

Bert Leyendecker *Hrsg.*

Qualitätsmanagement in den 20er Jahren – Trends und Perspektiven

Bericht zur GQW-Jahrestagung 2020 in
Koblenz



Qualitätsmanagement in den 20er Jahren - Trends und Perspektiven

Bert Leyendecker
Hrsg.

Qualitätsmanagement in den 20er Jahren - Trends und Perspektiven

Bericht zur GQW-Jahrestagung 2020
in Koblenz

Hrsg.
Bert Leyendecker
FB WiWi
Hochschule Koblenz
Koblenz, Deutschland

ISBN 978-3-662-63242-0 ISBN 978-3-662-63243-7 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-63243-7>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2021

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Ellen-Susanne Klabunde

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Unter dem Leitthema „Qualitätsmanagement in den 20er Jahren - Trends und Perspektiven“ hat die Gesellschaft für Qualitätsmanagement gemeinsam mit der Hochschule Koblenz zur GQW Tagung 2020 eingeladen. Wir freuen uns, dass wir Ihnen nun den zugehörigen Tagungsband vorstellen können.

Wenn man nach den Trends der kommenden Jahre fragt, muss in vielen Branchen und Disziplinen fast zwingend die Digitalisierung genannt werden. So bildet dieses Thema auch einen starken Schwerpunkt in diesem Tagungsband. Die Beiträge beschäftigen sich mit künstlicher Intelligenz beim autonomen Fahren, der Rolle der Digitalisierung bei Nachweissystemen für Zusatzqualifikationen und Zutrittszertifikaten sowie der Integration von Industrie 4.0-Elementen in ganzheitlichen Produktionssystemen. Auch die Frage, welche Rolle die Blockchain-Technologie im Qualitätsmanagement spielen könnte, wird betrachtet. Eine weitere Facette bildet der Beitrag über den Einsatz von Eye-Tracking in der Produktentwicklung. Die aktuelle Corona-Krise wird ebenfalls aufgegriffen und erste Analysen zum Einfluss des digitalen Reifegrads auf das Arbeitszeitmodell in Krisenzeiten vorgestellt. Aber auch Beiträge zur Rolle von Erfahrungswissen im Qualitätsmanagement, zur Messung der Qualität in Produkt-Service-Systemen, zur ganzheitlichen Fehleranalyse, zu geometrischen Produktspezifikationen und Montagereihenfolgen finden Sie in diesem Band.

Ein breiter Kanon spannender und aktueller Themen also, der zur Diskussion über das Qualitätsmanagement von morgen einlädt. Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen Autorinnen und Autoren für Ihre Beiträge, bei den Gutachterinnen und Gutachtern für ihre kritische Würdigung und bei meinem Team für die Organisation und Durchführung dieser Tagung bedanken. Ihr Engagement hat diese Tagung zu einem spannenden und inspirierenden Ereignis gemacht!

Ihnen, liebe Leserin, lieber Leser, wünsche ich interessante Erkenntnisse aus den hier veröffentlichten Beiträgen, verbunden mit der Aufforderung und Bitte,

das Qualitätsmanagement der Zukunft aktiv mitzugestalten, um so aus den sich neu ergebenden technischen Möglichkeiten für unsere Kunden und für uns viel Gutes und Hilfreiches zu gestalten.

Koblenz, Deutschland
Oktober 2020

Prof. Dr. Bert Leyendecker
Forschungsprofessur Produktionsmanagement
und Business Excellence

Inhaltsverzeichnis

Vorstellung einer modellbasierten Methodik für eine ganzheitliche Fehleranalyse eines technischen Produktsystems mit seiner Umwelt in der Nutzungsphase	1
Ovidiu Bielefeld, Manuel Löwer, und Nadine Schlüter	
Individuell-digitale Nachweise im Qualitäts-, Risiko- und Krisenmanagement	19
Carolin Schönen, Timothy Lahmann, Mareike Hambitzer, Christian Kenntner, Brigitte Petersen, und Beate Conrady	
Entwicklung eines Empfehlungsassistenten zur Integration von Industrie 4.0-Elementen in Ganzheitliche Produktionssysteme	39
Christoffer Rybski und Roland Jochem	
Festlegung und Messung der Qualität verschiedener Produkt-Service-Systeme	57
Phillip Miersch und Roland Jochem	
Literaturanalyse zur Determinierung des Bedarfs an Erfahrungswissen für QM-Methoden	84
Marcel Randermann und Roland Jochem	
Ansätze zur Verbesserung KI-basierter Systeme für das autonome Fahren	100
Dominik Brüggemann, Stefan Bracke, Hanno Gottschalk, Matthias Rottmann, Kira Maag, Robin Chan, und Marius Schubert	
Korrelationsbasierte Erkennung von Montagereihenfolgen mittels 6 DoF-Zeitreihendaten zur Prozessdiagrammerstellung	120
Louis Huebser, Sascha Thamm, Thomas Hellebrandt, Ina Heine, und Robert H. Schmitt	

**Eye-Tracking zur Kundenanforderungvalidierung
im Produktentwicklungsprozess 146**
Lena Stubbemann, Robert Refflinghaus, und Thies Pfeiffer

**Systematisierung der Prüfzwecke und kostenorientierte
Prüfmerkmalsdefinition auf Basis des Systems der Geometrischen
Produktspezifikation. 166**
Felix Herrmann, Stanley Sittner, Robert Hofmann, Sophie Gröger,
Anika Schramm, und Uwe Götze

**Einfluss des digitalen Reifegrads auf das Arbeitszeitmodell
in Krisenzeiten. 183**
Christoph Szedlak, Bert Leyendecker, Patrick Pötters,
und Holger Reinemann

**Potenzialanalyse datengetriebener Business Cases auf Basis
von Blockchain 204**
Marcus Branke, Patrick Böttcher, Christoph Szedlak, Bert Leyendecker,
und Ralf Woll

Autorenverzeichnis 231



Vorstellung einer modellbasierten Methodik für eine ganzheitliche Fehleranalyse eines technischen Produktsystems mit seiner Umwelt in der Nutzungsphase

Ovidiu Bielefeld^(✉), Manuel Löwer, und Nadine Schlüter

Fachgebiet Produktsicherheit und Qualität, Bergische Universität Wuppertal,
42119 Wuppertal, Deutschland

{bielefeld, loewer, schlueter}@uni-wuppertal.de

Zusammenfassung. Der Tesla-Autounfall, bei dem das Autopilot-System nicht in der Lage war, zwischen dem hellen Himmel als Hintergrund und der weißen Seite des Lastwagens zu unterscheiden, zeigte, welche dramatische Folgen Unfälle aus der Interaktion zwischen dem Produkt und seiner Umwelt in der Nutzungsphase haben können. Denn der heftige Aufprall des Autos mit dem LKW führte zum sofortigen Tod des Autofahrers. Deshalb ist es wichtig, bereits in der Produktentwicklung potentielle Fehler zu identifizieren, die sich in der Nutzungsphase aus Produkt-Umwelt-Interaktion ergeben könnten. Um Fehler zu identifizieren gibt es in der Produktentwicklung unterschiedliche Methoden (z. B. FMEA oder Ishikawa). Allerdings wird die Produkt-Umwelt-Interaktion bei diesen Methoden nicht ausreichend betrachtet. Infolge besteht der Bedarf an einer Methodik, mit der potenzielle Fehler, die sich aus den Wechselwirkungen zwischen Produktsystem und seiner Umwelt ergeben, systematisch identifiziert werden können. Diese Methodik soll dabei modellbasiert sein, um eine ganzheitliche und transparente Sicht auf das Produktsystem und seine Umwelt zu realisieren. In diesem Artikel wird die wissenschaftliche Lücke bezüglich der systematischen Betrachtung von Fehlern aufgrund von Interaktionen des Produktsystems mit der Umwelt in der Produktentwicklung dargelegt. Zudem wird ein erstes, grobes Konzept für eine Methodik der modellbasierten und ganzheitlichen Fehleranalyse bei Produkt-Umwelt-Interaktionen vorgestellt, um potenzielle Fehler während der Nutzungsphase zu identifizieren. Des Weiteren wird die Methodik anhand eines Anwendungsbeispiels veranschaulicht.

Schlüsselwörter: Fehleranalyse · Modell · Nutzungsphase · Produkt · Umwelt

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Ein technisches Produktsystem steht in der Nutzungsphase in einer permanenten Wechselwirkung mit seiner Umwelt (vgl. Abb. 1). Dabei können die Umwelt bzw. Umweltfaktoren sowohl eine positive als auch eine negative Beeinflussung auf das technische Produkt ausüben. Um Letzteres geht es in diesem Artikel. Eine negative und unberücksichtigte Beeinflussung der Umwelt auf ein technisches Produkt kann zu Ausfällen und sogar zum Tod führen, wie der Tesla-Unfall gezeigt hat. Infolge ist eine Betrachtung der Wechselwirkung oder Interaktion bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung von eminenter Bedeutung [1]. An einem weiteren Beispiel, einem Oberleitungsbus, soll diese These untermauert werden. Der Elektromotor wird über die Stromabnehmerstange bzw. den Stromabnehmerkopf mit elektrischer Energie aus der Stromleitung versorgt. Während der Fahrt kam es mehrmals zur Entgleisung und Kontaktverlust zwischen dem Stromabnehmerkopf und der Stromleitung, sodass der Energietransfer unterbrochen wurde. Dies führte zum Systemausfall, da der Elektromotor nicht mehr mit elektrischer Energie versorgt werden konnte. Nachdem der Vorfall reklamiert wurde, hat ein Entwicklungsteam des Herstellers den Fall untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Fehlerursache aus der Zusammenwirkung von mehreren Faktoren entstanden ist: scharfer Kurvenradius (vgl. Abb. 1) und Umweltfaktoren (z. B. Feuchtigkeit, Regen usw.) [2, 3].

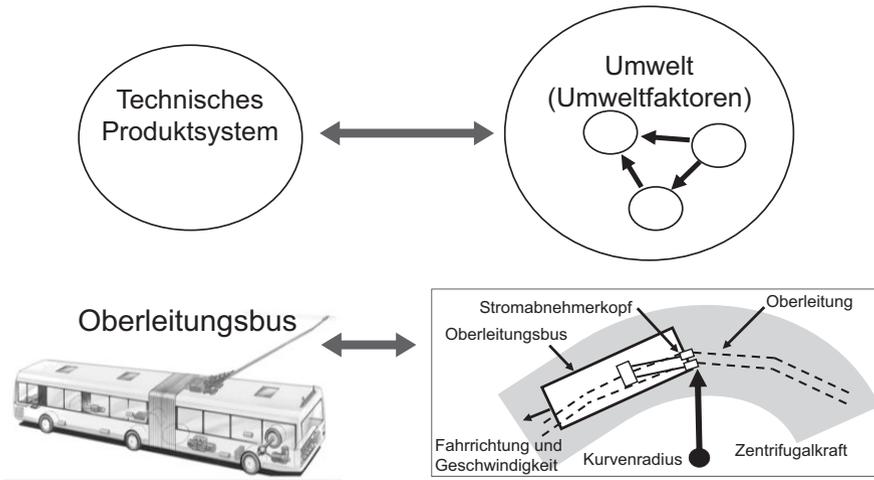


Abb. 1. Beispiel für eine Interaktion zwischen einem technischen Produktsystem (Oberleitungsbus, links) und seiner Umgebung (rechts). (In Anlehnung an [1–3])

Die umfassende Analyse hinsichtlich der Fehlerursache kostete dem Hersteller viel Zeit und Ressourcen. Um dies zukünftig zu vermeiden, wurden die elementaren Erkenntnisse in zwei wesentlichen Punkten zusammengefasst:

- 1) Die Fehler-Ursache-Analyse wurde an verschiedenen Standorten durchgeführt und es gab ein unterschiedliches Verständnis hinsichtlich der Fehlerbeschreibung. Dies erschwerte die Durchführung der Analyse.
- 2) Die in der Produktentwicklung angewendeten Methoden der Fehleranalyse (z. B. FMEA, FTA usw.) haben die potentiellen Fehler aus der Interaktion zwischen Produkt und seiner Umwelt unzureichend berücksichtigt.

Daraus lässt sich ableiten, dass sowohl in der Industrie als auch in der Wissenschaft der Bedarf an einer einheitlichen Fehlerbeschreibung (Forschungslücke 1) und eine Methode der Fehleranalyse, welche die Interaktion zwischen dem technischen Produkt und seiner Umwelt in der Nutzungsphase berücksichtigt, besteht (Forschungslücke 2) [1, 3–8]. Um diese Forschungslücken zu schließen, wird nachfolgend eine mögliche Lösung vorgestellt.

1.2 Lösung

Eine mögliche Lösung zur vorgestellten Problemstellung, ist die Entwicklung einer modellbasierten Methodik für eine ganzheitliche Fehleranalyse mit dem Fokus auf der Interaktion zwischen dem technischen Produktsystem und seiner Umwelt (Produkt-Umwelt-Interaktion) in der Nutzungsphase. Zusätzlich soll untersucht werden, wie Fehler standardisiert und ganzheitlich beschrieben werden können. Die Methodik soll in den frühen Phasen der Produktentwicklung (von Konzept- bis zur Testphase) durch Experten und Entwicklungsteams aus der Produktentwicklung angewendet werden.

1.3 Herangehensweise

Um das Ziel zu erreichen bzw. die modellbasierte Methodik für die Fehleranalyse mit dem Fokus auf Interaktion zwischen Produkt und seiner Umwelt zu entwickeln, sollten zunächst die zwei Forschungslücken im folgenden Abschn. 2 (Stand der Wissenschaft und Technik) untersucht werden. Die Ergebnisse aus diesem Kapitel sollen in die Entwicklung der Methodik implementiert werden. Zudem sollen Anforderungen an die neue Methodik abgeleitet werden. Die Anforderungen sind bei der Entwicklung der Methodik zu berücksichtigen und zu erfüllen. Die Methodik wird im Abschn. 3 an einem Beispiel validiert. Abschließend erfolgt im Abschn. 4 das Fazit mit einem zusammenfassenden, kritischen Blick auf die Methodik und einem Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

In der Problemstellung wurden zwei Forschungslücken vorgestellt. Aus den Forschungslücken werden zwei Forschungsfelder abgeleitet, welche dieses Kapitels inhaltlich bestimmen:

- Der Begriff Fehler (Abschn. 2.1)
- Methoden der Fehleranalyse (Abschn. 2.2)

Im Abschn. 2.1 werden Fehlerdefinitionen in der Fachliteratur und Normen untersucht. Ziel dabei ist es, unterschiedliche Definitionen und Auffassungen von Fehlern zu einer standardisierten und ganzheitlichen Fehlerbeschreibung zu synthetisieren.

Im Abschn. 2.2 werden die in der Praxis und Wissenschaft genutzten Methoden der Fehleranalyse eruiert, um festzustellen, inwieweit diese Methoden die Interaktion zwischen dem Produkt und seiner Umwelt in der Nutzungsphase berücksichtigen. Abschließend werden Anforderungen an die neue Methodik generiert.

2.1 Der Begriff „Fehler“

Der Begriff „Fehler“ wird in nationalen und internationalen Normen und in der Fachliteratur unterschiedlich definiert. Einige Definitionen weisen Gemeinsamkeiten auf, während andere sich stark voneinander unterscheiden. Dies wird im internationalen Raum deutlich, da der deutsche Begriff „Fehler“ zugleich mit *failure*, *fault* und *error* übersetzt wird.

In der Qualitätsmanagementnorm (ISO 9001:2015) wird Fehler oder *failure* als „Nichtkonformität: Nichterfüllung einer Anforderung“ bezeichnet [4]. Somit bezieht sich der Fehler in der ISO 9001:2015 auf die Anforderungen an ein Produkt oder an seine Bauteile und Komponenten. Auf der anderen Seite definiert die ISO 26262 *failure* als die Beendigung der Fähigkeit eines Elements (in der Norm als Hard- oder Software Komponente gemeint) eine Funktion zu erfüllen [5]. Hierbei liegt der Bezug des Fehlers auf den Komponenten und Funktionen. Hervorzuheben ist, dass das Verständnis von Fehlern im Sinne von „*failure*“ als Beendigung oder Nichterfüllung einer Funktion in den meisten Literaturquellen und Normen vertreten ist (vgl. [9, 10]).

Im Gegensatz dazu wird „*fault*“ als „anormaler Zustand, welcher einen Ausfall eines Elements verursachen kann“ [5], eine unzulässige Abweichung [10] oder auch Ereignis [11] interpretiert. Demgegenüber wird der Begriff „*error*“ als eine Abweichung zwischen dem berechneten und dem spezifisch geforderten Wert beschrieben [5].

Eine andere, weit umfassende Beschreibung von Fehlern findet sich bei Westkämper. Er synthetisiert verschiedene Begriffe des Fehlers aus Normen und Fachliteratur und stellt diese in einer zeitlich logischen Reihenfolge dar: Fehlerursache, Fehlerwirkung und Fehlerauswirkung oder Fehlerfolge [12]. Zudem erweitert Zingel die Ursache-Wirkung-Kette von Westkämper um den „Effekt“. Dabei sieht er den Effekt (z. B. physikalisch) als das Bindeglied zwischen der Fehlerursache und Fehlerwirkung [13]. Infolge ergibt sich die ganzheitliche und erweiterte Fehlerdefinition in Abb. 2.

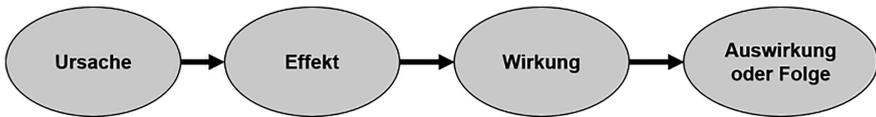


Abb. 2. Erweiterte Fehlerdefinition. (Eigene Darstellung in Anlehnung an [12, 13])

Die Besonderheit an dieser Definition ist, dass die eingangs erwähnten Fehlerdefinitionen (z. B. Nichterfüllte Anforderungen oder Funktionen) in die erweiterte Fehlerdefinition integriert werden können. Z. B. kann die Nichterfüllung einer Anforderung die Ursache für eine Fehlerkette sein. Daher wird diese synthetisierte, ganzheitliche Fehlerbeschreibung in die Entwicklung der Methodik (im Abschn. 3) integriert, um damit potentielle Fehler aus der Produkt-Umwelt-Interaktion besser beschreiben zu können. Vor diesem Hintergrund drängt sich die Frage auf, wie Fehler mithilfe etablierter Methoden der Fehleranalyse beschrieben werden? Und wie wird die Produkt-Umwelt-Interaktion mit Hilfe von diesen Methoden berücksichtigt? Im Abschn. 2.2 wird auf diese Fragen eingegangen.

2.2 Methoden der Fehleranalyse

Es gibt unterschiedliche Methoden, die in den frühen Phasen der Produktentwicklung eingesetzt werden. Jedoch legen nur die folgenden Methoden den Schwerpunkt auf die Fehleranalyse: FMEA (Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse), Ishikawa sowie FTA (Fehlerbaumanalyse), ETA (Ereignisbaumanalyse) und Bow Tie.

Die in der Praxis am meisten genutzte Methode ist die FMEA. Die FMEA ermöglicht eine systematische Analyse von Fehlerursachen, mit dem Ziel einer frühzeitigen Identifikation von Fehlern und Risiken in der Produktentwicklung, damit Fehler in der Nutzungsphase vermieden werden [8, 14]. Nach der Fehler- oder Risikoidentifikation erfolgt die Ermittlung der Aufgabenprioritätszahl (AP), welche die Risikoprioritätszahl (RPZ) ersetzt hat. Aufgrund der AP können Vermeidungsmaßnahmen erarbeitet werden, die dann umgesetzt werden sollen. Obwohl die FMEA eine etablierte und effiziente Methode darstellt, untersucht sie ausschließlich „einzelne“ Fehlerursachen und -auswirkungen, dabei werden Kombinationen und Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Funktionen und Komponenten nicht berücksichtigt [14, 15]. Auch die Produkt-Umwelt-Interaktion wird bei der FMEA nur marginal betrachtet. Zudem fehlt eine standardisierte und ganzheitliche Fehlerbeschreibung.

Mithilfe der Ishikawa Methode werden unterschiedliche Ursachen, die zu einer negativen Auswirkung oder einem Problem führen, systematisch identifiziert. Die Ursachen werden in Kategorien aufgeteilt, die sogenannten 5Ms (Mensch, Methode, Mitwelt, Material und Maschine), und in einer grafischen Form präsentiert. Das hat den Vorteil, dass jede Ursache übersichtlich und strukturiert visualisiert werden kann. Zugleich ist dies auch ein Nachteil der Methode, denn Kombinationen aus den Ursachen können mit Ishikawa nicht identifiziert werden [16]. Zwar werden durch die Kategorie „Mitwelt“ Umweltfaktoren betrachtet, allerdings nur einzeln und nicht in Zusammenwirkung. Zudem gibt es auch bei dieser Methode keine einheitliche Fehlerbeschreibung.

Die Bow-Tie-Methode resultiert aus der Kombination von ETA mit FTA [15], folglich werden die drei Methoden zusammen betrachtet. Im Gegensatz zur FMEA und Ishikawa werden bei ETA, FTA und Bow-Tie unterschiedliche Kombinationen von Fehlerursachen und Fehlerauswirkungen aus Komponenten und Funktionen über mehrere Ebenen der Systemstruktur analysiert. Dies ist eine der größten Stärken dieser Methoden. Allerdings werden dabei die Umweltaspekte nicht berücksichtigt und eine standardisierte Fehlerbeschreibung existiert auch bei diesen Methoden nicht. Im weitesten Sinne wird ein Fehler als ein unerwartetes Ereignis (Top-event) mit einem negativen Einfluss (und Konsequenzen) verstanden.

Abgeleitet aus den beiden Forschungsfeldern in den Abschn. 2.1 und 2.2 ergeben sich zwei grundsätzliche Anforderungen an die neue Methodik:

- (1) Die Methodik sollte nicht nur einfache Fehlerursachen und Fehlerauswirkungen, sondern auch Kombinationen aus der Interaktion zwischen Produkt und Umwelt identifizieren können (ganzheitliche Fehleranalyse) (abgeleitet aus dem Abschn. 2.2)
- (2) Die Methodik sollte über eine einheitliche und ganzheitliche Fehlerbeschreibung verfügen (abgeleitet aus den Abschn. 2.1 und 2.2).

3 Entwicklung und Validierung der neuen Methodik

3.1 Entwicklung der Methodik

Die Entwicklung der Methodik für eine ganzheitliche und modellbasierte Fehleranalyse mit dem Fokus auf der Produkt-Umwelt-Interaktion in der Nutzungsphase erfolgt in zwei Phasen. In der ersten Phase sollen alle notwendigen Informationen für die Fehleranalyse bereitgestellt werden, um Wechselwirkungen zwischen Produktsystem und Umweltfaktoren systematisch zu identifizieren. Die Informationen sollen strukturiert und modellbasiert zur Verfügung stehen, denn nur wenn das technische Produkt als Systemmodell verstanden wird, können Wechselwirkungen von Fehlern auf verschiedenen Systemebenen identifiziert werden [3, 17]. Dafür soll ein Tool entwickelt werden, mit dem alle relevanten Faktoren für die ganzheitliche Fehleranalyse gegenübergestellt werden können. Im Kontext zur Fehleranalyse der Produkt-Umwelt-Interaktion bedeutet „ganzheitlich“, dass bei der Analyse nicht nur das Produktsystem (Komponenten und Funktionen), sondern auch Umweltfaktoren (z. B. Temperatur), physikalische Effekte (z. B. Elektromagnetismus) und Ereignisse (z. B. Autounfall) berücksichtigt werden. Diese Aspekte der Fehleranalyse werden gegenübergestellt, um mögliche Kombinationen von Fehlerursachen und -auswirkungen zu erfassen (vgl. Anforderung 1 an die Methodik). In der zweiten Phase erfolgt, basierend auf dem Tool mit den modellbasierten Informationen, die ganzheitliche Fehleranalyse. Die daraus identifizierten Fehler werden mithilfe der erweiterten Fehlerdefinition aus Abb. 2 beschrieben (vgl. Anforderung 2 an die Methodik). Die zwei Phasen werden durch einzelne Schritte realisiert, welche in Abb. 3 vorgestellt werden.

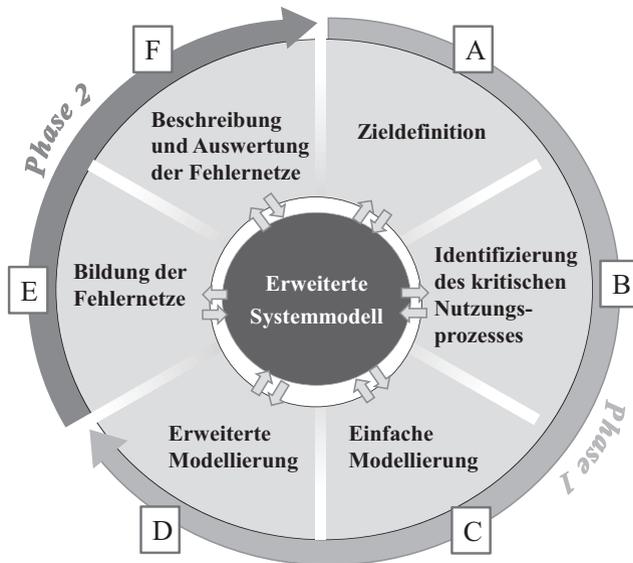


Abb. 3. Neue Methodik für eine modellbasierte und ganzheitliche Fehleranalyse. (Eigene Darstellung)

Im **ersten Schritt (A)** der Methodik wird das Ziel definiert. Mit der Zielsetzung soll der Anwender (z. B. ein Entwicklungsteam) konkret festlegen, „was“ mit der Methodik erreicht werden soll und „wofür“ sie genutzt wird. Hilfreich dabei sind die folgenden Kriterien:

- (1) Durch die Anwendung der Methodik soll sichergestellt werden, dass die grundfunktionale Hauptanforderung an das technische Produkt in der Nutzungsphase erfüllt wird.
- (2) Mittels der Methodik bzw. der Fehleranalyse sollen potentielle Fehler identifiziert werden, welche zu Personenschaden führen können. Zusätzlich sollen in diesem Schritt die Nutzungsprozesse in der Nutzungsphase des technischen Produkts ermittelt werden.

Im **zweiten Schritt (B)** soll, aus den ermittelten Nutzungsprozessen, mithilfe von Experten und bezogen auf die Zielsetzung, der kritische Nutzungsprozess definiert werden. Nach der Bestimmung des kritischen Nutzungsprozesses erfolgt im **dritten Schritt (C)** die Modellierung des Produktsystemmodells. Die Modellierung wird als „einfache Modellierung“ bezeichnet, da in diesem Schritt „nur“ die Komponenten und Funktionen des zu untersuchenden Produktsystems modelliert werden, die

eine direkte Relation zum identifizierten, kritischen Nutzungsprozess haben. Die Modellierung wird im nächsten, **vierten Schritt (D)** erweitert, indem neben dem Produktsystem auch die Aspekte der Umweltfaktoren, Effekte und Ereignisse, welche im kritischen Nutzungsprozess potentielle Fehler verursachen können, berücksichtigt werden. Die Wichtigkeit dieser Aspekte im Kontext zur Fehleranalyse wurde in unterschiedlichen, wissenschaftlichen Arbeiten hervorgehoben [2, 18, 19]. Zu diesem Zweck wurde ein Tool entwickelt, mit dem diese Informationen transparent dargestellt werden, um Wechselwirkungen, Fehlerkombinationen sowie Kausalitäten besser zu lokalisieren [7]. Mithilfe des Tools können im **fünften Schritt (E)** die Fehlernetze identifiziert werden. Mit „Fehlernetz“ ist die Struktur eines Fehlers gemeint, die aus mehreren Fehlerursachen, Effekte, Fehlerwirkungen oder –auswirkungen besteht. Das identifizierte Fehlernetz wird dann im **sechsten Schritt (F)** durch die „Schablone“ der erweiterten Fehlerdefinition (vgl. Abb. 2) detailliert beschrieben.

Mit dem Wissen aus dem erweiterten Systemmodell, kann die Methodik beliebig wiederholt werden, daher wird sie in Abb. 3 in Form eines zyklischen Ablaufs mit einzelnen Schritten, welche mit dem Modell interagiert, dargestellt. Mit der Beschreibung und Dokumentation einzelner Fehler oder Fehlernetze endet die Methodik. Infolge ist die Erarbeitung von Maßnahmen zur Fehlervermeidung nicht mehr Bestandteil der Methodik. Diese können mittels bestehender Methoden (z. B. FMEA) abgeleitet und umgesetzt werden. Nachfolgend werden die sechs Schritte an einem Beispiel validiert, dabei wird jeder Schritt (A bis F) in Form eines Abschnitts präsentiert.

3.2 Validierung der Methodik

Für die Validierung der Methodik dient die Eingangsproblematik des Oberstromabnehmers (OSA) als Beispiel. Dabei sollen die multifaktoriellen Zusammenwirkungen und Wechselwirkungen, welche zum reklamierten Fehler geführt haben (vgl. Abb. 1), genauer untersucht werden. Zudem sollen neben dem Produktsystem die Umweltfaktoren, Effekte und Ereignisse berücksichtigt werden. Im Folgenden werden die sechs Schritte der neuen Methodik am Beispiel des OSA umgesetzt.

A) Zieldefinition

Im ersten Schritt der Methodik soll die Zielstellung der Methodik definiert werden. Die zentrale Frage dabei ist, welche Faktoren bei der Interaktion zwischen Produkt und Umwelt in der Nutzungsphase des OSA zur Entgleisung führen und damit auch zur Nichterfüllung der Hauptanforderung „Oberleitungsbus muss Fahrgäste sicher zum Bestimmungsort befördern“. Für die Nutzungsphase des Oberleitungsbusses wurden folgende Nutzungsprozesse identifiziert:

- Bus fährt bergab,
- Bus fährt bergauf,
- Bus fährt,

- Bus bremst und
- Bus hält an der Haltestelle.

Auf Grundlage dieser Nutzungsprozesse wird im nächsten Schritt der kritische Nutzungsprozess identifiziert.

B) Identifizierung des kritischen Nutzungsprozesses

Die Identifizierung des kritischen Nutzungsprozesses basiert auf der Zieldefinition und dem reklamierten Vorfall. Entsprechend der Daten der Reklamation ist die Entgleisung auf einer geraden Strecke während des normalen Fahrbetriebs aufgetreten. Daher wird der Nutzungsprozess „Bus fährt“ als kritisch eingestuft und bestimmt maßgeblich den weiteren Verlauf der Methodik.

C) Einfache Modellierung

Die einfache Modellierung bezieht sich auf das Produktsystem „Oberleitungsbus“. Dabei liegt der Fokus auf den Komponenten und Funktionen des Teilsystems Oberstromabnehmer (OSA), weil an diesem Teilsystem die Entgleisung während des Nutzungsprozesses „Bus fährt“ auftritt. Somit beginnt die einfache Modellierung mit der Systemeingrenzung, die durch das Teilsystem OSA bestimmt wird (vgl. Abb. 4).

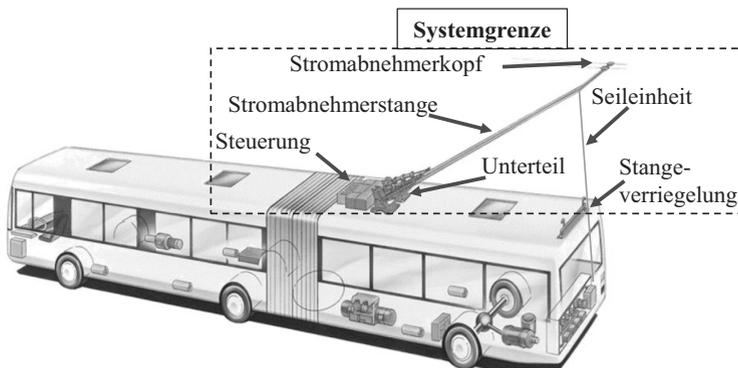


Abb. 4. Oberleitungsbus mit dem Fokus auf das Teilsystem Oberstromabnehmer. (In Anlehnung an [3])

Nach der Bestimmung der Systemgrenze werden die Komponenten und Funktionen modelliert, welche sich innerhalb der Systemgrenze befinden (vgl. Abb. 4). Für die Modellierung wird der DeCoDe-Ansatz (Demand Compliant Design) genutzt, weil DeCoDe mehrfach für eine modellbasierte Fehleranalyse erfolgreich umgesetzt wurde und viele Vorteile vergleichbar mit anderen Modellierungsansätzen bietet (siehe [7, 20]). In Abb. 5 werden die Komponenten und Funktionen des Teilsystems OSA mit dem kritischen Nutzungsprozess „Bus fährt“ vernetzt. Dabei bedeutet die Relation „realisiert“ dem DeCoDe-Ansatz zufolge, dass der Nutzungsprozess über die entsprechenden Komponenten und Funktionen realisiert wird.

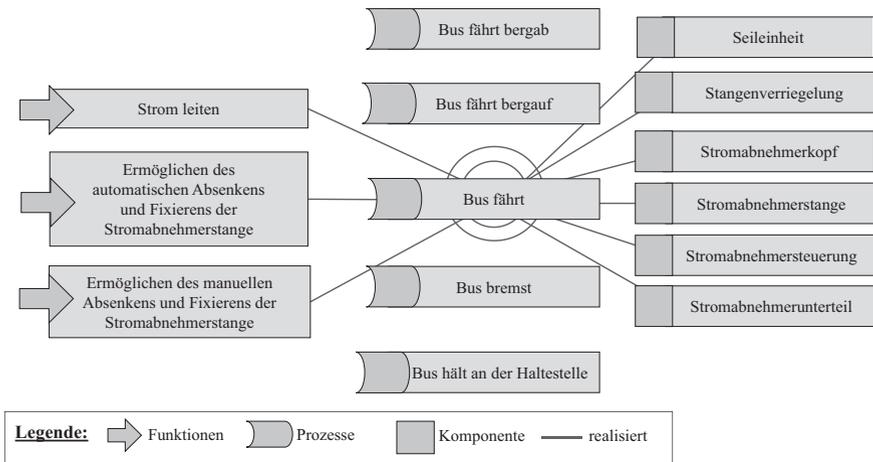


Abb. 5. Vernetzung Teilsystemmodell OSA (Funktionen, Nutzungsprozesse und Komponenten) mit dem Fokus auf dem Nutzungsprozess „Bus fährt“. (Eigene Darstellung in Anlehnung an [3])

Um festzustellen, welche Umweltfaktoren, Effekte und Ereignisse mit dem OSA während des kritischen Nutzungsprozesses „Bus fährt“ interagieren, erfolgt im nächsten Schritt der Methodik die „erweiterte Modellierung“.

D) Erweiterte Modellierung

Für eine ganzheitliche Fehleranalyse mit dem Fokus auf der Produkt-Umwelt-Interaktion wurde ein Tool entwickelt, wodurch alle für die Fehleranalyse erforderlichen Faktoren berücksichtigt werden. Wie bereits erläutert, bedeutet „ganzheitlich“ in dieser Arbeit, dass neben der Betrachtung des Produktsystems (Komponenten und Funktionen) auch die Umweltfaktoren, physikalischen Effekte und Ereignisse in die Analyse einfließen sollen. Um mögliche Wechselwirkungen zwischen diesen Faktoren transparent und strukturiert darzustellen, werden sie als vier Felder, auch Quadranten genannt, gegenübergestellt (vgl. Abb. 6).

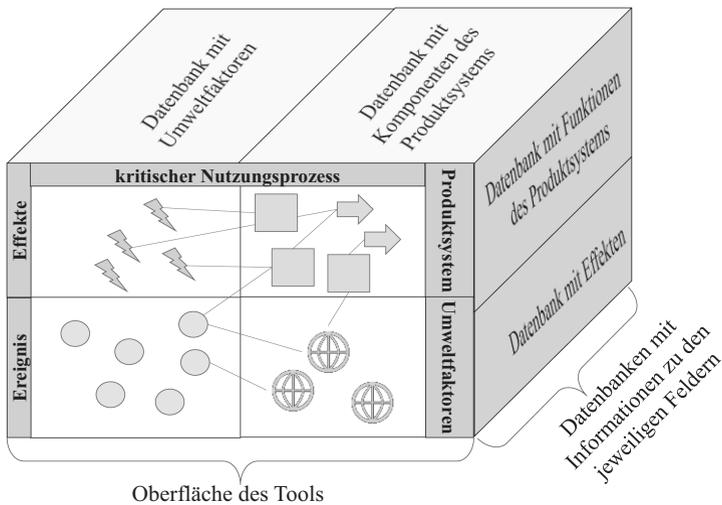


Abb. 6. Quadranten der Wechselwirkungen zur Identifikation potentieller Fehler aus der Interaktion von Produktsystem und Umwelt in der Nutzungsphase. (Eigene Darstellung)

Inhaltlich sind die vier Quadranten wie folgt zusammengesetzt:

- Produktsystem: Komponenten und Funktionen, die in den kritischen Nutzungsprozess involviert sind bzw. den Prozess realisieren
- Umweltfaktoren: Faktoren (z. B. Wind) aus der unmittelbaren Umgebung, welche das Produktsystem negativ beeinflussen können
- Ereignisse: Ereignisse (z. B. Autounfall) können im kritischen Nutzungsprozess aus der Wechselwirkung mehrerer Faktoren eintreten
- Effekte: z. B. physikalische Effekte, die aus der Wechselwirkung zwischen Komponenten und Funktionen und/oder aus der Interaktion zwischen diesen und den Umweltfaktoren entstehen können.

Grundsätzlich ist das Tool aus einem sichtbaren und einem unsichtbaren Bereich aufgebaut. Der sichtbare Bereich ist die Oberfläche des Tools mit den vier Quadranten. Auf der Oberfläche werden nur die Daten und Informationen sichtbar, die eine direkte Relation mit dem kritischen Nutzungsprozess „Bus fährt“ haben. Die notwendigen Informationen für die vier Felder werden von unterschiedlichen Datenbanken geliefert (unsichtbarer Bereich des Tools). Beispielsweise kann für die Modellierung der Komponenten und Funktionen des Produktsystems die Datenbank aus der Software iQUAVIS [21] genutzt werden, während für die Effekte die „TRIZ Effects Database“ [22] geeignet ist. In der Fachliteratur gibt es weitere Checklisten, um Datenbanken zu generieren. Ein Beispiel dafür ist die Taxonomie der Fehlerursachen nach Krishna. Darin werden alle möglichen Umweltfaktoren und Ereignisse aufgelistet, welche Fehler in der Nutzungsphase eines technischen Produkts verursachen können [18]. Die Abb. 7 illustriert die Anwendung des Tools auf das obere Beispiel des OSA (vgl. Abb. 7).

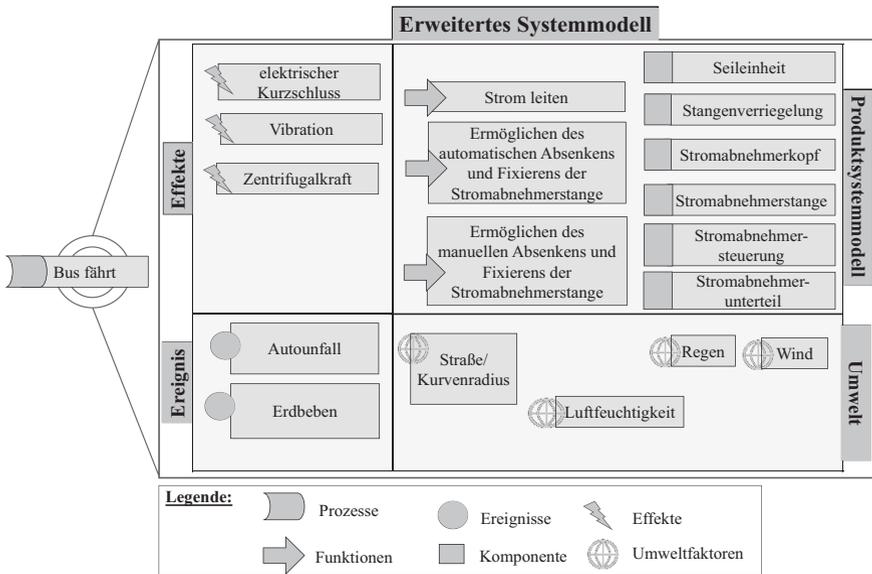


Abb. 7. Ausgefüllte Quadranten der Wechselwirkungen mit dem Fokus auf den Nutzungsprozess „Bus fährt“. (Eigene Darstellung)

Die Funktionen und Komponenten aus dem letzten Schritt wurden in den entsprechenden Quadranten in das Produktsystemmodell überführt. Als Umweltfaktoren können bspw. Regen oder Wind relevant sein, weil diese einen negativen Einfluss auf das Produktsystem ausüben können.

Hinzu kommt als weiterer, relevanter Umweltfaktor, der Straßenverlauf oder der Kurvenradius als Hinweis aus der Reklamation. Mögliche Effekte, die aus den Zusammenwirkungen von mehreren Faktoren resultieren können, sind in diesem Beispiel Vibration, elektrischer Kurzschluss und die Zentrifugalkraft, welche vom Kurvenradius abhängig ist. Hierbei ist hervorzuheben, dass die Effekte an dieser Stelle nicht vollständig sind, denn bei der Fehleranalyse und Bildung der Fehlernetze (siehe nächster Schritt) können weitere Effekte aus Wechselwirkungen und Ursachenkombinationen entstehen.

E) Bildung der Fehlernetze

Die vier Quadranten für die Produkt-Umwelt-Interaktion bieten eine neuartige Durchführung einer modellbasierten und ganzheitlichen Fehleranalyse. Anhand der Quadranten können unterschiedliche Szenarien mit potentiellen Fehlern oder Fehlernetzen gebildet werden. Im Idealfall soll die Fehleranalyse durch erfahrene Experten erfolgen. Denn basierend auf Erfahrungen und fundiertem, technischem Wissen, können Wechselbeziehungen zwischen den unterschiedlichen Faktoren besser identifiziert und somit auch valide Szenarien generiert werden. In Abb. 8 steht das Szenario „Entgleisung“ aus dem Eingangsproblem im Mittelpunkt. Dabei soll dieses Szenario die Zusammenwirkung von mehreren Faktoren, die zur Entgleisung geführt haben, verdeutlichen.

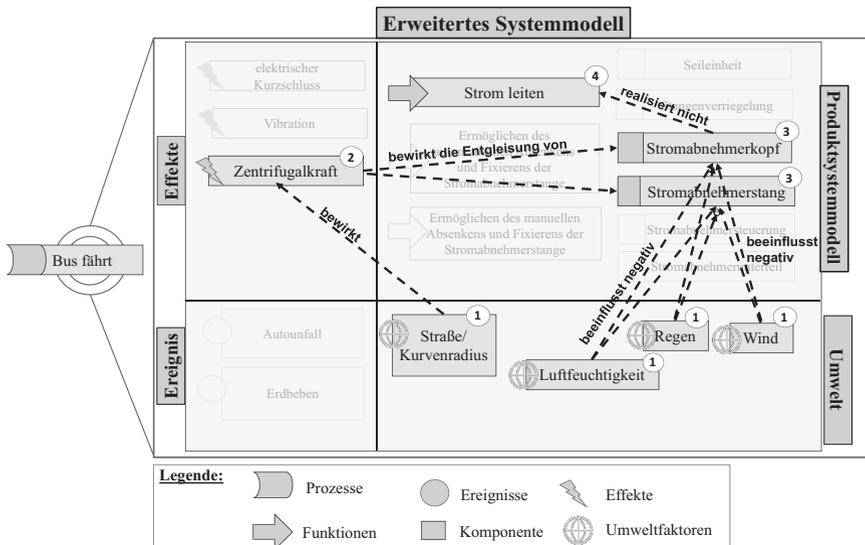


Abb. 8. Fehlernetz am Beispielsszenario „Entgleisung“ des Oberleitungsbusses. (Eigene Darstellung)

Die Nummerierung einzelner Faktoren charakterisiert die zeitliche Abfolge des Fehlernetzes. Der enge Kurvenverlauf bzw. Kurvenradius (1) bewirkt eine Zentrifugalkraft (2), welche zur Entgleisung der Komponenten Stromstange (3) und Stromabnehmerkopf (3) führt. Weitere Faktoren, welche die Entgleisung begünstigen bzw. die beiden Komponenten negativ beeinflussen, sind Luftfeuchtigkeit (1), Regen (1) und/oder Wind (1). Durch die Entgleisung und die damit eingehende Entkopplung der Stromstange von der Oberleitung wird die Funktion „Strom ableiten“ nicht mehr realisiert (vgl. Abb. 8).

Wie in Abb. 8 dargestellt, eignen sich die vier Quadranten sehr gut, um die Interaktion zwischen dem Produktsystemmodell und seiner Umgebung transparent zu visualisieren. Allerdings ist die Darstellung unstrukturiert und unklar, denn der identifizierte Fehler, vor allem bei komplexeren Fehlernetzen, ist nicht eindeutig erkennbar. Daher wird das Fehlernetz im nächsten Schritt strukturiert und mit einem weiteren neuen Tool detailliert beschrieben.

F) Beschreibung und Auswertung der Fehlernetze

Für die Beschreibung und Auswertung der Fehlernetze wurde ein neues Tool entwickelt [7]. Das nachfolgend vorgestellte Tool wurde im Rahmen des abgeschlossenen Forschungsprojekts KAUSAL entwickelt, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (siehe [20]) gefördert wurde. Der Inhalt des Tools basiert

auf den Ergebnissen der Literaturanalyse aus Abschn. 2.1. Insbesondere die erweiterte Fehlerdefinition (vgl. Abb. 2) dient als Vorlage und ist entscheidend für die Strukturierung des Fehlernetzes. Mithilfe des neuen Tools sollen unterschiedliche Fehler oder Fehlernetze detailliert und einheitlich beschrieben werden, daher ist es auch als Fehlerdokumentation gut geeignet. Das Tool wurde mittels Visual Basic for Applications (VBA) in Excel programmiert, da Excel sowohl in der Wissenschaft als auch in der Industrie eine weit verbreitete und genutzte Software ist. Grundsätzlich beinhaltet das Tool fünf Abschnitte beziehungsweise Fenster, die nachfolgend erläutert werden:

1. Allgemeine Informationen
2. Fehlerursachen
3. Wirkungen der Fehlerursache
4. Fehlerauswirkungen
5. Fehlerrisiko

Im ersten Fenster werden die allgemeinen Informationen (z. B. Datum, Benutzer, Version) eingegeben. Dies dient unter anderem der Rückverfolgbarkeit bei der Fehlerdokumentation. In das zweite Fenster werden die Faktoren (z. B. Funktionsausfall, Komponentenausfall, Nichteinhaltung der Anforderungen) eingetragen, welche den potentiellen Fehler verursacht haben. Dabei erlaubt das Tool an dieser Stelle das Eintragen von mehreren Faktoren, falls eine multifaktorielle Fehlerursache vorliegt. Im dritten Fenster werden die Wirkungen der Fehlerursache erfasst. An dieser Stelle treten die Effekte zum ersten Mal auf, da diese immer aus einer Fehlerursache resultieren. Im vierten Fenster werden die Fehlerauswirkungen oder Konsequenzen detailliert beschrieben. Fehler können sich auf unterschiedlichen Produktsystem-Ebenen (z. B. Komponenten, Teilsystem oder Gesamtsystem) oder auf die Umgebung des technischen Produktsystems in der Nutzungsphase auswirken. Bei Letzteren zählt auch – im schlimmsten Fall – den Personenschaden hinzu.

In dem letzten, fünften Fenster werden die potentiellen Fehler ausgewertet und priorisiert. Dies erfolgt mithilfe des sogenannten Risikographs, der sowohl im Risikomanagement als auch bei der Bewertung und Analyse von komplexen Systemen genutzt wird [23]. Dabei wird das Risiko des potentiellen Fehlers aus dem Multiplikationsprodukt von Schadensschwere und -wahrscheinlichkeit ermittelt [23].

Die Abb. 9 veranschaulicht, wie das Fehlernetz mit dem Szenario „Entgleisung“ über die erweiterte Fehlerdefinition in das Excel-basierte Tool überführt wird. Die erweiterte Fehlerdefinition aus Abb. 2 wird dabei als Schablone oder Vorlage genutzt.

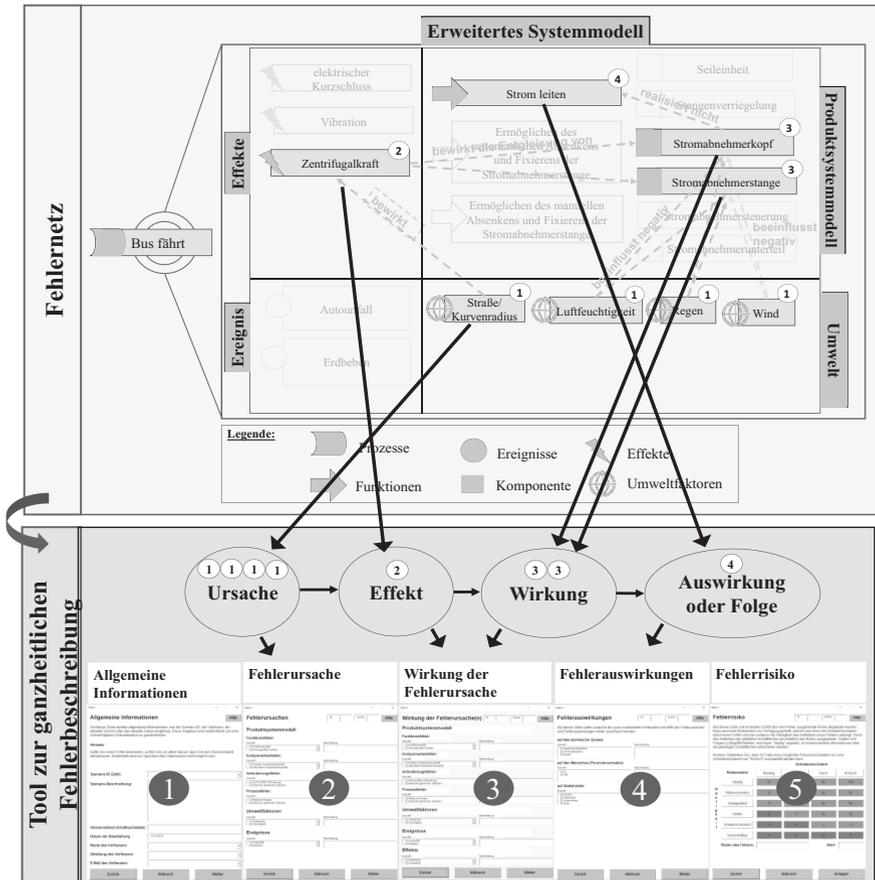


Abb. 9. Überführung des Fehlernetzes in das Tool zur Fehlerbeschreibung. (Eigene Darstellung)

Auf diese Weise wird aus dem zunächst unstrukturierten Fehlernetz aus Schritt E eine strukturierte und eindeutige Fehlerbeschreibung, indem einzelne Faktoren aus dem Fehlernetz, den einzelnen „Gliedern“ der erweiterten Fehlerdefinition zugeordnet werden:

- (1) Ursache(n): Straße/Kurvenradius, weitere, negative Beeinflussung durch: Luftfeuchtigkeit, Regen oder Wind
- (2) Effekt: Zentrifugalkraft
- (3) Wirkung: Entgleisung der Komponente Stromabnehmerstange und Stromabnehmerkopf
- (4) Auswirkung oder Folge: Ausfall der Funktion „Strom leiten“ am Stromabnehmerkopf und somit Nichterfüllung der Hauptanforderung „Oberleitungsbus muss Fahrgäste sicher zum Bestimmungsort befördern“ (vgl. Schritt A. Zieldefinition)

Dadurch kann das unstrukturierte Fehlernetz aus den vier Quadranten in das Tools zur ganzheitlichen Fehlerbeschreibung überführt werden, sodass die Fehlernetze detailliert und einheitlich beschrieben werden können. Die Priorisierung fällt bei diesem Beispiel aus, da nur ein Szenario exemplarisch betrachtet wurde. Basierend auf diesen Ergebnissen ist es prinzipiell möglich, mit den Informationen aus dem erweiterten Systemmodell weiterführende Fehleranalysen (bspw. für weitere Nutzungsprozesse) durchzuführen. Daher kann die Methodik aufgrund der zyklischen Vorgehensweise mehrfach zielgerichtet verwendet werden, um eine kontinuierliche Verbesserung technischer Produkten in den frühen Phasen der Produktentwicklung zu unterstützen (siehe Abb. 3).

4 Fazit und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass die etablierten Methoden der Fehleranalyse die Produkt-Umwelt-Interaktion nur marginal berücksichtigen, und über keine einheitliche Fehlerdefinition verfügen. Deshalb wurde eine neue Methodik für eine modellbasierte und ganzheitliche Fehleranalyse mit einer einheitlichen Fehlerbeschreibung entwickelt. Dabei soll die Methodik in den frühen Phasen der Produktentwicklung mit dem Fokus auf der Nutzungsphase Anwendung finden. Am Beispiel des Oberleitungsbusses wurden zwei neue Tools (Quadranten der Wechselwirkungen und das Excel-basierte Tool) erprobt, wodurch das Fehlernetz zum Szenario der Entgleisung umfassend analysiert und beschrieben wurde. Zu diesem Zweck wurden die Informationen in einem erweiterten Systemmodell strukturiert zur Verfügung gestellt. Damit war es möglich mehreren Fehlerursachen aus der Produkt-Umwelt-Interaktion, auch in Kombination (vgl. Abb. 9), zu identifizieren (1. Anforderung an die Methodik). Des Weiteren war es möglich, mittels des Excel-basierten Tools aus dem Schritt F der Methodik, den Fehler oder das Fehlernetz einheitlich und ganzheitlich zu beschreiben (2. Anforderung an die Methodik). Somit sind die aus Wissenschaft und Technik abgeleiteten Anforderungen durch die neue Methodik erfüllt worden.

Das Neue an der Methodik ist, dass die wesentlichen Aspekte (Komponenten und Funktionen des Produktsystemmodells, Umweltfaktoren, Ereignisse und Auswirkungen) berücksichtigt werden, um die Interaktion und Wechselwirkungen zwischen dem technischen Produkt und seiner Umwelt zu identifizieren.

Vergleichbar mit anderen Methoden der Fehleranalyse (z. B. Ishikawa oder FMEA), die nur einzelne Fehlerursachen berücksichtigen, ist es mit der neuen Methodik möglich, potenzielle Fehler aus Ursachenkombinationen zu identifizieren. Ebenfalls neu ist das Excel-basierende Tool für eine standardisierte und ganzheitliche Fehlerbeschreibung. Die Entwicklung dieses Tools resultiert aus der Synthese mehrerer Fehlerdefinitionen (siehe Abb. 2).

Die Methodik bietet den Vorteil einer systematischen und ganzheitlichen Identifikation potentieller Fehler aus der Produkt-Umwelt-Interaktion in der Nutzungsphase eines technischen Produkts, das sich im Zeitpunkt der Anwendung der Methodik noch in der Produktentwicklung befindet. Infolge werden durch die frühzeitige Identifizierung von potenziellen Fehlern mögliche Funktionsausfälle oder Personenschäden