen Tabellenausdrücken (engl. Common Table Expressions, CTE) für jeden Fehlerpfad mit dem dazugehörigen Wert für *B*. Da nicht alle Fehlerpfade gleich lang sind, müsste entweder zuerst der längste Fehlerpfad ermittelt oder die CTE mit jedem größeren Fehlerpfad um einige Spalten erweitert werden.
2. Vergleich aller Werte für *B* in den CTE und Anpassung der Werte in der ursprünglichen Tabelle oder in den ursprünglichen Tabellen. Zum Schluss folgt die Erstellung von neuen Spalten oder einer neuen Tabelle mit allen Informationen, die die Optimierung in einer FMEA-MSR beinhalten.¹⁸¹

Dieses Vorgehen müsste jedes Mal durchgeführt werden, wenn eine neue Maßnahme für einen Fehler definiert wird, um indirekte Maßnahmen erfassen zu können. Die Integration in PLZ-Analysen wie das *Bosch Semantic Stack* würde sich zudem nicht optimal gestalten,

¹⁷⁹ Vgl. Kap. 3.2 Potenziale der FMEA-Softwareunterstützung

¹⁸⁰ Vgl. Kap.2. Grundlagen zu FMEA

¹⁸¹ Vgl. o. V., „Datenbank/SQL-Grundlagen – SELFHTML“, o. J., https://wiki.selfhtml.org/wiki/Datenbank/SQL-Grundlagen#Datens.C3.A4tze_hinzuf.C3.BCgen_und_.C3.A4ndern.

3.4.2 NoSQL-Datenbanken

da die horizontale Skalierung in relationalen Datenbanken mit einem herkömmlichen relationalen Datenbankmanagementsystem (RDBMS) nicht möglich ist.¹⁸²

Relationale Datenbanken besitzen zudem den Nachteil, dass die Schema-Einschränkungen die Datenmigration zu und von verschiedenen RDBMS behindern.¹⁸³

3.4.2 NoSQL-Datenbanken

Der Begriff NoSQL wird für nicht-relationale Ansätze im Datenmanagement verwendet. Ein nicht-relationaler Ansatz erfüllt i.d.R. eine der zwei Bedingungen:

1. Die Speicherung der Daten erfolgt nicht in Tabellen.
2. Die Datenbankabfrage- und Manipulationssprache ist nicht SQL.

Häufig wird NoSQL mit *Not only SQL* übersetzt, was die Verwendung einer Kombination aus SQL nicht-relationalen Funktionen ausdrückt. NoSQL wird vor allem dort eingesetzt, wo die Abfrage- und Manipulationsgeschwindigkeit von vielen unterschiedlichen Daten im Vordergrund steht. Für solche Anwendungszwecke sind nicht-relationale Strukturen oft deutlich besser geeignet.¹⁸⁴

NoSQL-Datenbanken können aufgrund ihrer schemafreien Natur problemlos große Datenmengen verwalten und speichern. Dadurch wird auch eine horizontale Skalierung ermöglicht.¹⁸⁵ Das bedeutet für den FMEA-Anwendungsfall, dass FMEA-Daten in einer NoSQL-Datenbank in Form von Fehlernetzen gespeichert und direkt abgefragt werden können, ohne dafür CTE oder spezielle Tabellen erzeugen zu müssen. Außerdem können dadurch Beziehungen zwischen Parametern direkt abgespeichert, abgefragt, manipuliert und erzeugt werden. Das könnte besonders vorteilhaft für Software sein, die die Sortierung, Aufarbeitung und Analyse von Daten über den gesamten PLZ vornimmt, da diese aufgrund der Datenverschiedenheit die Daten nicht relational speichern wird.

Es gibt zahlreiche Typen von NoSQL-Datenbanken:

3. Schlüsselwertspeicher: Dieser Typ speichert nur Schlüssel-Wert-Paare und ist somit der effizienteste Weg auf diese zuzugreifen. Einige Beispiele dafür wären Amazon DynamoDB und Redis.¹⁸⁶

¹⁸² Vgl. Nida Fatima, „Verschiedene Arten von Datenbanken im Jahr 2024: Ein umfassender Leitfa-den“, *Astera*, 24. Januar 2024, <https://www.astera.com/de/type/blog/a-quick-overview-of-different-types-of-databases/>.

¹⁸³ Vgl. Nida Fatima.

¹⁸⁴ Vgl. Kaufmann und Meier, *SQL- & NoSQL-Datenbanken*, 14ff.

¹⁸⁵ Vgl. Nida Fatima, „Verschiedene Arten von Datenbanken im Jahr 2024“.

¹⁸⁶ Vgl. Nida Fatima; Vgl. Kaufmann und Meier, *SQL- & NoSQL-Datenbanken*, 15ff.

3.4.2 NoSQL-Datenbanken

- Dieser Typ ist für das Speichern des Wissens in einer FMEA nicht geeignet, da sich dieses nicht in Schlüssel-Wert-Paare unterteilen lässt.
4. Breite Spaltenspeicher: Dieser Typ kann auch als mehrdimensionaler Schlüsselwert-speicher bezeichnet werden. Bei diesem Typ können riesige Datenmengen in Tabellen oder Spalten verwaltet werden, wobei jede dieser Spalten als Datensatz fungieren kann. Beispiele für Breite Datenspeicher wären Scylla und HBase.¹⁸⁷
- Auch dieser Typ ist für die Speicherung von Wissen aus einer FMEA ungeeignet, da er dafür keine Vorteile gegenüber von SQL-Datenbanken aufweist.
5. Dokumentenspeicher: Dokumentenspeicher speichern Daten in Form von Dokumenten. Als digitale Dokumente wird eine Menge an Informationen bezeichnet, die einen Sachverhalt als geschlossene Einheit beschreibt und in einem Computersystem gespeichert ist. Dabei werden Informationen als strukturierte Objekte in einem einzigen Datensatz beschrieben.¹⁸⁸ Diesen Typ verwenden Couchbase und MongoDB, die einige der bekanntesten NoSQL-Datenbanken sind.¹⁸⁹
- Da die Daten in einer FMEA keine abgeschlossenen Einheiten bilden, ist auch dieser NoSQL-Datenbanktyp für die Wissensrepräsentation aus einer FMEA nicht optimal.
6. Graph-Datenbanken: Dieser Typ speichert Informationen als Eigenschaftsgraphen, die Knoten (Konzepte, Objekte) und gerichteten Kanten (Beziehungen) abbilden können.¹⁹⁰ Graph-Datenbanken werden verwendet, um verschiedene Arten von Daten und deren Beziehung zueinander zu analysieren.¹⁹¹
- Mit Graph-Datenbanken könnte die FMEA in jeder beliebigen graphischen Form gespeichert werden. Dadurch können alle Beziehungen in einer FMEA modelliert, analysiert und direkt abgefragt werden. Somit wäre das Wissen aus einer FMEA mit diesem NoSQL-Datenbanktyp am besten repräsentierbar. Aufgrund der Analysefunktionen von Graph-Datenbanken ist es zudem denkbar, dass Software für komplette produktorientierte PLZ-Analysen auch Graph-Datenbanken verwenden. Dadurch könnten alle Informationen aus der FMEA abgefragt und analysiert werden, ohne dass es dabei eines Übertrags der FMEA-Daten in eine Graph-Datenbank-Struktur bedarf.

¹⁸⁷ Vgl. Nida Fatima, „Verschiedene Arten von Datenbanken im Jahr 2024“.

¹⁸⁸ Vgl. Kaufmann und Meier, *SQL- & NoSQL-Datenbanken*, 21f.

¹⁸⁹ Vgl. Nida Fatima, „Verschiedene Arten von Datenbanken im Jahr 2024“.

¹⁹⁰ Vgl. Kaufmann und Meier, *SQL- & NoSQL-Datenbanken*, 16f.

¹⁹¹ Vgl. Nida Fatima, „Verschiedene Arten von Datenbanken im Jahr 2024“.

3.3 Graphische Datenbanken als Werkzeug

Eine genaue Betrachtung der in den vorangegangenen Unterkapiteln erläuterten Problemstellungen in Kombination mit dem FMEA-Vorgehen nach VDA und AIAG folgenden Entscheidungsbaum für Graph-Datenbanken:

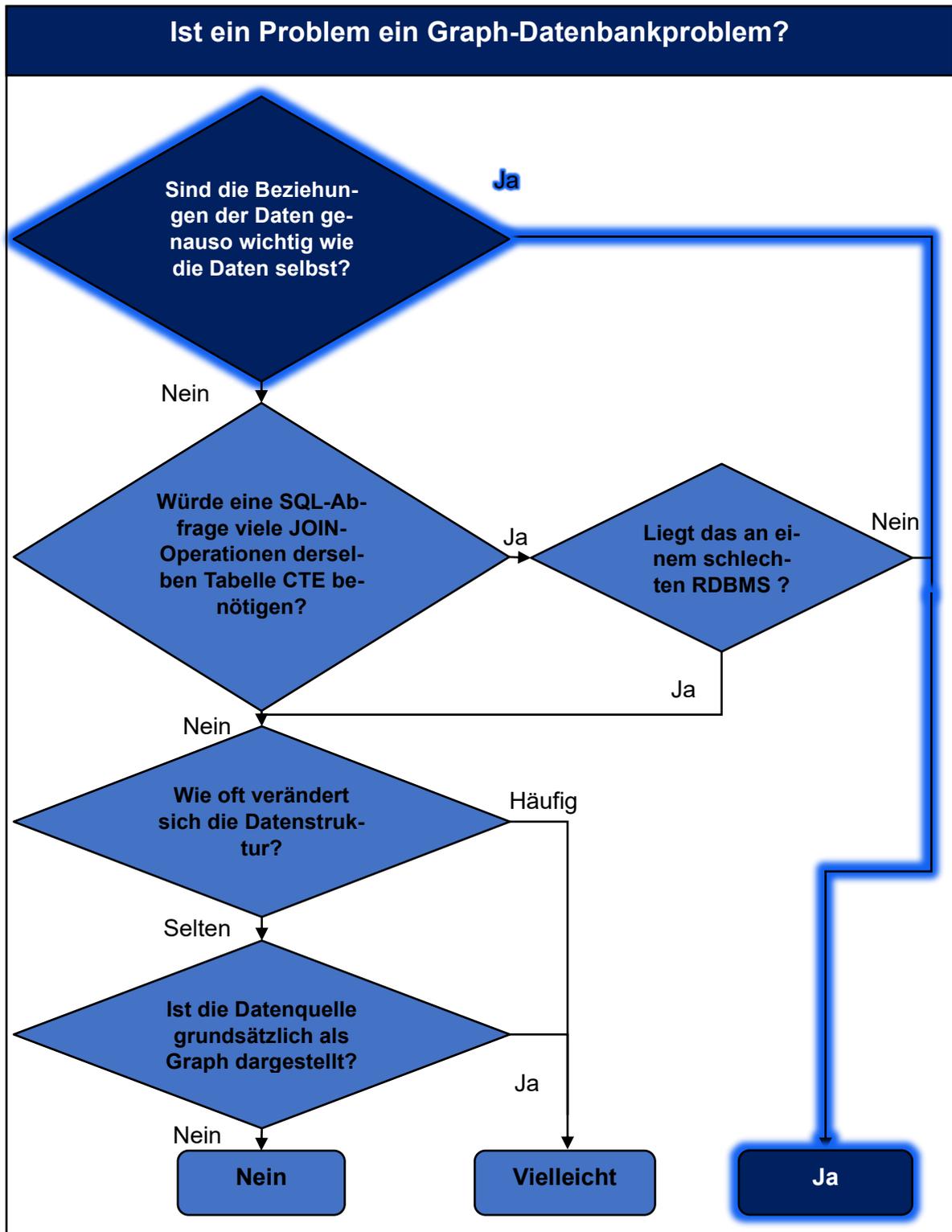


Abbildung 33: Entscheidungsbaum Nutzung Graph-Datenbank¹⁹²

Der ausgewählte Pfad ist mit einer blauen Umrandung hinterlegt und die Entscheidungspunkte im Pfad sind zusätzlich dunkelblau formatiert. Der erste Entscheidungspunkt des

¹⁹² Vgl. Dave Bechberger und Josh Perryman, *Graph Databases in Action* (Simon and Schuster, 2020), 20.

3.3.1 Wissensgraphen

Entscheidungsbaums in Abbildung 33 enthält die Frage, ob die Beziehungen genauso wichtig seien, wie die Daten selbst. Um diese Frage zu beantworten, bedarf es zunächst einer genaueren Definition von *Daten* und *Beziehungen* in der FMEA. Durch *Beziehungen* werden hierarchische Informationen, Abhängigkeiten oder Einflüsse in der FMEA beschrieben (z.B. *X ist ein Untersystem von Y*). Die *Daten* sind die Inhalte der FMEA, wie z.B. die im FMEA-Formblatt eingetragenen Werte (z. B. *Turbolader 01*). Die Wichtigkeit der Daten und Beziehungen kann durch die Notwendigkeit dieser für die Funktionalität bestimmt werden. Eine Betrachtung des Systems der Maßnahmen, mit denen Risiken minimiert werden, legt den folgenden Sachverhalt nahe: die Beziehungen zwischen den Fehlertypen, Fehlerfolgen und Fehlerursachen sind notwendig für die Einbindung von Maßnahmen sowie der Anzeige von deren Einflüssen. Das liegt daran, dass Fehlerarten, Fehlerfolgen und Fehlerursachen immer Fehlerarten sind, die sich auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen befinden.¹⁹³ Die Erstellung eines Fehlernetzes ist für die Bereitstellung der Informationen notwendig, welche Maßnahme welche konkreten Risiken beeinflusst. Besonders für die Einbindung von Ergebnissen aus der FMEA-MSR ist das von Relevanz, da dabei die Bedeutungen aller Risiken entlang eines Fehlerpfads minimiert werden und nicht nur von dem Risiko, welches direkt adressiert wird. Ohne Beziehungen ist die Erstellung eines Fehlernetzes nicht möglich, da dabei Beziehungen wie *ist die Fehlerfolge von, hat die Fehlerursache* essenziell sind. Dadurch sind die Beziehungen in einer FMEA gleichbedeutend mit den Daten und die Frage, ob das Problem ein Graph-Datenbankproblem ist, kann ebenfalls mit *ja* beantwortet werden.

3.3.1 Wissensgraphen

Um das Wissen aus einer FMEA in einer Graph-Datenbank zu hinterlegen, muss ein sog. *Wissensgraph* erstellt werden. Wissensgraphen ermöglichen die Speicherung von Informationen in strukturierter Form, wodurch eine fundierte Wissensbasis entsteht, die als Grundlage für weitere Anwendungen dient.¹⁹⁴ Dies unterstützt eines der Hauptziele der FMEA: Den Aufbau und die Erweiterung einer unternehmensweiten Wissensbasis.¹⁹⁵

Es gibt keine einheitliche Definition eines Wissensgraphen, es kann jedoch einen Konsens aus mehreren Definitionen abgeleitet werden: Ein Wissensgraph kann als Graph definiert werden, bei dem Wissensfragmente als Entitäten mit ihren semantischen Typen und Eigenschaften sowie deren Beziehungen zueinander und deren Individuen in Form von Tripeln,

¹⁹³ Vgl. Kap. 2. Grundlagen zu FMEA

¹⁹⁴ Vgl. Carsten Lanquillon und Sigurd Schacht, *Knowledge Science – Grundlagen: Methoden der Künstlichen Intelligenz für die Wissensextraktion aus Texten* (Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023), 190, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-41689-8>.

¹⁹⁵ Vgl. Kap 2.1 Ziele der FMEA

3.3.2 Ontologien

die aus Subjekt, Prädikat und Objekt bestehen, modelliert werden. Dieses Wissen wird formalisiert abgelegt und kann in Form der Resource Description Framework (RDF) – Notation implementiert werden.¹⁹⁶ RDF ist ein Standardmodell für den Datenaustausch im Web, welches über Funktionen verfügt, die die Zusammenführung schematisch unterschiedlicher Daten erleichtern. Außerdem unterstützt RDF die Weiterentwicklung von Schemata, ohne dass alle Datenkonsumenten verändert werden müssen. RDF erweitert die Struktur der Webverknüpfung, indem es Unique Resource Identifier (URI) verwendet, um sowohl die Beziehung zwischen den Elementen als auch die beiden Enden der Verbindung zu benennen. Auf diese Weise gebildete Datensätze werden typischerweise als Tripel bezeichnet. Mit diesem einfachen Modell können strukturierte und halbstrukturierte Daten gemischt, freigelegt und von unterschiedlichen Anwendungen gemeinsam genutzt werden.¹⁹⁷

3.3.2 Ontologien

Für die Erstellung eines Wissensgraphen ist es zunächst zweckmäßig, eine sog. Ontologie zu erstellen. Auch für Ontologien gibt es keine einheitliche Definition, somit wird die Ontologie für diese Arbeit in Anlehnung an die Definition nach Lanquillon und Schach wie folgt definiert: Eine Ontologie ist eine beschreibende Sprache, die eine explizite formale Spezifikation von Konzepten, die auch Klassen genannt werden, und deren Beziehungen zueinander darstellt.¹⁹⁸

Der wesentliche Unterschied zwischen einer Ontologie und einem Wissensgraphen ist, dass die Ontologie keine Daten über Individuen bzw. Instanzen der Klassen enthält. Eine Ontologie bildet also den Rahmen eines Wissensgraphen. Ein Wissensgraph besteht somit aus einer Ontologie und Instanzen der Klassen.¹⁹⁹ Das Ziel einer Ontologie ist es, bestehende Daten und Informationen so zu strukturieren, dass diese wiederum für andere Programme, Personen, Software-Agenten, ergänzt um Metainformationen, wiederverwertbar gespeichert und ausgewertet werden können. Ontologien setzen sich aus Konzepten oder Klassen eines bestimmten Bereichs zusammen. Diese Konzepte verfügen über spezifische Eigenschaften und Restriktionen, die sie näher definieren. Ähnlich wie in der objektorientierten Programmierung, lassen sich die Klassen hierarchisch in Untergruppen gliedern, was zu einer vernetzten Klassenstruktur führt. Zusätzlich definiert eine Ontologie die mög-

¹⁹⁶ Vgl. Lanquillon und Schacht, *Knowledge Science – Grundlagen*, 192.

¹⁹⁷ Vgl. o. V., „RDF - Semantic Web Standards“, zugegriffen 12. April 2024, <https://www.w3.org/2001/sw/wiki/RDF>.

¹⁹⁸ Vgl. Lanquillon und Schacht, *Knowledge Science – Grundlagen*, 185f.

¹⁹⁹ Vgl. Bess Schrader, „What’s the Difference Between an Ontology and a Knowledge Graph?“, *Enterprise Knowledge*, 15. Januar 2020, <https://enterprise-knowledge.com/whats-the-difference-between-an-ontology-and-a-knowledge-graph/>.

3.3.3 Einführung in OWL und RDFS

lichen Verbindungen zwischen diesen Klassen. Eine Ontologie stellt somit die Metainformationen dar, die den Zusammenhang und die Beschreibungsweise der Daten in einem Bereich erklären. Daten, die in einer Ontologie gespeichert werden, bilden jeweils eine Instanz eines Konzepts oder einer Klasse. Die festgelegte Struktur einer Ontologie, bestehend aus der hierarchischen Anordnung von Klassen und deren Unterklassen, ergänzt durch Eigenschaften und Restriktionen, sowie die daraus resultierenden Instanzen, formen eine strukturierte Wissensbasis. Diese repräsentiert auch die Realität.²⁰⁰

3.3.3 Einführung in OWL und RDFS

Um Ontologien und somit auch Wissensgraphen zu modellieren, wird eine formalisierte Darstellung einer strukturierten Wissensbasis benötigt. Für die Festlegung der Klassenhierarchie und der Attribute wird das Resource Description Framework Schema (RDFS) sowie die W3C Web Ontology Language (OWL) verwendet. RDFS ist eine universelle Sprache zur Darstellung von RDF-Daten und ist eine semantische Erweiterung des RDF.²⁰¹ OWL ist eine Sprache des semantischen Webs, um umfassendes und komplexes Wissen über Dinge, Gruppen von Dingen und die Beziehungen zwischen Dingen zu repräsentieren. OWL ist eine auf berechneter Logik basierende Sprache, sodass Wissen, das in OWL ausgedrückt wird, von Computerprogrammen genutzt werden kann, z.B. um die Konsistenz dieses Wissens zu überprüfen oder implizites Wissen explizit zu machen. OWL-Dokumente, bekannt als Ontologien, können im World Wide Web veröffentlicht und von anderen OWL-Ontologien referenziert oder auf sie verwiesen werden. OWL 2 (Die aktuelle OWL-Version) ist Teil des Semantic Web-Technologie-Stacks des W3C, zu dem u. A. auch RDF, RDFS gehören.²⁰²

Entitäten sind die grundlegenden Bausteine von OWL 2-Ontologien und definieren den Wortschatz sowie die benannten Begriffe einer Ontologie. Eine *Entität* kann als ein physisches oder logisches Element, welches Objekte und Beziehungen sein können, verstanden werden. Jede *Entität* hat eine individuelle IRI (Internationalized Resource Identifier), die eine Weiterentwicklung der URI ist.²⁰³ Die Codierung in IRI verwendet die Unicode Transformation Format (UTF)-8-Codierung im Unicode-Format.²⁰⁴ In dieser Arbeit werden für die bessere Lesbarkeit keine IRI verwendet und Umlaute durch *ue*, *ae* und *oe* und das *ß* durch

²⁰⁰ Lanquillon und Schacht, *Knowledge Science – Grundlagen*, 186.

²⁰¹ Vgl. o. V., „RDF Schema 1.1“, zugegriffen 12. April 2024, <https://www.w3.org/TR/rdf-schema/>.

²⁰² Vgl. o. V., „OWL - Semantic Web Standards“, zugegriffen 12. April 2024, <https://www.w3.org/OWL/>.

²⁰³ Vgl. o. V., „OWL 2 Web Ontology Language Structural Specification and Functional-Style Syntax (Second Edition)“, zugegriffen 12. April 2024, https://www.w3.org/TR/2012/REC-owl2-syntax-20121211/#Entities.2C_Literals.2C_and_Anonymous_Individuals.

²⁰⁴ Vgl. Martin J. Dürst und Michel Suignard, „Internationalized Resource Identifiers (IRIs)“, Request for Comments (Internet Engineering Task Force, Januar 2005), <https://doi.org/10.17487/RFC3987>.

3.3.4 Einführung in TURTLE und SPARQL

ss ausgedrückt. Neben Entitäten enthalten OWL 2-Ontologien typischerweise auch *Literale*, wie Zeichenketten oder ganze Zahlen.²⁰⁵ In dieser Arbeit werden sowohl RDFS-, als auch OWL-Entitäten verwendet, um die Ontologie und den Wissensgraphen zu modellieren.

3.3.4 Einführung in TURTLE und SPARQL

Eines der Formate, in dem RDFS- und OWL-Dokumente gespeichert werden, ist das Terse RDF Triple Language (TURTLE)-Format. Ein TURTLE-Dokument ist die textuelle Repräsentation eines RDF-Graphen in Tripeln.²⁰⁶ Diese Tripel lassen sich mit der Abfragesprache SPARQL Protocol and Query Language (SPARQL) abfragen.²⁰⁷

Jedes TURTLE-Dokument besteht aus Entitäten, die eine eindeutige URI haben und zu Tripeln in der Form von *Subjekt Prädikat Objekt* gespeichert werden. Um nicht jede Entität immer in URI-Format schreiben zu müssen, werden sich wiederholende Teile von URI als Präfixe, bzw. *Prefixes* gespeichert. Die IRI, die immer vergeben werden sind die der Präfixe *rdf:*, *rdfs:*, *owl:*, und *xsd:*. XSD steht für XML Schema Definition und ist eine Sprache zur Definition der Struktur, der Datentypen und der Einschränkung von Extensible Markup Language (XML)-Dokumenten. In OWL 2 werden sie vor allem verwendet, um Datentypen zu klassifizieren.²⁰⁸ Die URI der Ontologie selbst wird als *@base* gespeichert.²⁰⁹ Somit entsteht das erste Fragment der Ontologie:

```
@base <http://www.semanticweb.org/alexanderverkhov/ontologies/2023/11/FMEA#> .
@prefix rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#> .
@prefix xsd: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#> .
@prefix rdfs: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#> .
@prefix owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#> .
@prefix : <http://www.semanticweb.org/alexanderverkhov/ontologies/2023/11/FMEA#> .
```

Abbildung 34: Beispiel Prefixes²¹⁰

In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** wurde noch der *@prefix :* mit der URI der Basisontologie hinzugefügt, da dieser für die Schreibweise in Tripeln benötigt wird. Alle erzeugten Entitäten werden im Text mit dem Präfix *:* ausgestattet. OWL, RDFS, RDF und XSD stellen standardmäßig zahlreiche Entitäten zur Verfügung. Jedem Objekt

²⁰⁵ Vgl. o. V., „OWL 2 Web Ontology Language Structural Specification and Functional-Style Syntax (Second Edition)“.

²⁰⁶ Vgl. o. V., „RDF 1.1 Turtle“, zugegriffen 12. April 2024, <https://www.w3.org/TR/turtle/>.

²⁰⁷ Vgl. o. V., „SPARQL 1.1 Query Language“, zugegriffen 12. April 2024, <https://www.w3.org/TR/sparql11-query/>.

²⁰⁸ Vgl. o. V., „OWL 2 Web Ontology Language Structural Specification and Functional-Style Syntax (Second Edition)“.

²⁰⁹ Vgl. o. V., „RDF 1.1 Turtle“.

²¹⁰ Vgl. o. V.

3.3.5 Einführung in Inferenz

oder jeder Beziehung in einer Ontologie muss eine Entität zugeordnet werden.²¹¹ Die wichtigsten Standardentitäten für die FMEA-Ontologie sind die folgenden:

1. *rdf:type* ist eine Zuweisung einer URI zu einer Entität.
2. *owl:Class* repräsentiert Klassen, als Satz von Individuen verstanden werden können. Die Klasse *owl:Thing* repräsentiert alle Sätze von Individuen und befindet sich somit immer auf der höchsten Hierarchieebene (wie *DEFAULT_ROOT_CONCEPT* in Abbildung 35).
3. *rdfs:SubClassOf* ist eine hierarchische Strukturierung zweier Klassen. Dabei ist die eine Klasse die Unterklasse einer anderen Klasse.
4. *owl:ObjectProperty* verbinden Paare von Individuen und repräsentieren somit Beziehungen zwischen Individuen. Die oberste Instanz dieser Entität ist *owl:topObjectProperty*, die alle möglichen Paare von Individuen verbindet. Da eine *owl:ObjectProperty* eine pfeilartige Beziehung darstellt, benötigt diese eine *rdfs:range* als Ziel und eine *rdfs:domain* als Ursprung.
5. *rdfs:subPropertyOf* ist eine hierarchische Strukturierung zweier Beziehungen. Dabei ist eine Beziehung einer anderen untergeordnet.
6. *owl:DataProperty* verbinden Individuen mit Literalen, repräsentieren also Beziehungen zwischen Individuen und einem Literalen. Die Entität *owl:topObjectProperty* ist die oberste Instanz aller *owl:DataProperty* und umfasst alle Verbindungen zwischen Individuen und Literalen. Da eine *owl:DataProperty* eine pfeilartige Beziehung darstellt, benötigt diese eine *rdfs:range* als Ziel und eine *rdfs:domain* als Ursprung.²¹²

3.3.5 Einführung in Inferenz

Inferenz (engl. Inference) bildet einen der wichtigsten Vorteile von Graph-Datenbanken gegenüber von anderen Datenbanktypen. Inferenz ermöglicht es, aus vorhandenem Wissen und Axiomen neue Erkenntnisse abzuleiten. In einer RDF-Datenbank wird Inferenz eingesetzt, um auf Basis vorhandener RDF-Daten und einem formalen Satz von Inferenzregeln zusätzliche Erkenntnisse zu gewinnen.²¹³ Inferenz wird in Graph-Datenbanken häufig mit vordefinierten SPARQL-Abfragen durchgeführt.²¹⁴ Inferenzregeln mit geringer Komplexität können auch mit OWL direkt auf die Ontologie angewendet werden.²¹⁵ Eine Erweiterung für

²¹¹ Vgl. o. V.; Vgl. o. V., „OWL 2 Web Ontology Language Structural Specification and Functional-Style Syntax (Second Edition)“; Vgl. o. V., „RDF Schema 1.1“.

²¹² Vgl. o. V., „RDF Schema 1.1“; Vgl. o. V., „OWL 2 Web Ontology Language Structural Specification and Functional-Style Syntax (Second Edition)“.

²¹³ Vgl. o. V., „What Is Inference?“, Ontotext, o. J., <https://www.ontotext.com/knowledgehub/fundamentals/what-is-inference/>.

²¹⁴ Vgl. Waqas Ali u. a., „A Survey of RDF Stores & SPARQL Engines for Querying Knowledge Graphs“ (arXiv, 13. Oktober 2021), 1f, <http://arxiv.org/abs/2102.13027>.

²¹⁵ Vgl. o. V., „OWL Reasoning Examples“, 3. Dezember 2003, <http://owl.man.ac.uk/2003/why/latest/>.

3.3.5 Einführung in Inferenz

OWL, die für Inferenz verwendet werden kann ist die *Semantic Rule Web Language* (SWRL), die für genau diesen Einsatzzweck erzeugt wurde.²¹⁶ Für diese Arbeit reichen jedoch die Möglichkeiten der Inferenz mit SPARQL und OWL, daher werden keine SWRL-Regeln verwendet. In dieser Arbeit wird Inferenz primär über SPARQL-Abfragen in der Graph-Datenbank realisiert, während die Ontologie als Grundkonzept für die Graph-Datenbank fungiert.

Ein Beispiel, wofür Inferenz benötigt wird, wäre das autonome Fahren. Inferenzmechanismen werden dabei verwendet, um aus Sensordaten (wie Kameraaufnahmen, Radar und Lidar) die Umgebung des Fahrzeugs zu verstehen. Das System muss erkennen, ob Objekte wie andere Fahrzeuge, Fußgänger oder Hindernisse vorhanden sind, und dann entsprechend navigieren und reagieren.²¹⁷ Dabei werden aus Mustern von Sensordaten Schlussfolgerungen gezogen, die die Objekte klassifizieren und darauf basierende Aktionen empfehlen.

²¹⁶ Vgl. o. V., „SWRL: A Semantic Web Rule Language Combining OWL and RuleML“, 21. Mai 2004, <https://www.w3.org/submissions/SWRL/#7.1>.

²¹⁷ Vgl. o. V., „Referenzarchitektur für den autonomen Fahrzeugbetrieb - Microsoft mobility reference architecture“, 15. April 2024, <https://learn.microsoft.com/de-de/industry/mobility/architecture/ra-mobility-avops>.

4. Wissensgraph für FMEA nach VDA & AIAG Handbuch

In diesem Kapitel wird schrittweise ein Wissensgraph für die FMEA nach dem VDA & AIAG-FMEA-Handbuch erstellt und erläutert. Da ein Wissensgraph aus einer Ontologie und Instanzen dieser Ontologie besteht, wird zunächst eine Ontologie für den Wissensgraphen definiert und anschließend mit Instanzen gefüllt. Danach wird der Wissensgraph in eine Graph-Datenbank geladen und Inferenzregeln für die FMEA definiert.

4.1 Ontologie für FMEA nach VDA & AIAG Handbuch

Bei der Erstellung von Ontologien gibt es drei Grundregeln, die zu beachten sind:

- I. Es gibt nicht den einen richtigen Weg, eine Domäne zu modellieren, meistens existieren mehrere begründete Alternativen. Die beste Lösung hängt stark vom Anwendungszweck ab.
- II. Die Entwicklung von Ontologien ist kein einmaliger, sondern ein iterativer Prozess.
- III. Konzepte oder Klassen in Ontologien sollten sich auf physische und logische Objekte beziehen. Relationen sollten sich auf die Verbindungen der Objekte konzentrieren.

Der Erstellungsprozess einer Ontologie orientiert sich an dem Lebenszyklus einer Ontologie selbst.²¹⁸ In Anlehnung an das Vorgehen von Lanquillon und Schacht wird in dieser Arbeit ein aus vier Schritten bestehendes Vorgehen zur Ontologie-Erstellung verwendet:

1. Bestimmung der Domäne und ihres Anwendungszwecks
2. Wiederverwendung bestehender Ontologien
3. Herausarbeitung wichtiger Begriffe der Domäne
4. Festlegung der Klassen und Klassenhierarchie sowie deren Attribute²¹⁹

4.1.1 Schritt 1: Bestimmung der Domäne und ihres Anwendungszwecks

Zunächst ist es wichtig, die Domäne, in der die Ontologie Anwendung finden soll, zu definieren und die Anwendungsziele herauszuarbeiten. Dabei wird im Folgenden auf vier Fragen zurückgegriffen, die direkt darauf mit der Thematik dieser Arbeit beantwortet werden:

1. Für welche Domäne wird die Ontologie erstellt?
 - Eine Domäne lässt sich als Kombination aus Eingaberaum und den durch die Zielgröße festgelegten Ausgaberaum sowie den Verteilungen der möglichen Werte und Beziehungen untereinander definieren.²²⁰ Das bedeutet, dass eine

²¹⁸ Vgl. Lanquillon und Schacht, *Knowledge Science – Grundlagen*, 185ff.

²¹⁹ Vgl. Lanquillon und Schacht, 185ff.

²²⁰ Vgl. Lanquillon und Schacht, 29ff.

4.1.2 Schritt 2: Wiederverwendung bestehender Ontologien

Domäne die Thematik darstellt, für die eine Ontologie erstellt werden soll. Die Domäne wäre in dieser Arbeit die FMEA nach VDA & AIAG FMEA-Handbuch.

2. Wofür soll die Ontologie angewendet werden?²²¹

- Die Ontologie soll das Wissen in einer FMEA in elektronisch abfragbarer Form beinhalten und als Basis für einen Wissensgraphen dienen. Dieser soll als Basis für eine Graph-Datenbank verwendet werden, die alle Aspekte einer FMEA beinhaltet und Analysen der Daten in einer FMEA ermöglicht.

3. Welche Fragetypen sollen mit der Ontologie beantwortet werden?²²²

- Es sollen alle Fragetypen bezüglich der technischen Risiken in einer FMEA und deren Einflüsse beantwortet werden, z.B. welche Optimierungsmaßnahmen wurden für das Systemelement Turbolader 01 definiert, welche Fehler werden damit direkt und indirekt adressiert und wie effektiv waren sie?

4. Wer ist der Anwender der erstellten Ontologie?²²³

- Die Ontologie wird in einem Wissensgraphen weiterverarbeitet, der als Basis für eine Graph-Datenbank verwendet wird. Dieser soll für produktzentrierte PLZ-Analysesoftware nutzbar gemacht werden.

4.1.2 Schritt 2: Wiederverwendung bestehender Ontologien

Sobald Domäne und Anwendungszweck definiert sind, sollten zunächst existierenden Ontologien gesucht werden.²²⁴ Es gibt bereits eine FMEA-Ontologie, die die FMEA nach dem VDA-Standard VDA 96 thematisiert.²²⁵

²²¹ Vgl. Lanquillon und Schacht, 188.

²²² Vgl. Lanquillon und Schacht, 188.

²²³ Vgl. Lanquillon und Schacht, 188.

²²⁴ Vgl. Lanquillon und Schacht, 189.

²²⁵ Vgl. Dittmann, *OntoFMEA*, 219ff.

4.1.3 Schritt 3: Herausarbeitung wichtiger Begriffe der Domäne

Im dritten Schritt werden alle wichtigen Begriffe zu der Domäne gesammelt und jeder Begriff um seine möglichen Attribute erweitert. Die hierarchische Struktur der Begriffe und Attribute wird in diesem Schritt noch nicht thematisiert.²²⁹ Für diesen und für die weiteren Schritte wäre es sinnvoll, die Schritte in der FMEA als Systeme mit In- und Outputs zu betrachten.

Wichtige Begriffe aus FMEA-Schritt 1

Im ersten Schritt der FMEA, der Planung und Vorbereitung, gibt es folgende In- und Outputs:

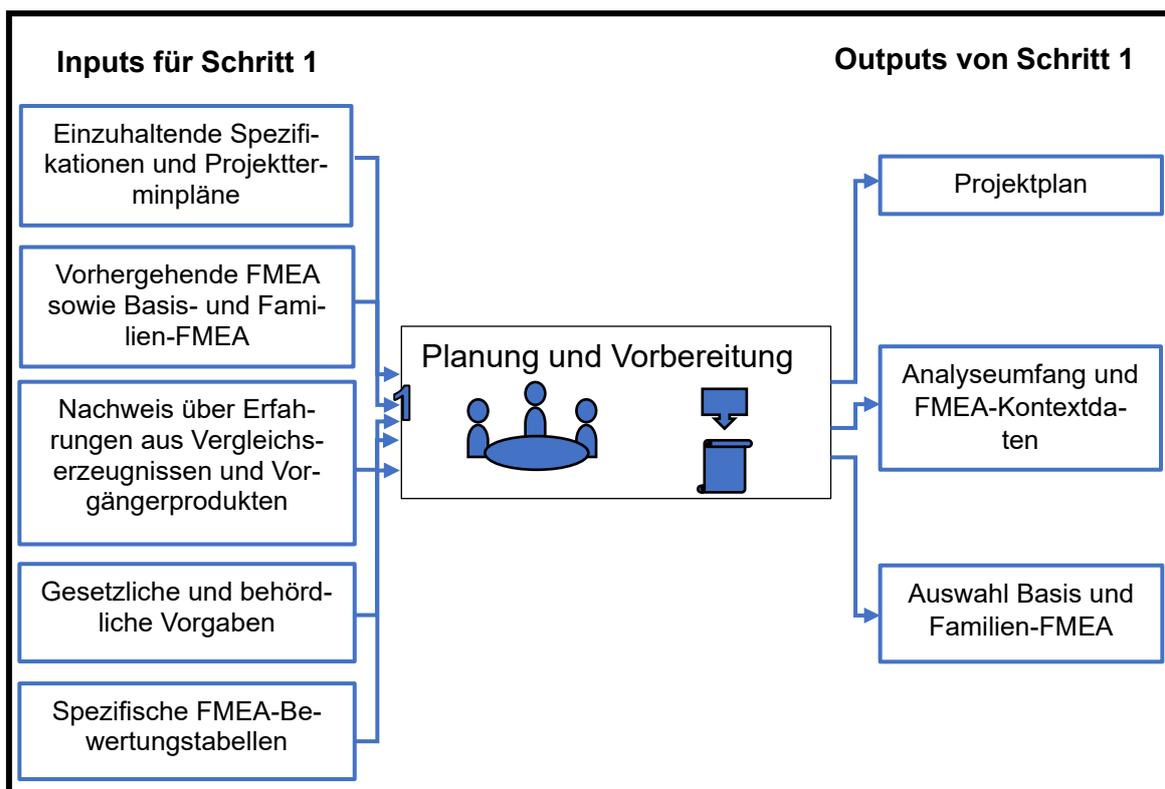


Abbildung 36: Input-Output-Betrachtung des ersten Schritts der FMEA

Im ersten Schritt werden alle wichtigen Randinformationen zur FMEA als Projekt gesammelt.²³⁰ Diese werden in einem Formblatt wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dokumentiert. Aus Abbildung 36 und der **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** können folgende wichtige Begriffe aus dem ersten Schritt der FMEA gesammelt werden:

²²⁹ Vgl. Lanquillon und Schacht, *Knowledge Science – Grundlagen*, 189.

²³⁰ Vgl. Kap. 2.6.1 Schritt 1: Planung und Vorbereitung

Wichtige Begriffe aus FMEA-Schritt 2

Tabelle 20: Wichtige Begriffe aus erstem Schritt der FMEA

Wichtige Begriffe aus den Inputs von FMEA-Schritt 1	Wichtige Begriffe aus den Outputs von FMEA-Schritt 1
<ol style="list-style-type: none"> 1. Spezifikationen 2. Projektterminpläne 3. Nachweise über Erfahrungen 4. Gesetzliche Vorgaben 	<ol style="list-style-type: none"> 5. Projektplan 6. Analyseumfang 7. Basis- und Familien-FMEA 8. Unternehmen 9. Standort 10. Kunde 11. Modelljahre bzw. Programme 12. Thema 13. FMEA-Startdatum 14. FMEA-Revisionsdatum 15. Interdisziplinäres Team 16. FMEA-ID 17. Verantwortung 18. Vertraulichkeitsstufe 19. FMEA-Art

Wichtige Begriffe aus FMEA-Schritt 2

Dasselbe kann mit allen folgenden Schritten wiederholt werden. Zu beachten ist dabei, dass die Outputs des vorangegangenen Schrittes immer als Input für die Nachfolgenden Schritte verwendet werden. Somit werden pro Schritt nur die wichtigen Begriffe erwähnt, die neu hinzugezogen werden. Die Strukturanalyse, den zweiten Schritt der FMEA, könnte wie folgt dargestellt werden:

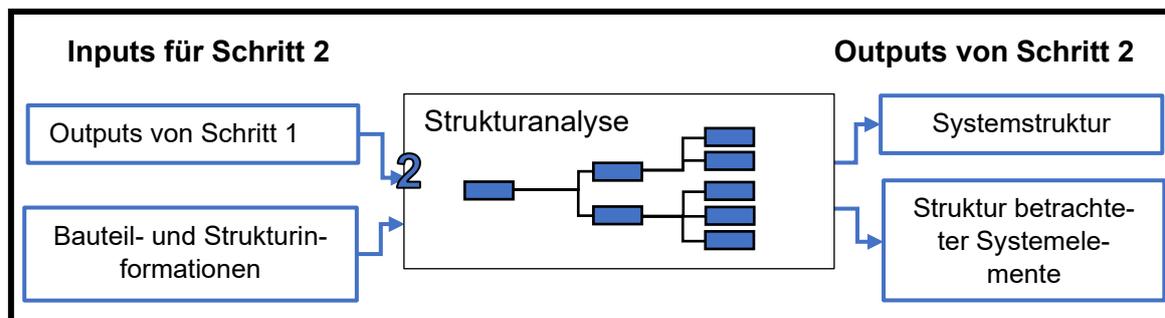


Abbildung 37: Input-Output-Betrachtung des zweiten Schritts der FMEA

Im zweiten Schritt der FMEA werden Bauteil- und Strukturinformationen in Strukturnetze aus verknüpften Systemelementen erstellt. Dabei entsteht die gesamte Systemstruktur und die Struktur der in der FMEA betrachteten Elemente, die in die Systemstruktur eingebunden wird.²³¹ Im Formblatt wird diese Systemstruktur wie in Tabelle 5 und in Tabelle 6 in nächsthöhere und nächstniedrigere strukturelle Ebene und strukturelles Fokuselement unterteilt.

²³¹ Vgl. Kap. 2.6.2 Schritt 2: Strukturanalyse

Wichtige Begriffe aus FMEA-Schritt 3

Dem zweiten Schritt der FMEA können somit folgende wichtige Begriffe entnommen werden:

Tabelle 21: Wichtige Begriffe aus zweitem Schritt der FMEA

Wichtige Begriffe aus den Inputs von FMEA-Schritt 2	Wichtige Begriffe aus den Outputs von FMEA-Schritt 2
20. Bauteil- und Strukturinformation	21. Systemstruktur 22. Systemelement 23. Nächsthöhere strukturelle Ebene 24. Nächstniedrigere strukturelle Ebene 25. Strukturelles Fokuselement

Wichtige Begriffe aus FMEA-Schritt 3

Aufbauend auf der Strukturanalyse wird im dritten Schritt der FMEA ein Funktionsnetz aus den Inputs der Systemstruktur erstellt. Dabei werden in Parameterdiagrammen Störgrößen und Einflüsse auf bestimmte Parameter der Funktionen ermittelt.²³² Daraus kann folgende Input-Output-Betrachtung des dritten FMEA-Schritts erstellt werden:

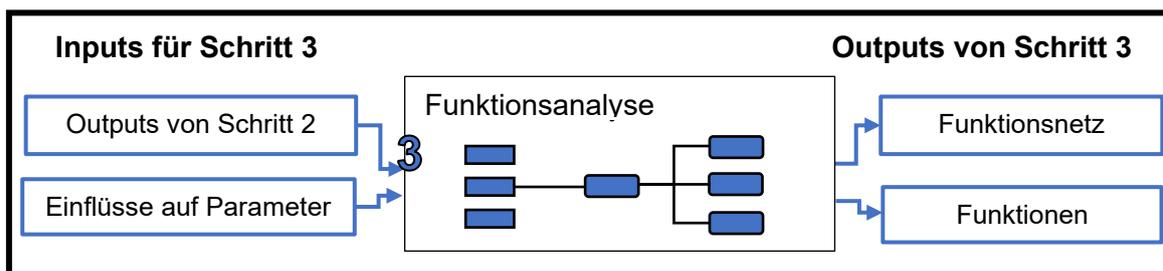


Abbildung 38: Input-Output-Betrachtung des dritten Schritts der FMEA

Ähnlich wie im zweiten Schritt werden in den Formblättern auch hier in der Tabelle 7 und der Tabelle 8 die Funktionen in Ebenen unterteilt. Außerdem erfolgt Zuordnung der Funktionen zur nächsthöheren Ebene und zum Endnutzer bei der DFMEA und zum eigenen, zum belieferten Werk und zum Endnutzer in der PFMEA. Es kommen aus dem dritten Schritt also die folgenden wichtigen Begriffe hinzu:

Tabelle 22: Wichtige Begriffe aus drittem Schritt der FMEA

Wichtige Begriffe aus den Inputs von FMEA-Schritt 3	Wichtige Begriffe aus den Outputs von FMEA-Schritt 3
26. Einflüsse 27. Parameter	28. Funktionen 29. Funktionsnetz 30. Funktion nächsthöherer Ebene 31. Funktion des Fokuselements 32. Funktion der nächstniedrigeren Ebene

²³² Vgl. Kap 2.6.3 Schritt 3: Funktionsanalyse

Wichtige Begriffe aus FMEA-Schritt 4

	33. Funktion für nächsthöhere Ebene 34. Funktion für eigenes Werk 35. Funktion für beliefertes Werk 36. Funktion für Endnutzer
--	---

Wichtige Begriffe aus FMEA-Schritt 4

Aus dem im dritten Schritt ermittelten Funktionsnetz werden den einzelnen Funktionen Fehlfunktionen zugeordnet, die in einem Fehlernetz münden.²³³ Daraus kann die Input-Output-Betrachtung in Abbildung 39 erstellt werden:

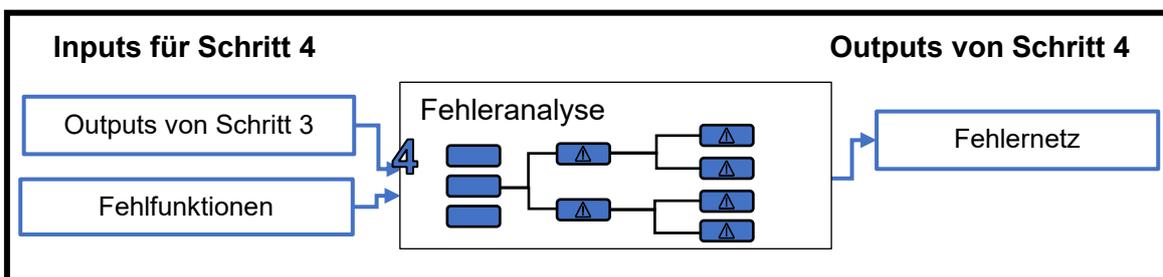


Abbildung 39: Input-Output-Betrachtung des vierten Schritts der FMEA

In den Formblättern für DFMEA mit einer Struktur wie in Tabelle 10 und für PFMEA mit einer Struktur wie in Tabelle 11 werden die Fehlfunktionen in Fehlerfolge, Fehlerart und Fehlerursache unterteilt. Die Fehlerfolgen erhalten entsprechend der Funktionen eine weitere Unterteilung in Fehlerfolgen für nächsthöhere Ebene und den Endnutzer in der DFMEA und Fehlerfolgen für das eigene, das belieferte Werk und für den Endnutzer in der PFMEA. Es kommen somit folgende Begrifflichkeiten hinzu:

Tabelle 23: Wichtige Begriffe aus viertem Schritt der FMEA

Wichtige Begriffe aus den Inputs von FMEA-Schritt 4	Wichtige Begriffe aus den Outputs von FMEA-Schritt 4
37. Fehlfunktionen	38. Fehlernetz 39. Fehlerart 40. Fehlerursache 41. Fehlerfolge 42. Fehlerfolge für Endnutzer 43. Fehlerfolge für nächsthöhere Ebene 44. Fehlerfolge für beliefertes Werk 45. Fehlerfolge für eigenes Werk

²³³ Vgl. Kap. 2.6.4 Schritt 4: Fehleranalyse

Wichtige Begriffe aus FMEA-Schritt 5

Nachdem das Fehlernetz erstellt wurde, kann die Risikoanalyse, der fünfte Schritt der FMEA angegangen werden. Neben dem Fehlernetz werden nun aktuelle Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen und FMEA-Bewertungskataloge benötigt, um die aus den Fehlernetzen entstandenen Risiken zu bewerten. Das Ergebnis des fünften Schritts der FMEA sind bewertete Risiken.²³⁴ Daraus lässt sich die folgende Grafik erstellen:

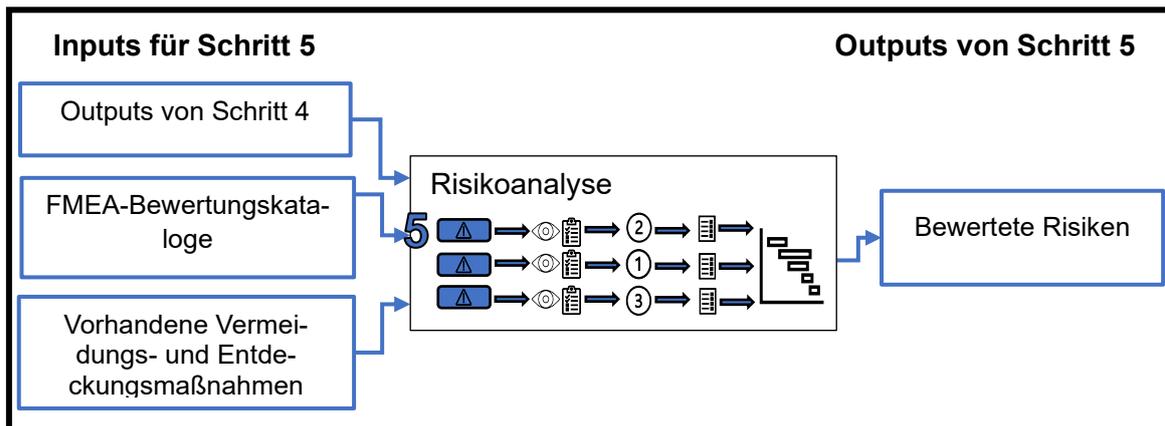


Abbildung 40: Input-Output-Betrachtung des fünften Schritts der FMEA

In den FMEA-Formblättern in Tabelle 12 und in Tabelle 13 wird eine zusätzliche Zuordnung der vorhandenen Entdeckungsmaßnahmen zu der Fehlerursache und der Fehlerart vorgenommen. Es ergeben sich aus dem fünften Schritt also die folgenden zusätzlichen Begrifflichkeiten:

Tabelle 24: Wichtige Begriffe aus fünftem Schritt der FMEA

Wichtige Begriffe aus den Inputs von FMEA-Schritt 5	Wichtige Begriffe aus den Outputs von FMEA-Schritt 5
<p>46. Vorhandene Vermeidungsmaßnahmen 47. Vorhandene Entdeckungsmaßnahmen 48. Vorhandene Entdeckungsmaßnahmen für die Fehlerart 49. Vorhandene Entdeckungsmaßnahmen für die Fehlerursache 50. FMEA-Bewertungskataloge</p>	<p>51. Bewertete Risiken 52. Auftreten (A) 53. Bedeutung (B) 54. Entdeckung (E) 55. Aufgabenpriorität (AP) 56. Bemerkungen</p>

Wichtige Begriffe aus FMEA-Schritt 6

Im sechsten Schritt der FMEA werden die bewerteten Risiken durch gezielte Maßnahmen minimiert. Dafür werden Informationen über die Ressourcen für die Maßnahmen, Informationen über geplante und umgesetzte Maßnahmen aus ähnlichen Projekten benötigt. Zu-

²³⁴ Vgl. Kap. 2.6.5 Schritt 5: Risikoanalyse 2.6.4 Schritt 4: Fehleranalyse

Wichtige Begriffe aus FMEA-Schritt 6

dem können die Ergebnisse von FMEA-MSR vonnöten sein, sofern eine FMEA-MSR durchgeführt werden soll.²³⁵ Daraus ergibt sich die folgende Input-Output-Betrachtung für den sechsten Schritt der FMEA:

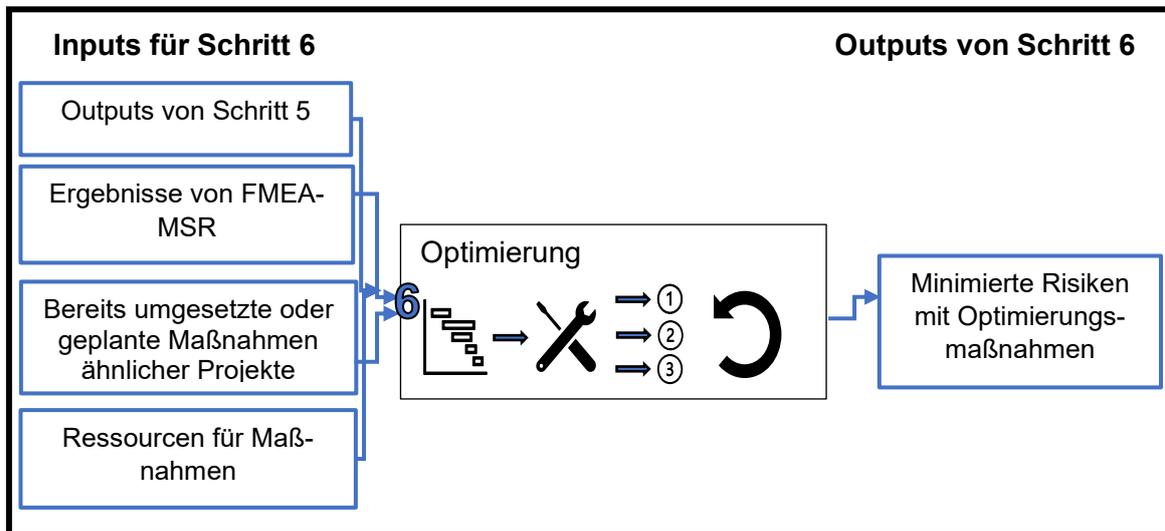


Abbildung 41: Input-Output-Betrachtung des sechsten Schritts der FMEA

Die FMEA-Formblätter für die Optimierung, wie sie in Tabelle 14 verwendet werden, sehen eine Zuordnung der FMEA-Entdeckungsmaßnahmen zu Fehlerarten und Fehlerursachen vor. Es können aus dem sechsten Schritt also die folgenden Begrifflichkeiten hinzugefügt werden:

Tabelle 25: Wichtige Begriffe aus sechstem Schritt der FMEA

Wichtige Begriffe aus den Inputs von FMEA-Schritt 6	Wichtige Begriffe aus den Outputs von FMEA-Schritt 6
<ul style="list-style-type: none"> • Ergebnisse der FMEA-MSR • Ressourcen für Maßnahmen • Ähnliche Risiken • Umgesetzte Maßnahmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Minimiertem Risiko • Optimierungsmaßnahmen • Maßnahmenattribute • FMEA-Entdeckungsmaßnahmen • FMEA-Entdeckungsmaßnahmen für Fehlerart • FMEA-Entdeckungsmaßnahmen für Fehlerursache • FMEA-Vermeidungsmaßnahmen

²³⁵ Vgl. Kap. 2.6.6 Schritt 6: Optimierung

Wichtige Begriffe aus FMEA-MSR

Die FMEA-MSR selbst erfordert ebenfalls weitere Begrifflichkeiten. Bei der FMEA-MSR wird entsprechend der Formblätter, die in Tabelle 16, Tabelle 17 und Tabelle 18 verwendet wurden, eine neue Betrachtung der Risiken vorgenommen. Dadurch kommen folgende Begrifflichkeiten hinzu:

Tabelle 26: Wichtige Begriffe aus der FMEA-MSR

Wichtige Begriffe aus den Inputs von FMEA-MSR-Schritt 5 und 6	Wichtige Begriffe aus den Outputs von FMEA-MSR-Schritt 5 und 6
57. Ergebnisse der DFMEA 58. Felddaten 59. Kundenreklamationen 60. Ressourcen für MSR-Maßnahmen 61. Vorhandene Monitoring-Maßnahmen 62. Vorhandene Systemreaktion 63. FMEA-MSR-Bewertungskataloge	64. Grund für Häufigkeit 65. Häufigkeit (H) 66. Schwerwiegendste Fehlerfolge nach Systemreaktion 67. Monitoring (M) 68. Optimierungsmaßnahmen 69. FMEA-MSR-Monitoring-Maßnahmen 70. FMEA-MSR-Systemreaktion 71. Bedeutung (B) nach Systemreaktion 72. FMEA-MSR-Aufgabenpriorität 73. MSR-Maßnahmenattribute

Wichtige Begriffe aus FMEA-Schritt 7

Im letzten Schritt der FMEA werden die Ergebnisse dokumentiert und kommuniziert. Dabei wird nur mit den Werten aus dem vorangegangenen Schritt bzw. aus den vorangegangenen Schritten gearbeitet.²³⁶ Dieser Sachverhalt ist in der Abbildung 42 dargestellt:

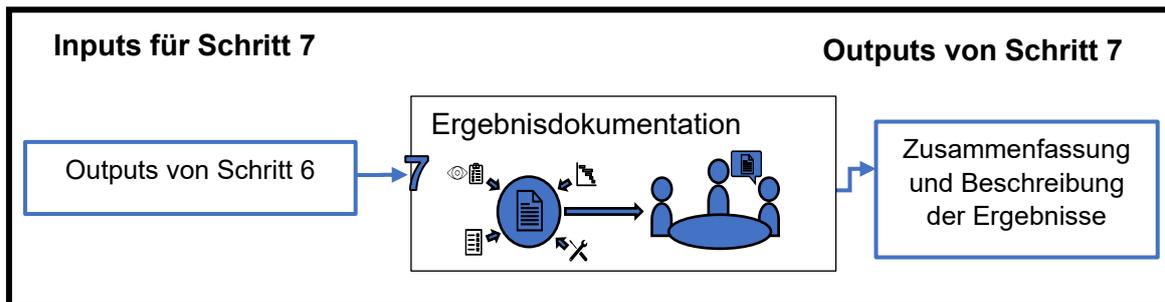


Abbildung 42: Input-Output-Betrachtung des siebten Schritts der FMEA

Da bei diesem Schritt weder logische noch physische Objekte erzeugt oder verbunden werden, müssen im siebten Schritt keine zusätzlichen Begriffe eingeführt werden.

²³⁶ Vgl. Kap. 2.6.7 Schritt 7: Ergebnisdokumentation

4.1.4 Schritt 4: Festlegung der Klassen und Klassenhierarchie sowie deren Attribute

Basierend auf den Informationen aus dem dritten Schritt der Ontologie-Erstellung werden die Begriffe nun als Klassen oder Attribute definiert, hierarchisch angeordnet und Überlappungen dieser entfernt.²³⁷ Das dabei entstehende Grundkonzept wird, mit dem in Abbildung 35 gezeigten Grundkonzept für die FMEA nach VDA 96 verglichen.

Hierarchie, Attribute und Beziehungen aus FMEA-Schritt 1

Die in Tabelle 20 dargestellte Sammlung an Begriffen impliziert eine Erstellung der Klasse *FMEA*, die auf oberster Ebene nach *owl:Thing* als *owl:class* definiert wird. Diese Klasse stellt die FMEA als Dokument dar. Folgende Begriffe aus Tabelle 20 können der Klasse *FMEA* direkt als Literalien, also Zahlen oder Zeichenketten, über eine Beziehung zugeordnet werden:

1. Standort (xsd:string)
2. FMEA-ID (xsd:string)
3. Modelljahre bzw. Programme (xsd:string)
4. Vertraulichkeitsstufe ({"geschützt" , "keine" , "unternehmensintern" , "vertraulich"})
5. FMEA-Startdatum (xsd:dateTime)
6. FMEA-Revisionsdatum (xsd:dateTime)

Literalien haben die Eigenschaft, dass sie in der Ontologie keine Individuen besitzen, sondern nur die Zuordnung eines Datensatzes zu diesen sind. Eine Besonderheit gibt es bei der *Vertraulichkeitsstufe*, bei der der Wertebereich kein Standard-XSD-Wert ist. Die *Vertraulichkeitsstufe* kann nämlich nur in der Klammer genannten Werte annehmen.

Aus dem ersten Schritt der FMEA gehen jedoch weitere Klassen und Beziehungen hervor: Spezifikationen und gesetzliche Vorgaben betreffen in erster Linie nicht die FMEA als Dokument, sondern das Produkt oder den Prozess, welcher in einer FMEA thematisiert wird. Als Produkt kann im FMEA-Kontext jedes Systemelement verstanden werden, welches aus mehr als einem anderen Systemelement entsteht. Dieselbe Analogie kann bei Prozessen mit Prozesselementen erstellt werden. Produkte werden in DFMEA und Prozesse in PFMEA thematisiert. Das bedeutet, es sind die folgenden sechs weiteren Klassen notwendig. *:Produkt*, *:Systemelement*, *:Prozess*, *:Prozesselement*, *:DFMEA* und *:PFMEA*. Dabei haben nur die Klassen *DFMEA* und *PFMEA* die direkte Beziehung *rdfs:subClassOf* zur Klasse *FMEA*.

²³⁷ Vgl. Lanquillon und Schacht, *Knowledge Science – Grundlagen*, 189.

Hierarchie, Attribute und Beziehungen aus FMEA-Schritt 1

Die verantwortliche Person für eine FMEA kann eine juristische oder auch eine natürliche Person sein. Da jede juristische Person und jede natürliche Person Personen sind, müssen juristische und natürliche Personen Instanzen einer Unterklasse von der Klasse Personen sein. Die Teammitglieder für FMEA sind Personen, die über die Beziehung *:istTeammitgliedFuer* und *:istVerantwortlichFuer* direkt mit der Klasse FMEA verbunden werden können. Dieselben Beziehungen können zudem als Unterbeziehungen für DFMEA und für PFMEA einzeln definiert werden.

Basis- und Familien-FMEA sind ebenfalls FMEA, somit hat die Klasse FMEA die Beziehung *:istBasisFMEAVon* zu sich selbst. Eine solche Beziehung wird als reflexive Beziehung bezeichnet.²³⁸

Die FMEA beeinflusst den Projektterminplan, der mit zahlreichen anderen Instanzen eines Projekts vernetzt ist. Um diese Beziehung zu modellieren wird die Klasse *:Projektterminplan* definiert und die Beziehung *:beeinflusstProjektterminplan* von FMEA zu Projektterminplan erstellt.

Da FMEA Produkte und Prozesse thematisieren, entfallen die Begriffe Thema und Analyseumfang, da diese Begriffe in diesem Kontext dasselbe ausdrücken.

Um die aus FMEA-Schritt eins generierten *owl:Class*, *owl:DataProperties* und *owl:ObjectProperties* darzustellen, werden in den nachfolgenden Grafiken (Abbildung 44 bis zur Abbildung 45) in diesem Unterkapitel die folgenden Symbole verwendet:

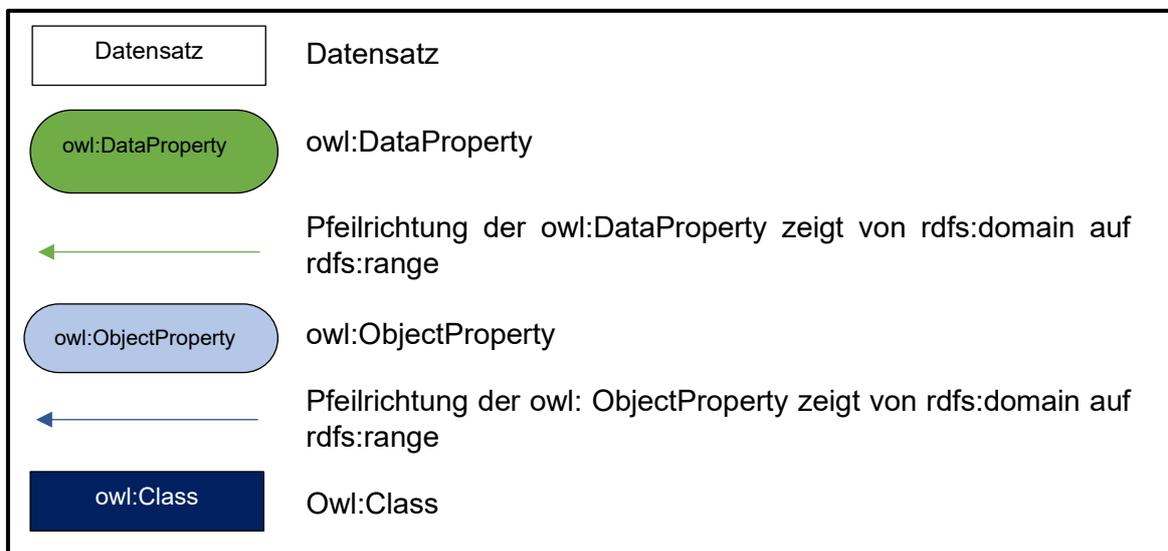


Abbildung 43: Legende Graphische Darstellung

Die *owl:DataProperties* der Klasse FMEA könnten mit der Legende aus Abbildung 43 wie folgt dargestellt werden:

²³⁸ Vgl. o. V., „OWL 2 Web Ontology Language Structural Specification and Functional-Style Syntax (Second Edition)“.

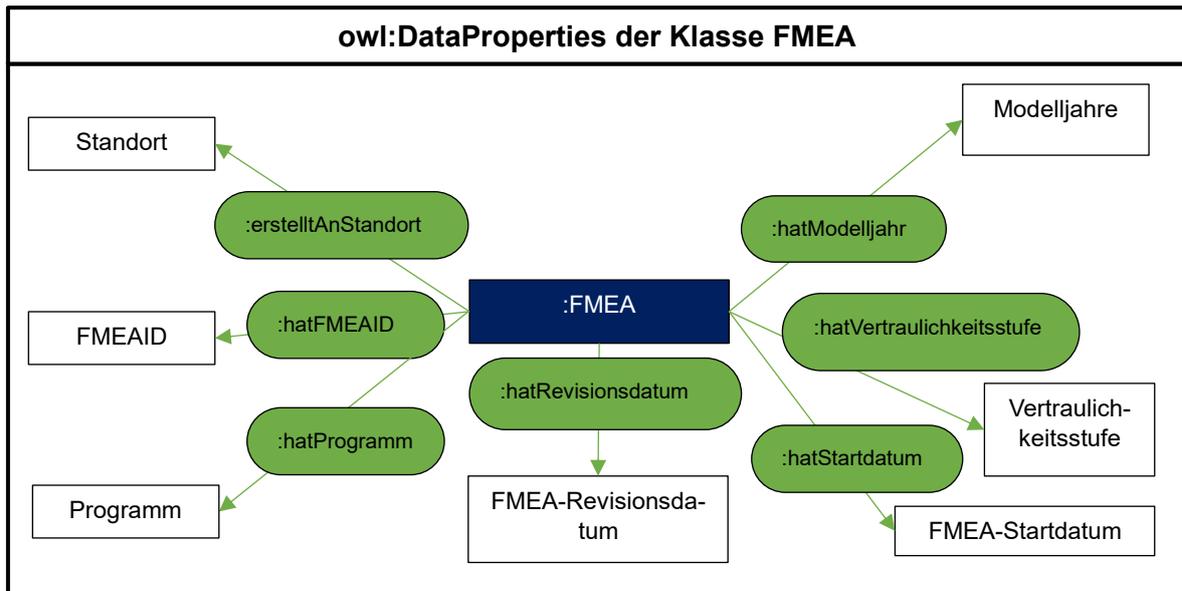


Abbildung 44: owl:DataProperties der Klasse FMEA

In Abbildung 44 wird vor jeden Namen ein Doppelpunkt `:` geschrieben. Das liegt an dem `@prefix :`, der für die URI der Ontologie definiert wurde. Zudem Beginnen die Namen aller Klassen mit Großbuchstaben und die Namen aller Beziehungen mit Kleinbuchstaben. Die Beziehungen zu den Klassen aus der FMEA lassen sich wie folgt darstellen:

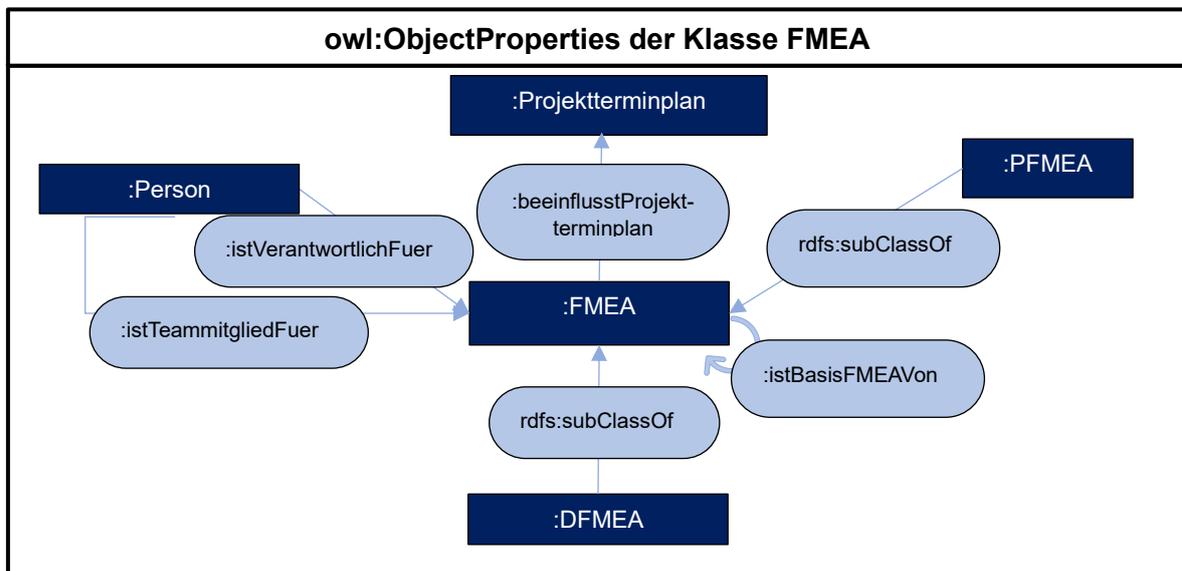


Abbildung 45: owl:ObjectProperties der Klasse FMEA aus erstem Schritt

In Abbildung 46 ist ein Fragment des daraus entstehenden Programmcodes im TURTLE-Format gezeigt, bei dem Kommentare mit dem Zeichen `#` am Anfang und mit dunkelgrüner Schriftfarbe gekennzeichnet sind. Wichtig im TURTLE-Format ist, dass die Reihenfolge, in der Entitäten definiert werden, die Funktionen nicht beeinträchtigen. Daher wurde für diese Arbeit der Code so erstellt, dass nach den Präfixen der Block mit den *owl:ObjectProperty*, danach der mit den *owl:DataProperty* und schließlich der mit den *owl:Class* definiert wurde.

```
@prefix : <http://www.semanticweb.org/alexanderverkhov/ontologies/2023/11/FMEA#> .
@prefix owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#> .
@prefix rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#> .
@prefix xml: <http://www.w3.org/XML/1998/namespace> .
@prefix xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#> .
@prefix rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#> .
@base <http://www.semanticweb.org/alexanderverkhov/ontologies/2023/11/FMEA#> .

#Hier erfolgt die Definition der owl:ObjectProperty, das hier gewählte Beispiel ist die Definition von :beeinflusstProjektterminplan

###http://www.semanticweb.org/alexanderverkhov/ontologies/2023/11/FMEA#beeinflusstProjektterminplan
:beeinflusstProjektterminplan rdf:type owl:ObjectProperty ;
    rdfs:domain :FMEA ;
    rdfs:range :Projektterminplan .

#Hier erfolgt die Definition der owl:DatatypeProperty

### http://www.semanticweb.org/alexanderverkhov/ontologies/2023/11/FMEA#erstelltAnStandort
:erstelltAnStandort rdf:type owl:DatatypeProperty ;
    rdfs:domain :FMEA ;
    rdfs:range xsd:string .

# Hier erfolgt die Definition der owl:Class

### http://www.semanticweb.org/alexanderverkhov/ontologies/2023/11/FMEA#FMEA
:FMEA rdf:type owl:Class .
### http://www.semanticweb.org/alexanderverkhov/ontologies/2023/11/FMEA#Projektterminplan
:Projektterminplan rdf:type owl:Class .
```

Abbildung 46: Grundlegender Aufbau TURTLE-Code

Die Unterklassen der Unterklassen mit ihren Beziehungen sind in Abbildung 45 und in Abbildung 46 nicht gezeigt, diese werden aber in den folgenden Unterkapiteln hergeleitet. Der TURTLE-Code wird in den nachfolgenden Unterkapiteln mit demselben Muster erstellt und im Text daher nicht weiter gezeigt. In den weiteren Unterkapiteln werden die *owl:DatatypeProperties* nicht mehr und die *owl:ObjectProperties* in den Abbildungen nur ohne Benennungen dargestellt. Diese Abbildungen werden mit dem Modul *OntoGraf* in der spezialisierten Ontologie-Modellierungssoftware *Protege* erstellt. Das aus den Erkenntnissen dieses Kapitels abgeleitete Modell wird in folgender Weise dargestellt:

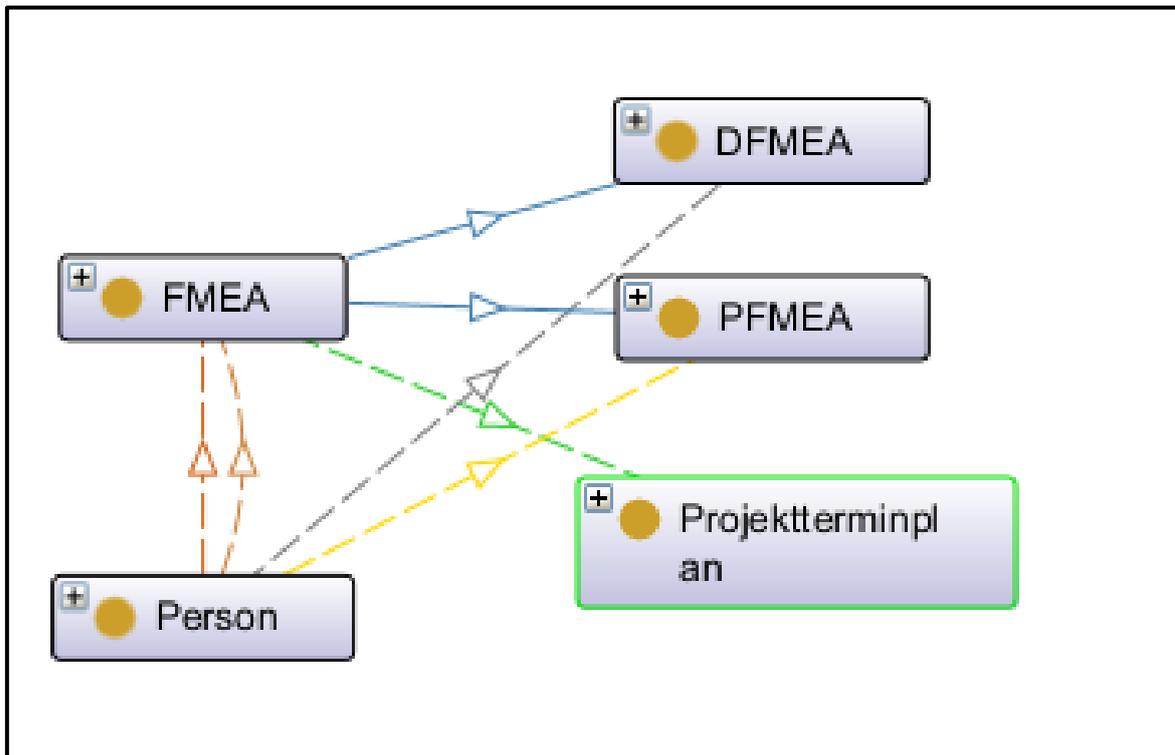


Abbildung 47: Klassen nach FMEA-Schritt 1

Hierarchie, Attribute und Beziehungen aus FMEA-Schritt 2

In FMEA-Schritt 2 können der Klasse `:Systemelement` die Beziehungen `:istUntersystemVon` und `:istObersystemVon` der Klasse selbst zugeordnet werden. `:istUntersystemVon` ist dabei die Inverse der Beziehung `:istObersystemVon`. Durch diese Begriffe kann die *Systemstruktur* wie mit den Begriffen *nächsthöhere strukturelle Ebene*, *nächstniedrigere strukturelle Ebene* und *strukturelles Fokuselement* modelliert werden.

Wichtig ist dafür außerdem die Beziehung `:thematisiertSystemelement` von der Klasse `:DFMEA` zu der Klasse `:Systemelement`. Dasselbe kann für Prozesselemente gemacht werden, die durch die Klasse PFMEA thematisiert werden. Dafür wird der Klasse `:Prozesselement` die Beziehung `:thematisiertProzesselement` mit der Klasse `:PFMEA` zugeordnet, wobei `:PFMEA` als *rdfs:domain* und `:Prozesselement` als *rdfs:range* fungiert. Für die Klasse `:Prozesselement` werden des Weiteren die reflexiven Beziehungen `:istOberprozessVon` und `:istUnterprozessVon` definiert, wobei `:istUnterprozessVon` eine Inverse von `:istOberprozessVon` ist.

Daraus entsteht folgendes Bild:

Hierarchie, Attribute und Beziehungen aus FMEA-Schritt 2

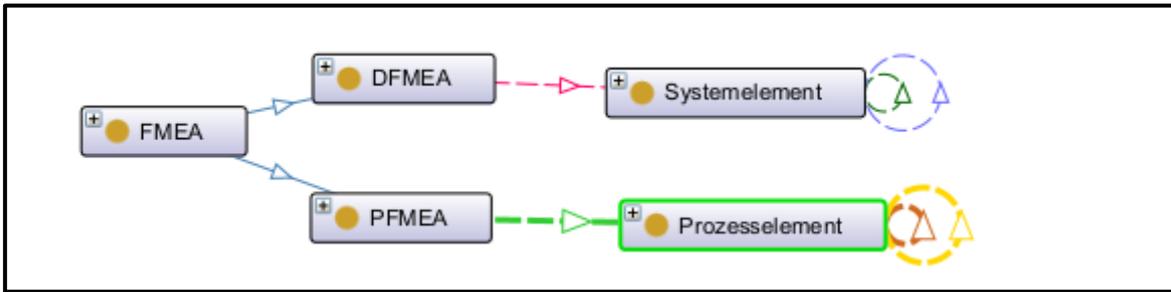


Abbildung 48: Klassen nach erster Bearbeitung FMEA-Schritt 2

Die Klassen `:Systemelement` und `:Prozesselement` werden zudem einer Klasse `:Element` zugeordnet, die die höchste Ebene der Elemente repräsentiert und über die Beziehung `:thematisiertElement` direkt mit der Klasse `:FMEA` verbunden. Dabei ist die Beziehung `:thematisiertElement` die übergeordnete Beziehung von `:thematisiertSystemelement` und `:thematisiertProzesselement`.

Außerdem wird für die Klasse `:Prozesselement` die Unterklasse `:Prozess` und für die Klasse `:Systemelement` die Unterklasse `:System` erstellt. Die Klasse `:Prozess` ist äquivalent zu der Menge aller Prozesselemente, die mindestens einmal als Oberprozess mit einem anderen Prozesselement verknüpft sind und ist damit eine definierte Unterklasse von `:Prozesselement`. Derselbe Sachverhalt kann aus `:System` und `:Systemelement` übertragen werden. Hierarchisch sind `:Prozess` und `:Systemelement` zwar auf einer höheren Ebene als `:Systemelement` und `:Prozesselement`. Da jedoch jeder Prozess ein Prozesselement und jedes System ein Systemelement ist, der mindestens einen Unterprozess bzw. ein Untersystem hat und somit nicht jedes Systemelement ein System bzw. nicht jedes Prozesselement ein Prozess ist, müssen `:Prozess` und `:System` Unterklassen von `:Prozesselement` und `:Systemelement` sein. Werden diese neuen Entitäten eingefügt, so entsteht die Grafik in Abbildung 49.

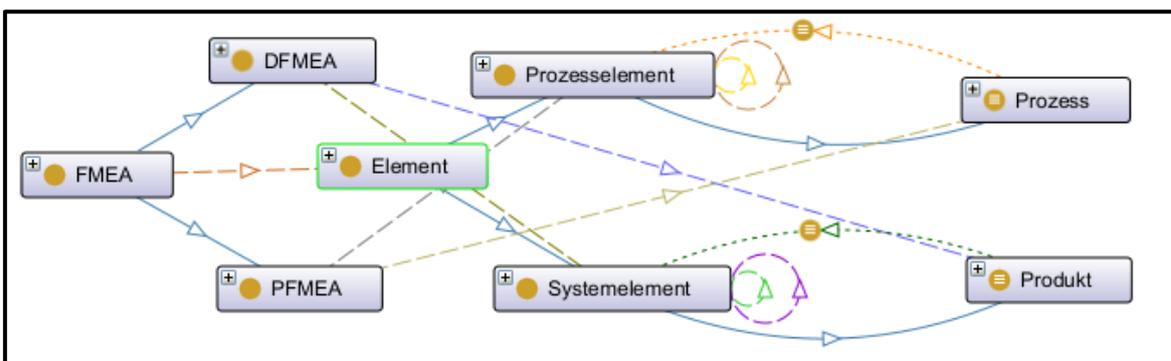


Abbildung 49: Finale Darstellung der Klassen in FMEA-Schritt 2

Wird die in diesem Schritt erstellte Logik auf das Beispiel-DFMEA-Fragment in Tabelle 5 angewendet, würde das folgendes bedeuten:

Die Beispiel-DFMEA ist eine DFMEA und somit eine FMEA. Sie thematisiert ein Systemelement (Aus Tabelle 5 z.B. *Turbolader-Baugruppe*), welches auch ein Element ist. Die *Turbolader-Baugruppe* kann aber auch als Produkt betrachtet werden, da sie aus mehreren Systemelementen (Aus Tabelle 5 z.B. *Turbolader 01* und *VTG-Verstellungseinheit*) besteht. Dabei ist die *Turbolader-Baugruppe* das direkte Obersystemelement von *Turbolader 01*, der wiederum ein Obersystemelement von *VTG-Verstellungseinheit* ist. Damit gilt auch, dass *VTG-Verstellungseinheit* ein Untersystem von *Turbolader 01* ist, der wiederum ein Untersystemelement von *Turbolader-Baugruppe* ist.

Hierarchie, Attribute und Beziehungen aus FMEA-Schritt 3

Den im zweiten Schritt definierten Elementen müssen nun Funktionen zugeordnet werden. Wie die Begriffe in Tabelle 22 darstellen, ist zudem eine Unterteilung der Funktionen in Funktionen für den Endnutzer, für die nächsthöhere Ebene, für das eigene Werk und das belieferte Werk notwendig. Die externen Einflüsse und Parameter einer Funktion werden durch die *owl:DataProperty :hatEinflussgroesse* und *:hatParameter* ausgedrückt. Damit können Einflüsse auf Funktionen und daraus folgende Fehler simuliert werden. Die Funktionen müssen für die Einordnung in die DFMEA- und PFMEA-Struktur weiter in Design- und Prozessfunktionen unterteilt werden, um den Datenfluss aus Design- und Prozess-FMEA voneinander abgrenzbar zu machen. Designfunktionen können Funktionen für die nächsthöhere Ebene oder den Endnutzer sein, während Prozessfunktionen das eigene Werk, das belieferte Werk oder Designfunktionen beim Endnutzer betreffen können. Dabei erzeugen Funktionen andere Funktionen, die Designfunktionen oder Prozessfunktionen sein können. Dadurch entsteht ein Funktionsnetz, welches Funktionen in Design- und Prozessfunktionen unterteilt und ein Fehlernetz von Designfunktionen und Prozessfunktionen bildet, die miteinander verbunden sein können. Die einzelnen Beziehungen werden im weiteren Textverlauf aufgrund von deren zunehmender Anzahl nicht mehr explizit benannt. Die Implementierung des dritten Schritts erzeugt die folgenden wesentlichen Verbindungen, die auch in Abbildung 50 dargestellt sind:

1. Ein Element hat eine Funktion, wobei ein Systemelement eine Designfunktion und ein Prozesselement eine Prozessfunktion hat
2. Eine Prozessfunktion kann eine Prozessfunktion für das eigene oder für das belieferte Werk erzeugen und selbst von einer Prozessfunktion oder einer Designfunktion erzeugt werden
3. Eine Designfunktion kann von einer Prozessfunktion und von einer Designfunktion erzeugt werden und kann Designfunktionen für den Endnutzer als auch für die nächsthöhere Strukturebene erzeugen

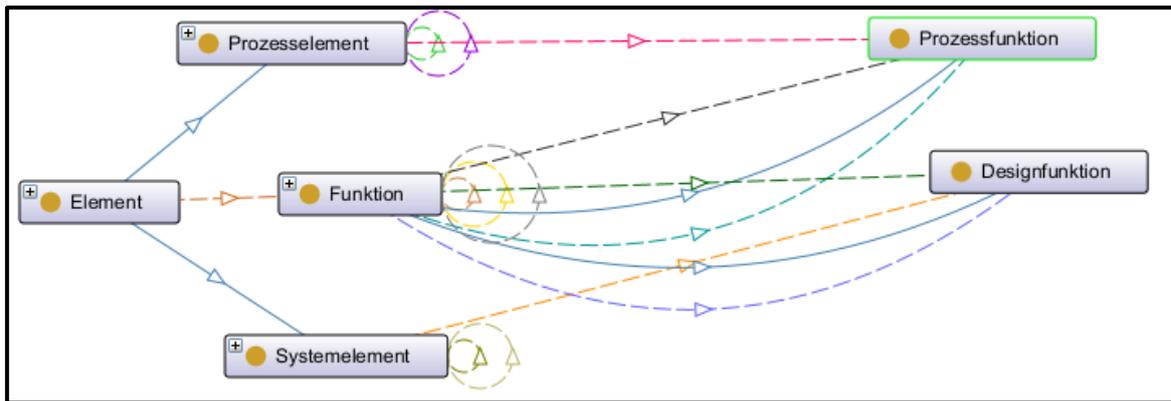


Abbildung 50: Graph mit betrachteten Klassen in FMEA-Schritt 3

Auf die Beispiel-PFMEA-Fragmente in der Tabelle 6 und der Tabelle 8 könnte diese Logik auf einen beispielhaften Sachverhalt wie folgt angewendet werden:

Das Prozesselement *PSR2: Montage* hat die Prozessfunktion *Material mit Werkzeugen nach Montageplan montieren*, die auch eine Funktion ist. Diese Funktion erzeugt (im übertragenen Sinne) die Prozessfunktion *Turbolader-Baugruppe an Abgaskrümmen montieren und für Motormontage bereitstellen* und wird von der Prozessfunktion *Drehmomentschlüssel verhindert das Weiterdrehen nach Erreichen des vordefinierten Drehmoments von 25Nm* erzeugt.

Hierarchie, Attribute und Beziehungen aus FMEA-Schritt 4

Die Begriffe aus Tabelle 23, die nicht explizit weiterverwendet werden, sind *Fehlfunktionen* und *Fehlernetz*. Das Fehlernetz wird aus Fehlerarten erstellt, die jeweils Fehlerfolgen und Fehlerursachen anderer Fehlerarten sind. Die Verbindung des Fehlernetzes zu der DFMEA oder PFMEA erfolgt über die Verbindung von Funktionen zu den Fehlerarten und drückt somit aus, dass es sich bei den Fehlerarten um Fehlfunktionen handelt. Die Fehlerfolgen eines Fehlers bzw. einer Fehlerart lassen sich in Fehlerfolgen für den Endnutzer, das belieferte Werk, das eigene Werk, den Endnutzer und die nächsthöhere Ebene gliedern. Eine Aufteilung der Fehlerarten in Design- und Prozessfehler erfolgt nicht, da eine solche Unterteilung bereits durch die Verbindung zu den Funktionen abfragbar ist. Die Sachverhalte, die für die Fehleranalyse in der FMEA modelliert werden müssen und in Abbildung 51 abgebildet sind, sind also die folgenden:

1. Eine Fehlerart kann eine Fehlerursache und eine Fehlerfolge für das eigene, das belieferte Werk, den Endnutzer und die nächsthöhere Ebene besitzen
2. Jede Fehlerart wird von einer Funktion hervorgerufen und bildet die Nichterfüllung dieser Funktion

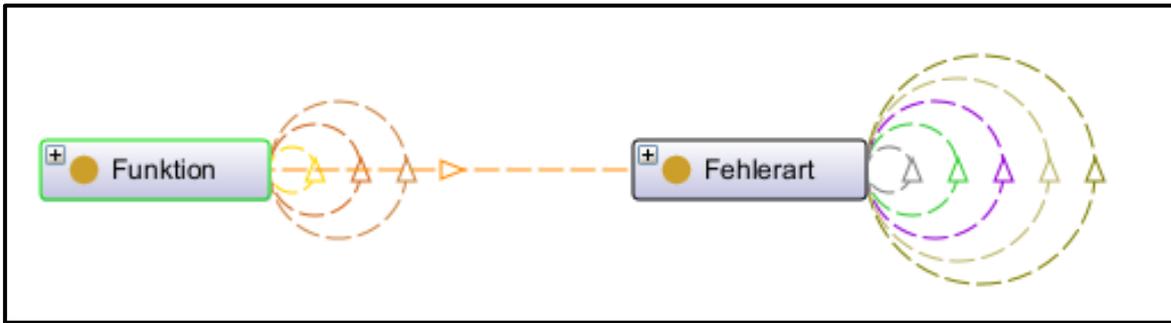


Abbildung 51: Modell mit betrachteten Klassen in FMEA-Schritt 4

Eine Anwendung dieser Logik auf die Beispiel-DFMEA-Fragmente in Tabelle 10 und Tabelle 7 erzeugt die folgende Aussage:

Die Funktion *Abgasleistung in Ladedruck bei kleiner Motordrehzahl umwandeln* wird durch die FA *Abgasleistung bei kleiner Motordrehzahl nicht umgewandelt* verhindert. Diese FA wird durch die FA *VTG-Leitschaufeln nicht verstellt* hervorgerufen und führt zum Auftreten der FA *Abgasleistung nicht umgewandelt*, aber langfristig auch zur FA *Nichteinhaltung der Abgasnorm* beim Endnutzer.

Hierarchie, Attribute und Beziehungen aus FMEA-Schritt 5

Alle Begriffe aus Tabelle 24 werden in der Ontologie verwendet. Es wird modelliert, dass die vorhandenen Entdeckungsmaßnahmen eine FA, aber auch für eine FU, die ebenfalls eine FA auf der nächstniedrigeren Ebene ist, adressieren können. Externe Inputs für die Maßnahmen können aus den in Tabelle 20 genannten Nachweisen über Erfahrung stammen und werden den Maßnahmen als *owl:DataProperty* zugeordnet. Selbes geschieht mit dem FMEA-Bewertungskatalog, da diese beiden Entitäten zunächst nur als Informationen für die FMEA implementiert werden.

Wichtig ist zudem, dass die Risikobewertung anhand der vorhandenen Maßnahmen und der Fehlfunktionen erfolgt. Das bedeutet, es müssen Kombinationen für Fehlerarten mit den dazugehörigen Maßnahmen erstellt werden, die die Risikobewertung beeinflussen. Die Bewertung von *E* für ein Risiko wird von einer Kombination der Entdeckungsmaßnahmen und der dazugehörigen FA beeinflusst. Da die Entdeckungsmaßnahmen jedoch für die FA und die FU oder nur für die FA oder nur für die FU definiert werden können, werden für die Modellierung dieses Sachverhalts jeweils zwei weitere Kombinationen benötigt. Eine Kombination muss die Kombination einer als FA mit der dazugehörigen Entdeckungsmaßnahme modellieren und eine weitere die Kombination der FU dieser FA und der Entdeckungsmaßnahme dafür abbilden können. Diese beiden Klassen münden dann in einer weiteren Klasse, die eine Kombination der beiden Kombinationen darstellt und die Risikobewertung direkt beeinflusst.

Hierarchie, Attribute und Beziehungen aus FMEA-Schritt 5

Die Vermeidungsmaßnahmen beziehen sich immer auf die FU einer FA und lassen sich daher mit nur einer Klasse als Kombination einer Vermeidungsmaßnahme mit einer FA darstellen. Diese bestimmen den Wert für *A* eines Risikos.

Der Wert für *B* wird nur von der FF, also einer FA auf höheren Ebenen beeinflusst. Daher muss dieser Wert entlang eines Fehlerpfads an alle untergeordneten Elemente weitergereicht werden, sofern er höher ist als das von einer Ebene erzeugte *B*. Eine höhere Bewertung für *B* in niedrigeren Ebenen ist logisch nicht möglich, da das bedeuten würde, dass die Fehlerfolge eines Unterprozesses gravierender ist als die Fehlerfolge eines Oberprozesses, der dieselben Fehlerfolgen besitzt.

Aus der Kombination von *A*, *B* und *E* wird das *AP* gebildet, welches in diesem Anwendungsfall ebenfalls als Klasse definiert wird. Die Bewertungen für *A*, *B*, *E* und *AP* werden als *owl:DataProperty* zu den Klassen hinzugefügt.

Die Maßnahmen sowie der Stand die hier bewertet werden, repräsentieren den Ist-Zustand vor der FMEA und erhalten in der Ontologie das Suffix *VorFMEA* in deren Namen. Das aus dem fünften Schritt der FMEA entstandene Modell ist in Abbildung 52 dargestellt.

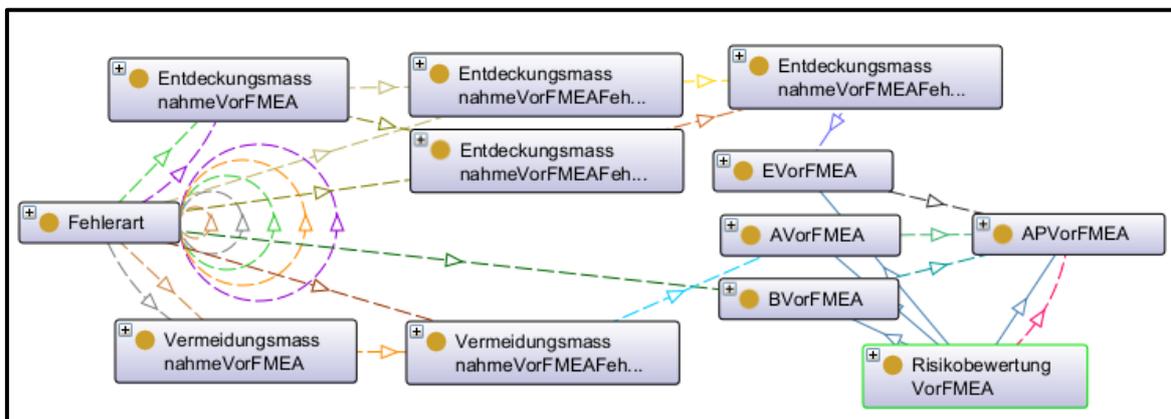


Abbildung 52: Modell mit betrachteten Klassen in FMEA-Schritt 5

Im Rahmen dieser Arbeit entstand eine alternative Implementierung dieses FMEA-Schrittes durch eine Beziehung zwischen einer Maßnahme und einer Fehlerart. Dabei wurde die Kombination als Äquivalent zu der Beziehung von der Maßnahme zur Fehlerart definiert. Daraus entsteht die folgende Struktur:

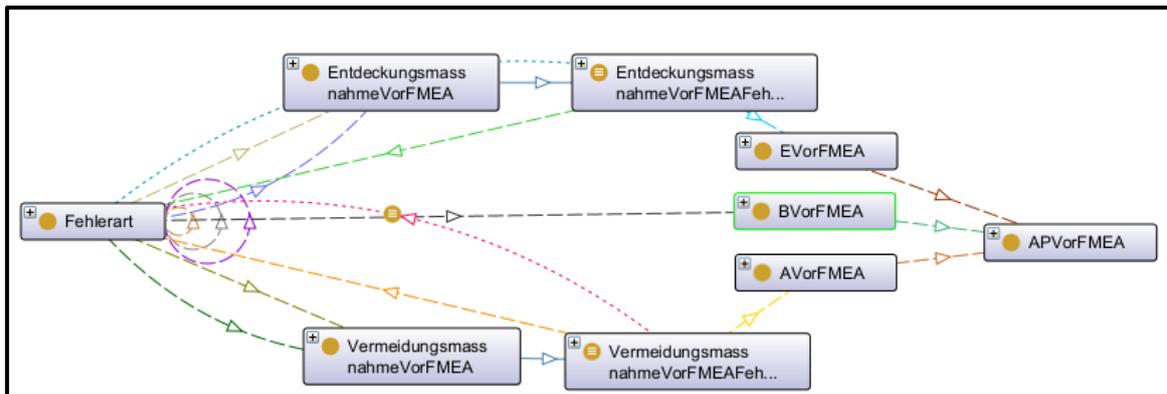


Abbildung 53: Verworfenes alternatives Modell der betrachteten Klassen in FMEA-Schritt 5

Dieses Modell wurde jedoch verworfen, da es sich als nicht praktikabel herausgestellt hat. Durch das Fehlen einer expliziten Beziehung zwischen den Maßnahmen und den Kombinationen ist es nicht möglich, von den Instanzen der Klasse *:EntdeckungsmassnahmeVorFMEA* auf Instanzen der Klasse *:EVorFMEA* zu schließen. Somit ist aus diesem Modell nicht abfragbar, durch welche Maßnahme und welche Fehlerart eine konkrete Instanz der Klasse *:EVorFMEA* entstanden ist. Dasselbe gilt für die Klassen *:VermeidungsmassnahmeVorFMEA*, *:VermeidungsmassnahmeVorFMEA Fehlerart Kombination* und *:AVorFMEA*.

Wird diese Logik auf die Beispiel-PFMEA-Fragmente in Tabelle 11 und Tabelle 13 angewendet, so entsteht die folgende Aussage:

Die FA *Weiterdrehen nach Erreichen des vordefinierten Drehmoments nicht verhindert* wurde vor der FMEA durch die Entdeckungsmaßnahme *Monatliche Betriebsmittelprüfung* entdeckt und durch die direkte Vermeidungsmaßnahme *Austausch defekter Betriebsmittel nach monatlicher Funktionsprüfung* vermieden. Das E vor FMEA bewertet die Entdeckungswahrscheinlichkeit der FA *Weiterdrehen nach Erreichen des vordefinierten Drehmoments nicht verhindert*, deren Entdeckung mit der Entdeckungsmaßnahme *Monatliche Betriebsmittelprüfung* durchgeführt wird. Dasselbe gilt für die Vermeidungsmaßnahmen, die die Auftretenswahrscheinlichkeit A vor FMEA erzeugen. Die Bedeutung der FA vor FMEA, die durch das B vor FMEA ausgedrückt wird, richtet sich lediglich nach der gravierendsten Fehlerfolge entlang des Fehlerpfads. Bei der FA *Weiterdrehen nach Erreichen des vordefinierten Drehmoments nicht verhindert* ist das die FA auf der Ebene des Endnutzers *Geforderte Antriebsleistung nicht bereitgestellt*.

Hierarchie, Attribute und Beziehungen aus FMEA-Schritt 6

Wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und in Tabelle 24 zu sehen ist, unterscheiden sich die Begriffe für die Maßnahmen und die Risikobewertung durch den Zeitpunkt, an dem diese umgesetzt werden. Das Modell für den sechsten Schritt der FMEA

Hierarchie, Attribute und Beziehungen aus FMEA-MSR

besitzt somit eine ähnliche Struktur wie das Modell für den fünften FMEA-Schritt. Die Maßnahmen und die sich daraus ergebende Risikobewertung sind der optimierte Zustand nach einer FMEA. Um den Zeitpunkt zu signalisieren, wird dem Namen der Maßnahmen und maßnahmenbezogenen Entitäten das Präfix *FMEA* hinzugefügt. Nach Abschluss der FMEA-Maßnahmen wird das Risiko neu bewertet. Um das darzustellen, erhalten die Risikobewertung und alle auf die Risikobewertung bezogenen Entitäten das Suffix *NachFMEA*. Der neue Zustand ist der optimierte Zustand des Zustands vor der FMEA. Aus den einzelnen Risikobewertungen vor und nach Durchführung der FMEA kann also ermittelt werden, wie effektiv ein bestimmtes Maßnahmenpaket ein Risiko reduziert hat.

Da die FMEA-Maßnahmen im Rahmen der FMEA beschlossen werden, werden die in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** erwähnten *Ressourcen für Maßnahmen* als *owl:DataProperty* zu den Maßnahmen definiert. *Ähnliche Risiken* und *umgesetzte Maßnahmen* werden in der Ontologie nicht explizit definiert, da diese aus der Graph-Datenbank, die durch diese Ontologie erstellt wird, abgefragt werden können.

Für alle FMEA-Maßnahmen werden zudem noch die Maßnahmenattribute wie Verantwortlichkeiten und Fertigstellungsdaten definiert. Diese werden als *owl:DataProperties* der Klasse zugeordnet, zu der die ergriffene Maßnahme gehört.

In Abbildung 54 ist der Teil der Ontologie dargestellt, der die im sechsten Schritt betrachteten Klassen abbildet.

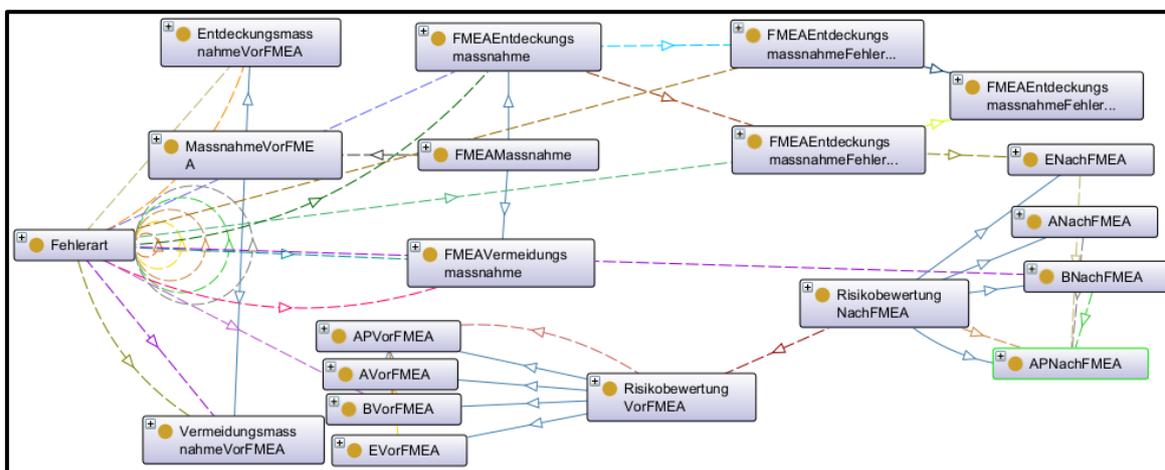


Abbildung 54: Modell mit betrachteten Klassen in FMEA-Schritt 6

Hierarchie, Attribute und Beziehungen aus FMEA-MSR

Noch nicht in der Ontologie enthalten ist der Begriff *Ergebnisse aus FMEA-MSR* aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Die FMEA-MSR benötigt also eine Verbindung der Ergebnisse zu denen in einer DFMEA.

Aus der Tabelle 26 und dem FMEA-MSR-Formblatt in Tabelle 16 geht hervor, dass eine FMEA-MSR dieselbe Grundstruktur wie eine DFMEA aufweist. Lediglich die Maßnahmen und die Bewertung unterscheiden sich. Daher wird die FMEA-MSR in der Ontologie als weitere FMEA-Art definiert. *B* wird in der FMEA-MSR ebenfalls von der FA beeinflusst, die jedoch die schwerwiegendste FF nach Systemreaktion darstellt und aus einer Kombination aus einer FA und einer vorhandenen Systemreaktion erzeugt wird. Das liegt daran, dass eine Systemreaktion eine FF blockiert, indem die Systemreaktion ausgeführt wird. *H* wird von der Kombination aus Fehlerart und dem *Grund für die Häufigkeit* erzeugt. Die vorhandene Monitoring-Maßnahme beeinflusst in Kombination mit der FA die Bewertung für *M*.

Felddaten und *Kundenreklamationen* aus der Tabelle 26 werden in dieser Ontologie als Instanzen der Klasse *:GrundFuerHaeufigkeit* definiert, da diese meistens im FMEA-Formblatt in der Spalte *Grund für Häufigkeit* vermerkt werden.²³⁹

Ergebnisse aus der DFMEA aus der Tabelle 26 werden durch die Struktur der Ontologie direkt in die FMEA-MSR eingearbeitet, da die FMEA-MSR-Maßnahmen und Bewertungen direkt mit der Fehlerart aus der DFMEA verbunden sind.

Die in Tabelle 26 genannten *FMEA-MSR-Bewertungskataloge* werden der Risikobewertung als *owl:DataProperty* zugeordnet, wie auch die FMEA-Bewertungskataloge in der DFMEA.

Daraus entsteht der in Abbildung 55 dargestellte Teil der Ontologie für die FMEA-MSR bis zum fünften Schritt.

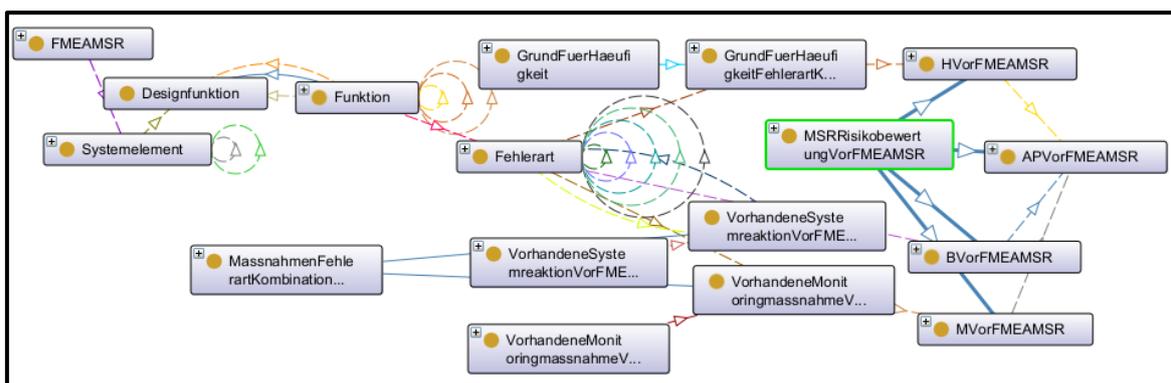


Abbildung 55: Modell des Grundkonzept der FMEA-MSR bis zum FMEA-MSR-Schritt 5

Wie in der DFMEA ähnelt auch in der FMEA-MSR der sechste FMEA-MSR-Schritt dem fünften. Der wesentliche Unterschied ist, dass FMEA-MSR-Vermeidungsmaßnahmen definiert werden können, die den Grund für die Häufigkeit adressieren.

²³⁹ Vgl. Kap. FMEA-MSR

4.1.5 Vergleich der obersten Konzeptebenen der FMEA-Ontologie nach VDA & AIAG FMEA-Handbuch mit der nach VDA 96

Der neu bewertete Stand mit der implementierten Systemreaktion blockiert die ursprüngliche Fehlerfolge entlang eines gesamten Fehlerpfads und ersetzt sie durch die schwerwiegendste Fehlerfolge nach der Systemreaktion. Das daraus erzeugte *B* muss im Anschluss daran auf den gesamten Fehlerpfad ausgebreitet werden.

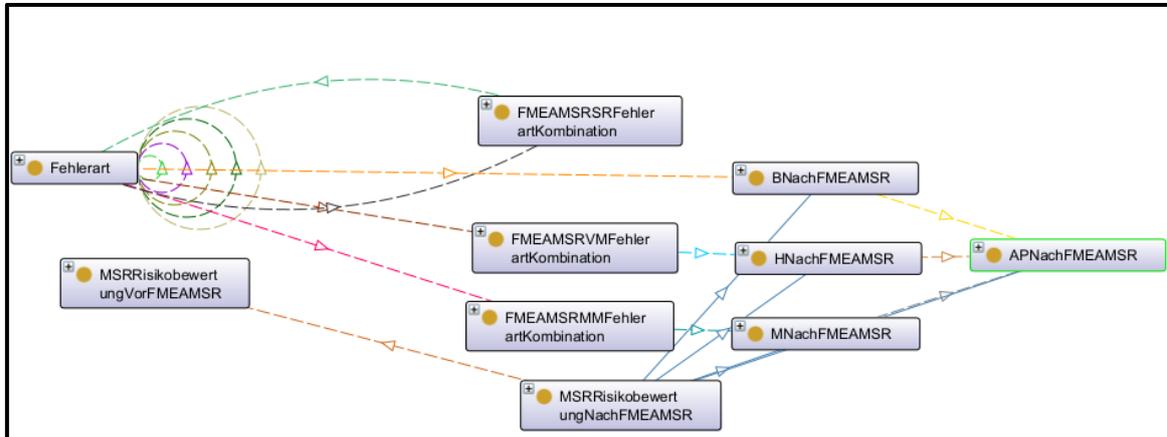


Abbildung 56: Modell mit betrachteten Klassen in FMEA-MSR-Schritt 6

Eine Anwendung dieser Logik auf die Beispiel-FMEA-MSR-Fragmente in Tabelle 17 und Tabelle 18 erzeugt die folgende Aussage hinsichtlich der Beeinflussung der DFMEA:

Durch die Systemreaktion *Reduktion der Motorleistung, sodass Verstellung nicht notwendig wird* wird die FA *Nichteinhaltung der Abgasnorm* verhindert. Dadurch kann nur noch die FA *Verlust der Antriebsleistung* hervorgerufen werden. Damit ist die Bedeutung aller FA, die diese FA verursachen, reduziert. Da im siebten Schritt der FMEA keine neuen logischen oder physikalischen Objekte erzeugt werden, wird dieser auch in der Ontologie nicht betrachtet.

4.1.5 Vergleich der obersten Konzeptebenen der FMEA-Ontologie nach VDA & AIAG FMEA-Handbuch mit der nach VDA 96

Für einen direkten Vergleich mit der FMEA-Ontologie nach VDA & AIAG FMEA-Handbuch und der nach VDA 96 werden zunächst die Objekte der obersten Konzeptebene der Ontologie nach VDA & AIAG dargestellt, die auch in der nach VDA 96 thematisiert werden:

4.1.6 Erweiterung der FMEA-Ontologie um weitere Informationen

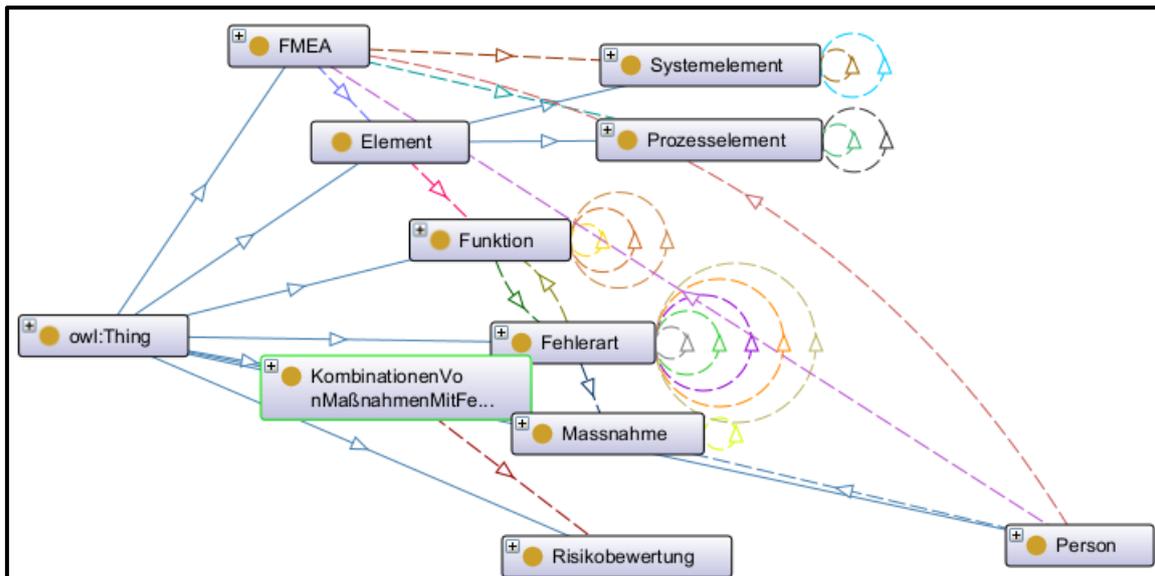


Abbildung 57: Oberste Konzeptebene der FMEA-Ontologie nach VDA & AIAG FMEA-Handbuch

Das *Fehlertupel* in Abbildung 35 stellt die Risikobewertung nach VDA & AIAG FMEA-Handbuch dar.²⁴⁰ Das *Systemelement* in der Abbildung 35 wäre in der Abbildung 57 das *Element*, da der Begriff *Systemelement* im VDA & AIAG-Handbuch für DFMEA und der Begriff *Prozesselement* für PFMEA verwendet wird.²⁴¹

Der gravierendste Unterschied ist jedoch, dass durch die Definition der FMEA-MSR auch die Fehlerarten von den Maßnahmen beeinflusst werden, indem sie z.B. durch Systemreaktionen blockiert werden. Zudem sind Kombinationen aus FA und Maßnahmen nötig, um die Beeinflussung der Risikobewertung darzustellen, da sich die Maßnahmen auf unterschiedliche Strukturebenen eines Fehlers auswirken.²⁴² In der FMEA-Ontologie nach VDA 96 wird angenommen, dass sich alle Entdeckungs- und Vermeidungsmaßnahmen auf die Fehlerursache beziehen.²⁴³

4.1.6 Erweiterung der FMEA-Ontologie um weitere Informationen

Die Ontologie für die FMEA kann außerhalb des einfachen FMEA-Vorgehens um weitere Informationen erweitert werden, von denen einige in diesem Unterkapitel dargestellt und erläutert werden. Um in der Ontologie aus Fehler im PLZ eingehen zu können, wird um die Klasse *:aufgetretenerFehler* erweitert. Die Instanzen dieser Klasse könnten mit Daten aus PLM-Software gefüllt werden und bilden daher eine Schnittstelle zwischen PLM-Software und FMEA. Die Daten eines Fehlers kann diese Klasse als *owl:DataProperty* aufnehmen. Diese Instanz erhält eine Verbindung zu der Klasse *:Fehlerart*, mit der das Fehlernetz um

²⁴⁰ Vgl. Dittmann, *OntoFMEA*, 237ff.

²⁴¹ Vgl. Dittmann, 229ff.

²⁴² Vgl. Kap. 2. Grundlagen zu FMEA

²⁴³ Vgl. Dittmann, *OntoFMEA*, 240.

4.2 Überführung der Ontologie in einen Wissensgraphen

diesen aufgetretenen Fehler erweitert werden kann. Diese Zuordnung kann bei bekanntem Kontext mithilfe von Inferenz durchgeführt werden. Die aufgetretenen Fehler könnten dabei anhand von zugehörigem Struktur- oder Prozesselement und der Verhinderung von Funktionen zu bestimmten Fehlerarten zugeordnet werden oder gar neue Fehlerarten erzeugen.

Bei Design- oder Prozessänderungen könnte die neue Bauteil- oder Prozessstruktur, mit der in der FMEA hinterlegten Struktur mittels Inferenz verglichen und dem FMEA-Team bei Veränderung angezeigt werden. Für diesen Zweck werden die Klassen *:NeuesProzesselement* und *:NeueSystemelement* erstellt. Spezifikationsveränderungen beeinflussen Produkte und Prozesse maßgeblich, da diese Kundenforderungen darstellen.²⁴⁴ In der FMEA-Ontologie kann dadurch auf alle Fehler- und Strukturpfade hinweisen, die von einer Spezifikationsveränderungen betroffen sein könnten. Dafür wird die Klasse *:Spezifikationsveränderung* erstellt.

4.2 Überführung der Ontologie in einen Wissensgraphen

Um eine Ontologie in einen Wissensgraphen zu überführen, werden den Klassen Instanzen, also Individuen zugeordnet. Individuen können grundsätzlich durch Entitäten mit dem *rdf:type owl:NamedIndividual* ausgedrückt werden.²⁴⁵ Die Informationen für die Individuen können aus der Beispiel-PFMEA, Beispiel-DFMEA und der Beispiel-FMEA-MSR gewonnen werden. Damit können die Validität und die Funktionsfähigkeit der FMEA-Ontologie bewiesen werden. In dieser Arbeit werden Einträge aus den FMEA-Formblättern im Kapitel 2.6 **Vorgehensweise bei FMEA** in Individuen für die einzelnen Klassen des Wissensgraphen übersetzt. Es sollen jedoch nicht nur die konkreten Werte der Beispiel-FMEA eingebunden werden können, sondern die Informationen aus dem FMEA-Formblatt auch für andere Werte aus dem FMEA-Formblatt übersetzt werden.

4.2.1 VBA-Programm für die Füllung des Wissensgraphen mit Individuen

Da die Formblätter in Microsoft Excel erstellt wurden, wird im Rahmen dieser Arbeit ein Code in Visual Basic for Applications (VBA) erstellt, um diese Datenmigration zu automatisieren. Dafür erstellt das VBA-Programm Tripel im TURTLE-Format und erstellt eine Datei für jedes FMEA-Formblatt. VBA wurde für diesen Zweck ausgewählt, da es sich um die von

²⁴⁴ Vgl. o. V., „Spezifikation | QUALITY.DE“, 28. Januar 2015, <https://www.quality.de/lexikon/spezifikation/>.

²⁴⁵ Vgl. o. V., „FullSemanticsNamedIndividuals - OWL“, 1. Juni 2008, <https://www.w3.org/2007/OWL/wiki/FullSemanticsNamedIndividuals>.

4.2.2 Beispiel des Hinzufügens von Individuen

Microsoft Office-Anwendungssuite bereitgestellten Programmiersprache handelt.²⁴⁶ Das Programm besitzt nicht den Zweck, ein finales Produkt darzustellen, sondern eine Möglichkeit aufzuzeigen, das FMEA-Formblatt mithilfe eines Programms in die FMEA-Ontologie zu überführen. Das VBA-Programm wird in ein übergeordnetes Steuerungsprogramm und drei Ausleseprogramme für die in der Ontologie definierten FMEA-Arten unterteilt.

Für die Erstellung von Individuen wird für jedes FMEA-Formblatt die logische Infrastruktur in Abbildung 58 verwendet.

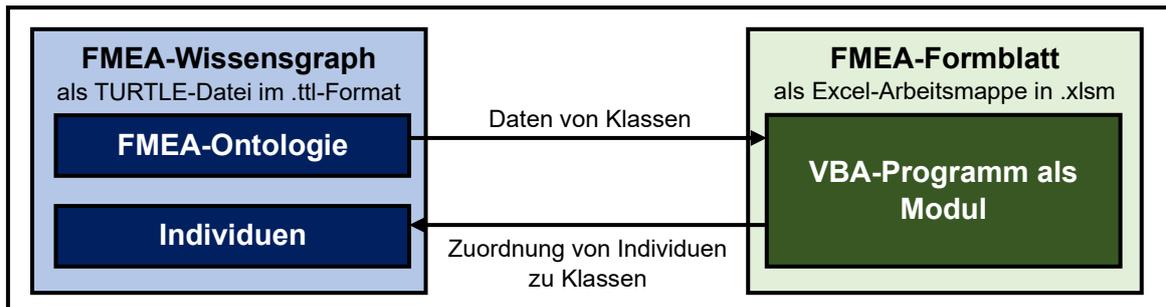


Abbildung 58: Logische Infrastruktur Datenmigration von FMEA-Formblatt in Wissensgraph

Das VBA-Programm benötigt die Daten zu den Klassen aus der FMEA-Ontologie, um diesen Individuen zuordnen zu können (Abbildung 58). Da die Individuen aus dem FMEA-Formblatt stammen, muss eine Logik implementiert werden, um den Klassen entsprechend den Einträgen im Formblatt die richtigen Individuen zuzuordnen. Da das VBA-Programm in dieser Arbeit nur ein Mittel ist, um die Individuen in die Ontologie einzutragen, wird die programmatische Ausgestaltung von diesem nur kurz mit den Individuen aus dem FMEA-Schritt 1 erklärt.

4.2.2 Beispiel des Hinzufügens von Individuen

Die in Abbildung 47 dargestellten Klassen, die aus dem ersten Schritt erstellt wurden, sind `:FMEA`, `:Person`, `:DFMEA` und `:PFMEA`. Jede Instanz ist eine Entität und muss daher eine URI bzw. IRI erhalten. Die URI bzw. IRI werden für den FMEA-Wissensgraphen direkt aus Werten der FMEA-Ontologien gebildet, müssen aber zuvor in das benötigte Format konvertiert werden. In Realität könnten die Werte im FMEA-Formblatt wie folgt eingetragen sein:

²⁴⁶ Vgl. o. V., „Office Visual Basic for Applications (VBA)-Referenz“, 7. April 2023, <https://learn.microsoft.com/de-de/office/vba/api/overview/>.

4.2.2 Beispiel des Hinzufügens von Individuen

PLANUNG UND VORBEREITUNG (SCHRITT 1)					
Unternehmen:	Beispiel GmbH	Betrachtetes Element:	Motor	FMEA-ID:	A102
Standort:	Ulm	FMEA-Startdatum:	2010-02-01	Verantwortung:	Heinz Konstrukteur
Kunde:	Beispielkunde	FMEA-Revisionsdatum:	2014-06-05	Vertraulichkeitsstufe:	keine
Modelljahr(e) bzw. Programm(e):	2013-2018	Interdisziplinäres Team:	Heinz Konstrukteur, Petra Projektleiterin, Vladimir Versuchsingenieur, Konstantin Kunde, Marta Methodikerin	FMEA-Art:	DFMEA

Abbildung 59: Beispielhaftes Datenformat des FMEA-Formblatts

Aus der Abbildung 59 geht hervor, dass bereits eine Instanz von `:Element` hinzugefügt werden kann, die Unterteilung in Design- und Prozesselement erfolgt jedoch erst durch die Steuerungslogik. Die wichtigste Steuerungslogik in diesem Schritt ist die Erkennung, ob im Feld FMEA-Art DFMEA oder PFMEA steht. Für diesen FMEA-Schritt wurde noch hinzugefügt, dass wenn die verantwortliche Person kein Teammitglied ist, trotzdem in die Liste der Teammitglieder eingetragen wird.

Die URI für die Klasse `:FMEA` wird bspw. aus der FMEA-ID und der FMEA-Art erstellt und je nach FMEA-Art automatisch der Klasse `:DFMEA` oder `:PFMEA` zugeordnet. Dadurch wird in der Steuerungslogik in VBA zudem ausgewählt, welches Ausleseprogramm gestartet werden soll.

Jedes Ausleseprogramm basiert auf einem ähnlichen Prinzip, welches sich mit dem Programmfragment in Abbildung 60 erläutern lässt. Im Programm ist fest definiert, welche Bedeutung welcher Zelle zugeschrieben werden kann. Bevor ein Wert aus einer Zelle ausgelesen wird, wird immer geprüft, ob die Zelle leer ist. Anschließend wird der Zelleninhalt, wenn dieser als Klasse dargestellt werden soll, zunächst in das in dieser Arbeit verwendete IRI-angelehnte Format gebracht und der String, der alle Individuen eines Wissensgraphen beinhaltet um diese erweitert. Am Ende des Programmdurchlaufs entsteht ein String, der für den Fall einer DFMEA `Wissensgraphtripel_DFMEA` heißt und alle Individuen einer konkreten FMEA beinhaltet. In Abbildung 60 sind Kommentare grün angezeigt und beginnen mit #. Diese Art von Kommentaren wird in VBA zwar nicht erkannt, wird hier aber für die bessere Übersicht verwendet.

4.3 Erstellung einer FMEA-Graph-Datenbank

```
#Wenn die Zellen für FMEA-ID und FMEA-Art nicht leer sind.
If Cells(2, 8) <> "" And Cells(5, 8) <> "" Then

    #Setze IndividualName auf einen kombinierten String der beiden Zellen.
    IndividualName = Cells(5, 8) & Cells(2, 8)

    #Setze IndividualIRI auf einen kombinierten String aus der IRI der Ontologie, des Zeichens „#“ und
    IndividualName
    IndividualIRI = OntIRI & "#" & IndividualName

    #Setze Wissensgraphtripel_DFMEA den String der Definition des Individuums für :FMEA
    Wissensgraphtripel_DFMEA = IndividualIRI & vbLf _
    & ":" & IndividualName & " rdf:type owl:NamedIndividual ," & vbLf _
    & "          : " & Cells(5, 8) & " ;"

    #Wenn die Zelle 2,5 nicht leer ist, füge dem Wissensgraphtripel_DFMEA die Beziehung :themati-
    siertSystemelementInDFMEA mit der IRI des Inhalts der Zellen 2,5 zu.
    If Cells(2, 5) <> "" Then
        Wissensgraphtripel_DFMEA = Wissensgraphtripel_DFMEA & vbLf _
        & ":thematisiertSystemelementInDFMEA : " _
        & EncodeUmlautsForIRI(Replace(Replace(Cells(2, 5), " ", "_"), ":", "_")) & " ;"
    End If

    ...
```

Abbildung 60: Programmfragment Ausleseprogramm

Wie in Abbildung 60 dargestellt, werden Beziehungen zu den Instanzen der Personen ebenfalls automatisch erstellt. Sobald z.B. eine Person in dem Feld für das interdisziplinäre Team gelistet ist, wird diese der Klasse *:Person* zugeordnet und erhält die Beziehung *:istTeammitgliedFuer* zu der Instanz von *:FMEA*. Zusätzlich wird eine Funktion eingebunden, die juristische von natürlichen Personen unterscheidet und diese automatisch in die Unterklassen von *:Person* einordnet. Dasselbe passiert mit dem Kunden und dem Unternehmen.

Entitäten, die als *owl:DataProperty* klassifiziert werden, benötigen keine Konvertierung in ein URI-angelegtes Format. Wenn es sich um Zahlenformate wie *xsd:integer* handelt, benötigen diese keine Zeichen, sondern können so in Tripel übernommen werden. Zelleninhalte mit dem Format *xsd:string* müssen hingegen mit Anführungszeichen gekennzeichnet werden, damit diese im Tripel erkannt werden.

Am Ende des Programms wird entweder eine *.ttl*-Datei mit der FMEA-Art und der FMEA-ID im Dateinamen erstellt oder die bestehende *.ttl*-Datei mit dem Dateinamen überschrieben.

4.3 Erstellung einer FMEA-Graph-Datenbank

Auf Basis des Wissensgraphen kann eine FMEA-Datenbank erstellt werden, die viele Wissensgraphen enthält und SPARQL-Abfragen dieser ermöglicht. Als Graph-Datenbank wird in dieser Arbeit GraphDB (ehemals bekannt als OWLIM) verwendet, da es sich dabei um eine kostenlose Lösung handelt, die SPARQL 1.1 unterstützt und die Migration von Daten

4.3 Erstellung einer FMEA-Graph-Datenbank

über ein Representational State Transfer – Application Programming Interface (REST-API) zulässt.²⁴⁷ Zudem speichert GraphDB RDF-Graphen unter Verwendung einer Mischung aus Tripel- und Quadrupeltabellen. In GraphDB werden Indizes für zwei Tripelpermutationen sowie eine Quadrupelpermutation erstellt. Prädikatenlisten können ebenfalls indiziert werden, um die Prädikate, die mit einem bestimmten Subjekt oder Objekt verbunden sind, schnell zu finden. Zudem wird eine Vielzahl anderer Funktionen, einschließlich räumlicher Funktionen, Volltextindizierung, Inferenz, semantischer Ähnlichkeit, Integration mit MongoDB unterstützt.²⁴⁸ Für diese Arbeit ist jedoch nur die Einbindung von Abfragen und Inferenz in SPARQL 1.1 und die REST API-Schnittstelle von Relevanz.

Die REST-API-Schnittstelle wird in dieser Arbeit mithilfe eines Python-Skripts verwendet, um den von dem VBA-Programm erstellten Wissensgraphen in GraphDB zu laden. Bei mehreren programmatisch erstellten Wissensgraphen funktioniert die Datenmigration, wie in Abbildung 61 dargestellt.

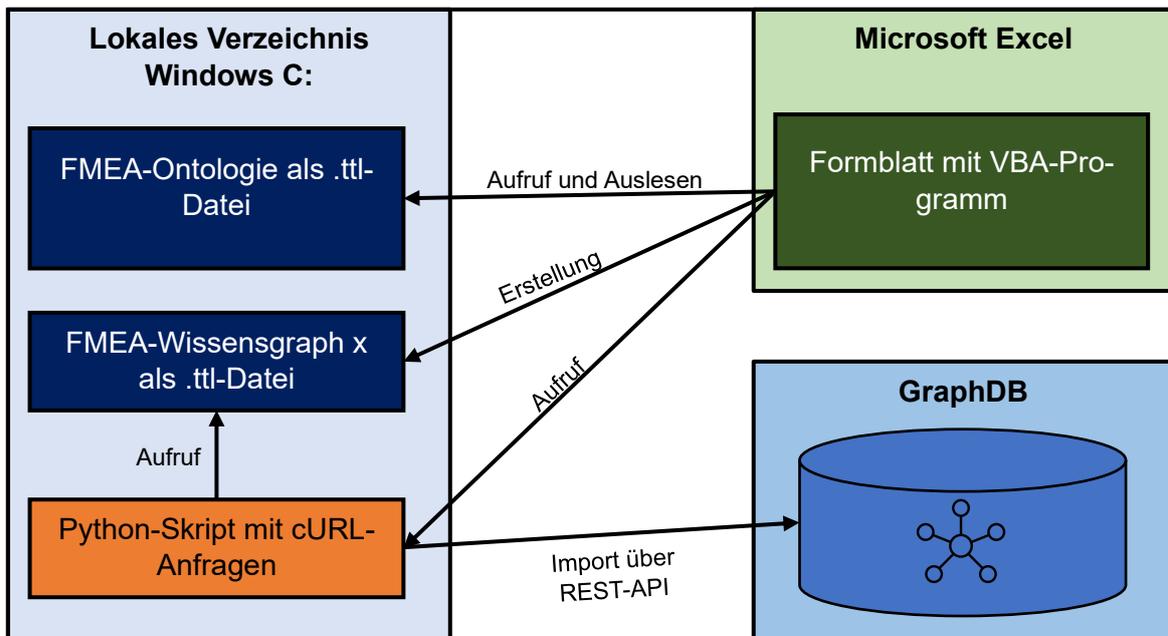


Abbildung 61: Datenmigration von FMEA-Formblatt in GraphDB

Aus der FMEA-Ontologie wird mithilfe des VBA-Programms der FMEA-Wissensgraph erzeugt, indem die TURTLE-Codes für die Instanzen aus den Zellwerten der Excel-Arbeitsmappe generiert werden. Das VBA-Programm wird für die Datenmigration um den Aufruf eines Python-Skripts erweitert, welches den vom VBA-Programm erzeugten Wissensgraphen durch cURL-Anfragen an die REST API in GraphDB importiert.

²⁴⁷ Vgl. Ali u. a., „A Survey of RDF Stores & SPARQL Engines for Querying Knowledge Graphs“, 31; Vgl. o. V., „Using the GraphDB REST API — GraphDB 10.6 documentation“, zugegriffen 14. April 2024, <https://graphdb.ontotext.com/documentation/10.6/using-the-graphdb-rest-api.html>.

²⁴⁸ Vgl. Ali u. a., „A Survey of RDF Stores & SPARQL Engines for Querying Knowledge Graphs“, 31.

4.4 Inferenzregeln

Die Inferenzregeln werden für diese Arbeit mithilfe von SPARQL Templates in GraphDB realisiert. Diese SPARQL-Templates werden ebenfalls vom Python-Skript aufgerufen.

Die erste Inferenzregel bezieht sich auf indirekte Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen für bestimmte Risiken. Dafür muss bedacht werden, dass eine Entdeckungsmaßnahme eine FA entdeckt, wenn es die FU entdeckt, was aber nicht umgekehrt gilt. Gleiches gilt für die Vermeidungsmaßnahmen: Wird eine FU vermieden, so wird auch eine FA vermieden, wird eine FA vermieden, so wird aber nicht zwangsläufig deren FU vermieden. Die Instanzen in der Beispiel-DFMEA in Tabelle 12 legen nahe, dass die Entdeckungsmaßnahme *Funktionsprüfung des Turboladers 01* die FA *Abgasleistung bei kleiner Motordrehzahl nicht umgewandelt* erkennen kann, aber nicht, dass die *VTG-Leitschaufeln nicht verstellt* wurden. Die Funktionsprüfung wird aber indirekt erkennen, dass die FF für die nächsthöhere Systemebene *Abgasleistung nicht umgewandelt* eingetreten ist und dass die weitere FF *Nichteinhaltung der Abgasnorm* eintreten wird. Somit können Entdeckungs- und Vermeidungsmaßnahmen FA nur im Fehlerpfad aufwärts beeinflussen, wobei diese Beeinflussung indirekt ist. Daher wird in dieser Arbeit zwischen direkten und indirekten Maßnahmen unterschieden. Um alle Elemente aufwärts entlang eines Fehlerpfads zu erhalten, müssen lediglich alle Instanzen der Klasse angezeigt werden, welche über die Beziehung *:hatFehlerfolge* miteinander verbunden sind. Diesen Instanzen wird dann die Beziehung *:hatIndirekteEntdeckungsmaßnahme* oder *:hatIndirekteVermeidungsmaßnahme* zugeordnet. Die SPARQL-Abfrage, die das für die Vermeidungsmaßnahmen vor FMEA umsetzt, ist in Abbildung 62 dargestellt.

```
PREFIX : <http://www.semanticweb.org/alexanderverkhov/ontologies/2023/11/FMEA#>
insert {
  ?Higher :hatIndirekteVMVorFMEA ?VM
}
WHERE {?Lower a :Fehlerart .
  ?Higher a :Fehlerart .
  ?VM a :VermeidungsmaßnahmeVorFMEA.
  ?Lower :hatDirekteVermeidungsmaßnahmeVorFMEA ?VM.
  ?Lower (:hatFehlerfolge)+ ?Higher .
}
```

Abbildung 62: SPARQL-Abfrage für Erstellung von indirekten Vermeidungsmaßnahmen

Mit demselben Prinzip kann die Bedeutung durch die Beziehung *:hatGravierendereBedeutung* entlang eines Fehlerpfads nach unten vererbt werden. Weitere Inferenzen für neue

4.5 Einige Anwendungsfälle für die FMEA-Graph-Datenbank

Fehler, die im PLZ auftreten, können durch die Beziehung *:verhindertFunktion* zu Funktionen und somit zu Strukturebenen in der FMEA zugeordnet werden. Dafür muss jedoch bekannt sein, welche Funktion oder Funktionen ein Fehler konkret unterdrückt. Bei neuen Funktionen müssen Unterfunktionen und Oberfunktionen und Struktur- oder Prozesselemente bekannt sein, damit die Funktion eindeutig zugeordnet werden kann. Dasselbe gilt für neue System- oder Prozesselemente, die in die FMEA-Struktur eingebunden werden können, sobald deren Einfluss auf die Funktionen im Vergleich zum alten Element in die FMEA klar ist. Für diese Arbeit wird jedoch angenommen, dass PLM-Software über Analyserwerkzeuge verfügt, die diese Beziehungen erstellen können.

Für die FMEA-MSR ist Inferenz wichtig, um darzustellen, dass FF von Systemreaktionen blockiert und durch die schwerwiegendsten FF nach den Systemreaktionen ersetzt werden. Dabei erhalten alle Elemente, die entlang eines Fehlerpfads eine durch Systemreaktion ersetzte FF besitzen eine neue FF. Im Anschluss daran muss erneut geprüft werden, welche FF in diesem Fehlerpfad die gravierendste ist und den im Fehlerpfad untergeordneten Elementen zugeordnet werden.

4.5 Einige Anwendungsfälle für die FMEA-Graph-Datenbank

Der FMEA-Wissensgraph stellt eine Basis für die Automatisierung von FMEA-Erstellungsaufgaben durch die Integration von Daten aus multiplen Datenquellen dar. So könnten beispielsweise Strukturebenen und Funktionen direkt aus Digitalen Zwillingen (DTs) generiert werden, ohne dass diese Daten manuell in eine FMEA eingetragen werden müssten. Kritische Pfade, die von kritischen Bauteilen oder Designmerkmalen verursacht werden, könnten damit direkt an DTs weitergegeben werden, sodass die Bauteilstruktur und die Funktionen in den DTs und in der FMEA konsistent bleiben.

Durch die Möglichkeit der Inferenz kann die Graph-Datenbank genutzt werden, um Benutzerführung und Konsistenzprüfung zu ermöglichen. Manuell ist es sehr aufwändig, aus einem Fehlerpfad mit vielen Verknüpfungen die gravierendste Fehlerfolge zu ermitteln, in eine FMEA einzutragen oder zu aktualisieren. Dies bietet insbesondere dann eine enorme Herausforderung, wenn einige dieser Fehlerfolgen durch Systemreaktionen blockiert werden oder mehrere unterschiedliche Teams eine FMEA bearbeiten. Mit der FMEA-Graph-Datenbank können diese Informationen schnell und zuverlässig abgefragt, überprüft und weiterverwendet werden, um Daten in Fehlerpfaden, wie z.B. die gravierendsten Fehlerfolgen, zu ermitteln. Damit könnte z.B. die Frage beantwortet werden, welcher Fehler zu dem gravierendsten Risiko führt und deshalb zuerst bearbeitet werden sollte.

4.5 Einige Anwendungsfälle für die FMEA-Graph-Datenbank

Aus Parameterdiagrammen der FMEA können zudem Einflüsse auf unterschiedliche Funktionen, die Fehler verursachen können, extrahiert und für Risikoanalysen oder Simulationen verwendet werden. Damit könnte zum Beispiel die Frage beantwortet werden, welche Einflüsse auf eine Funktion oder ein Designmerkmal zur Nichterfüllung welcher Spezifikationen führen können. Dafür wird zusätzlich zu diesem Konzept eine Einbindung von Parameterdiagrammen und Spezifikationen benötigt, welche die Inferenz von Abhängigkeiten oder Wechselwirkungen erlaubt.

In Kombination mit PLM-Software können mithilfe der FMEA-Graph-Datenbank die Kosten, die Zulieferer und die Kunden von kritischen Bauteilen abgefragt und analysiert werden. Das ermöglicht unter anderem eine Unterstützung bei Investitionsentscheidungen, indem die Auswahl alternativer Komponenten, Fertigungsanlagen und -prozesse quantitativ messbar gemacht wird. Eine Fragestellung dazu wäre, was eine Risikominimierung in einem Produkt oder Prozess kostet. Sind außerdem die Kosten und Eintrittswahrscheinlichkeiten für Fehlerfolgen bekannt, so können sogar Erwartungswerte bestimmter Produkte oder Prozesse im Fehlerfall untersucht werden. Damit könnte z.B. die Frage beantwortet werden, welche möglichen finanziellen Verluste durch ein defektes Bauteil in einem System verursacht werden können und welche Maßnahmen somit die rentabelsten sind.

Ein weiterer Anwendungsfall der FMEA-Graph-Datenbank ist, dass in Abhängigkeit von Daten aus dem PLM neue Verknüpfungen und Beziehungen implementiert werden können. So könnten beispielsweise Änderungen in der Lieferkette oder neue regulatorische Anforderungen automatisch in den FMEA-Prozess integriert werden. Auch könnten historische Daten aus dem PLM genutzt werden, um Trends und Muster zu identifizieren, die auf potenzielle zukünftige Fehler hinweisen. Durch die Verknüpfung mit Echtzeitdaten aus dem PLM können zudem kontinuierliche Verbesserungen und Anpassungen in der FMEA durchgeführt werden, was zu einer höheren Effizienz und Genauigkeit im Fehlererkennungsprozess führt.

Im Allgemeinen lassen sich zahlreiche Anwendungsfälle für die FMEA-Graph-Datenbank im industriellen Umfeld definieren. Dabei ist jedoch wichtig zu beachten, dass die Graph-Datenbank kein fertiges Werkzeug ist, sondern nur die Basis dafür bildet. Um die in diesem Kapitel definierten Anwendungsfälle umzusetzen, muss ein Front-End erstellt und die Graph-Datenbank für den konkreten Anwendungsfall optimiert werden.

5. Exception Handling mithilfe von FMEA

Als Exception Handling kann der Prozess des Reagierens auf unerwünschte oder unerwartete Ereignisse, wenn ein Programm ausgeführt wird, definiert werden.²⁴⁹ Da FMEA-MSR Systemreaktionen beinhalten, wäre es denkbar, diese für Exception Handling einzusetzen. Ein Teil von Industrie 4.0-Systemen ist im Allgemeinen die Smart Factory, die durch den Einsatz von autonomen Systemen und ganzheitlich digitalisierten Produkt- und Fabrikmodellen (Digitale Fabrik) eine weitgehend autonome Produktion ermöglicht.²⁵⁰ Ein Bestandteil der Smart Factory sind somit Produktionsprogramme, die in PFMEA thematisiert werden. Für Exception Handling im Kontext der Smart Factory wird hier in der Arbeit eine neue Ausgestaltungsform der FMEA-MSR, die PFMEA-MSR erstellt. Auf den konkreten Anwendungsfall mit dem OA bezogen, könnte ein Exception Handling mit den Informationen aus der PFMEA-MSR so aufgebaut sein:

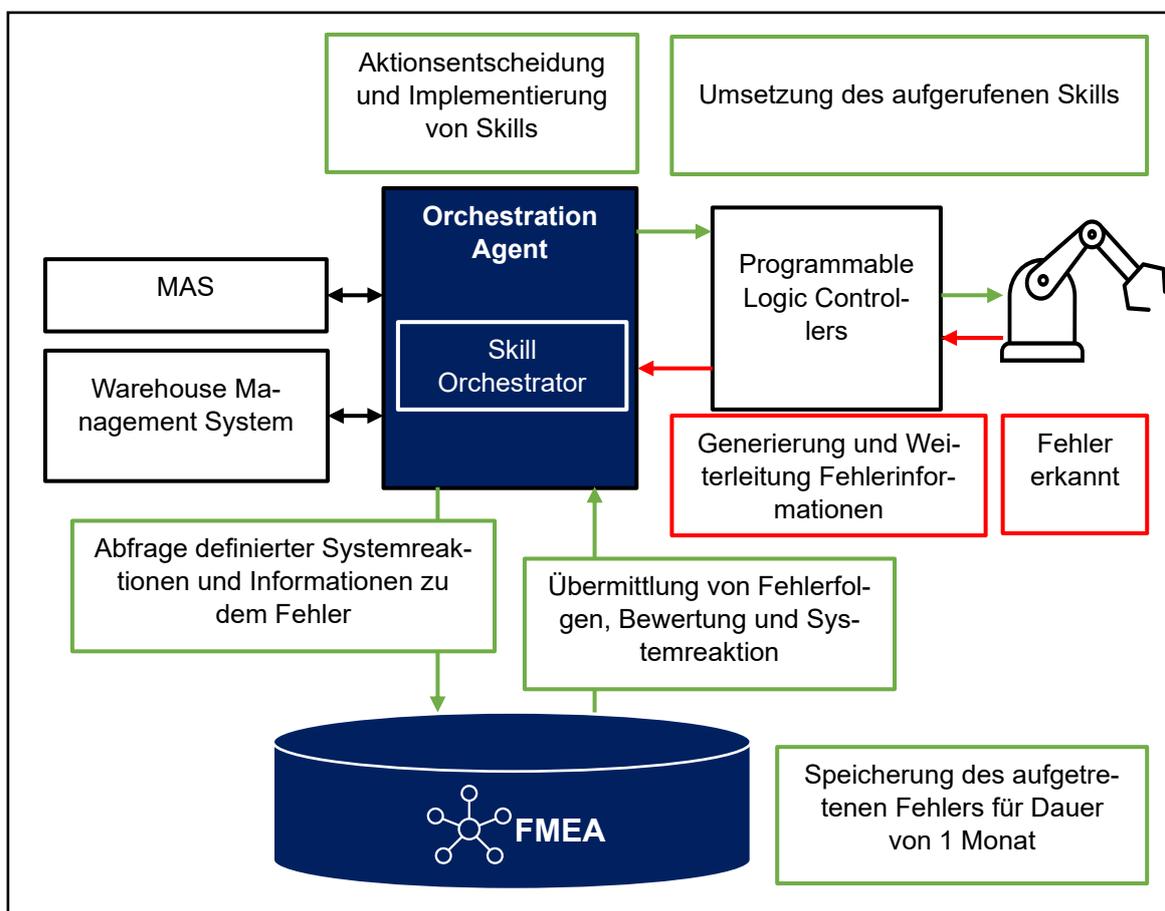


Abbildung 63: Verortung der FMEA-Graph-Datenbank im Exception Handling

²⁴⁹ Vgl. Alexander S. Gillis, „What Is Exception Handling? - SearchSoftwareQuality“, Software Quality, zugegriffen 20. April 2024, <https://www.techtarget.com/searchsoftwarequality/definition/error-handling>.

²⁵⁰ Vgl. Heiner Lasi u. a., „Industrie 4.0“, WIRTSCHAFTSINFORMATIK 56, Nr. 4 (August 2014): 262, <https://doi.org/10.1007/s11576-014-0424-4>.

5. Exception Handling mithilfe von FMEA

In Abbildung 63 wird der Pfad der Fehlererkennung und rot und der Pfad der Fehlerbehebung in grün dargestellt. Der Ablauf der Fehlerbehandlung nach Abbildung 63 wäre der folgende:

1. Ein Fehler im Produktionsprozess wird auf Feldebene erkannt und an die PLCs weitergegeben
2. Die PLCs generieren die Fehlerinformationen und leiten diese an den OA weiter
3. Der OA fragt die FMEA-Datenbank ab, ob für einen solchen Fehler eine Systemreaktion definiert wurde und ob es Informationen wie Risikobewertung oder Fehlerfolgen zu diesem Fehler gibt
4. Die Datenbank übermittelt auf diese Anfrage dazugehörige Systemreaktionen und Informationen zu dem Fehler und speichert Informationen und den Kontext zum aufgetretenen Fehler für die Dauer von unter einem Monat, da davon ausgegangen wird, dass historische Fehlerdaten anderweitig vom OA gespeichert werden
5. Ist eine Systemreaktion vorhanden, entscheidet der OA, welche Aktionen durchgeführt werden und ruft die benötigten Skills für die Fehlerbehandlung auf, die als Anweisungen für die PLCs in diese implementiert werden
6. Die PLCs setzen die implementierten Skills um und der Produktionsprozess kann weiterlaufen

Dieser Ansatz für das Exception Handling wird durch die Erstellung einer Beispiel-PFMEA-MSR und durch eine mögliche Übersetzung dieser in ein SPS-Programm von PLCs in diesem Kapitel überprüft. Für die PLCs wird in dieser Arbeit angenommen, dass sie eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) besitzen und den folgenden Programmaufbau haben:

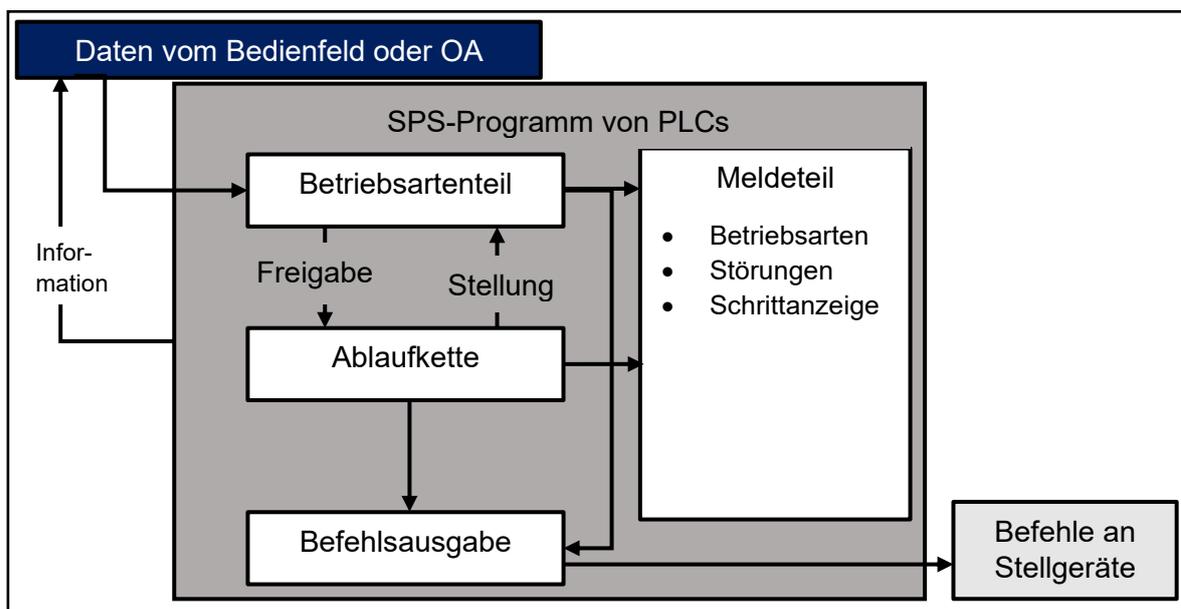


Abbildung 64: SPS-Programm von PLCs mit Betriebsartenteil

5.1 Definition der PFMEA-MSR

Die Funktionsbausteine (FB) des SPS-Programms einer PLC sind in Abbildung 64 als weiße Felder im dunkelgrauen Kasten, der das SPS-Programm darstellt, definiert. Die Daten aus dem Bedienfeld oder vom OA werden an den *Betriebsarten-FB* des SPS-Programms von PLCs übermittelt. Der *Betriebsarten-FB* gibt je nach Betriebsart die *Ablaufkette* für die jeweilige Betriebsart frei und erhält die Informationen über die Stellung vom *FB Ablaufkette*. Dieser FB ruft den *FB Befehlsausgabe* auf, der wiederum *Befehle an Stellgeräte* übermitteln. Da sich die Betriebsarten auf der höchsten Ebene im SPS-Programm der PLCs befinden, werden die Systemreaktionen aus der PFMEA-MSR zur Prüfung der Umsetzbarkeit in Betriebsarten übersetzt und in einem Betriebsartenentwurf dargestellt.

5.1 Definition der PFMEA-MSR

Wie die FMEA-MSR eine Erweiterung der DFMEA darstellt, wird die PFMEA-MSR als eine Erweiterung der PFMEA für automatisierte und geregelte Produktionssysteme definiert. Im folgenden Text wird die FMEA-MSR als DFMEA-MSR weiterverwendet, sodass FMEA-MSR als Oberbegriff von DFMEA- und PFMEA-MSR gesehen werden kann. Als Formblatt für die PFMEA-MSR wird das Formblatt einer PFMEA und die Erweiterung der DFMEA-MSR verwendet. Selbes gilt für die Bewertungskataloge bis auf die Bedeutung *B* in der PFMEA-MSR. In der DFMEA-MSR ist die Bewertung für *B* dieselbe, wie die Bewertung der *B* für den Endnutzer in der DMFEA.²⁵¹ Während *B* der DFMEA-MSR auf die Auswirkungen beim Endnutzer ausgerichtet ist, benötigt die PFMEA-MSR einen Bewertungskatalog mit Ausrichtung auf die Auswirkungen auf das eigene Werk. Somit wird der Bewertungskatalog der PFMEA für *B* mit den Auswirkungen auf das eigene Werk verwendet.

5.2 Erstellung einer Beispiel-PFMEA-MSR

Als beispielhaft betrachtetes Objekt für die Beispiel-PFMEA wird ein Prozess definiert, der ein Lager, zwei Stanzmaschinen mit Transportband und einen Vakuum-Sauggreifer der Fischertechnik GmbH benötigt. Die Objekte für diesen Prozess sind in der Abbildung 65 dargestellt.

²⁵¹ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 183ff.

5.2 Erstellung einer Beispiel-PFMEA-MSR

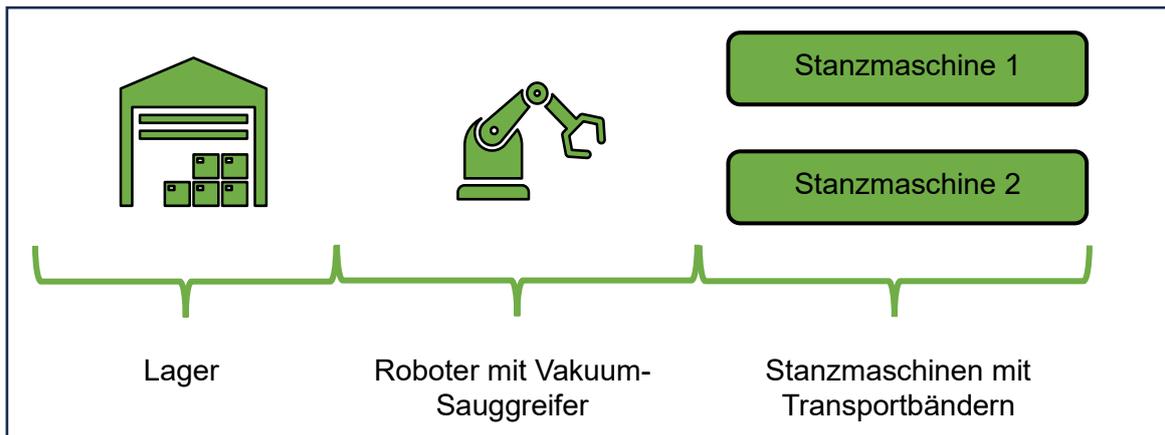


Abbildung 65: Objekte in Beispiel-PFMEA

Der Prozess, der mit den Objekten in Abbildung 65 realisiert wird ist ein Stanzprozess mit dem Abtransport in das *Lager* durch den *Roboter mit Vakuum-Sauggreifer*. Dieser kann ein Werkstück von der *Stanzmaschine 1* zur *Stanzmaschine 2* oder auch direkt ins *Lager* bringen. Es wird angenommen, dass *Stanzmaschine 1* und *Stanzmaschine 2* dieselbe Funktion haben und dass Fertigungsaufträge parallel auf beiden Maschinen bearbeitet werden. Der störungsfreie, reguläre Fertigungsprozess kann durch die folgenden Schritte beschrieben werden:

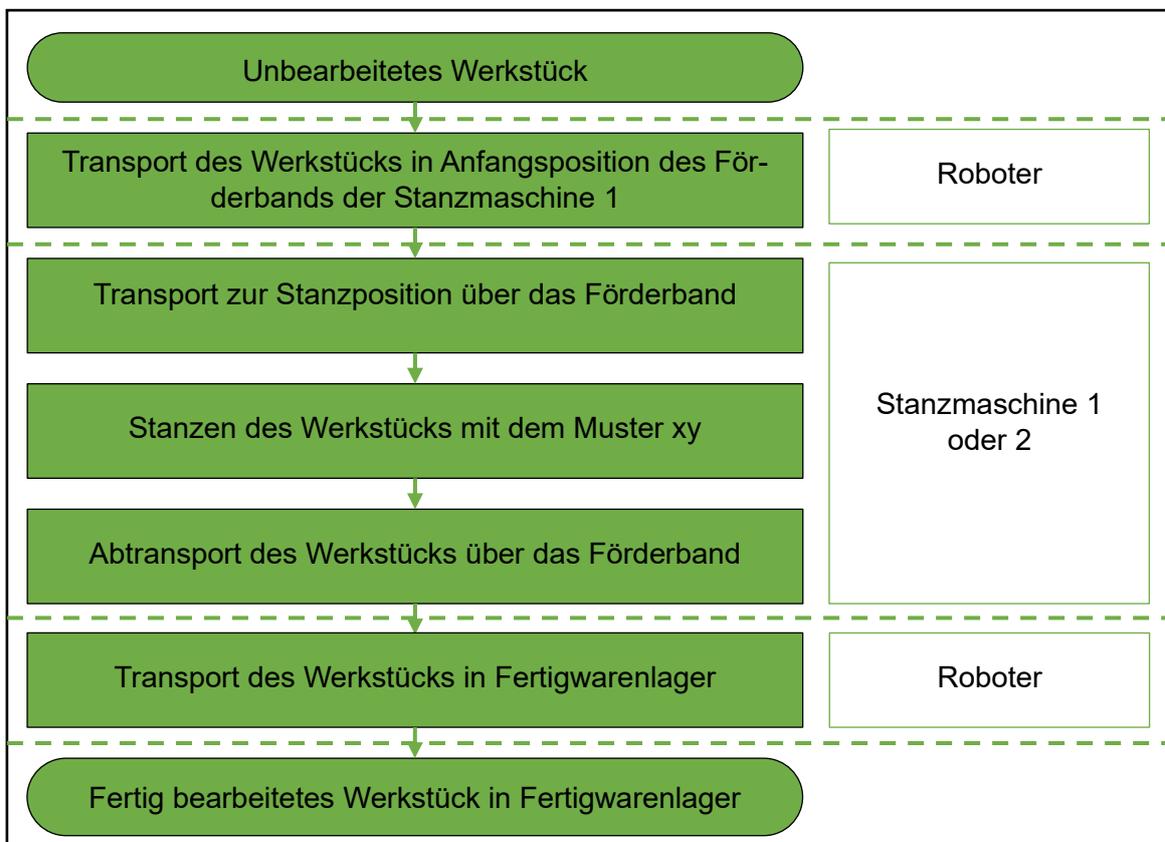


Abbildung 66: Flussdiagramm Prozess Beispiel-PFMEA-MSR

5.2 Erstellung einer Beispiel-PFMEA-MSR

Auf der linken Seite der Abbildung 66 ist ein Flussdiagramm des Fertigungsprozesses für die Beispiel-PFMEA-MSR zu sehen. Auf der rechten Seite befinden sich die Maschinen, mit denen der bzw. die jeweiligen Fertigungsschritte ausgeführt werden.

Bevor Risiken in einer PFMEA-MSR bearbeitet werden können, muss zunächst eine PFMEA dieser Risiken erfolgt sein. In dieser Arbeit wird nur eine PFMEA-MSR für die *Stanzmaschine 1* erstellt. Für die Beispiel-PFMEA-MSR werden drei mögliche Fehlerszenarien erstellt:

1. Das Werkstück erreicht zwar die Anfangsposition, aber nicht die Stanzposition auf der *Stanzmaschine 1*, da der Antriebsmotor des Förderbands ausgefallen ist.
2. Das Stanzen des Werkstücks schlägt auf *Stanzmaschine 1* fehl, da das Einprägen nicht funktioniert.
3. Das Stanzen des Werkstücks schlägt auf *Stanzmaschine 1* fehl, da das Material die Stanzung aufgrund von Nichterfüllung einer fiktiven Materialspezifikation nicht zulässt.

Diese drei Szenarien können entsprechend dem FMEA-Vorgehen bis zum vierten Schritt abgearbeitet werden.²⁵² Die Dokumentation dieser im FMEA-Formblatt für die PFMEA-MSR ist in der Tabelle 27 dargestellt. Auf die Funktionen der Prozessursachenelemente wird hier im Text nicht weiter eingegangen, da diese für die Erläuterung der PFMEA-MSR als Methode nicht zielführend sind.

²⁵² Vgl. Kapitel 2. Grundlagen zu FMEA

5.2 Erstellung einer Beispiel-PFMEA-MSR

Tabelle 27: Schritt 2 bis 4 der PFMEA für Beispiel PFMEA-MSR

STRUKTURANALYSE (SCHRITT 2)			FUNKTIONSANALYSE (SCHRITT 3)			
1. Nächsthöhere strukturelle Ebene	2. Strukturelles Fokuselement bzw. -prozess	3. Nächstniedrigere strukturelle Ebene (Prozessursache nelement)	1. Funktion Nächsthöhere Ebene		2. Funktion Fokuselement bzw. -prozess	3. Funktion nächstniedrigere Ebene
Stanzmaschine 1	Transport über das Förderband	Maschine: Antriebsmotor	Eigenes Werk:	Automatisiertes Stanzen inkl. Transport des Werkstücks zu und von der Stanze Nr.1 weg	Befördern des Werkstücks in die Stanzposition für die Stanzmaschine	Antreiben des Förderbands
			Beliefertes Werk:			
			Endnutzer:			
Stanzmaschine 1	Stanzvorgang	Maschine: Werkzeug	Eigenes Werk:	Automatisiertes Stanzen inkl. Transport des Werkstücks zu und von der Stanze Nr.1 weg	Stanzen des Werkstücks mit Muster xy	Einprägen des Abdrucks mit dem Muster xy durch Druck
			Beliefertes Werk:			
			Endnutzer:			
Stanzmaschine 1	Stanzvorgang	Material: Werkstück	Eigenes Werk:	Automatisiertes Stanzen inkl. Transport des Werkstücks zu und von der Stanze Nr.1 weg	Stanzen des Werkstücks mit Muster xy	Erfüllung der Materialspezifikation, um Stanzvorgang möglich zu machen
			Beliefertes Werk:			
			Endnutzer:			
FEHLERANALYSE (SCHRITT 4)						
1. Fehlerfolgen (FF) für nächsthöhere Ebene oder Endnutzer			Bedeutung (B) der FF	2. Fehlerart (FA) des Fokuselements bzw. -prozesses	3. Fehlerursache (FU) auf nächstniedrigerer Ebene	
Eigenes Werk:	Stanzvorgang auf Maschine 1 unmöglich		8	Werkstückbeförderung wird nicht gestartet	Antriebsmotoren werden nicht aktiviert	
Beliefertes Werk:						
Endnutzer:						
Eigenes Werk:	Stanzvorgang auf Maschine 1 erzeugt Ausschuss		9	Stanzen des Werkstücks mit Muster xy fehlgeschlagen	Einprägen des Abdrucks fehlgeschlagen	
Beliefertes Werk:						
Endnutzer:						
Eigenes Werk:	Stanzvorgang auf Maschine 1 erzeugt Ausschuss		9	Stanzen des Werkstücks mit Muster xy fehlgeschlagen	Materialspezifikation nicht erfüllt	
Beliefertes Werk:						
Endnutzer:						

Nach dem vierten Schritt werden für die Szenarien eins bis drei die jeweiligen Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen erstellt und bewertet. Im fünften Schritt wird angenommen, dass es optische Sensoren am Bandanfang, einen Fehlerspeicher, ein Kamerasystem zur Werkstücküberprüfung und Lagerpersonal gibt. Außerdem wird angenommen, dass das Rohmaterial, welches gestanzt wird, von einem Zulieferer geliefert wird.

5.2 Erstellung einer Beispiel-PFMEA-MSR

Tabelle 28: Schritt 5 und 6 der PFMEA für Beispiel-PFMEA-MSR

RISIKOANALYSE (SCHRITT 5)											
Vorhandene Vermeidungsmaßnahmen (VM) für FU	Auftreten (A) der FU	Vorhandene Entdeckungsmaßnahmen für FU oder FA						Entdeckung (E) der FU/FA	FMEA Aufgabenpriorität (AP)		
Systemauslegung gemäß Simulation und Toleranzberechnung	9	Entdeckungsmaßnahme der FU:	Optische Prüfung durch Sensoren an der Stanzposition und an der Startposition						1	H	
		Entdeckungsmaßnahme der FA:									
Systemauslegung gemäß Simulation und Toleranzberechnung	5	Entdeckungsmaßnahme der FU:	Auslesen des Fehlerspeichers bei Defekterkennung nach Stanzsystem durch Kamerasystem mit anschließendem Kontexteintrag des gesamten Stanzprozesses in den Fehlerspeicher						4	H	
		Entdeckungsmaßnahme der FA:									
Verlangen des Nachweises der Erfüllung der Materialspezifikation von Zulieferer	5	Entdeckungsmaßnahme der FU:	Stichprobenartige Sichtprüfung durch Lagerpersonal bei Warenannahme						9	H	
		Entdeckungsmaßnahme der FA:									
OPTIMIERUNG (SCHRITT 6)											
FMEA Vermeidungsmaßnahme	FMEA Entdeckungsmaßnahme	Name des Verantwortlichen	Geplantes Fertigstellungsdatum	Status	Ergriffene Maßnahmen mit Nachweis	Fertigstellungsdatum	Bedeutung (B)	Auftreten (A)	Entdeckung (E)	FMEA Aufgabenpriorität (AP)	Bemerkungen
Verlangen Ausfallrate von unter 10FIT inkl. Funktionstest vom Zulieferer	Entdeckungsmaßnahme der FU:	Max Musteringenieur	10.03.2023	In Bearbeitung	-	-	8	8	1	H	FMEA-MSR wird durchgeführt, um den Betrieb auch bei Antriebsmotorausfall sicherzustellen
	Entdeckungsmaßnahme der FA:										
-	Entdeckungsmaßnahme der FU:	-	-	-	-	-	9	5	4	H	FMEA-MSR wird durchgeführt, um das Risiko des Fehlstanzvorgangs zu reduzieren
	Entdeckungsmaßnahme der FA:										
-	Entdeckungsmaßnahme der FU:	Vergleich mit der Materialspezifikation bei Feststellen einer mangelhaften Oberflächenqualität vor	10.05.2023	Abgeschlossen	Einbau des Materialqualitätssensors an den Bandanfang der Stanzmaschine 01 und Implementierung des Programms für den Abgleich mit der Materialspezifikation	20.06.2023	9	5	2	M	FMEA-MSR wird durchgeführt, um die Bedeutung des fehlerhaften Materials zu reduzieren
	Entdeckungsmaßnahme der FA:	Einbau eines Materialqualitätssensors für die Überprüfung der Oberflächenqualität vor der Stanzung									

Da die Risiken aus den Szenarien eins bis drei mit einer einfachen PFMEA nicht ausreichend reduziert werden können, werden für alle Risiken PFMEA-MSR durchgeführt. Entsprechend dem Informationsfluss von DFMEA zur PFMEA, existiert auch ein Informationsfluss der DFMEA-MSR zur PFMEA und zur PFMEA-MSR. Als *Grund für die Häufigkeit* können in einer PFMEA-MSR also auch Systemreaktionen aus der DFMEA-MSR sowie deren Auftretenshäufigkeiten thematisiert und für den Produktionsprozess weiterbearbeitet werden. Besonders sinnvoll kann das in Produktionssystemen sein, in denen mehrere Maschinen interagieren und die Systemreaktionen der einzelnen Maschinen aufeinander abgestimmt werden müssen. Wird in einer Maschine z.B. eine Systemreaktion zur Fehlerprävention hervorgerufen, sollten der Grund und der Ablauf der Systemreaktion für das Steuerungssystem auf Gesamtprozessebene übermittelt werden. Ansonsten könnte es sein, dass

5.2 Erstellung einer Beispiel-PFMEA-MSR

mehrere Maschinen durch eigene Systemreaktionen versuchen, denselben Fehler zu minimieren oder sich gegenseitig in der Stöorzustand versetzen. In der Beispiel-PFMEA-MSR wird angenommen, dass die Stanzmaschinen bei Erkennung einer Störung in der Maschine und dem Werkstück in Anfangsposition die Antriebsmotoren für das Förderband abschaltet (Tabelle 29).

Tabelle 29: MSR-Ergänzung zu Schritt 5 der Beispiel-PFMEA-MSR

FMEA-MSR Ergänzung zu RISIKOANALYSE (SCHRITT 5)								
Grund für die Häufigkeit	Häufigkeit (H) der FU	Vorhandene Monitoring-Maßnahme	Vorhandene Systemreaktion	Monitoring (M)	Schwerwiegendste Fehlerfolge nach Systemreaktion	Bedeutung (B) der FF nach bisherigen Maßnahmen für Monitoring und Systemreaktion	Bedeutung (B) der FF nach DFMEA	FMEA-MSR Aufgabenpriorität (AP) vor Maßnahmen
Daten aus DFMEA MSR belegen, dass bei Maschine im Stöorzustand alle Antriebsmotoren deaktiviert werden	3	Erkennung durch Eintrag im Fehlerspeicher, dass Maschine im Stöorzustand	-	3	Stanzvorgang wird nicht ausgeführt und Produktion bleibt stehen	8	8	H
Felddatenanalyse zeigt, dass 5% aller Stanzvorgänge ein fehlerhaftes Stanzmuster hervorrufen	5	Eintrag in Fehlerspeicher, dass die Stanzmaschine 1 ein fehlerhaftes Stanzmuster erzeugt	Deaktivierung der Maschine nach Erkennung des Stanzfehlers	2	Es wird nichts mehr auf Maschine 1 gefertigt und das Produktionssystem stoppt auf Maschine 1	8	9	H
Felddatenanalyse zeigt, dass 0,3% aller Lieferungen vom Zulieferer außerhalb der in der Spezifikation bestimmten Toleranz liegen	4	Eintrag in Fehlerspeicher, dass das Material fehlerhaft ist	-	2	Material wird weiterverarbeitet	9	9	H

Wie in Tabelle 29 zu sehen ist, sind die *MSR-AP hoch (H)* und sollten somit weiter minimiert werden. Für die weitere Minimierung der Risiken in der PFMEA-MSR ist es jedoch wichtig, das Monitoring und die Systemreaktionen aller Komponenten in einem System aufeinander abzustimmen. Bei einer Systemsteuerung mit einem OA kann dieser über die Unterstützung von Verhandlungs- und Entscheidungsszenarien optimale Lösungen für das Gesamtsystem mit dem MAS aushandeln und diese Information automatisiert in die FMEA einfließen lassen.²⁵³ Bei einer Person, die das System verwalten soll, müssten alle Systemreaktionen aus DFMEA-MSR und PFMEA-MSR sowie deren Einflüsse auf umliegende Systeme angezeigt und für den Benutzer oder die Benutzerin in übersichtlicher Form dargestellt werden.

²⁵³ Vgl. Lober u. a., „Flexible Skill-Based Production Systems through Novel OPC UA Design Approaches“, 3.page / merge

5.3 Übersetzung der PFMEA-MSR-Ergebnisse in Betriebsarten

Tabelle 30: MSR-Ergänzung zu Schritt 6 der Beispiel-PFMEA-MSR

FMEA-MSR Ergänzung zu OPTIMIERUNG (SCHRITT 6)												
FMEA-MSR Vermeidungsmaßnahme	Monitoringmaßnahme	Systemreaktion	Schwerwiegendste Fehlerfolge nach Systemreaktion	Bedeutung (B) der FF nach FMEA-MSR	Name des Verantwortlichen	Gepantes Fertigstellungsdatum	Status	Beschlossene Maßnahme mit Nachweis	Fertigstellungsdatum	Häufigkeit (H)	Monitoring (M)	FMEA-MSR Aufgabenpriorität (AP) nach Maßnahmen
	Eintrag in den Fehlerspeicher, dass die Stanzmaschine 1 außer Betrieb ist	Fehlerbehandlungsroutine: 1. Roboter greift Werkstück erneut und stellt es auf die Stanzmaschine 2	Taktzeitverlust i.H.v. --, da Roboter und Stanzmaschine 2 besetzt sind	2	Max Musteringenieur	15.03.2024	In Bearbeitung			3	2	N
		Fehlerbehandlungsroutine: 1. Maschine hält das Förderband an und gibt eine Fehlermeldung aus 2. Warten auf Roboter, bis dieser das Werkstück abtransportiert	Taktzeitverlust und Ausschussproduktion	2	Max Musteringenieur	15.03.2024	In Bearbeitung			5	2	M
Sobald ein fehlerhaftes Werkstück erkannt wird, wird dem Zulieferer automatisiert eine Nachricht mit der Abweichung von der Spezifikation zugesendet	Eintrag in den Fehlerspeicher, dass die Maschine auf den Abtransport des Werkstücks wartet	Das Werkstück wird von der Stanzmaschine 1 so lange auf dem Förderband stehen gelassen, bis der Roboter 01 das Werkstück holt und in den Ausschussbereich des Lagers gebracht hat	Taktzeitverlust und i.H.v. 10s / Bauteil und Ausschussproduktion	2	Max Musteringenieur	15.03.2024	In Bearbeitung			4	2	N

Nachdem die PFMEA-MSR durchgeführt wurde, liegen die MSR-Maßnahmen und Systemreaktionen in Form von Zeichenketten (*xsd:string*) vor. Diese Systemreaktionen können als Fehlerbehandlungsroutinen für das Exception Handling verwendet werden, um auf bestimmte, in der FMEA thematisierte Fehler reagieren zu können. Dafür müssen die Systemreaktionen zunächst aus Zeichenketten in Betriebsarten übersetzt werden.

5.3 Übersetzung der PFMEA-MSR-Ergebnisse in Betriebsarten

In dieser Arbeit wird dafür die graphische Darstellung der Betriebsarten nach dem *Guide d'Etude des Modes de Marche et d'Arrêt* (GEMMA) vorgenommen, die in dieser Arbeit als GEMMA-Diagramm bezeichnet wird. Dieses Diagramm zeigt einen Übergang zwischen den Stillständen, Betriebszuständen und den Stöorzuständen von Maschinen. Um die Integration aller Komponenten in das GEMMA-Diagramm zu gewährleisten, wird ein Hauptdiagramm auf Systemebene und Unterdiagramme für die einzelnen Komponenten benötigt.²⁵⁴ Die Bedingungen für die Zustandswechsel in den Diagrammen folgen aus den Monitoring-Maßnahmen und die Schritte der Fehlerbehandlung aus den Systemreaktionen der PFMEA-MSR. In diesem Kapitel wird das übergeordnete GEMMA-Diagramm für das gesamte System erstellt, welches in der PFMEA thematisiert wird. Um die Komplexität des Betriebsartenentwurfs möglichst gering zu halten, wird im Folgenden nur das Ausweichen

²⁵⁴ Vgl. o. V., „LE GEMMA“, zugegriffen 21. April 2024, <https://www.technologuepro.com/cours-automate-programmable-industriel/Le-GEMMA.htm>.

5.3 Übersetzung der PFMEA-MSR-Ergebnisse in Betriebsarten

von der *Stanzmaschine 1* auf die *Stanzmaschine 2*, aber nicht von *Stanzmaschine 2* auf *Stanzmaschine 1* fokussiert. Die Einbindung des Ausweichens von *Stanzmaschine 2* auf *1* würde, da die Maschinen baugleich sind, identisch zum Ausweichen von *Stanzmaschine 1* auf *2* sein. Für das GEMMA-Diagramm werden die folgenden Betriebsarten benötigt:

Tabelle 31: Definition der Betriebsarten für GEMMA-Diagramm auf Systemebene

Betriebsart	Identifikator	Beschreibung
Stromversorgung	PZ	Die Stromversorgung ist eingeschaltet
Fahrt in den Initialzustand	A6	Die Stanzmaschinen und der Roboter werden in ihre Initialzustände versetzt
Initialzustand	A1	Die Stanzmaschinen und der Roboter sind in ihren Initialzuständen
Stillstand angefordert am Ende des Zyklus	A2	Nach Produktion des Fertigungsauftrags werden der Roboter und die Maschine 2 angehalten
Vorbereitung zur Wiederaufnahme nach Störung	A5	Alle Komponenten im System werden darauf vorbereitet, den Initialzustand anzufahren
Normalbetrieb	F1	Der Produktionsprozess läuft ungestört (Abbildung 66), beide Stanzmaschinen und der Roboter befinden sich im fehlerfreien Zustand
Diagnose und Störbehandlung	D2	Die Stanzmaschinen und der Roboter werden angehalten, diagnostiziert und ggf. repariert
Produktion trotz Störung	D3	Die Produktion läuft nur noch auf der Stanzmaschine 2 mit geändertem Takt weiter, die Stanzmaschine 1 wird dabei nicht mehr verwendet
Not-Aus	D1	Alle Systeme werden abgeschaltet und in den Not-Aus-Modus versetzt

Um die Zustandsübergänge auf Systemebene zu definieren, werden Fehlerspeichereinträge in gravierende (Komponente kann die Störung nicht selbst beseitigen) und nicht gravierende (Komponente kann die Störung selbst beseitigen) unterteilt und ein Signal für die Beendigung eines Fertigungsauftrags definiert. Alle benötigten binären Eingangssignale für die Zustandsübergänge sind also die folgenden:

- **Fehler_M1**: Signal für gravierenden Fehlerspeichereintrag zu Stanzmaschine 1
- **Fehler_M2**: Signal für gravierenden Fehlerspeichereintrag zu Stanzmaschine 2
- **Fehler_R**: Signal für gravierenden Fehlerspeichereintrag zu Roboter
- **Ende_Fe**: Signal für Fertigstellung des Fertigungsauftrags
- **S**: Start-Signal
- **EM_Stop**: Not-Aus-Signal mit invertierter Logik
- **INIT_FG**: Signal für Freigabe des Initialzustands

5.3 Übersetzung der PFMEA-MSR-Ergebnisse in Betriebsarten

Aus diesen Sensorsignalen können alle Bedingungen für die Zustandsübergänge in Tabelle 32 erstellt werden. Nicht alle Zustandsübergänge benötigen aber Bedingungen, es sind auch automatische Zustandsübergänge möglich.²⁵⁵ Die Variable *Strom* symbolisiert somit das Einschalten der Stromversorgung und *auto* einen automatischen Zustandsübergang. Im Rahmen des Betriebs des Gesamtsystems wird angenommen, dass die Ein- und Abschaltung der Stromversorgung nicht als Eingangssignal vorgesehen ist.

Tabelle 32: Zustandsübergänge für GEMMA-Diagramm auf Systemebene

Zustandsübergang	Boolesche Bedingung
PZ zu A6	Strom
A6 zu A1	auto
A1 zu F1	S AND Not Ende_Fe
F1 zu D3	Fehler_M1 AND NOT Fehler_M2 AND NOT Fehler_R
D3 zu A2	Ende_Fe
A2 zu A1	INIT_FG
F1 zu D2	(Fehler_M1 AND Fehler_M2) OR Fehler_R
D2 zu A5	NOT (Fehler_M1 OR Fehler_M2 OR Fehler_R)
A5 zu A6	INIT_FG
Alle zu D1	NOT EM_Stop
D1 zu A5	EM_Stop

Nach der Definition der Zustandsübergänge und der Zustände kann das folgende GEMMA-Diagramm für die Systemebene erstellt werden. Auf dieser Ebene wird der Grundstein dafür gelegt, dass die Fertigung von der *Stanzmaschine 1* auf die *Stanzmaschine 2* überhaupt ausweichen kann. Der gesamte Betriebsartenentwurf im GEMMA-Diagramm könnte sich dann wie folgt gestalten:

²⁵⁵ Vgl. o. V.

5.3 Übersetzung der PFMEA-MSR-Ergebnisse in Betriebsarten

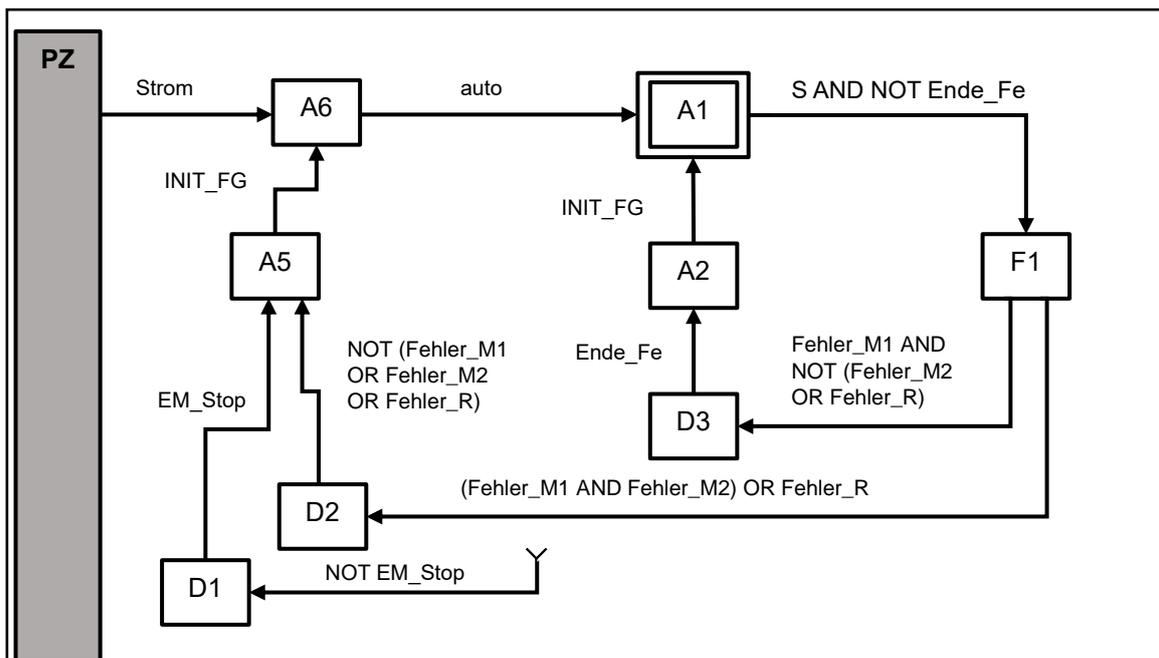


Abbildung 67: GEMMA-Diagramm auf Systemebene²⁵⁶

Mit diesem GEMMA-Diagramm kann die Systemreaktion aus Tabelle 30 *Fehlerbehandlungsroutine: 1. Roboter greift Werkstück erneut und stellt es auf die Stanzmaschine 2* als Teil des FB *Ablaufkette* in der Betriebsart *D3* implementiert werden. Um die Szenarien zwei und drei aus der Beispiel-PFMEA-MSR (Tabelle 30) einbauen zu können, müssten die Eingangssignale weiter spezifiziert werden. Für den Roboter muss durch den Fehler in der Maschine eins die Information übergeben werden, ob es sich um einen Materialfehler oder einen Werkzeugfehler der Stanze handelt. Davon ist nämlich abhängig, ob der Roboter das Werkstück auf die Maschine zwei oder in den Ausschussbereich des Lagers bringt. Somit ist die Einbindung der Maßnahmen aus der PFMEA-MSR im Betriebsartendiagramm für die Steuerung der PLCs möglich. Besonders wichtig wird für die PFMEA-MSR als Methode jedoch, dass die Systemreaktionen so definiert sind, dass sie vom OA für die Steuerung der PLCs übersetzt werden können.

Für weitere Systemreaktionen auf den unteren Hierarchieebenen (Stanzmaschine eins, Stanzmaschine zwei und Roboter) können im Allgemeinen die folgenden Einflüsse zwischen den Betriebsarten zu der Systemsteuerung definiert werden:

- Die Zustände A6, A1, A5, A2 und F1 werden erst dann von der Systemebene erreichbar, wenn die Untersysteme den jeweiligen Schritt erreicht haben
 - Sowohl der Roboter als auch die Stanzmaschinen eins und zwei müssen sich bspw. in A6 befinden, damit sich das System A6 erreichen kann

²⁵⁶ Vgl. o. V.

5.3 Übersetzung der PFMEA-MSR-Ergebnisse in Betriebsarten

- D2 kann erreicht werden, sobald sich ein Untersystem in D2 oder D3 befindet, dabei ist von Bedeutung, ob von diesem Untersystem für die Erfüllung der Kernfunktion ausgewichen werden kann
 - Befindet sich z.B. die Maschine eins im Zustand D2, kann das System ausweichen und sich in den Zustand D3 begeben
 - Ist aber der Roboter im Zustand D2, so kann sich das System auch nur in D2 gegeben
- Wird der Zustand D1 von einem Untersystem erreicht, wäre es zweckmäßig auch das ganze System in den Zustand D1 zu versetzen

Mit diesen Einflüssen könnten Betriebsartensteuerungen direkt mit PFMEA-MSR verbunden werden, wenn das vermittelnde System (z.B. der OA) die genaue Einordnung und die Restriktionen der einzelnen Prozesse und Prozesselemente verarbeiten kann. PFMEA-MSR werden dabei insbesondere die Zustände D2 und D3 sowie die Zustandsübergänge von D2 auf A5 und von D3 auf A2 fokussieren.

6. Evaluation

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist in zwei Teile gegliedert: Der erste Teil konzentriert sich darauf, das Potential der FMEA durch den Ausbau der Softwareunterstützung für diese Methode zu erweitern. Im zweiten Teil liegt der Fokus auf der Erweiterung der FMEA um zusätzliche Anwendungsfälle, insbesondere im Bereich des Exception Handlings für Systeme der Industrie 4.0 (z.B. den OA). Da die PFMEA-MSR jedoch in der FMEA-Graphdatenbank abgelegt wird, sind diese Konzepte miteinander verbunden. Die Bewertung des FMEA-Wissensgraphen ist damit auch für das Exception Handling mit der PFMEA-MSR gültig. Somit wird zunächst das Konzept des Wissensgraphen für die FMEA und anschließend das Konzept der PFMEA-MSR für Exception Handling evaluiert.

6.1 Evaluation des FMEA-Wissensgraphen

Da die Graph-Datenbank auf einem Wissensgraphen basiert und in dieser Arbeit der Kern des Datenbankkonzepts ist, erfolgt nur eine Bewertung des Wissensgraphen. Ein guter Wissensgraph sollte eine feinkörnige Ontologie-Struktur besitzen, die Informationen der realen Welt präzise ausdrücken kann. Instanzen sowie Tripel sollten die Klassen und Eigenschaften der Ontologie vollständig nutzen. Um den Inhalt messbar zu machen, lässt sich eine strukturelle Qualitätsmetrik entwickeln, indem diese Perspektive in vier Kategorien aufteilt wird. Diese Kategorien sind eine detaillierte Klassenhierarchie, erweiterte Eigenschaften in Unterklassen, die effektive Nutzung von Unterklassen und das Komplexitätsmanagement.²⁵⁷ In den folgenden Unterkapiteln werden die Kategorien einzeln mit dazugehörigen Kennzahlen vorgestellt und auf den FMEA-Wissensgraphen angewendet.

6.1.1 Detaillierte Klassenhierarchie

Eine detaillierte Klassenhierarchie bedeutet, dass die Klassenhierarchie innerhalb der Ontologie umfangreich untergliedert sein muss. Zur Verdeutlichung der Kategorie wird die Klasse „Person“ als Beispiel verwendet: Je stärker „Person“ in horizontale Unterklassen wie „Künstler, Athlet, Politiker, Arzt“ und in vertikale Ebenen wie „Person, Künstler, Musiker“ aufgeteilt wird, desto besser ist die Ontologie. Verglichen mit einem Szenario, in dem ausschließlich die Klasse „Person“ für mit Menschen assoziierte Klassen existiert, wird eine feinere Aufteilung nach Berufen die Leistungsfähigkeit der Ontologie verbessert, da der Umfang der Klassifikation von Entitäten eingeschränkt wird. Dies erleichtert die Aufgabe der

²⁵⁷ Vgl. Sumin Seo u. a., „Structural Quality Metrics to Evaluate Knowledge Graphs“ (arXiv, 9. Dezember 2022), 3, <http://arxiv.org/abs/2211.10011>.

6.1.1 Detaillierte Klassenhierarchie

Entitäts-Disambiguierung, indem der Bereich, dem eine Person mit gleichem Namen zugeordnet ist, klar definiert wird, was die Unterscheidung vereinfacht. Werden die Unterklassen „Musiker“ und „Autor“ zur Klasse „Künstler“ hinzugefügt, die wiederum eine Unterklasse von „Person“ ist, werden von der Ontologie spezifischere Informationen für Anwendungsaufgaben geliefert.²⁵⁸

Als Kennzahl dafür kann die *Class Instantiation* (CI) verwendet werden. Diese Metrik bewertet, wie detailliert Klassen in der Ontologie definiert sind und wie umfassend sie instanziiert werden. Sie summiert für jede Klasse im Wissensgraph die Instanzierung, gewichtet nach der Tiefe der Klassenhierarchie, um einen umfassenden Indikator für die Nutzung der Ontologie zu bieten. Diese lässt sich durch die folgende Formel berechnen:²⁵⁹

Formel 1: Berechnung CI²⁶⁰

$$CI(Class) = \sum_{i=1}^{n_c} \frac{ir(c_i)}{2^{d(c_i)}}$$

In der Formel 1 ist n_c die Anzahl der Unterklassen, die eine Klasse besitzt. Der Parameter $ir(c_i)$ steht für das Verhältnis der Instanzen, das definiert ist als die Anzahl der Instanzen der Klasse geteilt durch die Gesamtzahl aller Instanzen im Wissensgraph. Der Term c_i bezieht sich auf die i -te Unterklasse, die die Klasse hat, und $d(c_i)$ steht für die Distanz zwischen der Klasse und ihrer Unterklasse c_i .²⁶¹ Diese Berechnung könnte beispielhaft an einem Wissensgraphen aus der Klasse FMEA durchgeführt werden, der nach Hinzufügen der Klasse PFMEA-MSR den folgenden Aufbau besitzt:

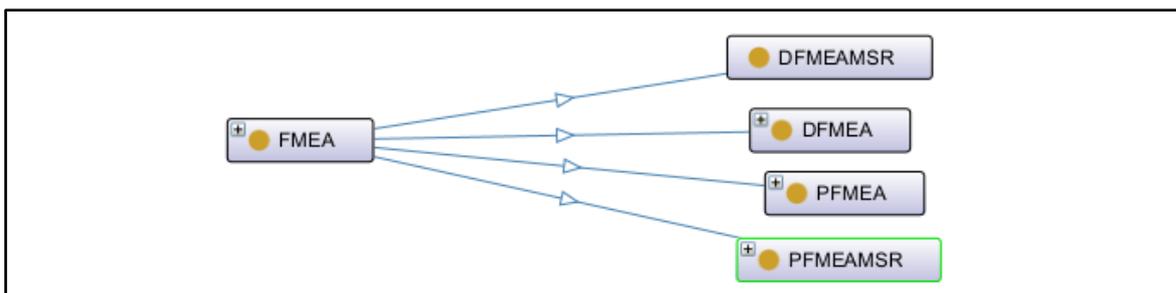


Abbildung 68: Aufbau der Klasse FMEA nach Hinzufügen von PFMEAMSR

Mit dem Klassen-Aufbau aus lassen sich die folgenden Werte für die Parameter der Formel eintragen:

- $n_c = 4$ (Die Klasse besitzt vier Unterklassen)
- $c_i = \{DFMEAMSR, DFMEA, PFMEA, PFMEAMSR\} = \{c1, c2, c3, c4\}$

²⁵⁸ Vgl. Seo u. a., 4f.

²⁵⁹ Vgl. Seo u. a., 5f.

²⁶⁰ Seo u. a., 6.

²⁶¹ Vgl. Seo u. a., 5f.

6.1.2 Erweiterte Eigenschaften in Unterklassen

- $d(c_i) = \{1, 1, 1, 1\}$ (Alle Klassen haben den Abstand eins zur Klasse FMEA)
- $ir(c_i) = \{0,25; 0,25; 0,25; 0,25\}$ (Insgesamt gibt es vier Instanzen der Klasse FMEA, für jede Klasse ist eine Instanz erstellt, also besitzt jede Unterklasse 0,25 aller Instanzen der Oberklasse)

Formel 2: Berechnung $CI(FMEA)$

$$\rightarrow CI(FMEA) = 4 * \frac{0,25}{2^1} = 0,5$$

Dieser Wert zeigt eine ausgewogene Nutzung der Klassen im Verhältnis zu deren Abstand zur Oberklasse. In diesem Beispiel ist das klar, da die Instanzen speziell für die Klassen erstellt und das Beispiel absichtlich so ausgewählt wurde. Im Allgemeinen gilt jedoch, dass die Entfernung (Tiefe in der Klassenhierarchie) eine Rolle in der Gewichtung der Klassen spielt. Klassen, die weiter von der Hauptklasse entfernt sind, erhalten eine stärkere Gewichtung, wodurch der Einfluss von tief verschachtelten Klassenstrukturen auf die Gesamtbewertung erhöht wird. Damit kann die Klassenhierarchie des Wissensgraphen bei der aktiven Nutzung hinsichtlich ihres Aufbaus optimiert werden. So ist die CI des kompletten FMEA-Wissensgraphen deutlich kleiner. Da die CI nur pro Klasse gebildet werden kann, wird die durchschnittliche CI aller Klassen des gesamten FMEA-Wissensgraphen gebildet. Diese beträgt etwa 0,027. Dieser Wert für CI deutet darauf hin, dass die Unterklassen und deren Instanzen nicht in hohem Maße genutzt werden, um die Ontologie mit Daten zu füllen. Dies könnte darauf hinweisen, dass viele Klassen nur wenige oder keine Instanzen haben, oder dass die Klassenstruktur zu verschachtelt ist. Da hier sehr wenige FMEA mit einer minimalen Anzahl an Daten als Instanzen verwendet werden, liegt der geringe CI-Wert an der geringen Anzahl der Instanzen und der im Verhältnis dazu hohen Anzahl an Unterklassen. Die komplette Rechnung für das durchschnittliche CI wird hier nicht aufgeführt, da diese aus zahlreichen Schritten besteht.

6.1.2 Erweiterte Eigenschaften in Unterklassen

Je mehr spezifische Eigenschaften eine Unterklasse im Vergleich zur Oberklasse aufweist, desto effektiver ist die Untergliederung innerhalb der Ontologie. Der Aspekt, wie viele erweiterte Eigenschaften Unterklassen im Vergleich zu den Oberklassen haben, wird in dieser Kategorie thematisiert. Beispielsweise sollte, wenn die Klasse *Athlet* eine Unterklasse der *Person* ist, die *Person* allgemeine Eigenschaften wie *Eltern*, *Geburtsdatum* und *Geburtsort* haben. Je mehr spezifische Eigenschaften (z.B. *Rückennummer*, *Team*, *Welt-Rangliste*, *Liga* usw.) der *Athlet* aufweist, desto detaillierter ist die Qualitätsinformation, die durch die

6.1.2 Erweiterte Eigenschaften in Unterklassen

Klassenzugehörigkeit gewonnen wird.²⁶² In dieser Kategorie können zwei Kennzahlen verwendet werden: die *Subclass Property Acquisition* (SPA) und die *Subclass Property Instantiation* (SPI).

Die SPA misst, wie viele neue Eigenschaften (*owl:ObjectProperties* und *owl:DataProperties*) in Unterklassen definiert sind, die nicht in den Oberklassen vorhanden sind. Sie bewertet die Fähigkeit der Ontologie, spezifischere Informationen in Unterklassen bereitzustellen und wird wie folgt berechnet:²⁶³

Formel 3: Formel zur Berechnung SPA²⁶⁴

$$SPA(Ontology) = \frac{\sum(N_i(P_{subclass} - P_{superclass}))}{N(C)}$$

P steht in Formel 3 für das Set (die Menge) der Eigenschaften. In diesem Kontext bezieht sich P auf die Gesamtheit aller Eigenschaften, die in einer bestimmten Klasse definiert sind. $N_i(P)$ ist eine Funktion, die die Anzahl der Elemente in einem gegebenen Eigenschaftsset zählt. In der Praxis zählt $N_i(P)$ die Anzahl der Eigenschaften, die einer Klasse zugeordnet sind. Die Operation $P_{subclass} - P_{superclass}$ berechnet die Differenzmenge der Eigenschaften zwischen einer Unterklasse und ihrer Oberklasse. Das bedeutet, dass sie die spezifischen Eigenschaften identifiziert, die in der Unterklasse definiert sind, aber nicht in der Oberklasse vorhanden sind. Das Ergebnis dieser Differenzbildung ist ein Set von Eigenschaften, die einzigartig für die Unterklasse sind. Nachdem diese Differenzmenge berechnet wurde, zählt $N_i(P_{subclass} - P_{superclass})$ die Anzahl der Eigenschaften, die ausschließlich in der Unterklasse definiert sind. Diese Zahl gibt an, wie viele neue, einzigartige Eigenschaften eine Unterklasse im Vergleich zu ihrer Oberklasse hinzufügt. $N(C)$ zählt die Gesamtzahl der Klassen in der Ontologie. Sie wird verwendet, um die durchschnittliche Anzahl der spezifischen Eigenschaften pro Klasse zu ermitteln. Die Metrik SPA wird schließlich berechnet, indem die Summe aller einzigartigen Eigenschaften in allen Unterklassen durch die Gesamtzahl der Klassen geteilt wird. Diese Berechnung liefert den Durchschnittswert der neu hinzugefügten Eigenschaften pro Klasse in der Ontologie, was ein Indikator dafür ist, wie differenziert und spezialisiert die Unterklassen im Vergleich zu ihren Oberklassen sind.²⁶⁵

Die komplette Rechnung erfolgt in einem mehrschrittigen Prozess mithilfe SPARQL-Abfragen erfolgt. Zunächst wird eine SPARQL-Abfrage erstellt, um $\sum(N_i(P_{subclass} -$

²⁶² Vgl. Seo u. a., 6f.

²⁶³ Vgl. Seo u. a., 6f.

²⁶⁴ Vgl. Seo u. a., 7.

²⁶⁵ Vgl. Seo u. a., 6f.

6.1.2 Erweiterte Eigenschaften in Unterklassen

$P_{superclass}) = 88$ zu ermitteln. $N(C) = 93$ ergibt sich aus einer SPARQL-Abfrage, die alle Elemente vom Typ *owl:Class* abfragt. Daraus kann die folgende Rechnung für SPA erstellt werden:

Formel 4: Berechnung von SPA(FMEA)

$$SPA(FMEA_Ontologie) = \frac{\sum(N_i(P_{subclass} - P_{superclass}))}{N(C)} = \frac{88}{93} \approx 1,06$$

Dieser Wert sagt aus, dass etwa eine Eigenschaft explizit pro Unterklasse definiert ist. Das Ergebnis ist jedoch nur wenig repräsentativ für die Ansatz der FMEA-Graph-Datenbank, da für diese Arbeit zahlreiche Klassen und Beziehungen zu demonstrativen Zwecken, z.B. Für den Vergleich der META-Ebenen, erstellt wurden.²⁶⁶ Dadurch wird die Anzahl der Klassen in der Ontologie mit wenig oder keinen Beziehungen in die Höhe getrieben und das SPA reduziert.

Die SPI quantifiziert, wie oft die spezifischen Eigenschaften von Unterklassen, die nicht in den Oberklassen vorhanden sind, in RDF-Tripeln verwendet werden. Sie bietet eine Bewertung dafür, wie gut die spezifischen Eigenschaften einer Unterklasse genutzt werden. Sie lässt sich mit der folgenden Formel berechnen:²⁶⁷

Formel 5: Formel für Berechnung SPI²⁶⁸

$$SPI(Class) = \frac{N(T_{class} - T_{class_superclass})}{N(T_{class})}$$

In der Formel 5: Formel für Berechnung SPI steht T für die Menge aller RDF-Tripel, die in einem bestimmten Kontext oder einer Datenmenge vorhanden sind. T_{class} ist somit die Menge der RDF-Tripel, die Instanzen einer bestimmten Klasse als Subjekt verwenden. Zum Beispiel enthält T_{Actor} alle Tripel, bei denen eine Instanz der Klasse *Actor* das Subjekt ist. Die Menge $T_{class_superclass}$ umfasst alle RDF-Tripel, die Eigenschaften verwenden, die für die Oberklasse definiert sind. Beispielsweise würden Tripel, die allgemeine Eigenschaften der Klasse *Person* (als Oberklasse von *Actor*) nutzen, hier eingeordnet. $N(T)$ ist eine Funktion, die die Anzahl der RDF-Tripel in der Menge T berechnet. Es ist ein Maß für die Gesamtanzahl der Tripel, die in einer Analyse berücksichtigt werden. $N(T_{class} -$

²⁶⁶ Vgl. Kap. 4.1.5 Vergleich der obersten Konzeptebenen der FMEA-Ontologie nach VDA & AIAG FMEA-Handbuch mit der nach VDA 96

²⁶⁷ Vgl. Seo u. a., „Structural Quality Metrics to Evaluate Knowledge Graphs“, 7.

²⁶⁸ Seo u. a., 7.

6.1.3 Effektive Nutzung von Klassen und Eigenschaften

$T_{class_superclass}$) zählt somit die Anzahl der RDF-Tripel, die speziell die einzigartigen Eigenschaften der Unterklasse verwenden und $N(T_{class})$ die Gesamtzahl der Tripel, die Instanzen der Unterklasse als Subjekt verwenden. Das bedeutet, es werden nur die Tripel gezählt, die Eigenschaften nutzen, die nicht in der Oberklasse vorhanden sind.²⁶⁹

Auch die Berechnung von SPI wird nur partiell thematisiert, wobei die Oberklasse :*FMEA* und die Unterklasse :*DFMEA* als Beispiele untersucht werden. Die Instanzen der Klasse :*DFMEA* sind insgesamt in 16 RDF-Tripel ein Subjekt. Alle 16 dieser RDF-Tripel haben Eigenschaften, die nicht in der dazugehörigen Oberklasse :*FMEA* definiert sind. Dadurch entsteht die folgende Berechnung für dieses Beispiel:

Formel 6: Berechnung von $SPI(DFMEA)$

$$SPI(DFMEA) = \frac{N(T_{DFMEA} - T_{DFMEA_FMEA})}{N(T_{DFMEA})} = \frac{16}{16} = 1$$

$SPI(DFMEA) = 1$ bedeutet, dass die Klasse eine sehr hohe Spezifität aufweist und deshalb eine effektive Differenzierung, zwischen der Ober- und der Unterklasse darstellt. Dabei ist jedoch anzumerken, dass die Instanzen der Klassen speziell für diese erstellt wurden und die Werte somit grundsätzlich eine hohe Spezifität aufweisen werden. Der Durchschnittliche Wert für SPI in der gesamten FMEA ist 0, da den Oberklassen in der FMEA-Ontologie automatisch die Beziehungen der Unterklassen übergeben werden. Dadurch wird die Suche nach Instanzen im Wissensgraphen vereinfacht, da keine Beziehungen existieren, die nur den Unterklassen zugeordnet sind.

6.1.3 Effektive Nutzung von Klassen und Eigenschaften

Die in der Ontologie definierten Klassen und Eigenschaften müssen ausreichend im Wissensgraph verwendet werden. Auch wenn Klassen und Eigenschaften detailliert definiert sind, nützen Ontologien nur, wenn sie im Wissensgraph angewandt werden. Die Klasse *Person* könnte beispielsweise in spezifischere Klassen wie *Chef eines chinesischen Restaurants in Seoul* oder *Musiklehrer der vierten Klasse einer Grundschule* unterteilt werden. Wenn jedoch die Anzahl der Instanzen im Vergleich zur Gesamtanzahl der Instanzen im Wissensgraph zu gering ist, kann nicht behauptet werden, dass das Hinzufügen der Klasse vorteilhaft ist. Ähnlich können spezifische Eigenschaften wie *Anzahl der Debütsongs, die bei Konzerten gesungen wurden* und *Verwaltungsbezirk, in dem die meisten Fans leben*, für die Klasse *Musiker* definiert werden, doch wenn keine Daten vorhanden sind und diese

²⁶⁹ Vgl. Seo u. a., 7.

6.1.3 Effektive Nutzung von Klassen und Eigenschaften

nicht als tatsächliche RDF-Tripel genutzt werden, ist es besser, sie nicht hinzuzufügen.²⁷⁰ Dieser Kategorie können die Metriken *Instantiated Class Ratio* (ICR) und *Instantiated Property Ratio* (IPR) zugeordnet werden.

Das ICR misst das Verhältnis der Klassen, die tatsächlich Instanzen in der Ontologie haben, zur Gesamtzahl der definierten Klassen. Sie gibt an, wie gut die Klassen der Ontologie tatsächlich genutzt werden. Das ICR wird wie in Formel 7 berechnet:²⁷¹

Formel 7: Formel zur Berechnung ICR²⁷²

$$ICR(Ontology) = \frac{N(IC)}{N(C)}$$

In Formel 7 steht $N(C)$ für die Anzahl aller Klassen in der Ontologie und $N(IC)$ für die Anzahl aller Klassen mit Instanzen in der Ontologie. In der FMEA-Ontologie wird das ICR somit wie folgt berechnet:

Formel 8: Berechnung ICR(FMEA_Ontologie)

$$ICR(FMEA_Ontologie) = \frac{N(IC)}{N(C)} = \frac{72}{88} \approx 0,82$$

Dieser Wert für ICR sagt aus, dass die Klassen im Allgemeinen sehr wenig Instanzen besitzen. Das ist primär dadurch verursacht, dass die Ontologie mit nur wenigen Werten arbeitet und wenig FMEA-Formblätter sowie Randinformationen besitzt. Diese Kennzahl könnte jedoch für zukünftige Optimierungen von großer Bedeutung sein, um bspw. nicht benötigte Klassen für bestimmte Anwendungsfälle zu entfernen oder gar neue Klassen zu definieren.

Die IPR misst das Verhältnis der Eigenschaften, die tatsächlich in RDF-Tripeln verwendet werden, zur Gesamtzahl der in der Ontologie definierten Eigenschaften. Sie zeigt, wie effektiv die Eigenschaften der Ontologie genutzt werden und wird wie folgt berechnet:

Formel 9: Formel zur Berechnung IPR

$$IPR(Ontology) = \frac{N(IP)}{N(P)}$$

²⁷⁰ Vgl. Seo u. a., 5.

²⁷¹ Vgl. Seo u. a., 5.

²⁷² Seo u. a., 5.

6.1.4 Komplexitätsmanagement

Dabei repräsentiert $N(IP)$ die Anzahl der Eigenschaften in RDF-Tripeln und $N(P)$ die Anzahl aller Eigenschaften in der Ontologie. Für den konkreten Anwendungsfall der FMEA-Ontologie ergeben sich dazu folgende Werte:

Formel 10: Berechnung von $IPR(FMEA_Ontologie)$

$$IPR(FMEA_Ontologie) = \frac{N(IP)}{N(P)} = \frac{179}{406} \approx 0,44$$

Dieser Wert sagt aus, dass nur 44% der definierten Eigenschaften in RDF-Tripeln verwendet werden.

6.1.4 Komplexitätsmanagement

Die Qualität der Ontologie steigt zwar mit der Untergliederung der Klassen, doch ist dies negativ, wenn dadurch die Komplexität zunimmt. Ein Beispiel für einen Faktor, der die Komplexität der Ontologie beschreibt, ist die Mehrfachvererbung. Mehrfachvererbung bedeutet, dass eine Klasse mehrere Oberklassen hat. Beispielsweise ist die Klasse *Krankenhaus* sowohl eine Unterklasse der *Einrichtung*, einem Raum, der eine spezifische Funktion bietet, als auch eine Unterklasse der *Organisation*, einer Gruppe von Mitarbeitern einschließlich Ärzten und Krankenschwestern. Das Vermeiden von Mehrfachvererbung ist vorzuziehen, es sei denn, sie ist notwendig. Im Fall des Krankenhauses, wo sowohl Standortinformationen, die eine Eigenschaft der Einrichtung sind, als auch Mitgliederinformationen, die eine Eigenschaft der Organisation sind, spielt die Mehrfachvererbung notwendig.²⁷³

Eine Kennzahl zur Quantifizierung der Komplexität ist die *Inverse Multiple Inheritance (IMI)*. Diese bewertet die Einfachheit des Wissensgraphen, indem sie die Häufigkeit der Mehrfachvererbung misst. Ein niedrigerer Wert deutet auf eine komplexere Vererbungsstruktur hin, während ein höherer Wert (durch die Bildung des Kehrwerts) eine einfachere Struktur anzeigt. Die IMI lässt sich mit der nachfolgenden Formel berechnen:²⁷⁴

Formel 11: Formel zur Berechnung IMI ²⁷⁵

$$IMI(Ontology) = \frac{1}{\frac{\sum_{i=1}^{N_c} nsup(C_i)}{N_c}}$$

In der Formel 11 repräsentiert N_c die Gesamtzahl aller Klassen in der Ontologie. C_i steht für jede einzelne Klasse in der Ontologie während des Berechnungsprozesses. Für jede

²⁷³ Vgl. Seo u. a., 5.

²⁷⁴ Vgl. Seo u. a., 7.

²⁷⁵ Seo u. a., 7.

6.1.5 Vergleich mit anderen Wissensgraphen

dieser Klassen wird die Anzahl der direkten Oberklassen ermittelt. Somit gibt $nsup(C_i)$ an, wie viele direkte Oberklassen jede Klasse C_i hat. Es wird für jede Klasse innerhalb der Ontologie bestimmt und dient dazu, die Häufigkeit von Mehrfachvererbung zu messen.²⁷⁶

Die Berechnung der Metrik IMI wird in dieser Arbeit ebenfalls nur angeschnitten. Das N_c wurde als $N(C) = 91$ bereits in den vorherigen Unterkapiteln berechnet und wird daher nicht thematisiert. Die FMEA-Ontologie hat insgesamt 69 Oberklassen, somit gilt $\sum_{i=1}^{N_c} nsup(C_i) = 69$. Daraus kann die durchschnittliche Anzahl an Oberklassen pro Klasse bestimmt werden, die sich aus $\frac{\sum_{i=1}^{N_c} nsup(C_i)}{N_c} = \frac{401}{104} \approx 3,9$ ergibt. Der Kehrwert daraus bildet die IMI, wie in der folgenden Berechnung dargestellt:

Formel 12: Berechnung $IMI(FMEA_Ontologie)$

$$IMI(FMEA_Ontologie) = \frac{1}{\frac{\sum_{i=1}^{N_c} nsup(C_i)}{N_c}} = \frac{104}{401} \approx 0,26$$

Das bedeutet, dass der FMEA-Wissensgraph im Durchschnitt 3,9 Unterklassen pro Oberklasse besitzt. Der Wert ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass einige Klassen für die bessere Übersichtlichkeit und Darstellung in dem Editor *Protege* erstellt wurden.

6.1.5 Vergleich mit anderen Wissensgraphen

Um nun den FMEA-Wissensgraphen mit anderen zu vergleichen, werden die Kennzahlen einiger weiterer Wissensgraphen verwendet. Wikidata wurde 2012 von Wikimedia Deutschland ins Leben gerufen und stellt einen frei bearbeitbaren Wissensgraphen dar, der eng mit Wikipedia verbunden ist. Benutzer können direkt auf Wikidata zugreifen, um Daten zu erstellen und zu bearbeiten, was eine dynamische und partizipative Datenquelle schafft. Im Gegensatz zu anderen Wissensgraphen ist die Ontologie-Information bei Wikidata nicht als separate Datei verfügbar, aber die hierarchische Struktur zwischen den Entitäten kann durch die Nutzung von Eigenschaften wie *subclass of* erschlossen werden. DBpedia, gestartet 2007 von der Freien Universität Berlin und der Universität Leipzig, nutzt eine automatisierte Extraktion, um strukturierte Informationen aus Wikipedia zu sammeln. Dieser Wissensgraph baut seine eigene Ontologie-Struktur auf und verwaltet diese, um eine breite Palette von Daten systematisch zu organisieren und zugänglich zu machen. Freebase, gegründet 2007 von MetaWeb Technologies, wurde 2015 in Wikidata durch die Wikimedia Foundation und Google integriert. Die Ontologie von Freebase ist in einer für Menschen

²⁷⁶ Vgl. Seo u. a., 5.

6.1.5 Vergleich mit anderen Wissensgraphen

lesbaren Form aufgebaut, die die Struktur von 'Domäne/Klasse/Prädikat' folgt und eine umfassende Organisation von Wissen ermöglicht. YAGO wurde 2007 vom Max-Planck-Institut entwickelt und extrahiert Informationen aus den Infoboxen der Wikipedia sowie aus WordNet in verschiedenen Sprachen. Die resultierende Ontologie-Struktur von YAGO basiert auf WordNet, was diesem Wissensgraphen eine solide begriffliche Grundlage gibt. Der Google Knowledge Graph, entwickelt von Google im Jahr 2012, ist darauf ausgelegt, die Bedeutung von Suchbegriffen innerhalb der Google-Suchmaschine zu verstehen. Er bietet über eine API Zugang zu Informationen wie Name, Beschreibung, Bild und Typ von Entitäten, wobei die Typisierung auf schema.org basiert. Der Google Knowledge Graph zielt darauf ab, die Sucherfahrung durch ein tiefgreifendes Verständnis der Inhalte und ihrer Kontexte zu verbessern. Eine Gegenüberstellung der Kennzahlen dieser Ontologien mit der FMEA-Ontologie ergibt die folgende Tabelle:²⁷⁷

Tabelle 33: Gegenüberstellung Kennzahlen mit bekannten Wissensgraphen²⁷⁸

Kennzahl	FMEA	Wikidata	DBpedia	YAGO	Google Knowledge Graph	Freebase
ICR	0,82	0,334	0,540	0,966	0,099	0,314
IPR	0,44	1	1	0,96	1	0,003
CI	0,027	0,743	0,949	0,616	0,66	0,749
IMI	0,26	0,962	0,971	0,942	0,952	1
SPA	1,06	40,94	63,57	2,23	0	1
SPI	0	0,00001	0,0668	0,00001	0	0
Anzahl der Klassen	88	273	59662	804	910	53091
Anzahl der Eigenschaften	159	607	7476	21607	1447	23446
Anzahl der Instanzen	61	95312952	7362499	73260077	1390438	115880746

Zunächst fällt auf, dass der FMEA-Wissensgraph im Vergleich zu den anderen sehr wenig Instanzen besitzt. Daraus resultieren primär auch die Abweichungen in vielen Parametern, die Instanzen beinhalten. Die größte Abweichung besteht im Wert für CI. Die Abweichungen für IMI und SPA sind ebenfalls groß, da in der FMEA-Ontologie zahlreiche inaktive Oberklassen definiert wurden. Die Schwankung der einzelnen Kennzahlen zwischen den Wissensgraphen kommt daher, dass diese unterschiedlichen Einsatzzwecken dienen sollen.

²⁷⁷ Vgl. Seo u. a., 2f.

²⁷⁸ Vgl. Seo u. a., 8.

6.1.6 Kosten

Im Fall des FMEA-Wissensgraphen wird durch die Kennzahlen jedoch Optimierungspotenzial deutlich, welches sich vor allem in der Füllung des Wissensgraphen mit Instanzen sowie der Elimination nicht benötigter Ober- bzw. Subklassen befindet. Im Allgemeinen lässt sich jedoch sagen, dass die Anzahl der Klassen sowie die Hierarchie dieser vom Einsatzzweck abhängig ist.

6.1.6 Kosten

Ein relevanter Punkt bei der Auswahl der Datenbank sind Kosten. Das *GraphDB 12-Core Cluster* 95000\$ pro Jahr (netto), welches eine Software As A Service-Lösung darstellt und Support für 5 Stunden am Tag und 8 Stunden anbietet.²⁷⁹. Dabei müssen sowohl die Kosten der Implementierung als auch die Kosten der Wartung berücksichtigt werden. Diese Kosten würden zusätzlich zu den Kosten spezialisierter FMEA-Software anfallen, müssten dann aber auch mit den Kostenersparnissen durch geringere Aufwände in Suche und Aktualisierung sowie erweiterte Funktionalität verrechnet werden. Aufgrund der hohen Investitionskosten wird es außer für FMEA-Softwareanbieter selten sinnvoll sein, eine Graph-Datenbank nur für den Anwendungsfall der FMEA zu installieren. Die Einbindung der

6.2 Zusätzliche Bewertung des Konzepts der PFMEA-MSR für das Exception Handling

Da die PFMEA-MSR Informationen an ein Exception Handling Framework des OA weitergibt, muss für dieser Informationsfluss zunächst in das Framework eingeordnet werden. Ein Exception Handling Framework für das Fallmanagement lässt sich in vier Ebenen unterteilen:

1. *Die Aktivitätsebene* umfasst die Anpassung der Behandlung von Ausnahmen für individuelle Aktivitäten, um eine effektive Verwaltung zu gewährleisten, ohne den Gesamtprozess zu beeinträchtigen. Die Behandlungsmethoden werden an den spezifischen Lebenszyklus und die Anforderungen jeder Aktivität angepasst.
2. *Die Fragment- bzw. Stufenebene* beinhaltet die Ausnahmebehandlung innerhalb bestimmter Segmente des Falles. Hier wird sichergestellt, dass Ausnahmen innerhalb

²⁷⁹ Vgl. o. V., „AWS Marketplace: GraphDB Enterprise 12-Core Cluster“, zugegriffen 24. April 2024, <https://aws.amazon.com/marketplace/pp/prodview-rceq2ciyjdipy>; Vgl. o. V., „Alle Produkte – Microsoft Azure Marketplace“, zugegriffen 24. April 2024, https://azuremarketplace.microsoft.com/de-de/marketplace/apps/ontotextad1692361256062.graphdb_enterprise_12_core_cluster?tab=overview.

6.2 Zusätzliche Bewertung des Konzepts der PFMEA-MSR für das Exception Handling

dieser spezifischen Teile effektiv behandelt werden können, ohne dass andere Bereiche des Prozesses beeinträchtigt werden. Dies umfasst Maßnahmen zur Wiederherstellung und Fortsetzung des Betriebs innerhalb des betroffenen Segments.

3. *Die Fallebene* behandelt Ausnahmen, die gesamte Fälle betreffen, insbesondere wenn die auslösende Aktivität nicht in dem Fragment oder der Stufe enthalten ist, die betroffen ist. Diese Ebene berücksichtigt umfassende Strategien und Maßnahmen zur Gewährleistung der Kontinuität des gesamten Falles und ermöglicht eine umfassende Reaktion auf größere Ausnahmesituationen.
4. *Die Erholungsmaßnahmen auf der Fallebene* konzentrieren sich darauf, den gesamten Fall nach einer Ausnahme wieder zur Normalität zurückzuführen. Diese Maßnahmen zielen darauf ab, die Funktionalität und Integrität des Gesamtfalles wiederherzustellen und langfristige Auswirkungen von Ausnahmen zu minimieren. Jede Ebene trägt dazu bei, ein robustes und effektives Management von Ausnahmen in verschiedenen Szenarien des Fallmanagements zu gewährleisten.²⁸⁰

Der Informationsfluss von der PFMEA-MSR zum OA könnte sich für fallbasierte Ausnahmebehandlung auf der Fragment- bzw. Stufenebene oder auf der Fallebene befinden. Die Fragment- bzw. Stufenebene befasst sich mit der Handhabung von Ausnahmen innerhalb spezifischer Abschnitte oder Phasen eines Prozesses. Da die PFMEA-MSR darauf abzielt, potenzielle Fehler und deren Auswirkungen zu analysieren und Überwachungs- sowie Reaktionsschemata bereitzustellen, könnte die Integration dieser Informationen auf dieser Ebene erfolgen. Hier würden spezifische Daten über erkannte Fehler und vorgeschlagene Reaktionen direkt anwendbar sein, um die Handhabung von Ausnahmen innerhalb bestimmter Teile des Systems zu informieren und zu steuern. Die Fallebene umfasst die übergreifende Verwaltung und Reaktion auf Ausnahmen, die den gesamten Fall betreffen. Informationen aus der FMEA-MSR könnten auf dieser Ebene genutzt werden, um breitere Strategien zur Ausnahmebehandlung zu entwickeln und umzusetzen. Das würde bedeuten, dass das Framework auf Basis der FMEA-MSR erarbeitet, wie auf systemweite Ausnahmen zu reagieren ist, insbesondere wenn diese nicht direkt in einem Fragment oder einer Stufe identifiziert wurden. Diese Fallebene umfasst die übergreifende Verwaltung und Reaktion auf Ausnahmen, die den gesamten Fall betreffen. Informationen aus der FMEA-MSR könnten auf dieser Ebene genutzt werden, um breitere Strategien zur Ausnahmebehandlung zu entwickeln und umzusetzen. Das würde bedeuten, dass das Framework auf Basis der

²⁸⁰ Vgl. Kerstin Andree u. a., „An Exception Handling Framework for Case Management“, *Software and Systems Modeling* 21, Nr. 3 (Juni 2022): 949f, <https://doi.org/10.1007/s10270-022-00993-3>.

6.2 Zusätzliche Bewertung des Konzepts der PFMEA-MSR für das Exception Handling

PFMEA-MSR erarbeitet, wie auf systemweite Ausnahmen zu reagieren ist, insbesondere wenn diese nicht direkt in einem Fragment oder einer Stufe identifiziert wurden.

Dafür müssen die Informationen aus der PFMEA-MSR möglichst schnell abfragbar sein und die Daten effizient verarbeiten können. Die Abfragegeschwindigkeit hängt bei Graph-Datenbanken nicht von der Anzahl von der Datenmenge, sondern von der Anzahl konkreter Beziehungen ab.²⁸¹ Das bedeutet, dass die Notwendigkeit bestehen könnte, Beziehungen des Wissensgraphen für den Anwendungsfall des Exception Handlings zu entfernen, um schnelle Abfragen zu ermöglichen. Des Weiteren ist die Datenqualität in der PFMEA-MSR stark vom Anwender abhängig, weshalb die automatisierte Übersetzung in Betriebsarten oder Ablaufketten in der Praxis problematisch sein könnte. Ein weiterer kritischer Punkt an der PFMEA-MSR für den industriellen Einsatz ist das Fehlen dieser Ausgestaltungsform in Standards. Eines der Ziele, wieso FMEA durchgeführt werden, ist Compliance, die mit dieser Ausgestaltungsform bisher nicht gegeben ist.

²⁸¹ Vgl. o. V., „Graph Database (Graphdatenbank) erklärt“, IONOS Digital Guide, 7. November 2019, <https://www.ionos.de/digitalguide/hosting/hosting-technik/graphdatenbank/>.

7. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit werden verschiedene Arten der FMEA gemäß dem VDA & AIAG FMEA-Handbuch (DFMEA, PFMEA und FMEA-MSR) detailliert anhand praxisnaher Produkte und Prozesse erläutert. Zusätzlich erfolgt eine Analyse bestehender FMEA-Softwarelösungen, um das realisierbare Potential einer softwaregestützten Umsetzung dieser Methode aufzuzeigen. Es wird diskutiert, wie diese Potentiale mit verschiedenen Datenbanktechnologien umgesetzt werden können, woraufhin ein Ansatz basierend auf Graph-Datenbanken für die Unterstützung der FMEA-Methode entwickelt wird. Aus den erstellten FMEAs werden Informationen extrahiert, mit denen eine Ontologie in vier Schritten entwickeln, implementiert und anschließend validiert wird. Diese Ontologie wird in einen Wissensgraphen überführt und in einer Graph-Datenbank gespeichert. Der Wissensgraph wird frühzeitig anhand relevanter Kennzahlen evaluiert, um Richtungen für zukünftige Optimierungen aufzuzeigen. Durch den Vergleich der neu entwickelten FMEA-Ontologie mit einer älteren Version, die nach dem VDA 96 Standard erstellt wurde, wird die Evolution des FMEA-Standards beleuchtet und ein neuer möglicher Ansatz für dessen Gestaltung vorgeschlagen. Die Überführung der Daten aus dem FMEA-Formblatt in die Graph-Datenbank wird durch ein Programm automatisiert, das die tabellarische Struktur der FMEA in einen Wissensgraphen übersetzt. Um das FMEA-Vorgehen möglichst genau zu modellieren, werden für die Graph-Datenbank zusätzliche Inferenzregeln definiert, die mit relationalen Datenbanken nur schwer realisierbare Funktionen, wie beispielsweise die Fehlerpfadanalysen, ermöglichen. Diese Graph-Datenbank bietet eine Plattform, um FMEA-Informationen maschinenlesbar für diverse Anwendungen, wie beispielsweise PLM-Analysen, nutzbar zu machen.

Eine mögliche Erweiterung, die in dieser Arbeit untersucht wird, ist die Verwendung der FMEA für die Erweiterung der Wissensgraphen von Industrie 4.0-Systemen wie dem Orchestration Agent. Diese Informationen werden für das Exception Handling nutzbar gemacht, indem eine neue Ausgestaltungsform der FMEA, die PFMEA-MSR definiert wird. Damit wird das bestehende FMEA-Konzept erweitert und ein Ansatz für die potenzielle Weiterentwicklung der FMEA-Methode präsentiert. Anhand eines beispielhaften Fertigungsprozesses wird diese FMEA-Erweiterung angewendet und eine Methode gezeigt, die darin befindlichen Optimierungen direkt in Steuerungsanweisungen für PLCs mit SPS-Programmen mit Betriebsartenteil zu überführen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Ein weiterer interessanter Aspekt zu FMEA-Software ist, dass während dem Entstehungsprozess (März 2024) dieser Arbeit, die Softwareanbieter PLATO und IQS zu dem Unternehmen PeakAvenue GmbH fusioniert sind.²⁸² Damit wurde auch die FMEA-Software von PLATO, die im Rahmen dieser Arbeit getestet wurde, überarbeitet und mit neuen Funktionen ausgestattet. Dazu gehören systematische Auswertungen von Strukturen und Ursachenketten, Integration und Auswertung externer Daten (Internet of Things, PLM) und auch Vergleich und Ermittlung von Unterschieden in Varianten und Projekten.²⁸³ Diese neuen Funktionen konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr getestet werden, da die Testlizenz bereits abgelaufen war. Diese Ansätze werden auch in der Arbeit in den Vorteilen von Graph-Datenbanken gegenüber relationalen thematisiert.

Weitere Arbeiten am FMEA-Wissensgraphen würden sich entsprechend der Evaluation auf die Füllung des Wissensgraphen mit Instanzen und der Überarbeitung der Klassenhierarchie befassen. Dabei könnte ein Wissensgraph mit weniger Klassen und mehr *owl:Object-Properties* erstellt werden, der durch Inferenz bei Bedarf neue Klassen konstruiert. Es ist außerdem naheliegend, dass der Wissensgraph um Informationen aus Spezifikationen und DT erweitert wird, um Einflüsse und Veränderungen für FMEA schneller analysieren zu können. Mithilfe von Informationen aus DT könnten Vorschläge bei kritischen Bauteilen oder Prozessen für FMEA-Teams automatisch anhand von Vergangenheitsdaten und Simulation erarbeitet werden. Im Wissensgraphen wird davon ausgegangen, dass alle geplanten Maßnahmen umgesetzt werden, was nicht der Fall ist. Die Maßnahmen müssten in umgesetzte und verworfene Maßnahmen kategorisiert werden. Diese Informationen könnten FMEA-Teams zur Verfügung gestellt werden und bei der Definition neuer Maßnahmen wichtig sein. Zudem müsste der Wissensgraph um fortlaufende Verbesserung erweitert werden, da diese bisher noch nicht korrekt erfasst wird.

Das Übersetzungsprogramm von der tabellarischen Struktur in den FMEA-Wissensgraphen müsste um die Möglichkeit ergänzt werden, mehrere Tabellenzeilen pro Eintrag in den Wissensgraphen übersetzen zu können. Bisher wird davon ausgegangen, dass z.B. alle Vermeidungsmaßnahmen in eine Zelle geschrieben werden. Neben der Übersetzung von Excel-Arbeitsmappen in das TURTLE-Format, könnte diese Art von Übersetzung auch verwendet werden, um Daten aus anderen tabellarischen Strukturen, wie z.B. Daten aus SQL-Datenbanken in das TURTLE-Format zu bringen. Nur würden dabei keine Zellen, sondern Einträge ausgelesen und übersetzt werden. Alternativ können SQL-Daten, wie alle struktu-

²⁸² o. V., „Aus Plato und iqs wird Peakavenue“, Quality Engineering, 24. März 2023, <https://quality-engineering.industrie.de/top-news/news-produkte/aus-plato-und-iqs-wird-peakavenue/>.

²⁸³ Vgl. o. V., „FMEA - PeakAvenue“, zugegriffen 24. April 2024, <https://www.peakavenue.com/software/e1ns-engineering/e1ns-methods/fmea>.

7. Zusammenfassung und Ausblick

rierten Daten, auch über OntoRefine in GraphDB importiert und anschließend über ein sogenanntes *Mapping* in einen Wissensgraphen übersetzt werden, ohne Daten in einer TURTLE-datei zwischenspeichern zu müssen.²⁸⁴ Da der Fokus dieser Arbeit vor allem auf der Erstellung des Wissensgraphen liegt und die TURTLE-Datei für Überprüfungen benötigt wird, wird diese Möglichkeit zunächst nicht genauer betrachtet. Für zukünftige Anwendungen sollte die TURTLE-Datei jedoch in einen SPARQL-Code für das Mapping übersetzt werden, sodass alle strukturierten Daten in den Wissensgraphen eingebunden werden können.

In dieser Arbeit werden viele optimistische Annahmen zu Funktionen der Software getroffen, mit der die FMEA-Graph-Datenbank interagiert. Dazu gehören Annahmen über die Ermittlung der Fehlerart bei PLM-Software und Konzentration auf den konkreten Anwendungsfall des OA. Da nicht viele Industrie 4.0-Systeme dieselben Funktionalitäten wie der OA besitzen, könnte sich die Integration der PFMEA-MSR in den Fertigungsprozess deutlich schwieriger gestalten und weitere Informationen erfordern. Ein Beispiel dafür wäre die Speicherung von Fehlerdaten in der Klasse *:AufgetretenerFehler*, die nur für einen Monat gespeichert werden, da angenommen wird, dass der OA einen Fehlerspeicher für historische und aktuelle Daten hat und die Unterteilung automatisiert vornimmt.

²⁸⁴ Vgl. Radostin Nanov, „Loading Data in GraphDB: Best Practices and Tools“, *Ontotext* (blog), 1. April 2022, <https://www.ontotext.com/blog/loading-data-in-graphdb-best-practices-and-tools/>.

III. Quellenverzeichnis

- ADAC Redakiton. „Kühlflüssigkeit: Auf die Mischung kommt es an“, 1. Dezember 2022. <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/tipps-zum-tanken/kuehlmit-tel-motor/>.
- Alexander S. Gillis. „What Is Exception Handling? - SearchSoftwareQuality“. Software Quality. Zugegriffen 20. April 2024. <https://www.techtarget.com/searchsoftwarequality/definition/error-handling>.
- Ali, Waqas, Muhammad Saleem, Bin Yao, Aidan Hogan, und Axel-Cyrille Ngonga Ngomo. „A Survey of RDF Stores & SPARQL Engines for Querying Knowledge Graphs“. arXiv, 13. Oktober 2021. <http://arxiv.org/abs/2102.13027>.
- Andree, Kerstin, Sven Ihde, Mathias Weske, und Luise Pufahl. „An Exception Handling Framework for Case Management“. *Software and Systems Modeling* 21, Nr. 3 (Juni 2022): 939–62. <https://doi.org/10.1007/s10270-022-00993-3>.
- Bechberger, Dave, und Josh Perryman. *Graph Databases in Action*. Simon and Schuster, 2020.
- Bertsche, Bernd, und Gisbert Lechner, Hrsg. „FMEA — Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse“. In *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten*, 106–59. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. https://doi.org/10.1007/3-540-34996-0_4.
- Biegert, Uwe. „Sichere Automatisierungssysteme mit Hilfe qualitativer Modellierung und quantitativer Risikobewertung“, o. J.
- BMW AG. „Turbolader“. Teilegeschäft. [leebsmann24.de](http://www.leebsmann24.de), 2017. https://www.leebsmann24.de/bmw-ersatzteile/view/btdetail/?series=f15&typ=ks61&og=01&hg=11&bt=11_5088.
- BMW M57/N57 Turboladerkunde I Ist das wirklich ein BiTurbo??? oder doch Registeraufladung?*, 2022. <https://www.youtube.com/watch?v=3OJxiDE77o4>.
- Bodendorf, Freimut. *Daten und Wissen*. Berlin: Springer, 2006.
- Clemens Hug. „Präsentation Bosch Semantic Stack“, 23. April 2024.
- Deutsche Gesellschaft für Qualität, Hrsg. *FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*. 5. Auflage. DGQ-Band 13–11. Berlin Wien Zürich: Beuth, 2012.
- Dittmann, Lars Uwe. *OntoFMEA: Ontologiebasierte Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*. 1. Aufl. Gabler Edition Wissenschaft : Information - Organisation - Produktion. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl, 2007.
- Dr. Martin Paping. „Sieben typische Schwachstellen in der Produktentwicklung“, o. J.
- Dürst, Martin J., und Michel Suignard. „Internationalized Resource Identifiers (IRIs)“. Request for Comments. Internet Engineering Task Force, Januar 2005. <https://doi.org/10.17487/RFC3987>.
- Gleißner, Werner, und Frank Romeike. „Anforderungen an die Softwareunterstützung für das Risikomanagement“. *Controlling und Management* 49, Nr. 2 (April 2005): 154–64. <https://doi.org/10.1007/BF03255004>.
- Grosser, Holger. „Risikobasierter Ansatz“. ISO9001. Zugegriffen 12. November 2023. <https://iso9001.info/iso-9001-2015-2/risikobasierter-ansatz/>.
- Hering, Ekbert, und Alexander Schloske. *Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse: Methode zur vorbeugenden, systematischen Qualitätsplanung unter Risikogesichtspunkten*. essentials. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-25763-7>.
- Isermann, Rolf. „Das mechatronische Kraftfahrzeug“. In *Fahrdynamik-Regelung: Modellbildung, Fahrerassistenzsysteme, Mechatronik*, herausgegeben von Rolf Isermann, 1–26. Wiesbaden: Vieweg, 2006. https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9049-8_1.
- Karl, Christina. „So stellen Unternehmen die Zukunftsfähigkeit ihrer Software sicher“. *Avision* (blog), 25. Mai 2020. <https://www.avision-it.de/2020/05/25/so-stellen-unternehmen-die-zukunftsaehigkeit-ihrer-software-sicher/>.

III. Quellenverzeichnis

- Kaufmann, Michael, und Andreas Meier. *SQL- & NoSQL-Datenbanken: 9. erweiterte und aktualisierte Auflage*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2023. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-67092-7>.
- Kocas, Hakan. „Geschichtliche Entwicklung der FMEA - FMEA.NET - FMEA - Fehler Möglichkeits & Einfluss Analyse“, 8. Juni 2019. <https://www.fmea.net/lexikon/geschichtliche-entwicklung-der-fmea/>.
- Lanquillon, Carsten, und Sigurd Schacht. *Knowledge Science – Grundlagen: Methoden der Künstlichen Intelligenz für die Wissensextraktion aus Texten*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-41689-8>.
- Lasi, Heiner, Peter Fettke, Hans-Georg Kemper, Thomas Feld, und Michael Hoffmann. „Industrie 4.0“. *WIRTSCHAFTSINFORMATIK* 56, Nr. 4 (August 2014): 261–64. <https://doi.org/10.1007/s11576-014-0424-4>.
- Leng, Jiewu, Weinan Sha, Baicun Wang, Pai Zheng, Cunbo Zhuang, Qiang Liu, Thorsten Wuest, Dimitris Mourtzis, und Lihui Wang. „Industry 5.0: Prospect and Retrospect“. *Journal of Manufacturing Systems* 65 (Oktober 2022): 279–95. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.09.017>.
- Lober, Andreas, Joel Lehmann, Julian Reichwald, Lisa Ollinger, und Hartwig Baumgärtel. „Flexible Skill-Based Production Systems through Novel OPC UA Design Approaches“. *IFAC-PapersOnLine* 56, Nr. 2 (2023): 3654–59. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1529>.
- Michel, Stefanie, und Wiegert, Bernhard. „Symptome für einen Lagerschaden frühzeitig erkennen“, 24. September 2007. <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/symptome-fuer-einen-lagerschaden-fruehzeitig-erkennen-a-114207/>.
- Nanov, Radostin. „Loading Data in GraphDB: Best Practices and Tools“. *Ontotext (blog)*, 1. April 2022. <https://www.ontotext.com/blog/loading-data-in-graphdb-best-practices-and-tools/>.
- Nida Fatima. „Verschiedene Arten von Datenbanken im Jahr 2024: Ein umfassender Leitfaden“. *Astera*, 24. Januar 2024. <https://www.astera.com/de/type/blog/a-quick-overview-of-different-types-of-databases/>.
- o. V. „Abgaskrümmer-AGR - BMW X5 F15 X5 40dX SAV (KS61) - BMW Ersatzteile - leebmann24.de“. Zugegriffen 25. Dezember 2023. https://www.leebmann24.de/bmw-ersatzteile/view/btdetail/?series=f15&typ=ks61&og=01&hg=11&bt=11_5428.
- . „Alle Produkte – Microsoft Azure Marketplace“. Zugegriffen 24. April 2024. https://azuremarketplace.microsoft.com/de-de/marketplace/apps/ontotextad1692361256062.graphdb_enterprise_12_core_cluster?tab=overview.
- . „Aus Plato und iqs wird Peakavenue“. *Quality Engineering*, 24. März 2023. <https://quality-engineering.industrie.de/top-news/news-produkte/aus-plato-und-iqs-wird-peakavenue/>.
- . „AWS Marketplace: GraphDB Enterprise 12-Core Cluster“. Zugegriffen 24. April 2024. <https://aws.amazon.com/marketplace/pp/prodview-rceq2cijjdipy>.
- . „Betriebssysteme - Marktanteile weltweit bis Januar 2024“. Statista. Zugegriffen 5. April 2024. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/157902/umfrage/marktanteil-der-genutzten-betriebssysteme-weltweit-seit-2009/>.
- . „Bosch Semantic Stack“. Bosch Connected Industry. Zugegriffen 6. April 2024. <https://www.bosch-connected-industry.com/de/de/portfolio/bosch-semantic-stack/>.
- . „Datenbank/SQL-Grundlagen – SELFHTML“, o. J. https://wiki.selfhtml.org/wiki/Datenbank/SQL-Grundlagen#Datens.C3.A4tze_hinzuf.C3.BCgen_und_.C3.A4ndern.
- . „Doppelt aufgeladen: So funktioniert ein Biturbo - LeasingTime.de Magazin“. Zugegriffen 12. November 2023. <https://www.leasingtime.de/blog/736-doppelt-aufgeladen-so-funktioniert-ein-biturbo>.
- . „e1ns FMEA“. Zugegriffen 3. April 2024. <https://forms.zohopublic.eu/plato/form/EN-DemoRegistrationforUSCloud/formperma/0NwQ04NOwXX-Zcey-NAS1LQIJFyl8KgKouVbsUb8XvQ>.
- . „e1ns FMEA Präsentation“, o. J.
- . „FMEA - PeakAvenue“. Zugegriffen 24. April 2024. <https://www.peakavenue.com/software/e1ns-engineering/e1ns-methods/fmea>.

III. Quellenverzeichnis

- . „FullSemanticsNamedIndividuals - OWL“, 1. Juni 2008. <https://www.w3.org/2007/OWL/wiki/FullSemanticsNamedIndividuals>.
- . „Graph Database (Graphdatenbank) erklärt“. IONOS Digital Guide, 7. November 2019. <https://www.ionos.de/digitalguide/hosting/hosting-technik/graphdatenbank/>.
- . „KI-Gesetz: erste Regulierung der künstlichen Intelligenz“. Themen | Europäisches Parlament, 8. Juni 2023. <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20230601STO93804/ki-gesetz-erste-regulierung-der-kunstlichen-intelligenz>.
- . „LE GEMMA“. Zugegriffen 21. April 2024. <https://www.technologuepro.com/cours-automate-programmable-industriel/Le-GEMMA.htm>.
- . „MIL-STD-1629A“. Washington, DC, 1. November 1980.
- . „Office Visual Basic for Applications (VBA)-Referenz“, 7. April 2023. <https://learn.microsoft.com/de-de/office/vba/api/overview/>.
- . „OWL - Semantic Web Standards“. Zugegriffen 12. April 2024. <https://www.w3.org/OWL/>.
- . „OWL 2 Web Ontology Language Structural Specification and Functional-Style Syntax (Second Edition)“. Zugegriffen 12. April 2024. https://www.w3.org/TR/2012/REC-owl2-syntax-20121211/#Entities.2C_Literals.2C_and_Anonymous_Individuals.
- . „OWL Reasoning Examples“, 3. Dezember 2003. <http://owl.man.ac.uk/2003/why/latest/>.
- . „RDF - Semantic Web Standards“. Zugegriffen 12. April 2024. <https://www.w3.org/2001/sw/wiki/RDF>.
- . „RDF 1.1 Turtle“. Zugegriffen 12. April 2024. <https://www.w3.org/TR/turtle/>.
- . „RDF Schema 1.1“. Zugegriffen 12. April 2024. <https://www.w3.org/TR/rdf-schema/>.
- . „Referenzarchitektur für den autonomen Fahrzeugbetrieb - Microsoft mobility reference architecture“, 15. April 2024. <https://learn.microsoft.com/de-de/industry/mobility/architecture/ra-mobility-avops>.
- . „SPARQL 1.1 Query Language“. Zugegriffen 12. April 2024. <https://www.w3.org/TR/sparql11-query/>.
- . „Spezifikation | QUALITY.DE“, 28. Januar 2015. <https://www.quality.de/lexikon/spezifikation/>.
- . „SWRL: A Semantic Web Rule Language Combining OWL and RuleML“, 21. Mai 2004. <https://www.w3.org/submissions/SWRL/#7.1>.
- . „Unterdruckdosen – Steuerung eurer Wastegates“. BAR-TEK. Zugegriffen 18. November 2023. <https://www.bar-tek-tuning.de/produkte/motoren-teile/turbolader/druckdosen/>.
- . „Using the GraphDB REST API — GraphDB 10.6 documentation“. Zugegriffen 14. April 2024. <https://graphdb.ontotext.com/documentation/10.6/using-the-graphdb-rest-api.html>.
- . „Was ist eine Datenbank?“ Zugegriffen 6. April 2024. <https://www.oracle.com/de/database/what-is-database/>.
- . „What Is Inference?“ Ontotext, o. J. <https://www.ontotext.com/knowledgehub/fundamentals/what-is-inference/>.
- o.V. „DataLyzer FMEA Präsentation“, o. J.
- . „DataLyzer FMEA Software | DFMEA, Prozessablauf, PFMEA und Produktlenkungsplan“, 21. April 2022. <https://datalyzer.com/de/produkte/fmea-software/>.
- . „Details“. Zugegriffen 26. September 2023. <https://www.aiag.org/store/publications/details?ProductCode=FMEAAV-1>.
- . „Gesamtentwicklung des deutschen Außenhandels ab 1950“. Statistisches Bundesamt (Destatis), 11. August 2023. https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Aussenhandel/Tabellen/gesamtentwicklung-aussenhandel.pdf?__blob=publicationFile.
- . „J1739_199407: Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design Fmea), Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process Fmea), and Potential Failure Mode and Effects Analysis for Machinery (Machinery Fmea) - SAE International“. Zugegriffen 4. Oktober 2023. https://www.sae.org/standards/content/j1739_199407/.

III. Quellenverzeichnis

- PeakAvenue GmbH. „FMEA in der Cloud - PeakAvenue“. Zugegriffen 3. April 2024. <https://www.peakavenue.de/software/e1ns-engineering/fmea-in-der-cloud>.
- Pfeufer, Hans-Joachim. *FMEA – Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2021.
- Pischinger, Stefan, und Ulrich Seiffert, Hrsg. *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-25557-2>.
- Price, Chris, und Neil Taylor. „Multiple Fault Diagnosis from FMEA“, o. J.
- Probst, Gilbert, Steffen Raub, und Kai Romhardt. *Wissen managen: Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-8349-4563-1>.
- Pucher, Helmut, und Karl Zinner. *Aufladung von Verbrennungsmotoren: Grundlagen, Berechnungen, Ausführungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-28990-3>.
- Rosenow, Jan. „Borg-Warner setzt BMW-Motoren unter Druck“. »kfz-betrieb«, 30. November 2017. <https://www.kfz-betrieb.vogel.de/borg-warner-setzt-bmw-motoren-unter-druck-a-667418/>.
- Roth, Armin, Hrsg. *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48505-7>.
- Schrader, Bess. „What’s the Difference Between an Ontology and a Knowledge Graph?“ Enterprise Knowledge, 15. Januar 2020. <https://enterprise-knowledge.com/whats-the-difference-between-an-ontology-and-a-knowledge-graph/>.
- Schumacher, Dieter, Harald Legler, und Birgit Gehrke. „Marktergebnisse bei forschungsinintensiven Waren und wissensintensiven Dienstleistungen: Außenhandel, Produktion und Beschäftigung“, o. J.
- Seo, Sumin, Heeseon Cheon, Hyunho Kim, und Dongseok Hyun. „Structural Quality Metrics to Evaluate Knowledge Graphs“. arXiv, 9. Dezember 2022. <http://arxiv.org/abs/2211.10011>.
- Soldatos, John, Hrsg. *Artificial Intelligence in Manufacturing: Enabling Intelligent, Flexible and Cost-Effective Production Through AI*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-46452-2>.
- Spreafico, Christian, Davide Russo, und Caterina Rizzi. „A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents“. *Computer Science Review* 25 (1. August 2017): 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.05.002>.
- Tietjen, Thorsten, und André Decker. *FMEA-Praxis: Einstieg in die Risikoabschätzung von Produkten, Prozessen und Systemen*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2020.
- Vathoopan, Milan, Kirill Dorofeev, und Alois Zoitl. „31 Skill-Based Engineering of Automation Systems: Use Case and Evaluation“. In *31 Skill-Based Engineering of Automation Systems: Use Case and Evaluation*, 555–78. De Gruyter Oldenbourg, 2021. <https://doi.org/10.1515/9783110745979-033>.
- Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA). *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monitoring & Systemreaktion*. 1. Aufl. Berlin, 2021.
- Vogel-Heuser, Birgit und Bauernhansl, Thomas. *Handbuch Industrie 4.0. Bd. 1: Produktion*. 2., Erweiterte und Bearbeitete Auflage. Bd. 1. Springer Reference Technik. Berlin; [Heidelberg]: Springer Vieweg, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-45279-0>.
- Vogg, Ingrid, und Steffen Fleßa. *Qualitätsmanagement in der ambulanten Versorgung*. Wiesbaden: Gabler, 2011. <https://doi.org/10.1007/978-3-8349-6474-8>.
- Vogt, Maximilian, Adrian Rips, und Claus Emmelmann. „Augmented Reality in der additiven Produktion: FMEA als Werkzeug zur Erstellung von aufwandsgerechten AR-Inhalten für die Mensch-Maschine-Interaktion in der digitalen Produktion“. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 115, Nr. 11 (1. November 2020): 800–804. <https://doi.org/10.3139/zwf-2020-1151114>.
- Völker, Jonas. „Warum es Industrie 5.0 nicht gibt“. *atpinfo.de* (blog), 26. April 2024. <https://atpinfo.de/kolumne/warum-es-industrie-5-0-nicht-gibt/>.

III. Quellenverzeichnis

- Wälder, Konrad, und Olga Wälder. *Methoden zur Risikomodellierung und des Risikomanagements*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-13973-5>.
- Werner Dilger. „Multiagentensysteme“, 2004.
- Wicks, Angela M., und Christopher J. Roethlein. „A Satisfaction-Based Definition of Quality“. *The Journal of Business and Economic Studies* 15, Nr. 1 (Spring 2009): 82-97, 110-111. <https://www.proquest.com/docview/235806523/abstract/E7F2B19ADF574A2CPQ/1>.
- Yumpu.com. „2 Ausfalleffektanalyse nach DIN 25 448 (FMEA)“. yumpu.com. Zugegriffen 9. September 2023. <https://www.yumpu.com/de/document/read/18198442/2-ausfalleffektanalyse-nach-din-25-448-fmea>.
- Zhang, Tieling, Wei Long, und Yoshinobu Sato. „Availability of Systems with Self-Diagnostic Components—Applying Markov Model to IEC 61508-6“. *Reliability Engineering & System Safety* 80, Nr. 2 (Mai 2003): 133–41. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(03\)00004-8](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(03)00004-8).
- ПРОИЗВОДСТВО АВТОМОБИЛЕЙ BMW - Производственный процесс на заводе двигателей, 2022. <https://www.youtube.com/watch?v=iky1sY5R0M0>.

IV. Abkürzungsverzeichnis

A	Auftreten
AIAG	Automotive Industry Action Group
API	Application Programming Interface
APQP	Advanced Product Quality Planning
B	Bedeutung
CI	Class Instantiation
CTE	Common Table Expressions
DBMS	Datenbankmanagementsystem
DFMEA	Design-FMEA
DT	Digitale Zwillinge
E	Entdeckung
EM	Entdeckungsmaßnahmen
EU	Europäische Union
FB	Funktionsbausteine
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
FMEA-MSR	FMEA-Ergänzung für Monitoring und Systemreaktion
GEMMA	Guide d'Etude des Modes de Marche et d'Arrêt
H	Häufigkeit
IATF	International Automotive Task Force
ICR	Instantiated Class Ratio
IMI	Inverse Multiple Inheritance
IPR	Instantiated Property Ratio
ISO	der International Organization for Standardization
KI	Künstliche Intelligenz
M	Monitoring
MAS	Multi-Agenten-Systeme, Multi-Agenten-Systeme
MRK	Mensch Roboter Kollaboration
OA	Orchestration Agent
OWL	W3C Web Ontology Language
PFMEA	Prozess-FMEA
PLCs	Programmable Logic Controllers
PLM	Product Lifecycle Management
PLZ	Produktlebenszyklus
RDBMS	Relationales Datenbankmanagementsystem

IV. Abkürzungsverzeichnis

RDF	<i>Resource Description Framework</i>
RDFS.....	<i>Resource Description Framework Schema</i>
REST	<i>Representational State Transfer</i>
RGA.....	<i>Reifegradabsicherung</i>
SPA	<i>Subclass Property Acquisition</i>
SPARQL	<i>SPARQL Protocol and Query Language</i>
SPI.....	<i>Subclass Property Instantiation</i>
SPS	<i>Speicherprogrammierbare Steuerung</i>
SQL	<i>Structured Query Language</i>
SWRL	<i>Semantic Rule Web Language</i>
TURTLE.....	<i>Terse RDF Triple Language</i>
URI	<i>Uniquie Resource Identifier</i>
UTF	<i>Unicode Transformation Format</i>
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>
VDA.....	<i>Verband der Automobilindustrie</i>
VM.....	<i>Vermeidungsmaßnahmen</i>
VTG.....	<i>Variable Turbinengeometrie</i>
WMS.....	<i>Warehouse Management System</i>
XML	<i>Extensible Markup Language</i>
XSD	<i>XML Schema Definition</i>

V. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Abgasturbolader-Baugruppe N5D30B	16
Abbildung 2: Beispiel Betrachtungssystem System-DFMEA	18
Abbildung 3: Beispiel Verschiebung der Betrachtungselemente von System- zu Komponenten-DFMEA.....	19
Abbildung 4: Beispiel Betrachtungssystem Komponenten-DFMEA.....	19
Abbildung 5: Warnmeldung bei Fehler im Ladedrucksystem	21
Abbildung 6: Fehlerspeichereintrag bei Fehler in Ladedrucksystem.....	21
Abbildung 7: Beispiel Betrachtungssystem PFMEA	23
Abbildung 8: Genauerer Blick auf Abgaskrümmervorbild für Beispiel-PFMEA	24
Abbildung 9: 7 Schritte der FMEA nach VDA & AIAG FMEA-Handbuch	27
Abbildung 10: Allgemeines FMEA-Formblatt.....	28
Abbildung 11: Formblatt Ergänzung FMEA-MSR	29
Abbildung 12: Vorbereitung und Planung Einleitung	30
Abbildung 13: Strukturanalyse Einleitung.....	32
Abbildung 14: Aufbau Strukturbaum DFMEA	33
Abbildung 15: Beispiel Strukturbaum Turbolader-Baugruppe	33
Abbildung 16: Aufbau Strukturbaum PFMEA	35
Abbildung 17: Strukturbaum Beispiel-PFMEA.....	36
Abbildung 18: Funktionsanalyse Einleitung.....	37
Abbildung 19: Funktionsbaum Beispiel-DFMEA.....	38
Abbildung 20: Prozessdiagramm Montagetätigkeiten.....	39
Abbildung 21: Funktionsbaum Beispiel-PFMEA	40
Abbildung 22: Fehleranalyse Einleitung	41
Abbildung 23: Fehlernetz Beispiel-DFMEA	42
Abbildung 24: Fehlerbaum Beispiel-PFMEA	43
Abbildung 25: Risikoanalyse Einleitung	44
Abbildung 26: Optimierung Einleitung	46
Abbildung 27: Ergebnisdokumentation Einleitung	53
Abbildung 28: Gesamtprozess FMEA-Software	56
Abbildung 29: Möglicher Aufbau Softwareunterstützung für FMEA mit PLM-Software.....	64
Abbildung 30: intelligentes skill-basiertes Steuerungssystem mit Orchestration Agent.....	65
Abbildung 31: Möglicher Aufbau Softwareunterstützung für FMEA mit OA.....	66
Abbildung 32: Architektur und Komponenten eines Informationssystems.....	67
Abbildung 33: Entscheidungsbaum Nutzung Graph-Datenbank.....	73
Abbildung 34: Beispiel Prefixes.....	77

V. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 35: Oberste Konzeptebene der FMEA-Ontologie nach VDA 96.....	82
Abbildung 36: Input-Output-Betrachtung des ersten Schritts der FMEA.....	83
Abbildung 37: Input-Output-Betrachtung des zweiten Schritts der FMEA.....	84
Abbildung 38: Input-Output-Betrachtung des dritten Schritts der FMEA.....	85
Abbildung 39: Input-Output-Betrachtung des vierten Schritts der FMEA.....	86
Abbildung 40: Input-Output-Betrachtung des fünften Schritts der FMEA.....	87
Abbildung 41: Input-Output-Betrachtung des sechsten Schritts der FMEA.....	88
Abbildung 42: Input-Output-Betrachtung des siebten Schritts der FMEA.....	89
Abbildung 43: Legende Graphische Darstellung.....	91
Abbildung 44: owl:DataProperties der Klasse FMEA.....	92
Abbildung 45: owl:ObjectProperties der Klasse FMEA aus erstem Schritt.....	92
Abbildung 46: Grundlegender Aufbau TURTLE-Code.....	93
Abbildung 47: Klassen nach FMEA-Schritt 1.....	94
Abbildung 48: Klassen nach erster Bearbeitung FMEA-Schritt 2.....	95
Abbildung 49: Finale Darstellung der Klassen in FMEA-Schritt 2.....	95
Abbildung 50: Graph mit betrachteten Klassen in FMEA-Schritt 3.....	97
Abbildung 51: Modell mit betrachteten Klassen in FMEA-Schritt 4.....	98
Abbildung 52: Modell mit betrachteten Klassen in FMEA-Schritt 5.....	99
Abbildung 53: Verworfenes alternatives Modell der betrachteten Klassen in FMEA-Schritt 5	100
Abbildung 54: Modell mit betrachteten Klassen in FMEA-Schritt 6.....	101
Abbildung 55: Modell des Grundkonzept der FMEA-MSR bis zum FMEA-MSR-Schritt 5	102
Abbildung 56: Modell mit betrachteten Klassen in FMEA-MSR-Schritt 6.....	103
Abbildung 57: Oberste Konzeptebene der FMEA-Ontologie nach VDA & AIAG FMEA- Handbuch.....	104
Abbildung 58: Logische Infrastruktur Datenmigration von FMEA-Formblatt in Wissensgraph	106
Abbildung 59: Beispielhaftes Datenformat des FMEA-Formblatts.....	107
Abbildung 60: Programmfragment Ausleseprogramm.....	108
Abbildung 61: Datenmigration von FMEA-Formblatt in GraphDB.....	109
Abbildung 62: SPARQL-Abfrage für Erstellung von indirekten Vermeidungsmaßnahmen	110
Abbildung 63: Verortung der FMEA-Graph-Datenbank im Exception Handling.....	113
Abbildung 64: SPS-Programm von PLCs mit Betriebsartenteil.....	114
Abbildung 65: Objekte in Beispiel-PFMEA.....	116
Abbildung 66: Flussdiagramm Prozess Beispiel-PFMEA-MSR.....	116

V. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 67: GEMMA-Diagramm auf Systemebene.....	124
Abbildung 68: Aufbau der Klasse FMEA nach Hinzufügen von PFMEAMSR	127
Abbildung 69: 8 Schritte der FMEA nach DIN 25448.....	155
Abbildung 70: FMEA-Formblatt nach DIN 25448	156
Abbildung 71: FMEA-Formblatt nach VDA-Band vier (1986).....	164

VI. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Nomenklatur Beispiel-PFMEA.....	24
Tabelle 2: FMEA-Zeitplanung mit Bezug auf RGA-Phasen.....	26
Tabelle 3: Schritt 1 Formblatt mit Erläuterung	31
Tabelle 4: Gegenüberstellung 5Z in Beispiel-DFMEA und Beispiel-PFMEA	32
Tabelle 5: Schritt 2 Beispiel-DFMEA ausgefüllt.....	34
Tabelle 6: Schritt 2 Beispiel-PFMEA Formblatt ausgefüllt.....	36
Tabelle 7: Schritt 3 Beispiel-DFMEA in Formblatt ausgefüllt.....	38
Tabelle 8: Schritt 3 Beispiel-PFMEA Formblatt ausgefüllt.....	40
Tabelle 9: Mögliche Abstufung der Fehler für Beispiel-DFMEA	41
Tabelle 10: Schritt 4 Beispiel-DFMEA Formblatt ausgefüllt.....	42
Tabelle 11: Schritt 4 Beispiel-PFMEA ausgefüllt	43
Tabelle 12: Schritt 5 Beispiel-DFMEA	45
Tabelle 13: Schritt 5 Beispiel-PFMEA.....	46
Tabelle 14: Schritt 6 Beispiel-DFMEA	47
Tabelle 15: DFMEA für Beispiel-FMEA-MSR.....	49
Tabelle 16: Schritt 5 Beispiel-FMEA-MSR	51
Tabelle 17: Schritt 6 Beispiel-FMEA-MSR (Teil 1 von 2).....	52
Tabelle 18: Schritt 6 Beispiel-FMEA-MSR (Teil 2 von 2).....	53
Tabelle 19: Beispiel SQL-Datenbank.....	68
Tabelle 20: Wichtige Begriffe aus erstem Schritt der FMEA	84
Tabelle 21: Wichtige Begriffe aus zweitem Schritt der FMEA	85
Tabelle 22: Wichtige Begriffe aus drittem Schritt der FMEA	85
Tabelle 23: Wichtige Begriffe aus viertem Schritt der FMEA.....	86
Tabelle 24: Wichtige Begriffe aus fünftem Schritt der FMEA	87
Tabelle 25: Wichtige Begriffe aus sechstem Schritt der FMEA	88
Tabelle 26: Wichtige Begriffe aus der FMEA-MSR	89
Tabelle 27: Schritt 2 bis 4 der PFMEA für Beispiel PFMEA-MSR	118
Tabelle 28: Schritt 5 und 6 der PFMEA für Beispiel-PFMEA-MSR.....	119
Tabelle 29: MSR-Ergänzung zu Schritt 5 der Beispiel-PFMEA-MSR.....	120
Tabelle 30: MSR-Ergänzung zu Schritt 6 der Beispiel-PFMEA-MSR.....	121
Tabelle 31: Definition der Betriebsarten für GEMMA-Diagramm auf Systemebene	122
Tabelle 32: Zustandsübergänge für GEMMA-Diagramm auf Systemebene.....	123
Tabelle 33: Gegenüberstellung Kennzahlen mit bekannten Wissensgraphen	135
Tabelle 34: Beispiel Vergleich Bewertung RPZ.....	158
Tabelle 35: Beispielhaftes FMEA-Fragment nach DIN 25448.....	159
Tabelle 36: Beispiel zu detaillierter Aufschlüsselung der Fehlerfolgen.....	160
Tabelle 37: Risikomatrizen nach VDA-Band vier (1986).....	163

VII. Anhang

VII.I Entwicklung der FMEA

Die FMEA hat sich als essenzieller Bestandteil der Qualitätssicherung etabliert, hat sich seit ihrer Einführung allerdings verändert.²⁸⁵ Die FMEA hat sich, wie alle methodischen Techniken, aus dem Bedürfnis nach einem systematischen Ansatz zur Lösung eines Problems entwickelt. Die Weiterentwicklung der FMEA ist bis heute ein stetiger Prozess, der auch für die Evaluation von Software für die FMEA-Betreuung relevant ist. Ein wichtiges Bewertungskriterium von Software ist die Zukunftsfähigkeit, die stark vom Einsatzbereich abhängig ist.²⁸⁶ Auf die Softwareunterstützung in der FMEA-Betreuung bezogen, wäre folglich die Einsetzbarkeit der Software bei Veränderungen des FMEA-Standards von großer Bedeutung. Um die zukünftigen Entwicklungen der FMEA prognostizieren zu können, ist es notwendig, ihre historische Entwicklung näher zu beleuchten.

VII.I.I Einführung

Seit ihrer Einführung durch die US-Armee im Jahr 1949, hat die FMEA umfangreiche Veränderungen erfahren und wurde in zahlreichen Branchen, beginnend mit der Luft- und Raumfahrtindustrie, angewendet und weiterentwickelt.²⁸⁷ Eine der ersten Branchen, die von der FMEA profitierte und diese weiterentwickelte, war die Luft- und Raumfahrtindustrie. Diese Methode wurde insbesondere für die Apollo-Missionen der NASA (National Aeronautics and Space Administration) eingesetzt, da ein Versagen technischer Systeme in den sensiblen Bedingungen dieser Missionen katastrophale Folgen gehabt hätte.²⁸⁸ Wichtige Literatur zur frühen FMEA-Entwicklung stellt der Militär-Standard MIL-STD-1629A dar, welcher 1965 erstmals die FMEA-Methode beschrieb.²⁸⁹ Seit den 80er Jahren als FMECA (failure mode, effects and criticality analysis) in diesem Standard vermerkt.²⁹⁰

²⁸⁵ Vgl. Bernd Bertsche und Gisbert Lechner, Hrsg., „FMEA — Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse“, in *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten*, VDI-Buch (Berlin, Heidelberg: Springer, 2004), 107, https://doi.org/10.1007/3-540-34996-0_4.

²⁸⁶ Vgl. Christina Karl, „So stellen Unternehmen die Zukunftsfähigkeit ihrer Software sicher“, *Avision* (blog), 25. Mai 2020, <https://www.avision-it.de/2020/05/25/so-stellen-unternehmen-die-zukunftsfahigkeit-ihrer-software-sicher/>.

²⁸⁷ Vgl. Christian Spreafico, Davide Russo, und Caterina Rizzi, „A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents“, *Computer Science Review* 25 (1. August 2017): 19–28, <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.05.002>.

²⁸⁸ Vgl. Bertsche und Lechner, „FMEA — Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse“, 106f.

²⁸⁹ Vgl. Bertsche und Lechner, 106.

²⁹⁰ Vgl. o. V., „MIL-STD-1629A“ (Washington, DC, 1. November 1980), iii.

VII.I.I Einführung

In den daraus folgenden Jahren adaptierten die Kerntechnik und die Automobilindustrie die FMEA.²⁹¹ Der Grundgedanke der FMEA, alle denkbaren Ausfallarten zu ermitteln, die möglichen Ausfallfolgen und -ursachen aufzuzeigen und diesen entgegenzuwirken, blieb jedoch erhalten.²⁹²

Aus der Einführung der FMEA kann geschlossen werden, dass die FMEA-Methode zuerst in Branchen angewandt wurde, in denen die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Produkten besonders kritisch sind. Die Produkte dieser Branchen zeichneten sich durch technisch komplexe Systeme, hohen Koordinationsaufwand und gravierende Folgen im Fehlerfall aus.

Mit steigender Produktkomplexität und verlängerten Lieferketten im Zuge des technologischen Fortschritts und gestiegenen Außenhandelsvolumens in den 1970er Jahren,²⁹³ nahm die Bedeutung systematischer Methoden zur Risikoprävention zu.

1980 wurde die FMEA in Deutschland unter dem Namen „Ausfalleffektanalyse“ in der DIN 25448 normiert. In der DIN 25448 sind zwei FMEA-Arten definiert: Die Prozess- und die Konstruktions-FMEA. Der wesentliche Unterschied dieser beiden Arten liegt in deren Zielsetzungen: Die Konstruktions-FMEA zielt auf die qualitative Gestaltung des Produkts in der Konstruktionsphase, während die Prozess-FMEA Schwachstellen und Störeinflüsse in der Herstellungsphase fokussiert. Die Durchführung der FMEA ist bei beiden FMEA-Arten identisch. Sie erfordert Fachkenntnisse eines interdisziplinären Expertenteams, das in möglichst konstanter Zusammensetzung arbeitet. Die gleichbleibende Zusammensetzung ist relevant für die optimale Nutzung der zunehmenden Routine und Erfahrung, die mit einer FMEA einhergeht.

²⁹¹ Vgl. Bertsche und Lechner, „FMEA — Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse“, 106f.

²⁹² Vgl. Bertsche und Lechner, 106f.

²⁹³ Vgl. Dieter Schumacher, Harald Legler, und Birgit Gehrke, „Marktergebnisse bei forschungsintensiven Waren und wissensintensiven Dienstleistungen: Außenhandel, Produktion und Beschäftigung“, o. J., 32f; Vgl. o.V., „Gesamtentwicklung des deutschen Außenhandels ab 1950“ (Statistisches Bundesamt (Destatis), 11. August 2023), 2, https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Aussenhandel/Tabellen/gesamtentwicklung-aussenhandel.pdf?__blob=publicationFile.

VII.1.1 Einführung

Der Ablauf für die FMEA- Durchführung ist in der DIN 25448 in acht Schritte unterteilt²⁹⁴:

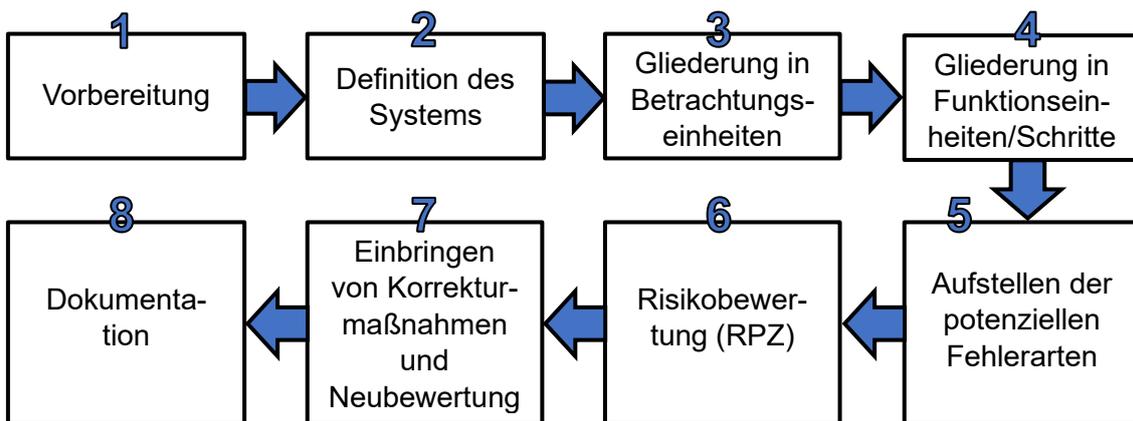


Abbildung 69: 8 Schritte der FMEA nach DIN 25448

- Der erste Schritt zur Durchführung der FMEA ist die Vorbereitung. In der Vorbereitungsphase wird das FMEA-Team gebildet und alle Informationen zusammengetragen. Zu diesen Informationen gehören Checklisten der Qualitätsmerkmale und -probleme, Funktions- und Ablaufdiagramme, Prüf- und Prüfmittelplanung, Zeichnungen und Stücklisten, Systemspezifikationen und Lastenhefte, Prüf-, Versuchs- und Serviceberichte sowie Sicherheitsvorschriften.
- Im zweiten Schritt wird das zu analysierende System für einen besseren Überblick mit allen funktionserfüllenden Elementen dargestellt. Dazu werden weitere Methoden wie bspw. das Blockdiagramm oder die Funktionsanalyse verwendet.
- Mit Bezug darauf wird das System im dritten Schritt in Teilsysteme (Betrachtungseinheiten) unterteilt, für die jeweils Teil-FMEA durchgeführt werden.
- Im Anschluss daran wird im vierten Schritt jede einzelne Funktion oder jeder Prozessschritt separat für jede Betrachtungseinheit aufgeführt.

Nun liegt ein möglichst weit unterteiltes System vor, bei dem alle Funktionen zu jeder Betrachtungseinheit für das gesamte Team ersichtlich sind.

- Im fünften Schritt werden zu jeder Funktionseinheit alle möglichen Fehler bzw. Probleme zusammengetragen und auf potenziell resultierende Folgen und potenzielle Fehlerursachen untersucht.
- Die Risikobewertung erfolgt mit einer sog. Risikoprioritätszahl (RPZ) und wird für jeden Fehler einzeln aus den Schätzfaktoren für Wahrscheinlichkeit des Auftretens, Bedeutung (Tragweite) des Fehlers und Wahrscheinlichkeit der Entdeckung ermittelt. Diese

²⁹⁴ Yumpu.com, „2 Ausfalleffektanalyse nach DIN 25 448 (FMEA)“, yumpu.com, zugegriffen 9. September 2023, <https://www.yumpu.com/de/document/read/18198442/2-ausfalleffektanalyse-nach-din-25-448-fmea>.

VII.I.II Grenzen

ohne die Gliederung in Betrachtungseinheiten und in Funktionsschritte durchzuführen. Dabei besteht jedoch die Gefahr, dass nur bekanntes Wissen analysiert wird, oder dass eine Vermischung von Fehler und Fehlerursache erfolgt.²⁹⁶

VII.I.II Grenzen

Neben spezifischen Fehlern weisen FMEA vorgehensbasierte Grenzen auf. Die FMEA ist eine subjektive Analyse, deren Grundlage der Kenntnisstand des Teams ist, welches die FMEA erstellt.²⁹⁷

Bestimmung der RPZ

Die Bestimmung der RPZ stellt innerhalb einer FMEA den subjektivsten Anteil dar. Erstens besteht dabei die Frage, in welcher Konstellation ein Risiko bspw. die „Wahrscheinlichkeit des Auftretens“ als „unwahrscheinlich“ und in welcher als „sehr gering“ eingestuft wird. Je nach Team können die RPZ der potenziellen Fehler also abweichen. Zweitens beeinflusst jeder einzelne Faktor der RPZ diese maßgeblich. Bewertet ein Team ein Risiko z.B. mit der Auftretenswahrscheinlichkeit zwei (sehr gering), mit der Bedeutung sechs (mäßig schwerer Fehler) und mit der Wahrscheinlichkeit der Entdeckung sechs (geringe Entdeckungswahrscheinlichkeit), so ist die RPZ des gesamten Risikos:

$$2 \cdot 6 \cdot 6 = 72$$

Da die RPZ unter 125 liegt, könnte daraus geschlossen werden, dass das Risiko eine niedrige Priorität aufweist und somit als „unbedeutend“ eingestuft wird. Folglich werden nach der DIN 25448 keine Maßnahmen durchgeführt, um das Risiko zu minimieren.

Ein anderes Team könnte die Auftretenswahrscheinlichkeit des gleichen Fehlers als „gering“ einstufen und würde somit den Wert vier für die Auftretenswahrscheinlichkeit wählen. Ein direkter Vergleich der Bewertungen dieser beiden Teams würde die folgende Tabelle entstehen lassen:

²⁹⁶ Vgl. Hering und Schloske, *Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*, 8f.

²⁹⁷ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 3.

Beschreibung der Zusammenhänge

Tabelle 34: Beispiel Vergleich Bewertung RPZ

	Wahrscheinlichkeit des Auftretens	Bedeutung (Auswirkung beim Kunden)	Wahrscheinlichkeit der Entdeckung	RPZ
Team 1	2	6	6	72
	Sehr gering	Mäßig schwerer Fehler	Sehr gering	Unbedeutend
Team 2	4	6	6	144
	Gering	Mäßig schwerer Fehler	Sehr gering	Bedeutend

Das zweite Team, das eine Auftretenswahrscheinlichkeit von vier („gering“) wählt, erkennt das Risiko als „bedeutend“ an und leitet Minderungsmaßnahmen ein. Die aus einer FMEA gefolgerte Prioritätenliste ist demnach abhängig vom bewertenden Team.

Beschreibung der Zusammenhänge

Die Qualität der gesamten FMEA ist auch in anderen Aspekten dieser von den Aufzeichnungen und den Entscheidungen innerhalb des Teams abhängig.²⁹⁸ Eine Schwierigkeit bei der FMEA-Erstellung besteht in der Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Fehlerfolge, Fehler und Fehlerursache.²⁹⁹ Dies lässt sich am besten anhand eines vereinfachten Beispiels verdeutlichen:

Das zu betrachtende System wäre die Motorölaufuhr in einem Ottomotor.

Als Fehler bzw. Fehlermodus wird angenommen, dass die Ölpumpe weniger Öl fördert als von der Konzeption gefordert.

Die Fehler könnten einerseits eine Überhitzung des Ottomotors und andererseits einen erhöhten Verschleiß von Haupt- und Pleuellagern auf der Kurbelwelle zur Folge haben.³⁰⁰

Für diesen Fehler könnten nun zwei Ursachen in Betracht gezogen werden: eine Verstopfung des Ölfilters und ein Defekt der Ölpumpe.

Dieses Beispiel lässt folgendes FMEA-Fragment nach DIN 25448 entstehen:

²⁹⁸ Vgl. Pfeufer, 3.

²⁹⁹ Vgl. Hering und Schloske, *Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*, 59.

³⁰⁰ Vgl. Stefanie Michel und Wiegert, Bernhard, „Symptome für einen Lagerschaden frühzeitig erkennen“, 24. September 2007, <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/symptome-fuer-einen-lagerschaden-fruehzeitig-erkennen-a-114207/>.

Dokumentation der Risiken

Tabelle 35: Beispielhaftes FMEA-Fragment nach DIN 25448

System	Potenzielle Fehler	Potenzielle Folgen des Fehlers	Potenzielle Ursachen des Fehlers
Ottomotor > Ölzufuhr	Ölpumpe fördert zu wenig Öl	Überhitzung des Motors	Verstopfung des Ölfilters
Ottomotor > Ölzufuhr	Ölpumpe fördert zu wenig Öl	Erhöhter Verschleiß von Haupt- und Pleuellagern	Defekt der Ölpumpe

Wenn das Team während der FMEA die Fehlerursache „Defekt der Ölpumpe“ mit der Fehlerfolge „Überhitzung des Motors“ verbindet, könnte es zu einem Missverständnis kommen. Der „Defekt der Ölpumpe“ könnte aufgrund mangelnder Förderleistung tatsächlich dazu führen, dass der Motor überhitzt. Dieser Defekt könnte aber auch hervorrufen, dass gar kein Öl gefördert wird und somit einen Haupt- und Pleuellagerschaden auf der Kurbelwelle erzeugen, bevor der Motor überhaupt überhitzen kann. Dies wäre die deutlich gravierendere Fehlerfolge als lediglich die Überhitzung des Motors.

Die daraus gefolgerten Maßnahmen bei einer Überhitzung des Motors könnten sich folglich auf eine Erhöhung der Pumpleistung der Ölpumpe konzentrieren, wobei das Problem ein verstopfter Ölfilter wäre. Dadurch würde die FMEA den Zweck der frühzeitigen Fehlererkennung und das Ziel des Aufbaus einer Wissensbasis mindestens teilweise verfehlen.

Um Fehler dieser Art zu verhindern, müssen die Mitglieder des Teams über eine ausreichend breite und tiefe Wissensbasis verfügen und diese auch anwenden. Die Basis für eine qualitativ hochwertige FMEA ist demnach das Expertenwissen und das Qualitätsbewusstsein jedes einzelnen Mitarbeiters.³⁰¹

Dokumentation der Risiken

Zudem stellt die präzise Dokumentation aller Risiken in der FMEA eine weitere Herausforderung dar. Besonders die Fehlerfolgen besitzen die Gefahr einer inkonsistenten Dokumentation. Ingenieure könnten sowohl verschiedene Beschreibungen für unterschiedliche Sachverhalte mit denselben Auswirkungen als auch identische Beschreibungen für unterschiedliche, jedoch ähnliche Folgen in die Dokumentation integrieren. Die Beschreibungen der Fehlerfolgen können also einerseits zu detailliert und andererseits zu allgemein formuliert sein. Dies resultiert in Komplikationen bei der zukünftigen Fehlerdiagnose, da die Zuordnung einer Sammlung von Fehlersymptomen zu Fehlern verkompliziert wird.³⁰²

³⁰¹ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 3; Vgl. Hering und Schloske, *Fehlermöglichkeiten- und Einflussanalyse*, 59.

³⁰² Vgl. Chris Price und Neil Taylor, „Multiple Fault Diagnosis from FMEA“, o. J., 1.

Dokumentation der Risiken

Auf das zuvor genannte, vereinfachte Beispiel mit dem Ottomotor bezogen, wäre es einerseits eine zu detaillierte Aufteilung der Fehlerfolge „Überhitzung des Motors“. Diese Fehlerfolge könnte in „Überhitzung des Motorblocks“ und „Überhitzung der Kurbelwelle“ erfolgen und für Verwirrung bei der Fehlerdiagnose sorgen. Werden den Fehlerfolgen unterschiedliche Fehler mit unterschiedlichen Ursachen zugewiesen, könnten die Symptome seitens der Fehlerdiagnose falsch gewertet werden. Als Visualisierung dieses Sachverhalts dient die nachfolgende Tabelle:

Table 36: Beispiel zu detaillierter Aufschlüsselung der Fehlerfolgen

System	Potenzielle Fehler	Potenzielle Folgen des Fehlers	Potenzielle Ursachen des Fehlers
Motor > Ölkreislauf	Verstopfung des Ölfilters	Überhitzung des Motorblocks	Ablagerungen im Ölsystem
Motor > Ölkreislauf	Einsatz des falschen Motoröls	Überhitzung der Kurbelwelle	Unzureichende Information über benötigte Beschaffenheit des Motoröls

Wenn ein Fehler mit einer erhöhten Motortemperatur in der späteren Verwendung der FMEA auftritt, würde bei der Fehlerdiagnose zunächst nach der Motorblock- oder nach der Kurbelwellentemperatur gesucht werden. Überhitzt aber der Motorblock, so überhitzt aufgrund des gleichen Ölkreislaufs auch die Kurbelwelle. Wird bei der Fehlerdiagnose die erhöhte Motorblocktemperatur zuerst festgestellt, so könnte fehlerhafterweise nach Ablagerungen im Ölzuführungssystem gesucht werden. Dabei kann diese Fehlerfolge mit gleicher Wahrscheinlichkeit von Motoröl mit einer falschen Beschaffenheit verursacht werden. In einem fähigen und beherrschten Fehlerdiagnoseprozess wird eine solche Komplikation zwar gelöst, verbraucht jedoch zeitliche Ressourcen und setzt ein Expertenteam in der Fehlerdiagnose voraus. Das Fehlerdiagnose-Team müsste nämlich mit dem FMEA-Erstellungsteam klären, inwiefern die Fehlerfolgen der Fehler zusammenhängen könnten und wie dieser Zusammenhang untersucht werden kann.

Andererseits ruft auch eine zu allgemeine Beschreibung einer Fehlerfolge ähnliche Komplikationen bei der Fehlerdiagnose hervor.³⁰³ Im obigen vereinfachten Beispiel könnte „Fehlfunktion des Ölsystems“ fehlerhafterweise als Zusammenfassung von „Überhitzung des Motors“ und „Erhöhter Verschleiß der Haupt- und Pleuellager“ dokumentiert werden. Das führt zu dem Ergebnis, dass das Fehlerdiagnose-Team derselben Fehlerursache zahlreiche unterschiedliche Fehler zuordnen kann. Somit entsteht wieder ein zeitlicher Aufwand, um das Spektrum der potenziellen Fehlerursachen für ein Symptom einzugrenzen.

³⁰³ Vgl. Price und Taylor, 1.

Aus diesen Beispielen wird deutlich, dass selbst für die Erstellung einer wiederverwendbaren Dokumentation der FMEA ein interdisziplinäres Expertenteam notwendig ist.

Konzentration auf Einfachfehler

Des Weiteren konzentriert sich die FMEA ausschließlich auf die Betrachtung von Einfachfehlern.³⁰⁴ Gemäß der DIN 25448 erfolgt eine Isolation des Systems, welche durch eine Unterteilung in Betrachtungs- und Funktionseinheiten beschrieben ist.³⁰⁵ Durch diese Isolation werden nur die Fehler bestimmter Komponenten in einem System identifiziert.³⁰⁶ Der Ausfall mehrerer Komponenten und das daraus entstehende Risiko wird in FMEA nach DIN 25448 demnach nicht berücksichtigt. Insbesondere die Interaktion von Software- und Bedienungsfehlern kann zu Mehrfachfehlern führen, welche durch eine solche FMEA übersehen werden.³⁰⁷

Angewandt auf das zuvor genannte Beispiel mit dem Ottomotor, wäre der erste Einfachfehler die Überhitzung des Motors, während der zweite, daraus resultierende Einfachfehler das Nachfüllen von Kühlflüssigkeit durch den Bediener bei heißem Motor darstellt. Da bei warmem Motor das Kühlsystem unter Druck steht, kann das Öffnen des Deckels für das Nachfüllen der Kühlflüssigkeit schwere Verbrühungen auf der Haut des Bedieners verursachen.³⁰⁸ Obwohl diese Fehlerfolge weitaus gravierender ist als eine bloße Überhitzung, wird sie in der FMEA des Ottomotors nicht berücksichtigt. Die in der FMEA eingeleiteten Maßnahmen fokussieren sich ausschließlich auf die Behebung der Motorüberhitzung und vernachlässigen die Informierung des Bedieners bei Überhitzung des Motors.

Zu den zentralen Limitationen der FMEA zählen demnach die Subjektivität und Teamabhängigkeit bei der Auswahl der RPZ, bei der Detaillierung von Fehlern und Fehlerfolge sowie bei der Dokumentation und die Betrachtung von Einfachfehlern.

Weiterentwicklungen der FMEA sollten demnach darauf abzielen, diese Grenzen zu erweitern oder die damit assoziierten Risiken zu minimieren.

VII.II Weiterentwicklung

Im Laufe der 1980er und 1990er Jahre wurden in den USA und im damaligen Westdeutschland substanzielle Weiterentwicklungen der FMEA vorgenommen. Dies umfasst sowohl

³⁰⁴ Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 3.

³⁰⁵ Vgl. Yumpu.com, „2 Ausfalleffektanalyse nach DIN 25 448 (FMEA)“, 66.

³⁰⁶ Vgl. Price und Taylor, „Multiple Fault Diagnosis from FMEA“, 1.

³⁰⁷ Vgl. Uwe Biegert, „Sichere Automatisierungssysteme mit Hilfe qualitativer Modellierung und quantitativer Risikobewertung“, o. J., 1f.

³⁰⁸ Vgl. ADAC Redakiton, „Kühlflüssigkeit: Auf die Mischung kommt es an“, 1. Dezember 2022, <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/tipps-zum-tanken/kuehlmittel-motor/>.

VII.II.I VDA-Band vier (1986)

eine detaillierte, überarbeitete Methodenbeschreibung als auch die Einführung eines neuen FMEA-Typen.

VII.II.I VDA-Band vier (1986)

Die erste konkrete Methodenbeschreibung wurde im VDA-Band vier im Jahre 1986 veröffentlicht und stellte eine automobilspezifische Weiterentwicklung der FMEA nach DIN 25448 dar.³⁰⁹ Eine Innovation in dieser VDA-Ausgabe war eine neue Art der FMEA, die primär der Überprüfung des Sicherheitskonzepts eines allgemeinen Systems auf Systemfehler dient: Die System-FMEA.³¹⁰ Die Einführung bezog sich anfangs lediglich auf mechatronische Systeme, motiviert durch den gestiegenen Einsatz mechatronischer Systeme in Kraftfahrzeugen, darunter ABS und ASR.³¹¹

Der Band vier des VDA definiert außerdem einen Ansatz mit fünf Schritten für die FMEA-Erstellung, der für Prozess-FMEA, Konstruktions-FMEA und System-FMEA nahezu identisch ist:³¹²

- Der erste Schritt ist die Systemstrukturierung. Diese umfasst die Schritte eins bis drei in der DIN 25448, die in Abb.1 dargestellt sind. Dabei wird eine Top-Down-Vorgehensweise angewandt, um Systemelemente aufzuteilen und Einflussfaktoren für diese zu identifizieren. Daraus entsteht je nach FMEA-Art ein sog. Strukturbaum bzw. Prozessstruktur- oder Prozessbaum.³¹³
- Im Anschluss dazu wird im zweiten Schritt eine Funktionszuordnung vorgenommen. Dabei werden den Elementen des Struktur- oder Prozessbaums Funktionen, Produktmerkmale und Prozessmerkmale zugeordnet. Die funktionalen Zusammenhänge der Systemelemente resultieren in einem sog. Funktionsnetz.³¹⁴ Dieser Schritt entspricht dem vierten Schritt in der DIN 25448, erweitert diesen jedoch mit der Erstellung des Funktionsnetztes.

³⁰⁹ Vgl. Bertsche und Lechner, „FMEA — Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse“, 106f; Vgl. Hakan Kocas, „Geschichtliche Entwicklung der FMEA - FMEA.NET - FMEA - Fehler Möglichkeiten & Einfluss Analyse“, 8. Juni 2019, <https://www.fmea.net/lexikon/geschichtliche-entwicklung-der-fmea/>.

³¹⁰ Vgl. Tietjen und Decker, *FMEA-Praxis*, 31f.

³¹¹ Vgl. Hering und Schloske, *Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*, 11; Vgl. Rolf Isermann, „Das mechatronische Kraftfahrzeug“, in *Fahrdynamik-Regelung: Modellbildung, Fahrerassistenzsysteme, Mechatronik*, hg. von Rolf Isermann (Wiesbaden: Vieweg, 2006), 1f, https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9049-8_1.

³¹² Vgl. Pfeufer, *FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse nach AIAG und VDA*, 16; Vgl. Hering und Schloske, *Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*, 5.

³¹³ Vgl. Hering und Schloske, *Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*, 6.

³¹⁴ Vgl. Hering und Schloske, 6f.

VII.II.I VDA-Band vier (1986)

- Als dritter Schritt ist im VDA-Band Vier die Fehler- oder Risikoanalyse definiert. In dieser Analyse werden anhand der Funktionen und Merkmale der Systemelemente potenzielle Fehlfunktionen oder Fehler abgeleitet. Die Zusammenhänge werden in einem Fehlernetz dargestellt.³¹⁵ Dieses Vorgehen entspricht dem fünften Schritt nach DIN 25448, stellt aber durch das standardisierte Fehlernetz eine Weiterentwicklung dar.
- Im vierten Schritt erfolgen die Maßnahmenanalyse und die Risikobewertung. Dabei werden den Risiken aus dem dritten Schritt Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen zugeordnet. Anschließend werden den hypothetischen Risiken entsprechend den Auswirkungen beim Kunden (B), der Wahrscheinlichkeit des Auftretens (A) und der Wahrscheinlichkeit der Entdeckung (E) anhand von unternehmens- oder branchenspezifischen Bewertungstabellen mit einer RPZ bewertet.³¹⁶ Die RPZ wird nicht mehr aus den drei Faktoren A, B und E zusammenmultipliziert. Es kommen sog. Risikomatrizen zum Einsatz, die auf branchenspezifischen Kennwerten basieren.

Tabelle 37: Risikomatrizen nach VDA-Band vier (1986)³¹⁷

Risiko- matrizen	FMEA-Art		
	System-FMEA	Konstruktions-FMEA	Prozess-FMEA
A*B (Produkt- risiko)	Beurteilung der Sicherheit des Produktes im Betrieb unter Berücksichtigung der potenziellen Bedeutung für den Kunden.	Beurteilung Zuverlässigkeit des Produktes unter Berücksichtigung der potenziellen Auswirkung auf den Kunden.	-
B*E (Verifizie- rungsrisiko)	Beurteilung der Wahrscheinlichkeit zum Nachweis der Funktionstüchtigkeit des Sicherheitsmechanismus innerhalb der Entwicklung unter Berücksichtigung der potenziellen Bedeutung für den Kunden.	Beurteilung der Wahrscheinlichkeit zur Entdeckung der Hypothese (Folge-Fehler-Ursache) innerhalb der Entwicklung unter Berücksichtigung der potenziellen Bedeutung den Kunden.	-
A*E	Beurteilung, inwiefern die Funktionalität des Sicherheitsmechanismus in der Entwicklung verifiziert werden konnte.	Beurteilung für den letzten Maßnahmenstand, inwiefern die Produktfunktion in der Entwicklung verifiziert werden konnte.	Beurteilung des sog. Durchschlupfs fehlerhafter Komponenten zum Kunden bzw. zum nächsten Arbeitsschritt.

³¹⁵ Vgl. Hering und Schloske, 7.

³¹⁶ Vgl. Hering und Schloske, 7.

³¹⁷ Vgl. Hering und Schloske, 16ff; Vgl. Hering und Schloske, 45ff; Vgl. Hering und Schloske, 33ff.

VII.II.II Weiterentwicklung in den 1990er Jahren

- Im fünften Schritt der FMEA nach VDA-Band Vier wird die Risikominimierung oder Optimierung vorgenommen. Auf Basis der RPZ werden, analogisch zum Vorgehen nach DIN 25448, Verbesserungsmaßnahmen zur Risikominimierung beschlossen. Die Dokumentation wird im vierten VDA-Band nicht mehr als FMEA-Teilprozess erwähnt.³¹⁸

Diese Schritte lassen folgendes FMEA-Formblatt nach dem vierten Band des VDA entstehen:

Firma (Logo):		Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse										Nummer: Serie:	
		Konstruktions-FMEA <input type="checkbox"/>			Prozess-FMEA <input type="checkbox"/>			System-FMEA <input type="checkbox"/>					
Typ/Modell/Fertigung/Charge:				Sachnummer: Maßnahmenstand:				Verantwortlich: Firma:				Erstellt:	
Fehler- folge	B	K	Fehlerart	K	Fehlerur- sache	K	Vermei- dungsmaß- nahme	A	Entde- ckungs- maßnahme	E	R P Z	Verantwortlich Termin/Status	

Abbildung 71: FMEA-Formblatt nach VDA-Band vier (1986)³¹⁹

Der entscheidende Fortschritt des vierten Bands des VDA liegt in der Reduzierung von Subjektivität und Teamabhängigkeit durch den Einsatz standardisierter Methoden.

VII.II.II Weiterentwicklung in den 1990er Jahren

Im Jahr 1993 veröffentlichten die FMEA-Teams von Chrysler, Ford und GM (General Motors) in Kooperation mit der AIAG (Automotive Industry Action Group) und der ASQC (American Society for Quality Control) das "AIAG FMEA Reference Manual". Dieses Referenzhandbuch sollte Divergenzen im Lieferantenmanagement durch unterschiedliche Richtlinien minimieren.³²⁰ Die damit adressierte FMEA-Grenze war die Subjektivität: Unterschiedliche Richtlinien könnten dazu führen, dass Lieferanten eine Defektrate von 1/1000 unterschiedlich bewerten, wie in Kapitel 2.2.2.1 ausführlicher erläutert wurde.

Der SAE J1739 FMEA Standard wurde 1994 in den USA von der SAE (Society of Automotive Engineers) gemeinsam mit Chrysler, Ford und GM ins Leben gerufen.³²¹ In Deutschland

³¹⁸ Vgl. Hering und Schloske, *Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*, 7f.

³¹⁹ Vgl. Hering und Schloske, 8.

³²⁰ Vgl. Kocas, „Geschichtliche Entwicklung der FMEA - FMEA.NET - FMEA - Fehler Möglichkeits & Einfluss Analyse“.

³²¹ Vgl. Kocas; Vgl. o.V., „J1739_199407: Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design Fmea), Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process Fmea), and Potential Failure Mode and Effects Analysis for Machinery (Machinery Fmea) - SAE International“, zugegriffen 4. Oktober 2023, https://www.sae.org/standards/content/j1739_199407/.

VII.II.II Weiterentwicklung in den 1990er Jahren

erschien 1996 der zweite Teil des VDA-Bands vier mit dem Zusatz „Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz – System FMEA“.³²²

Die DGQ (Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V.) setzte 1999 einen weiteren Meilenstein in der FMEA-Entwicklung, indem sie eine Arbeitsgruppe ins Leben rief, die die Anwendbarkeit der FMEA in weiteren Bereichen wie dem Dienstleistungssektor oder dem Projektmanagement prüfte. Ihre Erkenntnisse wurden 2001 in der ersten Ausgabe des Bandes 13-11 des DGQ publiziert.³²³

Die SAE J1739 wurde in den USA überarbeitet und diente 2001 der internationalen Standardisierung der FMEA in der IEC 60812. In Deutschland wurde das VDA-Handbuch im Jahr 2006 erneut überarbeitet. Die vierte Auflage des J1739-Handbuchs der SAE wurde zur technischen Grundlage der vierten Auflage des AIAG-Referenzhandbuchs, das 2008 veröffentlicht wurde. In Deutschland blieben Methoden des VDA und der DGQ dominant, während das AIAG-Referenzhandbuch in den USA als FMEA-Standard etabliert wurde.³²⁴

Die FMEA der 1990er und 2000er Jahre besitzen zwar weiterhin auf dieselben Limitationen wie jene gemäß DIN 25448, doch durch Standards sind sie deutlich weniger teamabhängig und subjektiv geworden. Obgleich die System-FMEA die Betrachtung von Einfachfehlern um Systeme erweitert hat, bleibt der Mangel, dass beim simultanen Ausfall mehrerer Systeme auftretende Fehler in den FMEA-Standards nicht berücksichtigt sind.

Die Inkonsistenzen zwischen den Normen in Deutschland und den Standards in den USA veranlassten den VDA und die AIAG ein gemeinsames FMEA-Handbuch zu initiieren. Das Ziel dieses Vorhabens war zudem die Schaffung einer gemeinsamen, übergreifenden Basis für alle Sektoren, die beide Organisationen vertreten.³²⁵

³²² Vgl. Kocas, „Geschichtliche Entwicklung der FMEA - FMEA.NET - FMEA - Fehler Möglichkeits & Einfluss Analyse“.

³²³ Vgl. Deutsche Gesellschaft für Qualität, Hrsg., *FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*, 5. Auflage, DGQ-Band 13–11 (Berlin Wien Zürich: Beuth, 2012), 15ff; Vgl. Kocas, „Geschichtliche Entwicklung der FMEA - FMEA.NET - FMEA - Fehler Möglichkeits & Einfluss Analyse“.

³²⁴ Vgl. Dittmann, *OntoFMEA*, 35ff; Kocas, „Geschichtliche Entwicklung der FMEA - FMEA.NET - FMEA - Fehler Möglichkeits & Einfluss Analyse“.

³²⁵ Vgl. Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA), *AIAG & VDA FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung – Monito-ring & Systemreaktion*, 15.