

*Band*  
**406**

Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts  
Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler (Hrsg.)  
Produktentstehung

Christian Oleff

# **Proaktives Management von Anforderungsänderungen in der Entwicklung komplexer technischer Systeme**



**Christian Oleff**

***Proaktives Management von Anforderungsänderungen in der Entwicklung komplexer technischer Systeme***

***Proactive management of requirement changes for the development of complex technical systems***

**Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

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

Band 406 der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

© Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – 2022

ISSN (Online): 2365-4422

ISBN: 978-3-947647-25-5

Das Werk einschließlich seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Herausgeber und des Verfassers unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Als elektronische Version frei verfügbar über die Digitalen Sammlungen der Universitätsbibliothek Paderborn.

Satz und Gestaltung: Christian Oleff

**Proaktives Management von  
Anforderungsänderungen in der  
Entwicklung komplexer technischer Systeme**

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)  
der Fakultät Maschinenbau  
der Universität Paderborn

genehmigte  
DISSERTATION

von  
M.Sc. Christian Oleff  
Paderborn

Tag des Kolloquiums: 09. August 2022  
Referent: Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark



## **Zusammenfassung**

Anforderungsänderungen sind ein wesentlicher Grund für Ineffizienzen und Projektfehlschläge in der Entwicklung komplexer technischer Systeme. Proaktives Management von Anforderungsänderungen hat das Potenzial, den Umgang mit Anforderungsänderungen effizienter zu gestalten. Dafür ist ein systematischer Ansatz erforderlich, der eine ganzheitliche Bewertung und Handhabung des Änderungsrisikos im industriellen Entwicklungskontext ermöglicht. Im Rahmen dieser Dissertation wird mit der ProMaRC-Methodik ein neuartiger Ansatz für das proaktive Management von Anforderungsänderungen vorgestellt. Die Methodik wurde in enger Zusammenarbeit mit Industrieanwender:innen aus der Automobilindustrie entwickelt und anhand von fünf Fallstudien validiert. Mittels automatisierter Abhängigkeitsanalyse auf Grundlage künstlicher Intelligenz wird der Anwendungsaufwand gegenüber bestehenden Ansätzen reduziert. Die teilautomatisierte Bewertung und Handhabung der Änderungswahrscheinlichkeit und -auswirkung erfolgt anhand eines modifizierten PageRank-Algorithmus und umfasst erstmals alle für die Risikoanalyse relevanten Einflussfaktoren. Die Validierung belegt, dass durch die ProMaRC-Methodik eine überzeugende Kombination aus praxistauglichem Anwendungsaufwand und Vollständigkeit der Analyse erzielt wird. Damit erschließt diese Dissertation das bisher kaum beachtete Forschungsfeld des proaktiven Managements von Anforderungsänderungen und fördert eine effizientere Produktentwicklung.

## **Abstract**

Requirement changes are a major source of inefficiencies in product development and increase the risk of project failure. Proactive management of requirement changes yields the potential to handle such changes efficiently. A systematic approach is required for proactive change management to assess and reduce the risk of a requirement change with appropriate effort in industrial application. Within the contribution at hand, a novel approach for Proactive Management of Requirement Changes (ProMaRC) is presented. It is developed in close collaboration with industry experts and validated based on five case studies. Automated dependency analysis based on artificial intelligence reduces the application effort compared to existing approaches. Semi-automated assessment and management of change likelihood and impact is performed using a modified PageRank algorithm. For the first time it includes all relevant influencing factors for risk analysis. The validation proofs that the ProMaRC approach achieves a convincing combination of practical application effort and completeness of analysis. This contribution opens up the research field of proactive change management for requirement changes which is currently almost unexploited and enables more efficient product development.



## Vorveröffentlichungen

- [GO22] GRÄBLER, I.; OLEFF, C.: Systems Engineering. Verstehen und industriell umsetzen. Springer Vieweg, Berlin 2022 (Manuskripteinreichung)
- [GOH22] GRÄBLER, I.; OLEFF, C.; HIEB, M.; PREUß, D.: Automated requirement dependency analysis for complex technical systems. In: Design Society: Proceedings of the Design Society. 17th International Design Conference. Cambridge University Press, Cambridge, UK 2022.
- [GOP22] GRÄBLER, I.; OLEFF, C.; PREUß, D.: Proactive Management of Requirement Changes in the Development of Complex Technical Systems. In Applied Sciences, 12 (2022) 4; S. 1874.
- [GWK22] GRÄBLER, I.; WIECHEL, D.; KOCH, A.; PREUß, D.; OLEFF, C.: Model-based effect-chain analysis for complex systems. In: Design Society: Proceedings of the Design Society. 17th International Design Conference. Cambridge University Press, Cambridge, UK 2022.
- [GOP21] GRÄBLER, I.; OLEFF, C.; PREUß, D.: Holistic change propagation and impact analysis in requirements management. In: RADMA: Proceedings of R&D Management Conference 2021. Innovation in an Era of Disruption 2021.
- [GOS21] GRÄBLER, I.; OLEFF, C.; SCHOLLE, P.: Strategisch-technische Anforderungsanalyse. In: Koch, R. et al.: Mehrzieloptimierte und durchgängig automatisierte Bauteilentwicklung für Additive Fertigungsverfahren im Produktentstehungsprozess. Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojektes OptiAMix. Shaker Verlag, Düren 2021; S. 31–49.
- [GPO21] GRÄBLER, I.; POTTEBAUM, J.; OLEFF, C.; PREUß, D.: Handling of explicit uncertainty in requirements change management. In: Design Society: Proceedings of the Design Society. 23rd International Conference in Engineering Design. Cambridge University Press, Cambridge, UK 2021; S. 1687–1696.
- [GOS20] GRAESSLER, I.; OLEFF, C.; SCHOLLE, P.: Method for Systematic Assessment of Requirement Change Risk in Industrial Practice. In Applied Sciences, 10 (2020) 23; S. 8697.
- [GPO20] GRÄBLER, I.; PREUß, D.; OLEFF, C.: Automatisierte Identifikation und Charakterisierung von Anforderungsabhängigkeiten – Literaturstudie zum Vergleich von Lösungsansätzen. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S.: Design fox X. Beiträge zum 30. DfX-Symposium. TuTech Verlag, Hamburg 2020; S. 199–208.
- [LWO20] LEY, P.-P.; WIRTHS, L.; OLEFF, C.; JUNGREITMAYR, F.; VAJNA, S.; PAETZOLD, K.; BORG, J. C.: A methodical approach to integrated product development in total hip arthroplasty. In: Marjanovic, D. et al.: Proceedings of the Design. 16th International Design Conference. Cambridge University Press, Cambridge, MA, USA 2020; S. 2009–2018.
- [GO19] GRÄBLER, I.; OLEFF, C.: Risikoorientierte Analyse und Handhabung von Anforderungsänderungen. In: Krause, D.; Kristin Paetzold; Wartzack, S.: Design for X. Beiträge zum 30. DfX-Symposium. TuTech Verlag, Hamburg 2019; S. 49–60.
- [GOH19] GRÄBLER, I.; OLEFF, C.; HENTZE, J.: Role Model for Systems Engineering Application. In: Design Society: Proceedings of the Design Society. 22nd International Conference on Engineering Design. Cambridge University Press, Cambridge, UK 2019; S. 1265–1274.
- [GOT19] GRÄBLER, I.; OLEFF, C.; TAPLICK, P.: Augmented Reality für die Vermittlung von Systems Engineering. In: Bertram, T. et al.: Fachtagung Mechatronik 2019. Universität Paderborn, Paderborn 2019; S. 180–185.
- [GTO19] GRÄBLER, I.; THIELE, H.; OLEFF, C.; SCHOLLE, P.; SCHULZE, V.: Method for Analysing Requirement Change Propagation Based on a Modified Pagerank Algorithm. In: Design Society: Proceedings of the Design Society. 22nd International Conference on Engineering Design. Cambridge University Press, Cambridge, UK 2019; S. 3681–3690.

- [GHO18] GRAESSLER, I.; HENTZE, J.; OLEFF, C.: Systems Engineering competencies in academic education. An industrial survey about skills in Systems Engineering. In: IEEE: Proceedings of the 13th System of Systems Engineering Conference (SoSE). IEEE, Piscataway, NJ 2018; S. 501–506.
- [GOS18] GRÄBLER, I.; OLEFF, C.; SCHOLLE, P.: Methode zur Bewertung von Anforderungsänderungen additiv gefertigter Produkte. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S.: Design for X. Beiträge zum 29. DfX-Symposium. TuTech Innovation, Hamburg 2018; S. 333–344.
- [GSH18] GRÄBLER, I.; SCHOLLE, P.; HENTZE, J.; OLEFF, C.: Semi-Automatized Assessment of Requirement Interrelations. In: Design Society: Proceedings of the Design Conference. 15th International Design Conference. Cambridge University Press, Cambridge, MA, USA 2018; S. 325–334.

# **Proaktives Management von Anforderungsänderungen in der Entwicklung komplexer technischer Systeme**

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation und Zielsetzung .....	1
1.2	Wissenschaftliches Vorgehen.....	4
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Begrifflichkeiten .....</b>	<b>7</b>
2.1	Unsicherheit und Risiko in der Produktentwicklung .....	7
2.2	Systems Engineering.....	8
2.3	Anforderungsentwicklung .....	10
2.4	Änderungsmanagement .....	11
<b>3</b>	<b>Feldstudie zur Untersuchung des Anwendungszusammenhangs..</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Stand der Forschung.....</b>	<b>17</b>
4.1	Übergreifende Ansätze zum proaktiven Management von Anforderungsänderungen in der Produktentwicklung .....	18
4.2	Identifikation von Änderungsursachen.....	23
4.3	Auswirkungen einer Anforderungsänderung.....	25
4.4	Eintrittswahrscheinlichkeit einer Anforderungsänderung .....	31
4.5	Proaktive Handhabung von Anforderungsänderungen .....	37
4.6	Forschungslücke und Forschungsfragen.....	39
<b>5</b>	<b>Anforderungen an die Methodik.....</b>	<b>41</b>

<b>6</b>	<b>Methodik zum proaktiven Management von Anforderungsänderungen .....</b>	<b>45</b>
6.1	Identifikation von Änderungsursachen.....	47
6.2	Ganzheitliche Risikoanalyse .....	53
6.2.1	Abhängigkeitsanalyse .....	53
6.2.2	Auswirkungsanalyse .....	59
6.2.3	Wahrscheinlichkeitsanalyse .....	70
6.3	Auswahl proaktiver Maßnahmen .....	78
6.4	Software-Werkzeug .....	84
6.5	Einführung und Anwendung der ProMaRC-Methodik.....	90
<b>7</b>	<b>Validierung der Methodik in der Automobilindustrie .....</b>	<b>95</b>
7.1	Fallstudien – Motorsteuergeräte, Knickarmroboter und weitere .....	97
7.2	Validierung der Methoden.....	100
7.3	Validierung der Verarbeitbarkeit unterschiedlicher Eingangsdaten .....	110
7.4	Validierung der Anwendbarkeit.....	114
7.5	Validierung des Ergebnisses .....	125
7.6	Methodik-Erfolg .....	130
7.7	Anforderungserfüllung und Diskussion .....	134
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>138</b>

**Anhang**

<b>A1</b>	<b>Grundlagen und Begriffsdefinitionen .....</b>	<b>A-157</b>
A1.1	Forschungsprozess nach Ulrich .....	A-157
A1.2	Systems Engineering-Kernelemente .....	A-158
A1.3	Qualitätskriterien für Anforderungen .....	A-159
A1.4	Abhängigkeitsarten zwischen Anforderungen.....	A-160
<b>A2</b>	<b>Aktivitäten zur Einbindung von Industrieanwender:innen .....</b>	<b>A-163</b>
A2.1	Weiterführende Unterlagen – Fragebögen .....	A-166
A2.2	Weiterführende Unterlagen – Workshops.....	A-180
<b>A3</b>	<b>Untersuchung des Anwendungszusammenhangs.....</b>	<b>A-197</b>
<b>A4</b>	<b>Methode zur Identifikation von Unsicherheiten .....</b>	<b>A-199</b>
<b>A5</b>	<b>Methode zur Bewertung der Änderungswahrscheinlichkeit.....</b>	<b>A-201</b>
A5.1	Übersicht der Änderungsinitiatoren und exemplarischer Änderungsimpulse .....	A-201
A5.2	Literaturbasierte Ausgangswerte für die Berechnung der exogenen Änderungswahrscheinlichkeit .....	A-202
A5.3	Übersicht der Projektcharakteristika zur Auswahl von Vergleichsprojekten .....	A-203
<b>A6</b>	<b>Methode zur Auswahl von proaktiven Maßnahmen.....</b>	<b>A-205</b>
<b>A7</b>	<b>Software-Werkzeug zur teilautomatisierten Anwendung der Methodik.....</b>	<b>A-207</b>
A7.1	Mock-Up .....	A-207
A7.2	UML und SysML Diagramme.....	A-210
A7.3	Benutzerhandbuch .....	A-228

<b>A8 Referenzprozess .....</b>	<b>A-277</b>
A8.1 Leitfragen für das unternehmensspezifische Tailoring .....	A-277
A8.2 Referenzmodelle zur Potenzialanalyse.....	A-278
A8.2.1 Repräsentative Anwendungsszenarien.....	A-278
A8.2.2 Exemplarische Leistungskennwerte.....	A-286
A8.2.3 Regulatorische Einordnung.....	A-288
A8.3 Referenzmodelle zur inhaltlichen Einordnung .....	A-290
A8.3.1 Primäre Anwendungspotenziale in der Systems Engineering- Prozesslandschaft.....	A-290
A8.3.2 Sekundäre Anwendungspotenziale in der Systems Engineering- Prozesslandschaft.....	A-291
A8.4 Referenzmodelle zur projektspezifischen Einordnung .....	A-292
A8.4.1 Einordnung in die Aufgabenbereiche des Projektmanagements...A-292	
A8.4.2 Einordnung in das Systems Engineering-Rollenmodell.....	A-293
<b>A9 Validierung – Fallstudie 4 (Knickarmroboter) .....</b>	<b>A-295</b>

**Abkürzungsverzeichnis**

ARCA	Automated Requirement Change Management for complex technical systems
engl.	Englisch
etc.	et cetera
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
GUI	Graphical User Interface
ImPaKT	IKT-befähigte modelbasierte Auswirkungsanalyse in der Produktentwicklung
insb.	insbesondere
KI	künstliche Intelligenz
max.	maximal
min.	minimal
MLR	Multinomiale logistische Regression
OptiAMix	Mehrzieloptimierte und durchgängig automatisierte Bauteilentwicklung für additive Fertigungsverfahren im Produktentstehungsprozess
ProMaRC	Proactive Management of Requirement Changes
ReqIF	Requirements Interchange Format
RNN	Recurrent Neural Network
SE	Systems Engineering
SVM	Support Vector Machine
UML	Unified Modeling Language
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Zielsetzung

Die Entwicklung komplexer technischer Systeme ist geprägt von Unsicherheiten und daraus resultierenden Anforderungsänderungen. Unsicherheiten sind unvermeidbar und können vielfältige Ursachen haben, beispielsweise ein unvollständiges Systemverständnis des Entwicklungsteams oder volatile Kundenbedürfnisse [Neu16, S. 26 ff.; PG20, S. 76 f.; Gra03, S. 566 ff.]. Zur Befriedigung der Stakeholderbedürfnisse müssen im Entwicklungsverlauf kontinuierlich die zugrundeliegenden Anforderungen angepasst werden. Hierzu werden neue Anforderungen ergänzt, bestehende Anforderungen geändert und veraltete Anforderungen gelöscht (vgl. Abbildung 1-1).

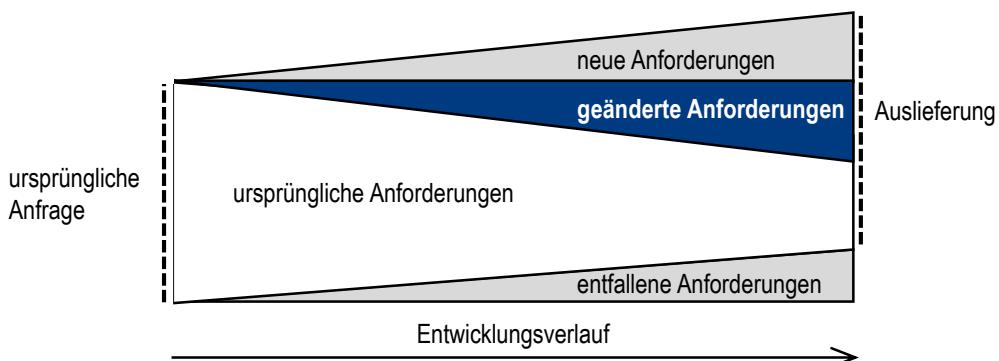


Abbildung 1-1: *Unsicherheitsbedingte Anpassungen des Anforderungssets im Entwicklungsverlauf in Anlehnung an [FMC05, S. 143; GO22]*

Die **hohe Anzahl an Anforderungsänderungen** wird durch Studien aus unterschiedlichen Entwicklungskontexten belegt [Sta17; MS12; FHS15; ABN06]. Für die Hälfte aller Systemanforderungen wird eine hohe Änderungswahrscheinlichkeit angenommen [HVM18, S. 312], weshalb Anforderungsänderungen insbesondere in den frühen Phasen der Entwicklung eine vorrangige Bedeutung gegenüber Ergänzungen oder Löschungen zukommt [FHS15, S. 45]. Exemplarisch kann die empirische Untersuchung eines sechsjährigen Projektverlaufs zur Entwicklung einer Flugzeugturbine des Unternehmens Rolls-Royce angeführt werden: In dem 700 Systemanforderungen umfassenden Anforderungsset wurden über 1000 dokumentierte Anpassungen vorgenommen, von denen der überwiegende Anteil Anforderungsänderungen waren [FHS15, S. 38]. Das tatsächliche Ausmaß an Anforderungsänderungen ist noch größer, da nicht dokumentierte Anforderungsänderungen, die den formellen Änderungsprozess nicht durchlaufen, in Änderungsstatistiken unberücksichtigt bleiben.

Jede Anforderungsänderung führt zu unmittelbaren Korrekturkosten und zusätzlichem Zeitbedarf in der Entwicklung. Anforderungen bilden aufgrund von logischen oder physikalischen Abhängigkeiten ein komplexes Netzwerk [Neu16, S. 24; HSW21, S. 2445 f.]. Über die direkt anfallenden Korrekturkosten und Zeitaufwände hinaus können sich Anforderungsänderungen aufgrund der Abhängigkeiten indirekt auf weitere Anforderungen auswirken (sogenannte Fortpflanzungseffekte bzw. **Änderungspropagation**). Eine Anforderungsänderung führt daher häufig zu einer Reihe nachfolgender Anforderungsänderungen [GWB09, S. 6; KCC12, S. 339; ECZ04, S. 10], deren Umsetzung wiederum Zeit- und Kostenaufwände verursacht.

Wie eine solche Änderungspropagation in der Entwicklungspraxis verläuft, illustriert ein Beispiel aus dem Kontext der Entwicklung eines LED-Frontscheinwerfers für das Unternehmen BMW [Mor12, S. 1 f.]. Die Anforderung an die maximale Temperatur des LED-Substrats ist ein zentraler Einflussfaktor auf die Leistungsfähigkeit des Scheinwerfers und wurde ursprünglich auf 120 °C festgelegt. Im Laufe der Entwicklung wurde die maximale Temperatur zur Effizienzsteigerung auf 90 °C reduziert. Zur Reduktion der Temperatur des LED-Substrats bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit des Scheinwerfers mussten mehr LEDs verbaut werden, deren Energiebedarf jeweils geringer ist. Dies wiederum erforderte die Anpassung der Anforderungen an den Bauraum, sodass aus der ursprünglichen Anforderungsänderung durch Propagationseffekte Änderungen von Anforderungen an Energiebedarf, Anzahl der LEDs und Geometrie resultierten. [Mor12, S. 1 f.]

Die effiziente Handhabung von Anforderungsänderungen ist eine zentrale Herausforderung in der Entwicklung komplexer Systeme [Kur18, S. 97; FHS15, S. 54; HVM18, S. 311; MSS12, S. 907]. Bisher werden Anforderungsänderungen in der Entwicklungspraxis reaktiv, unsystematisch und auf Basis von subjektiven Einschätzungen gehandhabt [SHB19, S. 3758 f.; JL18, S. 181 f.; GOS20, S. 2]. Studien zeigen seit vielen Jahren, dass die **ineffiziente Handhabung** von Anforderungsänderungen zu den bedeutendsten Ursachen für das Verfehlen von vorgegebenen Projektzielen (Qualität, Kosten und Zeit) zählt [Sta95; Sta11; Sta17; Lin97; ABN06; GHS12].

Trotz dieser Beobachtungen **fehlen in der industriellen Praxis Hilfsmittel**, die über die reaktive Handhabung von Änderungsanträgen hinausgehen und ein systematisches Vorgehen zum proaktiven Management von Anforderungsänderungen unterstützen. Proaktives Management ist die Vorausplanung und das gezielte Handeln, um den Verlauf des Änderungsgeschehens selbst zu bestimmen und Entscheidungssituationen herbeizuführen [Dud18]. Es erfordert die Identifikation und Handhabung potenzieller Anforderungsänderungen in der Phase des latenten Änderungsbedarfs, also bereits bevor der Änderungsbedarf in einem formalen Änderungsantrag erfasst wurde [Lin98, S. 107 ff.]. Weder kommerzielle Softwareprodukte zur Anforderungsentwicklung, wie beispielsweise IBM Doors, Sparx Enterprise Architect oder Siemens Polarion [Ebe19, S. 315 ff.] bieten

Funktionalitäten für ein proaktives Management<sup>1</sup>, noch existiert ausreichend Forschung zum proaktiven Umgang mit Anforderungsänderungen [MSS12, S. 907; JL18, S. 181 f.; HVM18, S. 312]. Stattdessen liegt der Fokus auf dem reaktiven Umgang mit formal erfassten Änderungsanträgen und der konsistenten Implementierung von Änderungsaufträgen. Eine vorausschauende Reduzierung der Anzahl von Änderungsanträgen und daraus resultierender Änderungsaufträge sowie deren kostensenkende Früherkennung ist nicht möglich.

**Proaktives Management** von Anforderungsänderungen vergrößert den vorhandenen Handlungsspielraum im Umgang mit Anforderungsänderungen und reduziert die negativen Auswirkungen, indem die Phase vor dem formalen Änderungsbedarf betrachtet wird (vgl. Abbildung 1-2). Zum Beispiel können Änderungen vermieden [Lin98, S. 112 ff.] oder vorverlagert werden, um Änderungsauswirkungen zu reduzieren [GRJ13, S. 148; Wic17, S. 94].

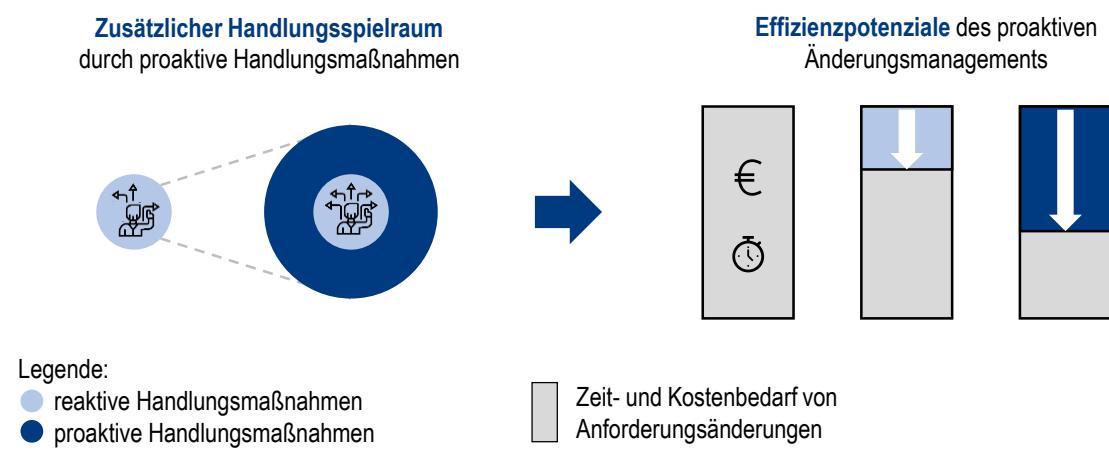


Abbildung 1-2: *Effizienzpotenziale durch proaktives Management von Anforderungsänderungen*

Um die Potenziale des proaktiven Managements von Anforderungsänderungen in der industriellen Praxis zu erschließen, sind eine methodische Grundlage für die Bewertung des Änderungsrisikos und ein systematisches Vorgehen zur Auswahl von Handlungsmaßnahmen notwendig. Aus den genannten Defiziten wird folgende Zielsetzung für die vorliegende Arbeit abgeleitet:

**Entwicklung einer Methodik für das proaktive Management von  
Anforderungsänderungen in der Entwicklung komplexer technischer Systeme.**

<sup>1</sup> geprüft: Februar 2022

## 1.2 Wissenschaftliches Vorgehen

Das wissenschaftliche Vorgehen orientiert sich am Ablauf des **Forschungsprozesses zur angewandten Wissenschaft nach ULRICH** [Ulr81, S. 20] (vgl. Abbildung 1-3 und Anhang A1.1). Dieser wissenschaftstheoretische Ansatz wurde ausgewählt, da die industrielle Praxis zur Förderung eines anwendungsorientierten Ergebnisses über alle Vorgehensschritte hinweg zyklisch einbezogen wird. Zur Ausgestaltung der einzelnen Vorgehensschritte wird ergänzend auf Elemente der **Design Research Methodology (DRM)** nach BLESSING und CHAKRABARTI [BC09] zurückgegriffen. Die DRM bietet umfassende Unterstützung bei der Konzeptionierung und Umsetzung von Forschungsphasen und ist strukturell mit der Ablauflogik nach ULRICH vereinbar. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen der Forschungsmethodik (z. B. [HC10; ECS03; JP14; PTR07]) wird in der DRM der Schwerpunkt auf die Erforschung neuer Lösungsansätze zur Unterstützung der technischen Systementwicklung gelegt. Auf diese Weise werden Rahmenbedingungen und Konventionen der technischen Systementwicklung und des Maschinen- und Anlagenbaus berücksichtigt. Konkret werden Konzepte zur Definition des Forschungsziels und -umfangs (DRM-Abschnitt: Research Clarification), die entwicklungsbegleitende Überprüfung der Forschungsergebnisse (DRM-Schritt: Support Evaluation) sowie die differenzierte Validierung von Anwendung und Erfolg der Methodik (DRM-Abschnitt: Descriptive Study II) in adaptierter Form aus der DRM übernommen.

Der erste Vorgehensschritt ist die **Erfassung praxisrelevanter Probleme** (Kapitel 1). Dafür werden bestehende Studien zu Problemen in der Produktentwicklung mit Bezug zur Anforderungsentwicklung ausgewertet und die Effizienzsteigerung im Umgang mit Anforderungsänderungen als grundlegende Herausforderung identifiziert. Daraus wird das Forschungsziel abgeleitet, durch proaktives Management von Anforderungsänderungen eine Unterstützung für die industrielle Praxis zu entwickeln.

Zur Absicherung der Relevanz des Problems und der Eignung des proaktiven Änderungsmanagements als Lösungsraum wird im zweiten Schritt die **Untersuchung des relevanten Anwendungszusammenhangs** vorgenommen (Kapitel 2 und 3). Neben einer Analyse von Fach- und Grundlagenliteratur zu Einflussfaktoren und deren Wirkzusammenhängen wird im Rahmen des öffentlich geförderten BMBF-Projekts OptiAMix [KGZ21] eine zweijährige Feldstudie durchgeführt. Ziel der Feldstudie ist es, die Relevanz der Problemstellung abzusichern, Einflussfaktoren und Wirkzusammenhänge des proaktiven Managements zu ermitteln und Rahmenbedingungen einer industriellen Anwendung zu erfassen. Dafür wird ein initiales Lösungskonzept für das proaktive Änderungsmanagement erarbeitet und anhand von drei Industrie-Fallstudien in der Entwicklungspraxis erprobt. Begleitend zur Entwicklung erfolgen kontinuierlich Testanwendungen von Industrieanwender:innen. Abgeschlossen wird die Feldstudie mit einer Befragung der Industrieanwender:innen.

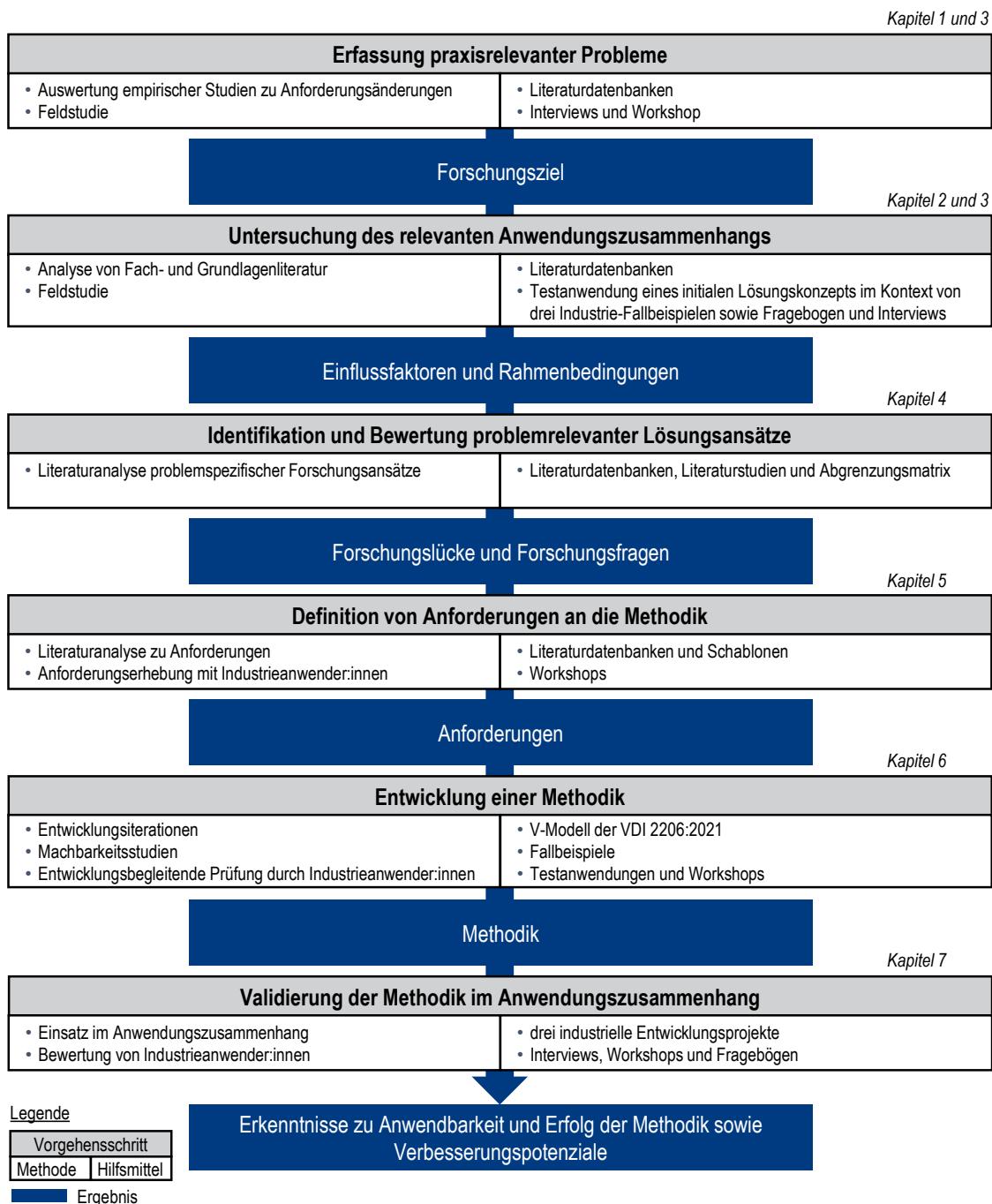
Das Verständnis des Anwendungszusammenhangs bildet das Grundgerüst für die **Identifikation und Bewertung problemrelevanter Lösungsansätze** (Kapitel 4). Da bisher keine Lösungsansätze in der industriellen Praxis etabliert sind, erfolgt die Identifikation relevanter Forschungsansätze mittels Literaturanalyse. Beginnend mit der Auswertung von Literaturstudien, werden die Befunde anhand einer systematischen Literaturanalyse angereichert. Als Hilfsmittel für Bewertung und Gegenüberstellung der Ansätze wird eine Abgrenzungsmatrix verwendet. Die Defizite im Stand der Forschung werden in einer Forschungslücke zusammengeführt und als Forschungsfragen abgebildet.

Auf Grundlage der Forschungslücke werden **Anforderungen an die Methodik** formuliert (Kapitel 5). Die Vollständigkeit der Anforderungen wird durch eine Kombination aus Feldstudie, Literaturanalyse und zwei ergänzenden Workshops zur Anforderungserhebung gewährleistet. Die Workshops werden mit Industrieanwender:innen durchgeführt, welche die Entwicklung und Validierung der Methodik in den nachfolgenden zwei Schritten unterstützen. Abschließend werden die Ergebnisse konsolidiert und Anforderungen an die Methodik spezifiziert.

Die **Entwicklung der Methodik** (Kapitel 6) wird auf die Anforderungserfüllung ausgerichtet, indem die Lösungselemente regelmäßig Machbarkeitsstudien und Testanwendungen von Industrieanwender:innen unterzogen werden. Für Machbarkeitsstudien werden Trainings- und Testdaten erzeugt. Testanwendungen von Industrieanwender:innen erfolgen im Rahmen des öffentlich geförderten BMBF-Projekts ARCA [GOP22] mit einem führenden Entwicklungsdienstleister der Automobilbranche. Die Entwicklung der Methodik erfolgt iterativ, in sachlogischer Anlehnung an das V-Modell der VDI/VDE 2206:2221 [VDI/VDE2206] und in engem Austausch mit Industrieanwender:innen. Eine Methodik wird dabei als System von zusammengehörigen Modellen, Methoden und Hilfsmitteln zur Lösung einer theoretischen und/oder praktischen Aufgabenstellung verstanden [Lau96; Boc96; Hey99; Grä99]. Im ersten Schritt der Entwicklung werden spezifische Anforderungen an die einzelnen Bestandteile der Methodik definiert. Anschließend werden die Methoden und Modelle konzipiert, entwickelt, prototypisch in einem Software-Werkzeug implementiert und von Industrieanwender:innen in Workshops geprüft. Verbesserungspotenziale werden für die nachfolgenden Iterationen priorisiert und zielgerichtet umgesetzt. Für die Einführung und Anwendung der Methodik wird ein Referenzprozess definiert.

Die abschließende **Validierung der Methodik im Anwendungszusammenhang** (Kapitel 7) dient der Bewertung von Anwendbarkeit und Erfolg sowie der Identifikation verbleibender Verbesserungspotenziale. Anwendbarkeit inkludiert die Prüfung, ob die Methodik in der Entwicklungspraxis angewandt werden kann und den angestrebten Zweck (Bewertung des Änderungsrisikos einer Anforderung und Auswahl einer proaktiven Handlungsmaßnahme) erfüllt [BC09, S. 184]. Dafür wird die Erfüllung der Anforderungen an die Methodik bewertet. Erfolg geht darüber hinaus. Es wird geprüft, ob sich die Anwendung der Methodik erwartungsgemäß auswirkt (Beitrag zur Effizienzsteigerung in

der Entwicklung) [BC09, S. 185]. Insgesamt werden fünf Fallstudien betrachtet, von denen drei aus der Industrie stammen. Darüber hinaus werden Industrieanwender:innen befragt. Hilfsmittel sind Workshops, ein Fragebogen und darauf aufbauende Interviews.



*Abbildung 1-3: Überblick zum wissenschaftlichen Vorgehen und Aufbau der Arbeit (aufbauend auf [Ulr81])*

## 2 Grundlagen und Begrifflichkeiten

In diesem Kapitel wird ein Überblick über Themenfelder und Begrifflichkeiten gegeben, die für das proaktive Management von Anforderungsänderungen relevant sind. Dazu zählen die Produktentwicklung, das Systems Engineering, die Anforderungsentwicklung und das Änderungsmanagement.

### 2.1 Unsicherheit und Risiko in der Produktentwicklung

Die Entwicklung komplexer technischer Systeme ist ein zentraler Bestandteil der Produktentstehung (vgl. Abbildung 2-1). Die Produktentstehung mündet in der Produktnutzung und umfasst die vier Abschnitte Strategische Planung und Innovationsmanagement, Systems Engineering und Entwicklungsmanagement, Realisierung und Produktionsmanagement sowie die digitale und virtuelle Produktentstehung [Grä15, S. 168].

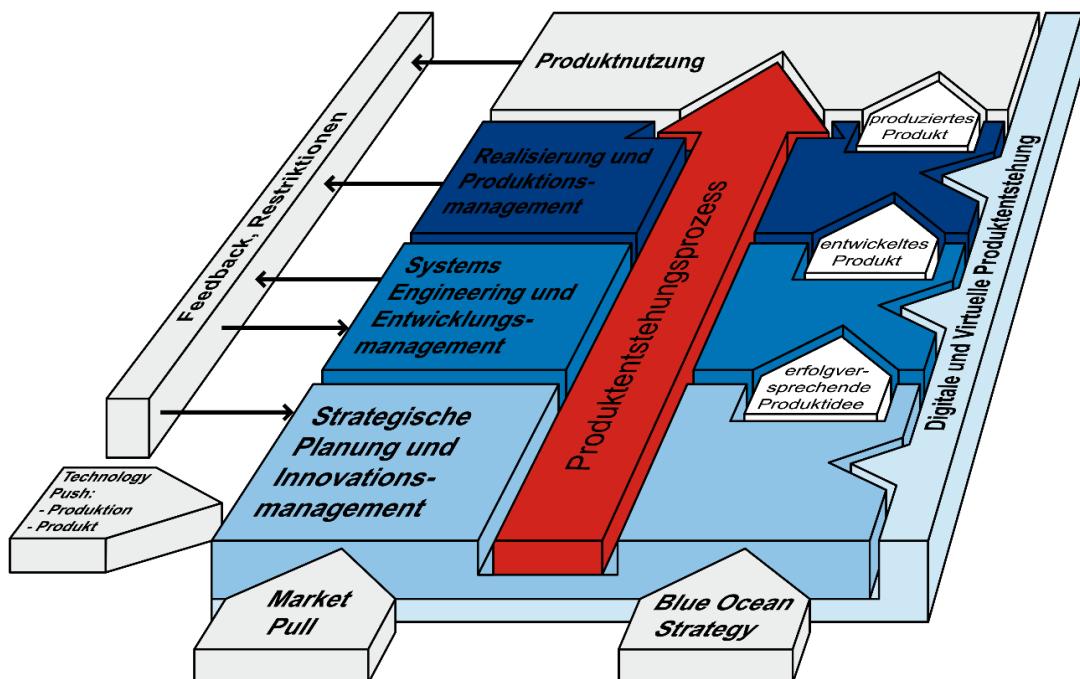


Abbildung 2-1: Handlungsfeld Produktentstehung nach Gräßler [Grä15, S. 168]

Im Abschnitt „Systems Engineering und Entwicklungsmanagement“ erfolgt die Produktentwicklung. Die Produktentwicklung verwertet die erfolgversprechende Produktidee ebenso wie Informationen und Anforderungen aus allen Phasen des generischen Produktlebenszyklus [GP21, S. 12 ff.], um ein bedarfsgerechtes Produkt zu entwickeln.

Das Vorgehen in der Produktentwicklung wird durch **Entwicklungsmethodik** unterstützt. Dazu zählen neben dem Systems Engineering [WRF15] beispielsweise die Richtlinien VDI/VDE 2206 [VDI/VDE2206] und VDI 2221 [VDI2221], die Pahl / Beitz Konstruktionslehre [BG21], das Integrated Design Engineering [Vaj22], das Münchener Vorgehensmodell [Lin09] oder die Entwicklungsmethodik für die kundenindividuelle Massenproduktion [Grä04].

Entwicklungsmethodik dient unter anderem dazu, die unvermeidbaren Unsicherheiten in der Produktentwicklung zu handhaben. Ausprägungen von Unsicherheiten sind Wissens- und Definitionslücken sowie äußere Einflüsse [MH06, S. 84]. In der Handhabung sind aleatorische und epistemische Unsicherheit zu unterscheiden [EKM10, S. 215]. Während die aleatorische Unsicherheit (zufällige Ereignisse wie z. B. eine Naturkatastrophe) nicht beeinflussbar ist, wird das Ausräumen der epistemischen Unsicherheit (z. B. fehlende Informationen) im Rahmen der Produktentwicklung angestrebt [PG20, S. 77]. Das kann beispielsweise durch Experimente, Simulationen oder Kunden-Reviews erreicht werden [PG20, S. 77].

Unsicherheiten sind der Ursprung von **Risiken**. Risiken werden definiert als die Auswirkung von Unsicherheit auf Ziele [DIN 31000]. Im Folgenden wird nicht der dichotomen Deutung, sondern der traditionellen Deutung des Risikobegriffs gefolgt, Risiken als möglichen Verlust zu interpretieren [Van12, S. 7 ff.]. Grund dafür ist, dass die proaktive Handhabung von Anforderungsänderungen primär auf die Reduzierung negativer Auswirkungen und die Minderung des Projektfehlschlagrisikos abzielt (vgl. Kapitel 1.1). Risiken können anhand der drei Dimensionen Zeit, Kosten und Qualität unterschieden werden [Bro99, S. 60 ff.]. Das Management von Risiken basiert auf der iterativen Durchführung der folgenden vier Tätigkeiten:

- 1) Risikoidentifikation: Identifikation, Sammlung und Spezifizierung von Risiken
- 2) Risikoanalyse und -bewertung: Analyse und Bewertung von Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkung des Risikos
- 3) Risikosteuerung: Auswahl und Implementierung von Risikosteuerungsmaßnahmen
- 4) Risikoüberwachung: Kontinuierliche Überprüfung und Neubewertung der getroffenen Annahmen und Kommunikation von Risiken mit Stakeholdern [DIN 31000]

## 2.2 Systems Engineering

Systems Engineering ist eine Entwicklungsmethodik, die originär für die Entwicklung komplexer technischer Systeme gestaltet wurde. Es zielt auf das Verstehen von Wirkzusammenhängen und die Beherrschung der Produktentwicklung trotz wachsender **System- und Lebenszykluskomplexität** ab (vgl. Abbildung 2-2) [GO22]. Das Wachstum der Systemkomplexität resultiert aus grundlegenden Trends wie z. B. der Individualisierung, der Globalisierung, neuen Konsummustern sowie der Wissensgesellschaft und Technologiekonvergenz [KG18, S. 1]. Diese Trends zwingen Unternehmen, die Bedürfnisbefriedigung der Stakeholder in den Fokus der Entwicklung zu rücken, was in komplexen Anforderungssets mündet [Fra09, S. 27]. Die Erfüllung der Anforderungen erfordert komplexe technische Lösungen bzw. Systeme. Die Komplexität der Systeme ist struktureller und dynamischer Natur [Sen92]. Strukturelle Komplexität ist auf die Anzahl, Varietät und

Konnektivität der Systemelemente zurückzuführen [Pat82, S. 23]. Die dynamische Komplexität resultiert aus der Vielzahl unterschiedlicher Systemzustände [Sen92] und führt zu einer teilweisen Unvorhersehbarkeit des Systemverhaltens. Neben der Systemkomplexität wächst auch die Lebenszykluskomplexität, die aus dem Streben nach Material- und Informationszirkularität eine vorausschauende Berücksichtigung nachgelagerter Lebenszyklusphasen des zu entwickelnden Systems erfordert [GO22]. Aufgrund der zuvor erläuterten Unsicherheiten und daraus resultierender Risiken ist der effiziente Umgang mit dieser Komplexität eine zentrale Herausforderung in der Produktentwicklung [Grä04, S. 44; SRB18, S. 7; GKK16, S. 111].

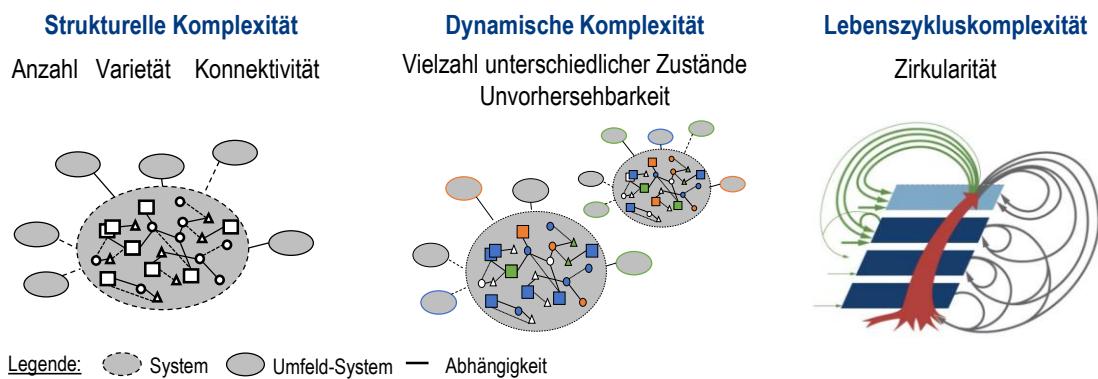


Abbildung 2-2: Komplexität in der Produktentwicklung (vgl. [GO22]; Bildquelle rechts: [GP21])

Unsicherheiten und Risiken in der Produktentwicklung wird durch das Zusammenspiel von drei Kernelementen entgegengewirkt [GO22]:

- 1) Systemdenken: Ganzheitliche Denkweise mit dem Ziel einer lebenszyklusgerechten Systementwicklung und Aufrechterhaltung der Systemintegrität.
- 2) Entwicklungsmethodik: Anhand des V-Modells sachlogisch miteinander verknüpfte Entwicklungsprozesse (vgl. Anhang A1.2).
- 3) Systems Engineer: Rollen und Aufgaben zur Anwendung von Systems Engineering (vgl. Anhang A1.2) [GO22]

Die drei Kernelemente zielen darauf ab, die Stakeholderbedürfnisse unter Einhaltung der Zeit-, Kosten- und Qualitätsvorgaben zu erfüllen [GO22]. Durch modellbasiertes Systems Engineering (MBSE) [WSW20; Wei14] und systematisches Front-Loading (Vorverlagerung von Entwicklungs- und Prüfaktivitäten) sollen unsicherheitsbedingte Fehlerkosten minimiert werden [WRF15, S. 14]. Mit MBSE wird Wissen aus der Entwicklung in einem Systemmodell abgebildet, das unter anderem die Basis für einen Digitalen Zwilling [SAT20; STG20; GP20] bilden kann. MBSE und das Front-Loading heben die Anforderungsentwicklung (engl. Requirements Engineering) als zentrale Komponente in der Entwicklung hervor [GP22, S. 16]. Statt Anforderungen als gegebenen und konstanten Startpunkt der Entwicklung zu interpretieren, wird im gesamten Entwicklungsverlauf die

Identifikation von Bedürfnissen, Ableitung von Anforderungen und bedarfsgerechte Integration von Anforderungsänderungen gefordert [WRF15, S. 54 ff.].

## 2.3 Anforderungsentwicklung

Die **Hauptaktivitäten** in der Anforderungsentwicklung sind die Ermittlung, Dokumentation, Prüfung und Abstimmung sowie Verwaltung von Anforderungen [ISO29148; CMMI-DEV]. Die Ermittlung umfasst die Erhebung, Konkretisierung und Verfeinerung von Anforderungen. Die Dokumentation dient der adäquaten Beschreibung von Anforderungen. Die Prüfung und Abstimmung stellt sicher, dass die Anforderungen den geforderten Qualitätskriterien genügen. Die Verwaltung wird als Anforderungsmanagement (engl. Requirements Management) bezeichnet und erfolgt parallel. Das Anforderungsmanagement beinhaltet Maßnahmen zur Strukturierung, Aufbereitung und Änderung von Anforderungen. [PR15, S. 4; BG21, S. 191 ff.]

Eine **Anforderung** wird nach IEEE 610.12 definiert als:

- 1) a condition or capability needed by a user to solve a problem or achieve an objective.
- 2) a condition or capability that must be met or possessed by a system or system component to satisfy a contract, standard, specification, or other formally imposed documents.
- 3) a documented representation of a condition or capability as in 1) or 2). [IEEE 610.12]

Anforderungen werden hinsichtlich ihrer Art unterschieden (z. B. funktionale oder nicht-funktionale Anforderungen, Qualitätsanforderungen und Rahmenbedingungen) [PR15, S. 8]. Ebenso kann die Perspektive unterschieden werden, aus der die Anforderungen formuliert sind, z. B. Stakeholderanforderung (Stakeholderperspektive) und Systemanforderung (Entwicklungserspektive) [WRF15, S. 31]. Weil Anforderungsänderungen bei allen Anforderungen auftreten, wird im Folgenden auf diese Unterscheidung verzichtet.

Die **Dokumentation** von Anforderungen erfolgt in natürlicher Sprache (z. B. Prosa), durch konzeptuelle Modelle (z. B. Anwendungsfalldiagramme) oder einer Kombination [PR15, S. 36 ff.]. Dabei sind Qualitätskriterien wie die 4C's („complete“, „clear“, „consistent“ und „correct“ [GHS12, S. 40]) einzuhalten. Eine Übersicht weiterer Qualitätskriterien ist Anhang A1.3 zu entnehmen. Teil der Anforderungsdokumentation sind neben der Anforderungsbeschreibung auch ergänzende Attribute. Dazu zählen beispielsweise Priorität (z. B. [PR21, S. 205 ff.]), Quelle (z. B. [GDB18, S. 9 ff.]), Spezifikationslevel (z. B. [RS14, S. 48 ff.]) und Informationen zur Verfolgbarkeit (z. B. [PR15, S. 46 ff.]).

Die Anforderungen werden in einem **Anforderungsset** gesammelt, welches eine Menge von zusammengehörigen Anforderungen umfasst, die ebenfalls Qualitätskriterien unterliegt (vgl. Anhang A1.3). Eine Unterscheidung von Lasten- und Pflichtenheft [BG21, S. 183 ff.] ist nicht notwendig, da das proaktive Änderungsmanagement für beide Dokumente anzuwenden ist – beispielsweise zur Erstellung eines Angebots (Lastenheft) oder

während der Entwicklung (Pflichtenheft). Änderungen des Anforderungssets resultieren aus dem Ergänzen, Ändern und Entfernen von Anforderungen [FMC05, S. 143]. Davon ist das Ändern einer Anforderung für das proaktive Änderungsmanagement von Anforderungen relevant.

Eine **Anforderungsänderung** ist definiert als jede Änderung, die an einer formal dokumentierten Anforderung vorgenommen wird [GOS20, S. 4]. Das umfasst nicht die Löschung oder Ergänzung von Anforderungen. Ebenso umfasst es nicht die kontinuierliche Verfeinerung von Anforderungen, die als Ergänzung zu verstehen ist. Löschung und Ergänzung unterscheiden sich von Änderungen, da jeweils spezifische Auslöser relevant und zu handhaben sind. Anforderungsänderungen resultieren im Wesentlichen aus Korrekturen oder Verbesserungen / Anpassungen (z. B. Kosteneinsparung) [WB85; Wic17, S. 15]. Aufgrund von Abhängigkeiten zwischen Anforderungen umfasst dies auch Korrekturen oder Verbesserungen durch Propagationseffekte. Anforderungsabhängigkeiten werden in bestehenden Referenzmodellen inhaltlich differenziert (z. B. [DP03; Poh96]). Beispielhafte Differenzierungen sind Beschränkung, Weiterentwicklung oder Verfeinerung [vgl. Anhang A1.4]. Eine Unterscheidung nach Propagationsverhalten wird nur vereinzelt vorgenommen (vgl. [ZLZ14, S. 44 f.; GKv14, S. 958]).

**Änderungspropagation** wird als Ereignis definiert, bei dem die Änderung einer Anforderung zur Änderung einer anderen Anforderung führt, die sonst nicht aufgetreten wäre [HVM18, S. 311]. Änderungspropagation ist im Anforderungskontext eine zentrale Änderungsursache [GWB09, S. 6; KCC12, S. 339].

Die Abschätzung von **Änderungsauswirkungen** ist daher auf Basis direkter Auswirkungen und Auswirkungen durch Propagation vorzunehmen [JL05, S. 124 ff.]. Auswirkungsdimensionen sind nach einer Analyse von WICKEL Produkt, Prozess und Ressourcen [Wic17, S. 13]. Die Bewertung der Auswirkungen kann anhand von Zeit, Kosten und Qualität erfolgen [Wic17, S. 13]. Obwohl das Ausmaß der Auswirkungen von Änderungen im Laufe der Entwicklung zunimmt [GB11, S. 110 ff.], treten Änderungen vermehrt in späten Entwicklungsphasen auf [FHS15; MD12; AK07]. Darin liegt ein wesentliches Kostensenkungspotenzial des proaktiven Änderungsmanagements.

## 2.4 Änderungsmanagement

Der Begriff „Änderungsmanagement“ wird im Kontext der Handhabung von Anforderungen ebenso verwendet wie im Kontext organisatorischer Änderungen bzw. dem unternehmerischen Veränderungsmanagement oder Kaizen (engl.: „Change Management“ und „Continuous Improvement Process (CIP)“). Im Folgenden wird der Begriff „Änderungsmanagement“ synonym zu dem Anforderungsänderungsmanagement technischer Systeme verwendet. Die Ziele und Aktivitäten im Änderungsmanagement unterscheiden sich im Verlauf einer Anforderungsänderung. Dabei werden die drei Phasen „vor dem Änderungsbedarf“ (kein expliziter Änderungsbedarf für eine Anforderung bekannt), „Entscheidung über den Änderungsbedarf“ (Auswirkungsanalyse und Abwägung von

Entscheidungsoptionen) und „Implementierung des Änderungsbedarfs“ unterscheiden [HCC13, S. 478 ff.].

Abhängig von der Phase des Änderungsverlaufs werden unterschiedliche Ziele verfolgt (vgl. Abbildung 2-3). Ziele des Änderungsmanagements sind:

- Vermeidung einer Änderung,
- Vorverlagerung einer Änderung,
- Effektivität der Änderungsentscheidung,
- Effizienz der Änderungsimplementierung,
- Lernen aus den Erkenntnissen. [FGN00, S. 172]

Die Zielerreichung wird durch Änderungsprozesse unterstützt. Neben industriell etablierten Standards und Richtlinien zum Änderungsprozess (z. B. DIN 199-4 oder VDA 4965), werden in der Literatur unterschiedliche Änderungsprozesse definiert [Dal82; RDT03; JEC11; Lin98; WIC19]. Den Ansätzen ist gemein, dass für die Phase vor dem Änderungsbedarf keine Hilfestellung geboten wird.

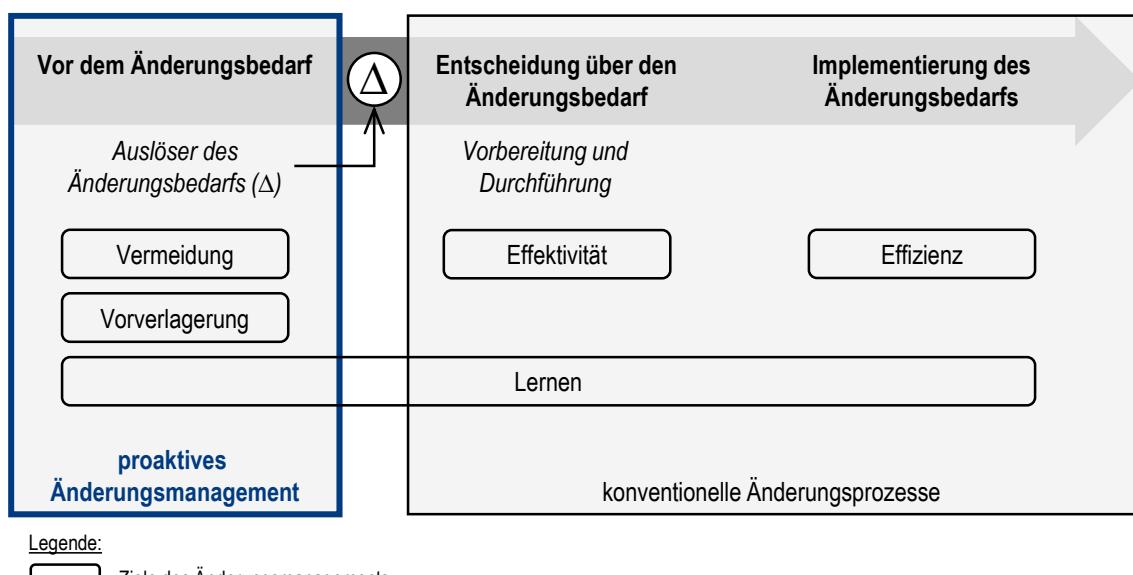


Abbildung 2-3: Ziele und Prozesse im Änderungsmanagement

Die mangelnde Unterstützung eines proaktiven Managements von Anforderungsänderungen vor dem Änderungsbedarf führt zu einer unzureichenden Berücksichtigung der Ziele Vermeidung und Vorverlagerung. Das proaktive Änderungsmanagement von Anforderungen folgt dem Vorgehen im Risikomanagement (Identifikation, Bewertung und Steuerung eines Risikos) und ist als Ergänzung zu bisherigen Änderungsmanagement-Ansätzen zu verstehen. Es kann einen bisher ungenutzten Handlungsspielraum eröffnen und damit zu einer effizienteren Entwicklung komplexer technischer Systeme beitragen.

### 3 Feldstudie zur Untersuchung des Anwendungszusammenhangs

Zur Untersuchung des Anwendungszusammenhangs wurde eine Feldstudie zum proaktiven Management von Anforderungsänderungen in der Entwicklung komplexer technischer Systeme durchgeführt. Die Feldstudie wird in diesem Kapitel zusammenfassend erläutert. Eine detaillierte Beschreibung ist in Anhang A2 und [GOS21] enthalten.

Übereinstimmend mit ULRICH wird der direkte Praxisbezug als erforderlich eingeschätzt, um die Komplexität und Mehrdimensionalität der zu beachtenden Phänomene ermitteln zu können [Ulr81, S. 19]. Daher wurde eine Feldstudie [BC09, S. 254 ff.] als Untersuchungsmethode gewählt und im Rahmen des öffentlich geförderten BMBF-Projekts OptiAMix [KGZ21] durchgeführt. Die Feldstudie dauerte zwei Jahre und umfasste vier Schritte [GOS21]:

#### **Schritt 1: Absicherung der Relevanz der Zielsetzung**

Die Zielsetzung dieser Arbeit (vgl. Kapitel 1.1) wurde im ersten Schritt mit Industrieanwender:innen diskutiert [F-KA1]<sup>2</sup> und im Rahmen eines Workshops präzisiert [F-W1]. Beteiligt waren acht Industrieanwender:innen aus der Automobilindustrie, dem Maschinenbau und der Produktionstechnik. Es bestanden erhebliche Ineffizienzen im Umgang mit Anforderungsänderungen, die durch proaktives Handeln vermieden oder reduziert werden könnten. Es fehlt jedoch eine Hilfestellung zur ganzheitlichen Bewertung des Änderungsrisikos von Anforderungen, sodass derzeit keine oder nur vereinzelt proaktive Maßnahmen ergriffen werden [GOS20, S. 3 f.]. Zudem wurde bestätigt, dass der Anwendungsaufwand bestehender Ansätze zur Analyse einzelner Teilespekten (z. B. Propagation) zu hoch für die industrielle Anwendung ist und einer Etablierung in der Entwicklungspraxis entgegensteht [GOS20, S. 3 f.]. Das Ergebnis der Untersuchung war daher, dass proaktives Änderungsmanagement von Anforderungen hohe Praxisrelevanz besitzt.

#### **Schritt 2: Entwicklung eines initialen Lösungskonzepts zum proaktiven Management von Anforderungsänderungen**

Im zweiten Schritt wurden existierende Lösungsansätze analysiert und Anwendungspotenziale ermittelt (vgl. [GTO19; GOS19; GOS18; GSH18]). Auf dieser Grundlage wurde ein initiales Lösungskonzept erarbeitet, das aus drei Elementen besteht:

---

<sup>2</sup> Im Folgenden werden Verweise genutzt, um auf Details zu den jeweiligen Aktivitäten im Anhang A2 zu referenzieren.

- A) Methode zur Bewertung der Änderungsauswirkungen und Änderungswahrscheinlichkeit durch äußere Einflüsse,
- B) Methode zur Bewertung der Änderungspropagation und der Änderungswahrscheinlichkeit durch Anforderungsänderungen,
- C) Software-Prototyp zur Nutzerführung und teilautomatisierten Methodenanwendung.

Methode A) umfasst eine Bewertung der Expert:innen von exogenen Änderungsinitiatoren in Anlehnung an eine FMEA-Logik. Die Bewertungskriterien decken die Auswirkung einer Änderung ebenso wie die exogene Änderungswahrscheinlichkeit ab. Ergebnis ist ein Prioritätsindex je Anforderungen. Methode B) beruht auf der inhaltlichen Gruppierung von Anforderungen anhand einer Hauptmerkmalliste (z. B. [PBF07, S. 220], [GDB18, S. 9 ff.] oder [VDI/VDE2206]). Zunächst werden teilautomatisiert Abhängigkeiten zwischen Anforderungen ermittelt. Die Datengrundlage dafür ist eine Abhängigkeitsmatrix (in Anlehnung an eine Design Structure Matrix nach EPPINGER und BROWNING [EB12]), in welcher Abhängigkeiten zwischen Hauptmerkmalen hinterlegt sind. Anschließend werden Kennzahlen zur Abschätzung der Änderungspropagation (Aktivsumme nach [EL10]) und der endogenen Änderungswahrscheinlichkeit (Passivsumme nach [EL10]) ermittelt und in einem Konnektivitätsindex vereint. Anhand von Prioritätsindex und Konnektivitätsindex werden die Anforderungen in ein Risikoportfolio eingeordnet und eine Risikokategorie („hoch“, „mittel“ oder „gering“) abgeleitet. Der Software-Prototyp wurde mit Mathworks MATLAB programmiert und umfasst neben einer Benutzerschnittstelle die Datenspeicherung und Berechnung der Kennzahlen. [GOS20]

### **Schritt 3: Entwicklungsbegleitende Tests mit Industrieanwender:innen**

Parallel zu Schritt 2 wurde das Lösungskonzept kontinuierlich anhand der folgenden drei Fallstudien [KGZ21, S. 141 ff.] getestet und die Erkenntnisse aus der Praxis in einem regelmäßigen Austausch mit den Industrieanwender:innen (V-KA1) bewertet:

- Dynamischer Kfz-Heckflügelhalter (Automobilbranche / Entwicklungsdienstleister) zur Befestigung und stufenlosen Verstellung des Anstellwinkels eines Heckflügels von Sportfahrzeugen (vgl. Anhang A3)
- Steuerkurve in einer Teigteil- und Wirkmaschine der Lebensmittelverarbeitung (Maschinenbau / Erstausrüster) zur Produktion von Brötchen (vgl. Anhang A3)
- Greifer in einer automatisierten Umformanlage (Produktionstechnik / Automobilzulieferer) für Bauteiltransport im Massiv-Umformprozess (vgl. Anhang A3)

## Schritt 4: Validierung des Lösungskonzepts

Im letzten Schritt wurde das Lösungskonzept anhand eines Fragebogens [F-F1] und drei darauf aufbauender Interviews mit jeweils zwei Expert:innen [F-I1] validiert. Details zur Auswertung der Fragebögen und Interviews können [GOS20; GOS21] entnommen werden. Zusammenfassend resultierten daraus die folgenden zwei Ergebnisse:

Das erste Ergebnis ist, dass alle Einflüsse von Anforderungsänderungen auf den Projekt-Erfolg sowie die zur Handhabung erforderlichen Informationsbedarfe ermittelt werden konnten (vgl. Abbildung 3-1). Daher dient das Einflussmodell als Bezugspunkt für die verfeinerte Literaturrecherche (vgl. Kapitel 4).

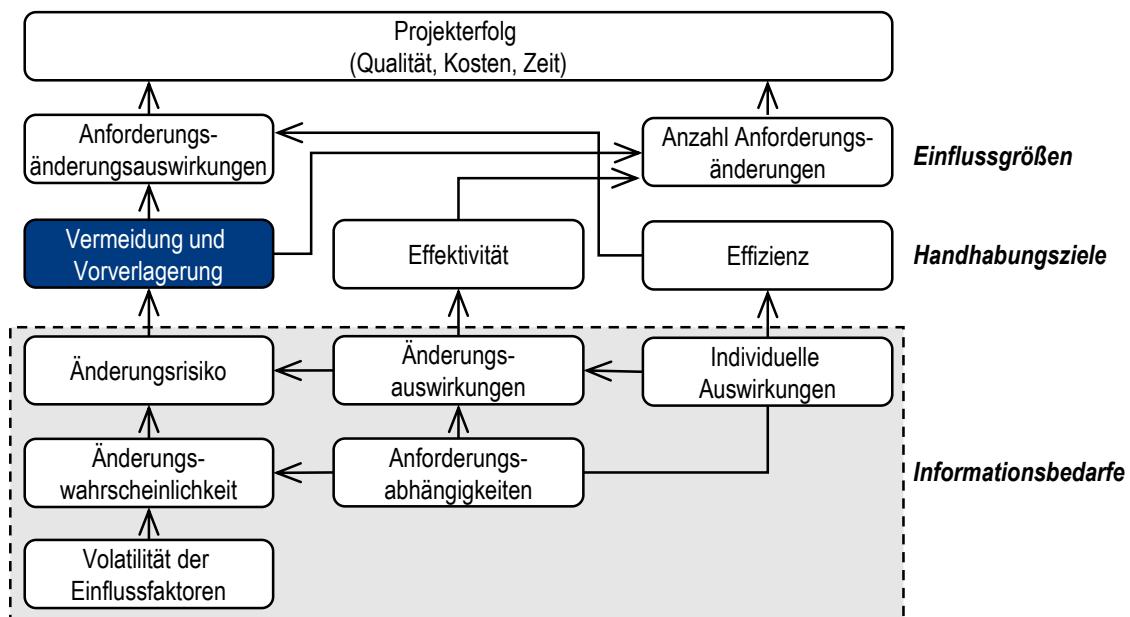


Abbildung 3-1: Einflussgrößen, Handhabungsziele und Informationsbedarfe im Kontext des proaktiven Managements von Anforderungsänderungen [GO19, S. 57]

Das zweite Ergebnis sind Rahmenbedingungen für das proaktive Änderungsmanagement aus der industriellen Praxis. Die Rahmenbedingungen sind aus Anwendungserfahrungen des initial gewählten Lösungskonzepts abgeleitet und lauten:

- Verarbeitbarkeit einer hohen Anzahl an Anforderungen sowie von Anforderungen aus unterschiedlichen Disziplinen,
- Berücksichtigung von Propagationseffekten zwischen Anforderungen,
- Verfügbarkeit der erforderlichen Daten und Informationen in frühen Entwicklungsphasen.

Die Testanwendungen zeigten beispielsweise, dass Anforderungssets mit mehreren hundert Anforderungen aus unterschiedlichen Fachabteilungen gebräuchlich sind. Manuelle Schritte der Anwender:innen, die für jede Anforderung durchzuführen sind, sollten daher zur Aufwandsminimierung vermieden werden (z. B. Zuordnung einer Anforderung zu einer Gruppe). Ebenso wurde deutlich, dass Propagationseffekte entscheidend zum ineffizienten Umgang mit Anforderungsänderungen beitragen, da sie unvollständig und unsystematisch erfasst werden. Daher gilt es eine aufwandsarme Unterstützung für die Identifikation und Analyse von Abhängigkeiten zu bieten. Deren Ermittlung anhand einer Matrix hat sich als verbesserungsbedürftig erwiesen, weil sowohl der Aufwand zur Erhebung als auch die Übersichtlichkeit der Darstellung unzureichend sind. Die Ausrichtung des proaktiven Änderungsmanagements auf frühe Entwicklungsphasen ist auf den Bedarf einer Unterstützung ab der Projektanbahnung zurückzuführen. In der Projektanbahnung können proaktive Maßnahmen umgesetzt werden, bevor vertragliche Bestimmungen die Überarbeitung von Anforderungen (z. B. Präzisierung) erschweren. Zudem sind die frühen Projektphasen vielversprechend, um Effizienzsteigerungen im Änderungsmanagement zu realisieren, weil überproportional viele Anforderungsänderungen auftreten [FHS15, S. 45]. Daraus folgt die Rahmenbedingung, dass das Daten- und Informationsangebot begrenzt ist. Insbesondere zeigte sich, dass keine Verfügbarkeit historischer Daten zu Anforderungsänderungen (z. B. Ursache und Auswirkungen) angenommen werden kann [GOS20], obwohl solche Daten in Product Lifecycle Management (PLM) Systemen erfasst werden können [Sta22; SKK10].

Über die Rahmenbedingungen hinaus wurde erkannt, dass eine Unterstützung bei der Einbindung des proaktiven Änderungsmanagements in die unternehmensspezifischen Entwicklungsprozesse erforderlich ist [GOS20, S. 19]. Das gilt für die Einführung des proaktiven Änderungsmanagements als auch für die Anwendung in Entwicklungsprojekten. Hilfestellung bedürfen unter anderem die Einbindung des Lösungsansatzes in die bestehende Prozesslandschaft und die Zuordnung von Verantwortlichkeiten. Die Erkenntnisse und Rahmenbedingungen werden zur Differenzierung bestehender Lösungsansätze genutzt (vgl. Kapitel 4) und bilden die Basis zur Definition von Anforderungen an die Methodik (vgl. Kapitel 5).

## 4 Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden spezifische Forschungsansätze zu den drei grundlegenden Schritten eines proaktiven Managements von Anforderungsänderungen (vgl. Kapitel 2.4) beschrieben<sup>3</sup>:

- 1) Identifikation von Änderungsursachen,
- 2) Analyse des Änderungsrisikos (Auswirkung und Eintrittswahrscheinlichkeit) und
- 3) Maßnahmen zur proaktiven Handhabung des Änderungsrisikos.

Zu Beginn werden übergreifende Ansätze vorgestellt, die mehrere Schritte sowie die Einbettung des proaktiven Änderungsmanagements in die Produktentwicklung behandeln (Kapitel 4.1). Anschließend werden Ansätze erläutert, die einzelne Schritte fokussieren (Kapitel 4.2 bis 4.5). Am Ende jedes Unterkapitels werden aus der Analyse des Stands der Forschung Abgrenzungskriterien abgeleitet, anhand derer im letzten Schritt die Forschungslücke sowie die dieser Arbeit zugrunde liegenden Forschungsfragen abgeleitet werden (Kapitel 4.6).

Zur Identifikation relevanter Forschungserkenntnisse wurde zunächst eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Dafür wurden die Literaturdatenbanken IEEE Explore, Scopus, SpringerLink, Google Scholar, Web of Science und Design Society durchsucht. Es wurden deutsche und englische Suchbegriffe sowie gebräuchliche Synonyme in die Suche einbezogen. Die Auswahl der Suchbegriffe erfolgte in Anlehnung an Literaturstudien aus den Bereichen Engineering Change Management und Requirements Change Management [JL18, S. 165; HCC13, S. 478; Wic17, S. 155 ff.]. Dabei wurde auf den Ergebnissen eigener Literaturanalysen [GO19; GOP21; GOS19; GPO20; GOS20; GOP22] sowie studentischer Arbeiten [Bot21; Kif21; Böh21; Hie21]<sup>4</sup> aufgebaut.

Die Suchtreffer wurden anhand von Titel und Abstract für eine Detailbetrachtung ausgewählt. Zudem wurden nachfolgend aufgelistete übergreifende Literaturstudien analysiert und mit den Suchtreffern abgeglichen:

- Änderungsmanagement für Komponenten (engl. engineering change): [HCC13], [Wic17] und [NWC11]
- Änderungsmanagement für Anforderungen: [JL18] und [HVM18]
- Risikomanagement: [Neu16]

---

<sup>3</sup> Zentrale Inhalte dieses Kapitels wurden im Rahmen von [GO19; GOP21; GOS19; GPO20; GOS20; GOP22] vorveröffentlicht.

<sup>4</sup> Studentische Arbeiten werden im Anschluss an den Anhang gesondert ausgewiesen.

Die dargestellte Vorgehensweise gewährleistet die Vollständigkeit und Aktualität der Literaturrecherche. Zusätzlich wurden die Ergebnisse der Literaturrecherche auf einschlägigen wissenschaftlichen Konferenzen veröffentlicht [GO19; GOP21; GOS19; GPO20; GOS20], um durch den Peer-Review Prozess und die wissenschaftliche Diskussion die Qualität der Literaturanalyse abzusichern.

#### **4.1 Übergreifende Ansätze zum proaktiven Management von Anforderungsänderungen in der Produktentwicklung**

Übergreifende Ansätze, die für mehrere Schritte des proaktiven Änderungsmanagements relevant sind, stammen aus der Entwicklungsmethodik, der Standardisierung und dem Risikomanagement. In bisherigen Ansätzen des Änderungsmanagements wird das proaktive Management von Anforderungsänderungen nicht unterstützt (vgl. Kapitel 2.4).

Etablierte **Entwicklungsmethodik** im Kontext komplexer technischer Systeme (vgl. Kapitel 2.1) geht nicht explizit auf spezifische Aspekte wie das proaktive Änderungsmanagement von Anforderungen ein. Beispielhaft werden zwar Vorausschau, Änderungsmanagement und Risikomanagement adressiert und durch geeignete Methoden unterstützt (z. B. [Lin09, S. 78 ff.]; [VDI/VDE2206]; [VDI2221]; [BG21, S. 919 ff.]). Aufgrund des übergreifenden Charakters der Entwicklungsmethodik fehlen jedoch Vorgehensansätze sowie Werkzeuge oder Hilfsmittel für das proaktive Änderungsmanagement.

Im Bereich der **Standardisierung** wird aufbauend auf dem generischen Risikomanagement-Standard DIN ISO 31000:2018-10 [DIN 31000], eine kontextspezifische Konkretisierung für die Produktentwicklung vorgenommen. Beispielsweise werden Aspekte des Risikomanagements in DIN EN ISO 9001 [DIN 9001] für das Qualitätsmanagement und ISO/IEC/IEEE 29148:2011 [ISO29148] zum Requirements Engineering aufgegriffen. Beide Standards verlangen eine konsistente Integration von Anforderungsänderungen und die Berücksichtigung von Anforderungsabhängigkeiten, geben aber keine spezifischen Vorgaben oder Handlungsempfehlungen. Die ISO/IEC 15504-5 sowie die daran angelehnte Automotive SPICE Norm [VDA QMC 3.1] gehen auf das Change Request Management ein, bringen es aber nicht explizit in Verbindung mit Anforderungen oder dem separat geforderten Risikomanagement. Im Gegensatz dazu wird im Capability Maturity Model Integration – Development (CMMI-DEV) auf Level 2 explizit das Management von Anforderungsänderungen und die Berücksichtigung von Anforderungsabhängigkeiten gefordert [CMMI-DEV]. Darin wird die Nutzung von **Software** zur Anforderungsentwicklung (vgl. Kapitel 1.1) zur Umsetzung empfohlen. Solche Softwareprodukte ermöglichen die manuelle Vernetzung von Anforderungen, bieten aber keine Funktionalitäten zur Identifikation potenzieller Änderungsursachen und der (teil-)automatisierten Risikoanalyse [GPO20, S. 4].

Weder existierende Ansätze des Änderungsmanagements noch etablierte Entwicklungsmethodik oder Entwicklungsstandards bieten spezifische Unterstützung für das proaktive Änderungsmanagement. Daher werden im Folgenden Ansätze für das

**Risikomanagement in der Produktentwicklung** betrachtet. Den Ansätzen ist proaktives Management inhärent. Dort beschriebene Methoden und Hilfestellungen können auf den Kontext von Anforderungsänderungen als ein spezifisches Risiko übertragen werden. Die Einschränkung auf Risikomanagement-Ansätze mit direktem Bezug zur Produktentwicklung wird gewählt, da in übergreifenden Ansätzen (z. B. [Die12; Van12; DIN 31000]) kein Bezug zu technischen Anwendungsfeldern genommen wird.

Ansätze zum Risikomanagement in der Produktentwicklung (z. B. [SM02; Van12; Die12; Neu16]) sind im Wesentlichen entsprechend der **Kernaktivitäten des Risikomanagements** strukturiert (vgl. Kapitel 1.1). Die Kernaktivitäten decken sich mit den Schritten des proaktiven Änderungsmanagements: Identifikation von Unsicherheiten, Risikoanalyse und Risikosteuerung.

Die Ansätze unterscheiden sich in Art und Umfang der Unterstützung je Kernaktivität. Gemein ist den Ansätzen, dass unterschiedliche Risiken aus dem Kontext der Produktentwicklung betrachtet werden können. Inwiefern die Anwendbarkeit für den spezifischen Bereich eines Änderungsrisikos von Anforderungen übertragbar ist, wird im weiteren Verlauf erläutert. Ansätze, die im Hinblick auf keine der Kernaktivitäten eine Anwendbarkeit für Anforderungsänderungen zeigen, werden nicht erläutert (z. B. [Dah02; Lüh06; Wiß06]). Zur Differenzierung werden die Rahmenbedingungen aus der Feldstudie verwendet. Über die Kernaktivitäten hinaus wird beschrieben, ob die Einordnung in den Entwicklungsprozess unterstützt wird (vgl. Kapitel 3).

### **Proaktives Risikomanagement nach SMITH und MERRITT**

SMITH und MERRITT haben einen etablierten Ansatz für das proaktive Risikomanagement in der Produktentwicklung erarbeitet. Ziel des Ansatzes ist es, die Fähigkeit von Entwicklungsteams zur Handhabung von Projektrisiken zu verbessern. Der Ansatz bietet eine generische Vorgehensstruktur, die alle Kernaktivitäten des Risikomanagements umfasst und für alle Projektrisiken anwendbar ist. Für jede Kernaktivität werden Techniken und Werkzeuge beschrieben und in einen logischen Ablauf integriert. Darüber hinaus werden an zwei zentralen Stellen des Vorgehens (Risikoidentifikation und -analyse) Konzepte für vorstrukturierte Workshops mit Expert:innen erläutert. [SM02]

Der Ansatz bietet sowohl für die **Identifikation von Unsicherheiten** als auch für die **Risikoanalyse** und die **Risikosteuerung** eine praxisnahe und umfassende Unterstützung. Die Unterstützung ist generisch und dadurch erst nach kontextspezifischer Konkretisierung für das Änderungsrisiko von Anforderungen anwendbar. Der Bedarf einer Konkretisierung wird insbesondere bei der Kernaktivität Risikoanalyse deutlich. Die Risikoanalyse beruht ausschließlich auf Experteneinschätzungen zu Eintrittswahrscheinlichkeit, Auswirkung und zum erwarteten Verlust. Kontextspezifische Aspekte wie beispielsweise das Propagationsverhalten bleiben unberücksichtigt. Zudem ist das ausschließlich auf Experteneinschätzungen beruhende Vorgehen für Anforderungssets mit einer hohen Anzahl an Anforderungen ungeeignet (vgl. Kapitel 3).

Die **Einbindung in den Entwicklungsprozess** wird nicht direkt behandelt. Stattdessen wird die Integration des Vorgehens in eine Entwicklungsmethodik erläutert, dabei jedoch ausschließlich die sequenzielle Abfolge der Schritte als kontinuierliche Aktivität dargestellt, ohne direkten Bezug zu Entwicklungsaktivitäten zu nehmen. Eine Unterstützung der Entwickler:innen im Umgang mit Anforderungsänderungen wird damit nur unzureichend geboten.

### **Modellbasiertes Ansatz zur risikoorientierten Entwicklung innovativer Produkte nach NEUMANN**

NEUMANN hat einen Ansatz zur risikoorientierten Entwicklung innovativer Produkte gestaltet. Er nimmt dafür eine andere Perspektive als bisherige Risikomanagement-Ansätze ein. Im Fokus steht nicht das Projektmanagement, sondern die Unterstützung der Entwicklungsentscheidungen. Es wird ein Modellierungsansatz entwickelt, der anhand einer Multiple-Domain Matrix kohärente Partialmodelle aus Produktentwicklung und Risikomanagement verknüpft. Damit werden Ereignisbäume für verschiedene Handlungsalternativen abgebildet und quantitativ verglichen. Eine der drei von NEUMANN betrachteten Objektklassen („Dimensionen“) sind Anforderungen („Zielsystem“), weshalb der Ansatz auf Besonderheiten des Anforderungskontextes Bezug nimmt. [Neu16]

NEUMANN behandelt mit seinem Ansatz alle vier Kernaktivitäten des Risikomanagements. Für die **Identifikation von Unsicherheiten** wird neben einer Übersicht existierender Methoden ein ergänzender Fragebogen eingeführt. Die **Risikoanalyse** umfasst sowohl die direkten Auswirkungen als auch die indirekten Auswirkungen eines Risikos oder einer Handlungsalternative. Das Propagationsverhalten von Anforderungsänderungen kann damit erfasst und abgeschätzt werden. Problematisch für die industrielle Anwendung ist das ausschließlich auf Experteneinschätzungen beruhende Vorgehen, welches durch den exponentiell steigenden Anwendungsaufwand für komplexe Anforderungssets unpraktikabel erscheint; Gleichermaßen gilt für die **Risikosteuerung**. Für die Risikosteuerung werden systematisch Handlungsalternativen bewertet und verglichen. Dafür ist erneut hoher Anwendungsaufwand erforderlich. Zudem werden keine konkreten Risikosteuerungsmaßnahmen beschrieben, aus denen eine Auswahl erfolgen kann. Die **Einbindung des Risikoprozesses in die Produktentwicklung** erfolgt exemplarisch anhand des V-Modells der VDI 2206:2004. Als Unterstützung werden charakteristische Integrationspunkte aufgezeigt. Eine Verknüpfung mit expliziten Entwicklungsaktivitäten fehlt und die VDI 2206:2004 lässt die Anforderungsentwicklung unberücksichtigt.

### **Anwendungsorientiertes System für das Management von Produkt- und Prozessrisiken nach GRUNDMANN**

Grundmann hat ein Risikomanagementsystem für die Entwicklung komplexer Systeme erstellt, das Unternehmen beim systematischen Umgang mit Risiken unterstützt. Es beinhaltet neben dem Risikomanagement im Zentrum des Ansatzes noch vier flankierende

Module, welche die Einführung in Unternehmen sowie die organisatorische Verankerung unterstützen sollen. Der Fokus liegt dabei auf technischen Risiken mit Bezug zur Mechanik. [Gru08]

Der Mechanik-Bezug spiegelt sich zum Beispiel bei dem Vorgehen zur **Identifikation von Unsicherheiten** wider. Dafür wird das Gesamtsystem mithilfe eines IST-Zustandsbaumes zerlegt und modelliert, um Kernprobleme und daraus resultierende Risiken zu identifizieren. Der dafür erforderliche Reifegrad der Lösung bzw. des Systems kann im Kontext von Anforderungsänderungen nicht vorausgesetzt werden. Zudem lässt sich das Vorgehen durch den Fokus auf physikalische Effekte nicht unmittelbar auf Anforderungen anwenden. Für die **Risikoanalyse** wird ein Objektmodell verwendet, um Funktionen und Effekte zu modellieren. Anschließend werden anhand des Modells die Risiken analysiert und mittels Risikoportfolio priorisiert. Durch die Einbeziehung von Wechselwirkungen zwischen Teilsystemen (Effekte) können auch Propagationseffekte berücksichtigt werden. Zur **Risikosteuerung** wird eine aus der TRIZ Wissenschaft abgeleitete Widerspruchsmatrix zur Lösung technischer Widersprüche aufgestellt. Das grundsätzliche Vorgehen zur Risikoanalyse und -steuerung wäre auch für Anforderungsänderungen anwendbar, müsste jedoch durch den bei Anforderungen fehlenden Bezug zu physikalischen Gesetzmäßigkeiten und daraus resultierenden Widersprüchen angepasst werden. Eine Besonderheit des Ansatzes nach GRUNDMANN sind die vier flankierenden Module, die unter anderem die **Einbindung in den Entwicklungsprozess** unterstützen: Risikopolitik, Risikostrategie, Risikomanagementorganisation sowie Risikokommunikation und -dokumentation. Die vier Module befähigen ein Unternehmen zur Risikomanagement-Anwendung, es fehlt jedoch die Schnittstelle zum Entwicklungsprojekt. Dafür müsste beispielsweise eine konkrete Bezugnahme zu Entwicklungsprozessen und -entscheidungen ergänzt werden.

### **Uncertainty Mode and Effects Analysis Methodik nach ENGELHARDT**

ENGELHARDT führt die Uncertainty Mode and Effects Analysis (UMEA) Methodik mit dem Ziel ein, Fehlentwicklungen in frühen Entwicklungsphasen durch Schwachstellenanalyse vorzubeugen. Der Fokus liegt auf der Analyse und Bewertung von Unsicherheiten entlang des Produktlebenszyklus. Das Vorgehen beinhaltet die Identifikation von Unsicherheiten, die Abschätzung der Wirkung sowie die Bewertung der Unsicherheiten im Sinne einer Priorisierung und Auswahl für das Einleiten von proaktiven Handlungsmaßnahmen. [Eng13]

Der Ansatz kombiniert generische Methoden des Stands der Wissenschaft, die jedoch weder Besonderheiten des Anforderungskontextes berücksichtigen noch eine spezifische Unterstützung für das proaktive Änderungsmanagement bieten. Eine Einordnung in den Entwicklungsprozess erfolgt lediglich vereinzelt durch Bezugnahme auf relevante Lebenszyklusphasen. Ein konkreter Prozess oder die Nennung spezifischer Entwicklungsaktivitäten fehlt.

## **Ansatz zur Steigerung der Robustheit von Projekten nach GERICKE**

GERICKE beschreibt einen Ansatz zur Steigerung der Robustheit von Projekten durch Unterstützung bei der Auswahl einer Risikohandhabungsstrategie. Den Schwerpunkt bildet die Risikosteuerung. Ergebnisse einer Risikoanalyse (Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkung) werden als Informationsgrundlage angenommen. Die Auswahl der Risikostrategie erfolgt anhand eines fragenbasierten Entscheidungsbaums oder einer an die FMEA angelehnten Bewertungsmatrix. [GB11]

Die Bewertungsmatrix ist für das proaktive Änderungsmanagement von Anforderungen anwendbar. Die Identifikation und Analyse von Risiken sowie die sich anschließende Auswahl konkreter Maßnahmen werden nicht unterstützt. Ebenso wird keine Einordnung in den Entwicklungsprozess vorgenommen.

## **Fazit und Abgrenzungskriterium**

Im Gegensatz zu existierenden Ansätzen des Änderungsmanagements, der Entwicklungs-methodik und Standards bieten Ansätze zum Risikomanagement eine übergreifende Unter-stützung beim Vorgehen zur Identifikation von Unsicherheiten und der Auswahl von proaktiven Maßnahmen (Risikosteuerung). Durch die generische Ausrichtung auf Risiken in der Produktentwicklung fehlt eine kontextspezifische Hilfestellung für Anforde-rungsänderungen. Dazu zählen Unsicherheiten im Kontext von Anforderungsänderungen (Änderungsursachen) sowie spezifische Maßnahmen.

Für die Risikoanalyse besteht Forschungsbedarf hinsichtlich einer Bewertung kontext-spezifischer Einflussfaktoren (z. B. Propagationseffekte). SMITH und MERRITT sowie NEUMANN und GRUNDMANN gehen in Grundzügen darauf ein, bieten jedoch keine Unter-stützung, die den Rahmenbedingungen einer Anwendung für Anforderungsänderun-gen in der industriellen Entwicklung komplexer technischer Systeme entsprechen. Dazu zählen insbesondere der zu hohe Anwendungsaufwand im Falle einer hohen Anzahl an Anforderungen und das Erfordernis von Ausgangsdaten, die in frühen Entwicklungspha-sen nicht verfügbar sind (vgl. Kapitel 3). Die Einordnung in den Entwicklungsprozess wird auf Ebene der Lebenszyklusphasen und des Entwicklungsmethodischen Vorgehens erläutert, es fehlen jedoch Bezugnahmen zu spezifischen Entwicklungsaktivitäten und ausführenden Rollen.

Aus der Analyse wird **Abgrenzungskriterium 1** abgeleitet: Referenzprozess für die Ein-ordnung des proaktiven Managements in die Produktentwicklung. Darüberhinausge-hende Defizite werden im Rahmen der nachfolgenden Kapitel zu spezifischen Lösungs-ansätzen analysiert und als separate Abgrenzungskriterien formuliert.

## 4.2 Identifikation von Änderungsursachen

Unsicherheiten in der Produktentwicklung sind die Ursache für Anforderungsänderungen [GPO21; Neu16]. Teil des proaktiven Managements von Anforderungsänderungen ist daher die Erfassung von Unsicherheiten. Während aleatorische Unsicherheiten beispielsweise über unspezifische Risikopuffer berücksichtigt werden [SM02, S. 114 ff.], wird bei den epistemischen Unsicherheiten eine möglichst vollständige Erfassung angestrebt. Vorarbeiten zu epistemischen Unsicherheiten in der Produktentwicklung bieten dazu umfangreiche Übersichten (z. B. [GMP13; SHB19; PG20; EDG98]).

Kontextspezifische Unsicherheitsarten bieten eine Struktur für die Identifikation der epistemischen Unsicherheiten. Je Unsicherheitsart können spezifische Maßnahmen zur Identifikation von Unsicherheiten eingeleitet werden. Eine Übersicht von epistemischen Unsicherheitsarten, spezifisch für den Kontext von Anforderungsänderungen, bietet [GPO21] (vgl. Abbildung 4-1). Neben einer vollständigen Auflistung von Unsicherheitsarten werden diese entlang der Aktivitäten in der Anforderungsentwicklung kategorisiert. Anhand dieser Übersicht können bestehende Ansätze hinsichtlich Anwendungspotenzial für kontextspezifische Unsicherheitsarten differenziert werden.

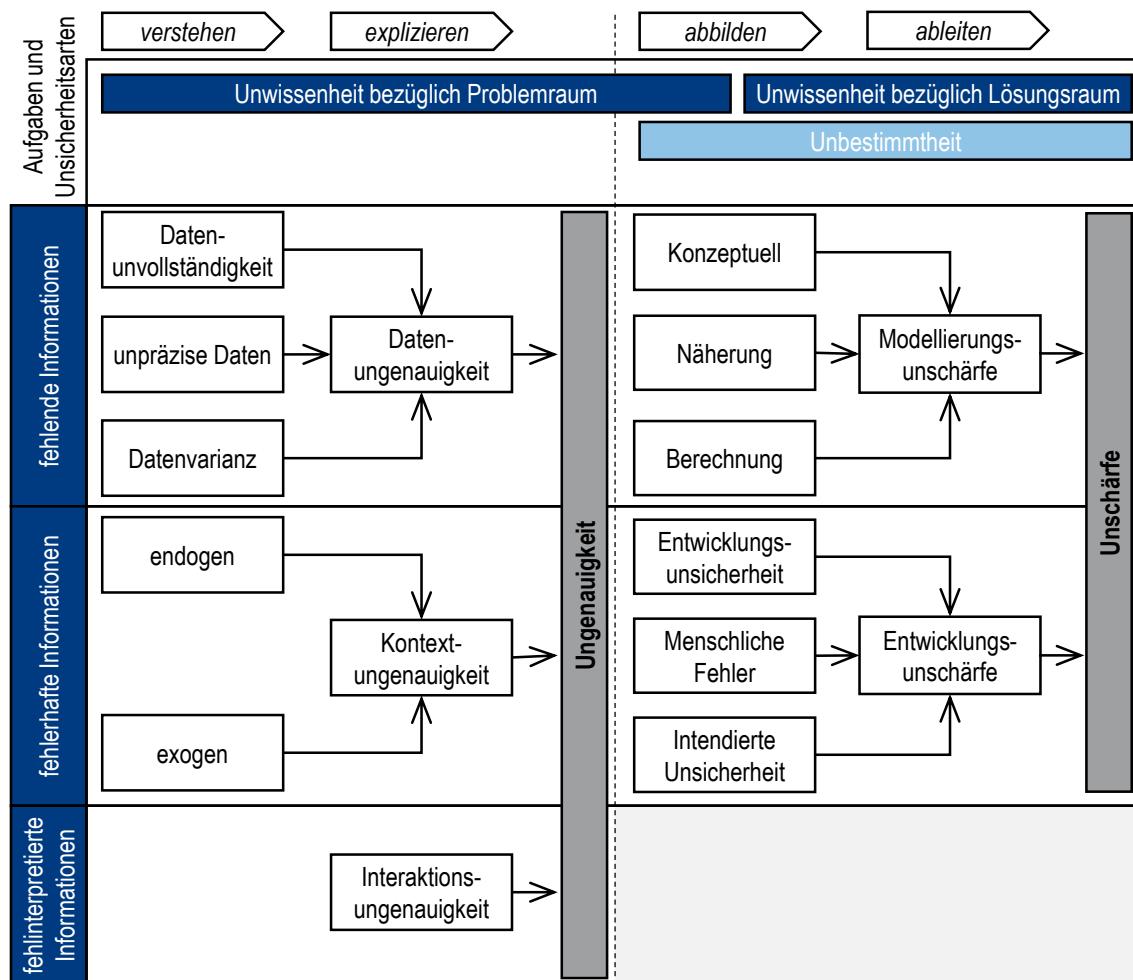


Abbildung 4-1: Unsicherheitsarten im Kontext von Anforderungen [GPO21, S. 1691]

Bisherige Ansätze zur Identifikation von Unsicherheiten in der Produktentwicklung lassen sich anhand des Anwendungsfeldes unterscheiden. Beispielsweise sind die Ansätze nach SMITH und MERRITT [SM02, S. 43 ff.], DAHMEN [Dah02, S. 54 ff.] oder WIBLER [Wiß06, S. 86 ff.] generisch und nehmen keine Eingrenzung des Anwendungsfeldes vor. Neben der Vorgehenslogik werden, wie in der Literatur zum betriebswirtschaftlich geprägten Risikomanagement (z. B. [Wan15]), Werkzeuge und Techniken zur Identifikation von Unsicherheiten benannt. Was fehlt, ist eine Hilfestellung zur Ermittlung von Unsicherheiten, die im betrachteten Kontext vorliegen können, und Maßnahmen, die zu deren Identifikation geeignet sind. Ansätze, die auf ein spezifisches Anwendungsfeld ausgerichtet sind, bieten eine solche Unterstützung. Dazu zählt die Identifikation von Unsicherheiten mit Bezug zur Produktion nach LÜHRIG [Lüh06, S. 94 ff.] oder Funktions-Effekt-Zusammenhängen in physikalischen Systemen nach GRUNDMANN [Gru08, S. 55 ff.]. Da sich die zu betrachtenden Unsicherheitsarten je Anwendungsfeld unterscheiden, ist die Anwendbarkeit der Ansätze für den Kontext von Anforderungsänderungen nicht gegeben. Bezug zu Unsicherheiten im Anforderungsset nimmt NEUMANN [NEU16]. Anhand eines Fragebogens werden Anwender:innen bei der Identifikation von Unsicherheiten unterstützt. Strukturiert ist der Fragebogen durch drei Unsicherheitstreiber: Markt, Produkt Nutzung sowie Politik, Recht und Gesellschaft. Nachteilig an einer Strukturierung nach Unsicherheitstreibern ist, dass die betrachteten Unsicherheiten nicht auf epistemische Unsicherheiten eingegrenzt werden. Zudem ist die Betrachtung nach NEUMANN unvollständig, weil Ungenauigkeiten in der Anforderungsbeschreibung unberücksichtigt bleiben (z. B. „Daten Ungenauigkeit“ vgl. Abbildung 4-1), obwohl Ungenauigkeiten zu den wichtigsten Ursachen für Anforderungsänderungen zählen [JL18, S. 166].

## Fazit und Abgrenzungskriterium

Existierende Forschungsansätze haben zwei Defizite. Zum einen wird kein Bezug auf die spezifischen Unsicherheitsarten im Kontext von Anforderungsänderungen genommen. Die Vollständigkeit der Betrachtung ist dadurch in der Praxisanwendung nicht gewährleistet. Zum anderen werden Industrieanwender:innen nicht bei der Auswahl konkreter anforderungsspezifischer Maßnahmen zur Reduktion von Änderungsursachen unterstützt. Aus der Analyse wird **Abgrenzungskriterium 2** abgeleitet: Reduktion anforderungsspezifischer Unsicherheiten und Maßnahmen.

### 4.3 Auswirkungen einer Anforderungsänderung

In Anlehnung an ARNOLD und BOHNER [AB93] definieren GRÄSSLER und WIECHEL Auswirkungsanalysen für technische Änderungen als:

*„Aktivität der Identifikation potenzieller Effekte einer Änderung – einschließlich initialer und konsekutiver Effekte – und die Abschätzung der resultierenden (lokalen und kollektiven) Folgen, mit dem Ziel, eine effektive Entscheidung über Änderungsbedarfe zu unterstützen.“*

[GW21, S. 3]

Aus dieser Definition können zwei grundlegende Schritte einer Auswirkungsanalyse abgeleitet werden: die Identifikation von Effekten einer Änderung und die darauf aufbauende Bewertung der resultierenden Änderungsauswirkungen (vgl. Abbildung 4-2).

#### Identifikation der Propagationseffekte einer Änderung

Die Identifikation von Propagationseffekten dient der Festlegung des Betrachtungsraums für die Auswirkungsanalyse, indem potenziell von der Änderung beeinflusste Elemente identifiziert werden. Dafür sind initiale sowie konsekutive Effekte zu berücksichtigen. Die initialen Effekte sind direkt auf den Änderungsbedarf oder Änderungsantrag zurückzuführen. Die konsekutiven Effekte werden durch Abhängigkeiten zwischen Anforderungen hervorgerufen. Die Identifikation kann hinsichtlich Breite und Tiefe der Analyse differenziert werden. Die Breite der Analyse wird dadurch bestimmt, wie viele unterschiedliche Elemente auf Beeinflussung untersucht werden (z. B. funktionale und nicht-funktionale Anforderungen). Die Tiefe der Analyse wird über die Ordnung der untersuchten konsekutiven Effekte bestimmt. Direkte Abhängigkeiten sind konsekutive Effekte erster Ordnung. Effekte, die von den beeinflussten Elementen erster Ordnung ausgehen, werden als konsekutive Effekte zweiter Ordnung bezeichnet. [GOP21]

Bisherige Ansätze gehen davon aus, dass die Tiefe limitiert werden kann: Konsekutive Effekte, höher vierter oder fünfter Ordnung, führen in der Entwicklungspraxis zu keinen Auswirkungen mehr und können vernachlässigt werden [CSE04, S. 7; Mor12, S. 198].

#### Bewertung der resultierenden Änderungsauswirkungen

Für die Bewertung der resultierenden Änderungsauswirkungen werden die Effekte hinsichtlich Auswirkungen auf die Projektziele (Qualität, Kosten und Zeit) untersucht. Das erfordert eine Abschätzung, auf welche Art und Weise die Änderung implementiert wird und welche Effekte somit zu einer tatsächlichen Beeinflussung führen. Dabei sind lokale Auswirkungen und Propagationseffekte zu unterscheiden. Lokale Auswirkungen auf die Projektziele resultieren direkt aus der betrachteten Anforderungsänderung. Die Auswirkungen hängen vom Änderungsbedarf, den Charakteristika der Anforderung (z. B. Anforderungsinhalt oder -priorität) und Entwicklungsentscheidungen (z. B. Grad der Befriedigung des Änderungsbedarfs durch die Anforderungsänderung) ab. Folgeänderungen

entlang des Propagationspfads, die durch Propagationseffekte verursacht werden, führen ihrerseits zu lokalen Auswirkungen. Die Summe aller lokalen Auswirkungen entlang des Propagationspfades – einschließlich der initialen Anforderungsänderung – wird als kollektive Auswirkung einer Änderung bezeichnet. Die erwarteten kollektiven Auswirkungen einer Änderung ermöglichen den Vergleich von Handlungsoptionen (z. B. Ablehnung eines Änderungsantrags, begrenzter Implementierungsgrad der Änderung oder Alternativen in der Art und Weise der Änderungsimplementierung). Damit sind die kollektiven Auswirkungen einer Änderung die Zielgröße der Auswirkungsanalyse. [GOP21]

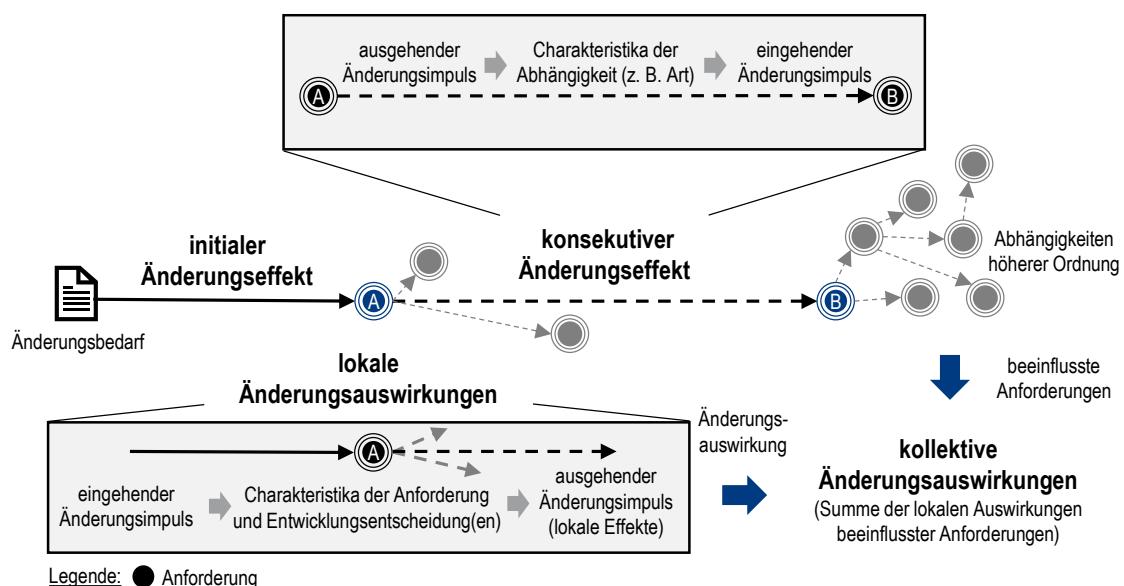


Abbildung 4-2: *Effekte und Auswirkungen einer Anforderungsänderung* [GOP21, S. 3]

Sowohl das Vorgehen als auch die Ergebnisse der Identifikation der Effekte und Bewertung der Auswirkungen werden maßgeblich durch die ausgewertete **Informationsgrundlage** geprägt. Grundlegend kann zwischen den beiden Kategorien Expertenwissen und Entwicklungsdaten (z. B. Anforderungsbeschreibungen oder Anforderungsdiagramme) unterschieden werden. Unterschiede in der ausgewerteten Informationsgrundlage existieren hinsichtlich des Umfangs (z. B. Existenz von Abhängigkeit und Differenzierung nach Abhängigkeitsart) und der Objektivität der Informationen. Beides wirkt sich unmittelbar auf die Ergebnisse der Auswirkungsanalyse aus. [GOP21]

Im Kontext des proaktiven Managements von Anforderungsänderungen in der Entwicklung komplexer technischer Systeme sind zwei weitere Unterscheidungskriterien relevant, die gesondert zu berücksichtigen sind. Ein Kriterium ist der Aufwand zur Informationsbeschaffung (z. B. manuelle oder automatisierte Datenauswertung). Das zweite Kriterium sind die erforderlichen Informationen (z. B. Softwarecode). Aufwandsseitig ist die industrielle Anwendbarkeit für umfangreiche Anforderungssets entscheidend. Informati onsseitig ist die limitierte Verfügbarkeit und Genauigkeit der Daten in frühen Entwick

lungsstadien zu berücksichtigen. Da in frühen Entwicklungsstadien kaum systemspezifische Informationen (z. B. SysML-Diagramme, Geometriedaten oder Softwarecode) verfügbar sind, darf für die Anwendbarkeit in frühen Entwicklungsphasen lediglich auf Anforderungsdaten, historische Entwicklungsdaten und Expertenwissen zurückgegriffen werden [HHL10, S. 783 ff.].

### **Ansätze zur Bewertung der Änderungsauswirkungen**

Im Folgenden werden spezifische Ansätze erläutert, die mindestens eine der vier folgenden Dimensionen einer Auswirkungsanalyse explizit behandeln:

- 1) Identifikation initialer Effekte,
- 2) Identifikation konsekutiver Effekte,
- 3) Bewertung der lokalen Auswirkungen und
- 4) Bewertung der kollektiven Auswirkungen.

Zur Differenzierung der Ansätze werden weiterhin die Rahmenbedingungen des proaktiven Managements von Anforderungsänderungen verwendet (vgl. Kapitel 3). Ansätze aus der Software-Entwicklung, die ausschließlich auf der Auswertung disziplinspezifischer Informationen (z. B. Softwarecode) beruhen und somit nicht für interdisziplinäre Anforderungssets anwendbar sind, werden nicht betrachtet. Dazu gehören unter anderem [ACC00; EDF96; HRH05; HR05].

Eine vielfach zitierte Methode zur Auswirkungsanalyse ist die Change Prediction Method (CPM) nach **CLARKSON ET AL.** [CSE04]. Die Methode unterstützt das Risikomanagement von Komponentenänderungen in der Produktentwicklung, indem Experteneinschätzungen zur Eintrittswahrscheinlichkeit und den Auswirkungen einer Änderung in Matrizen erfasst und Propagationseffekte ermittelt werden. Daraus wird das Änderungsrisiko einer Komponente ermittelt. Hinsichtlich der Auswirkungen können konsekutive Effekte bis zur vierten Ordnung berücksichtigt werden. Das Ergebnis ist die Einschätzung der Expert:innen zu Änderungsauswirkungen sowie eine automatisiert ermittelte Abschätzung der Propagationseffekte. Limitiert wird die Anwendbarkeit für höhere Ordnungen ebenso wie für Anforderungssets mit mehr als 50 Anforderungen [CSE04, S. 793 ff.]. Der Grund dafür ist, dass matrixbasierte Ansätze mit paarweisem Vergleich der Elemente zu exponentiell steigendem Rechenaufwand je zusätzlichem Element und betrachteter Ordnung der Abhängigkeiten führen. Initiale Effekte bleiben im Rahmen der CPM-Anwendung ebenso unberücksichtigt wie lokale Auswirkungen. Da Expertenwissen die ausschließliche Informationsgrundlage ist, kann die CPM bereits in frühen Phasen angewandt werden. Die Experteneinschätzung erfolgt nicht anhand von Leitfragen oder einer anderen Form der Systematisierung, weshalb ein hohes Ausmaß an Subjektivität der Einschätzung zu erwarten ist.

Die CPM wurde in zahlreichen weiteren Ansätzen weiterentwickelt (z. B. [KCC12; Ham13; LGR07; RGL06; AKE07]), bei denen die Analyse für Elemente mehrerer Domänen erweitert wurde (z. B. Anforderungen oder Funktionen). **KOH ET AL.** beziehen durch die Integration des House of Quality (HoQ) Konzepts Anforderungen in die Auswirkungsanalyse mit ein. Der CPM-HoQ Ansatz beruht auf einer Multiple Domain Matrix (MDM), die anhand vorgegebener Skalen durch Expert:innen mit Abhängigkeitsinformationen und Einschätzungen zu Handlungsoptionen befüllt werden. Übereinstimmend mit der CPM werden initiale Effekte und lokale Auswirkungen nicht berücksichtigt. Durch die Anreicherung der Analyse um weitere Elemente und Dimensionen der Betrachtung wird die Anwendbarkeit für umfangreiche Anforderungssets deutlich reduziert. Der Arbeitsaufwand zur Anwendung erlaubt ausschließlich die Analyse weniger Anforderungen. Dafür nimmt die Aussagekraft der Auswirkungsanalyse zu, da die Subjektivität reduziert wird und das Analyseergebnis explizite Auswirkungen einer Änderung auf die Anforderungserfüllung aufzeigt.

Ein Ansatz zur Auswirkungsanalyse, der als Informationsgrundlage nicht Experteneinschätzungen, sondern überwiegend Daten verwendet, ist die Methode Change Impact and Risik Analysis (CIRA) nach **DEUBEL ET AL.** [CDK07]. Der CIRA-Ansatz ermittelt, auf welche Merkmale und Eigenschaften sich eine Änderung auswirkt. Ziel ist es, eine Entscheidungsunterstützung für die Gegenüberstellung von Lösungsalternativen zur Änderungsimplementierung zu bieten. Die Informationsgrundlage für den CIRA-Ansatz ist ein vollständiges Produktmodell mit Abhängigkeiten zwischen Merkmalen und Eigenschaften. Damit können konsekutive Effekte einer Änderung ermittelt werden. Initiale Effekte und lokale Auswirkungen werden im Rahmen der Analyse nicht ermittelt. Dadurch ist auch die Bewertung der kollektiven Auswirkungen einer Änderung unvollständig. Die verwendete Informationsgrundlage erlaubt einen hohen Automatisierungsgrad, die Informationen sind durch den Bezug zu Lösungselementen jedoch in frühen Entwicklungsphasen nicht verfügbar. Eine manuelle Erzeugung des Produktmodells durch Expert:innen weist, wie der CPM-Ansatz, Defizite hinsichtlich Subjektivität und exponentiell steigendem Anwendungsaufwand auf.

Ansätze, die auf der Netzwerktheorie aufbauen (z. B. [GYX17; ZYZ20; LSS10; LZL08; EDL10; HVM18; Mor12; PW12]), unterscheiden sich von den bisherigen Ansätzen insbesondere durch die differenziertere Betrachtung der Abhängigkeitscharakteristika. Statt einer binären Betrachtung (Existenz vs. keine Existenz einer Abhängigkeit) werden dort die Abhängigkeiten als Kanten im Anforderungsnetz dargestellt und gewichtet. Die binäre Betrachtung von Abhängigkeiten erlaubt die Bewertung der konsekutiven Effekte einer Änderung, ist durch die Vernachlässigung vom spezifischen Propagationsverhalten jedoch ungenau in der Abschätzung von kollektiven Auswirkungen. Durch die Gewichtung der Abhängigkeiten anhand des Propagationsverhaltens kann die Aussagekraft der Analyse hinsichtlich kollektiver Änderungsauswirkungen verbessert werden. Exemplarisch wird der Ansatz Network-based Change Impact Assessment Approach nach

**CHENG und CHU** [CC12] betrachtet, der zwei Alternativen zur Gewichtung der Abhängigkeiten aufzeigt. Bei der ersten Alternative wird die Gewichtung unmittelbar durch Expert:innen vorgenommen. Bei der zweiten Alternative wird durch einen paarweisen Vergleich die Gewichtung ermittelt. Dabei wird verglichen, ob bei einer Änderung Komponente A oder Komponente B den größeren Einfluss auf Komponente C ausübt. Der paarweise Vergleich reduziert die Subjektivität, erhöht jedoch den manuellen Aufwand. Andere Ansätze leiten die Gewichtung der Abhängigkeiten aus den betrachteten Elementen (z. B. Parameter einer Komponente) ab (z. B. [YZ20; GYX17; HVM18; Mor12]). Die Ansätze setzen dafür aber ein umfassendes Informationsmodell mit Abhängigkeiten zwischen allen Komponenten und deren Parametern voraus, ohne dessen Verfügbarkeit und Generierung im industriellen Kontext ausreichend zu berücksichtigen. Initiale Effekte und lokale Auswirkungen von Änderungen werden durch den Fokus auf Änderungspropagation bei keinem der benannten Ansätze berücksichtigt.

Ein Ansatz, der auch initiale Effekte und lokale Auswirkungen einer Änderung berücksichtigt wurde von **GÄRTNER ET AL.** [GRS08] entwickelt. Ziel ist die Bewertung von Zeit- und Kostenauswirkungen einer Änderung auf Grundlage einer Monte-Carlo-Simulation. Dabei werden auch konsekutive Effekte betrachtet, sodass eine vollständige Bewertung der kollektiven Auswirkungen möglich ist. Der Ansatz geht damit in der Vollständigkeit der Betrachtung über die zuvor erläuterten Ansätze hinaus. Gleiches gilt für die Aussagekraft des Ergebnisses. Anstelle eines dimensionslosen Indikators für die Auswirkungen erfolgt eine konkrete Zeit- und Kostenabschätzung. Nachteilig ist das Erfordernis einer umfangreichen Informationsgrundlage. Es werden acht unterschiedliche Datensätze ausgewertet, zu denen beispielsweise Abhängigkeitsinformationen zum Produkt sowie eine Zuordnung sämtlicher für die Entwicklung einer Komponente erforderlicher Prozesse mit Zeit- und Kostenschätzung gehören. Während die Anwendung des Ansatzes automatisiert erfolgt, ist für die Generierung der Informationsgrundlage ein hoher manueller Arbeitsaufwand erforderlich, der zudem exponentiell mit der Anzahl an Elementen ansteigt. Darüber hinaus basieren die Daten zur Abschätzung der lokalen Auswirkungen einer Änderung ausschließlich auf Expertenbewertungen. Da keine Hilfestellung zur systematischen und vergleichbaren Bewertung geboten wird, ist ein hohes Maß an Subjektivität vorhanden.

Der Ansatz nach **WICKEL** [Wic17] behandelt das Problem von Subjektivität und Arbeitsaufwand manueller Experteneinschätzungen durch die Auswertung historischer Daten. Anhand von Data Mining Verfahren werden Änderungsdaten von Komponenten aus ähnlichen Entwicklungsprojekten ausgewertet und zur Identifikation und Charakterisierung von Abhängigkeiten verwendet. Zudem werden Änderungshäufigkeiten berücksichtigt, um im Sinne einer Effizienzsteigerung Änderungen zu vermeiden oder vorzuverlagern. Konsekutive Effekte werden hierbei einbezogen. Auf eine Abschätzung der initialen Effekte und lokalen Auswirkungen wird ebenso wie auf eine Abschätzung der kollektiven Auswirkungen verzichtet. Stattdessen wird die Einordnung in ein Portfolio mit den Dimensionen Änderungshäufigkeit und Änderungsabhängigkeiten vorgenommen.

Nachteilig an dem Ansatz ist insbesondere die fehlende Verfügbarkeit der erforderlichen historischen Daten im Kontext von Anforderungen (vgl. Kapitel 3), ohne die keine Anwendbarkeit für Anforderungsänderungen gegeben ist.

### **Fazit und Abgrenzungskriterium**

Die Identifikation von initialen Effekten und lokalen Auswirkungen wird lediglich bei dem Ansatz nach GÄRTNER ET AL. berücksichtigt und erfordert eine Informationsgrundlage, die für Anforderungen nicht vorhanden ist. Es existiert somit kein Ansatz, der diese beiden Dimensionen der Auswirkungsanalyse unter den Restriktionen des proaktiven Managements von Anforderungsänderungen behandelt und eine vollständige Bewertung der kollektiven Auswirkungen ermöglicht. Zudem sind ausschließlich Ansätze auf Grundlage der CPM in den frühen Entwicklungsphasen anwendbar. Da sie auf Expertenwissen beruhen, liegen bei diesen Ansätzen Defizite hinsichtlich Objektivität der Informationen und Anwendbarkeit für umfangreiche Anforderungssets vor.

Aus der Analyse wird **Abgrenzungskriterium 3** abgeleitet: Abschätzung der initialen und konsekutiven Änderungseffekte sowie der lokalen und kollektiven Änderungsauswirkungen bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Rahmenbedingungen des proaktiven Managements von Anforderungsänderungen (vgl. Kapitel 3).

## 4.4 Eintrittswahrscheinlichkeit einer Anforderungsänderung

Die Wahrscheinlichkeit einer Anforderungsänderungen bildet mit den daraus resultierenden Auswirkungen das Änderungsrisiko einer Anforderung. Die Abschätzung der Änderungswahrscheinlichkeit erfordert die Analyse potenzieller Änderungsursachen und deren Wahrscheinlichkeit, eine Änderung zu initiieren.

### Änderungsursachen

Zur Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Änderung müssen deren Initiatoren erkannt und analysiert werden. Initiatoren einer Änderung konstituieren die Änderungswahrscheinlichkeit und lösen den initialen Änderungsimpuls aus. Studien zeigen, dass es eine Vielzahl von Änderungsinitiatoren gibt [MD12, S. 154; ABN06, S. 123; FHS15, S. 43; GMP13, S. 197; SHB19, S. 3756]. Die Änderungsinitiatoren bringen jeweils zur Fehlerkorrektur oder mit dem Ziel der Ausschöpfung neuer Möglichkeiten einen Änderungsbedarf ein [BII12, S. 54; Wic17, S. 12]. Die Änderungsinitiatoren lassen sich in fünf Ursprungsbereiche kategorisieren:

- 1) Externer Markt (einschließlich Stakeholdern wie Kunden und Wettbewerber),
- 2) Kundenorganisation (Änderungen der Kundenbedürfnisse, die durch die Anforderungen formalisiert werden),
- 3) Projektvision (besseres Verständnis des Problemfelds aus Kundensicht sowie das Entstehen neuer Möglichkeiten und Herausforderungen),
- 4) Anforderungsspezifikation (besseres Verständnis des Problemfelds aus Sicht des Entwicklungsteams sowie die Auflösung von anforderungsbezogenen Unsicherheiten),
- 5) Lösung (in Verbindung stehend mit der gewählten Lösung zur Erfüllung der Anforderungen und der zur Lösung verwendeten Techniken). [MD12, S. 134; MG09, S. 54]

Neben den Initiatoren einer initialen Anforderungsänderung ist die **Propagation von Änderungen** ein weiterer Änderungsursprung. Der Anteil von Propagationseffekten an den Änderungsursprüngen wird durch eine Fallstudie über die Entwicklung eines komplexen Sensorsystems in der Luft- und Raumfahrtindustrie mit 41.500 Änderungswünschen über einen Zeitraum von acht Jahren unterstrichen [GWB09]. Die Studie zeigt, dass bis zu 50% der Anforderungsänderungen durch andere Anforderungsänderungen ausgelöst wurden [GWB09, S. 6].

Um sowohl die Änderungsinitiatoren als auch die Änderungspropagation zu erfassen, wird das aktuelle Verständnis von Anforderungsänderungsursachen um die beiden Dimensionen „Exogen“ und „Endogen“ erweitert (vgl. Abbildung 4-3). Exogene Änderungsinitiatoren lösen eine initiale Anforderungsänderung aus (**exogene Änderung**).

Exogene Änderungen sind losgelöst vom Zusammenspiel der Anforderungen und entstehen außerhalb des Anforderungsnetzes. Innerhalb der exogenen Änderungsinitiatoren ist die in der Praxis wichtige Unterscheidung von externen und internen Ursachen [MS12, S. 23] einzuordnen. So können Ursachen differenziert werden, die innerhalb der Organisation (intern; z. B. unvollständiges Systemverständnis) oder außerhalb der Organisation (extern; z. B. volatile Kundenbedürfnisse) liegen, was beispielsweise für die Verhandlung von Änderungskosten relevant ist. **Endogene Änderungen** können nur auftreten, nachdem eine initiale Änderung durch einen exogenen Änderungsinitiator ausgelöst wurde und entstehen ausschließlich durch Propagationseffekte innerhalb des Anforderungsnetzes. [GOS20, S. 5 f.]

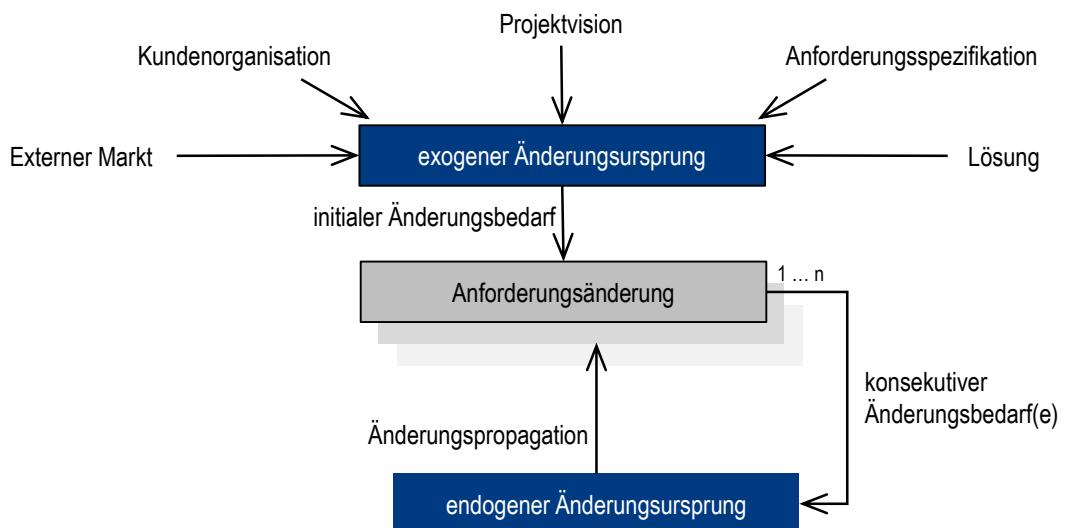


Abbildung 4-3: *Exogene und endogene Ursprünge einer Anforderungsänderung* [GOS20, S. 6]

## Änderungswahrscheinlichkeit

Diesem Verständnis folgend ist zur Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Anforderungsänderung die exogene und endogene Änderungswahrscheinlichkeit zu berücksichtigen. Die exogene Änderungswahrscheinlichkeit wird als jener Teil der Änderungswahrscheinlichkeit definiert, bei dem ein Änderungsbedarf durch eine außerhalb des Anforderungssets liegende Änderungsursache (z. B. veränderte Kundenbedürfnisse oder Regularien) hervorgerufen wird. Die endogene Änderungswahrscheinlichkeit ist als jener Teil der Änderungswahrscheinlichkeit definiert, bei der eine Änderung durch Änderungspropagation zwischen Anforderungen hervorgerufen wird.

Die zentralen Einflussgrößen für die **exogene Änderungswahrscheinlichkeit** sind die für das Entwicklungsvorhaben relevanten Änderungsinitiatoren. Empirische Studien zeigen, dass es deutliche Unterschiede hinsichtlich der Anzahl ausgelöster Anforderungsänderungen zwischen den Änderungsinitiatoren gibt, die zudem in Abhängigkeit vom Entwicklungsabschnitt variiert [ABN06, S. 123; FHS15, S. 43; AK07, S. 6 f.; AHH18, S. 8].

Da die **endogene Änderungswahrscheinlichkeit** auf Propagationseffekten beruht, sind in diesem Fall – wie bei den Änderungsauswirkungen durch Propagation (vgl. Kapitel 4.3) – die Art und die Ordnung der Anforderungsabhängigkeiten Einflussgrößen. Ebenso haben die Charakteristika einer Anforderung sowie Entwicklungsentscheidungen einen Einfluss (vgl. Abbildung 4-2).

### **Ansätze zur Bewertung der Änderungswahrscheinlichkeit**

Im Folgenden werden Ansätze erläutert, die mindestens eine der beiden Dimensionen exogene und endogene Änderungswahrscheinlichkeit explizit behandeln. Zur Differenzierung der Ansätze wird für die endogene Änderungswahrscheinlichkeit weitergehend bewertet, ob Abhängigkeiten höherer Ordnung und Indikatoren für das Propagationsverhalten (z. B. Abhängigkeitsarten) ausgewertet werden. Außerdem werden die beiden Rahmenbedingungen einer Anwendbarkeit in frühen Entwicklungsstadien sowie die Verarbeitbarkeit von umfangreichen Anforderungssets bewertet (vgl. Kapitel 3).

Die Ergebnisse der Literaturrecherche zeigen, dass ein überwiegender Anteil der Ansätze auf die Bewertung der endogenen Änderungswahrscheinlichkeit durch Propagation abzielt und nur beim Risikomanagementansatz nach **NEUMANN** [Neu16] die exogene Änderungswahrscheinlichkeit berücksichtigt wird (vgl. Kapitel 4.1). Die Bewertung der exogenen Änderungswahrscheinlichkeit findet im Rahmen der Unsicherheitsidentifikation statt und wird nicht anforderungsspezifisch, sondern für das gesamte Anforderungsset, vorgenommen. Ergebnis der manuellen Expertenbewertung sind identifizierte Unsicherheitstreiber mit Bezug zum Anforderungsset, die jedoch nicht auf die exogene Änderungswahrscheinlichkeit einzelner Anforderungen schließen lassen. Die Bewertung der endogenen Änderungswahrscheinlichkeit wird manuell durch Expert:innen vorgenommen. Für jede Anforderung werden schrittweise die Anforderungen entlang aller Propagationspfade hinsichtlich endogener Änderungswahrscheinlichkeit bewertet und daraus die gesamte endogene Änderungswahrscheinlichkeit ermittelt. Einflussfaktoren wie die Ordnung oder Art der Abhängigkeit werden nicht berücksichtigt. Eine Zusammenführung von exogener und endogener Änderungswahrscheinlichkeit erfolgt nicht. Da der Ansatz auf Expertenbewertungen beruht, ist die Verfügbarkeit der Informationen in frühen Entwicklungsstadien gewährleistet. Der Anwendungsaufwand ist jedoch untauglich für die Analyse umfangreicher Anforderungssets in der industriellen Praxis.

Eine manuelle Bewertung der Änderungswahrscheinlichkeiten wird auch für die CPM nach **CLARKSON ET AL.** [CSE04] verwendet (vgl. Kapitel 4.3). Mit dem Ziel, das Änderungsrisiko von Systemkomponenten zu bestimmen, wird in einer Matrix die Propagationswahrscheinlichkeit zwischen jeweils zwei Anforderungen bewertet. Anschließend werden durch Bildung der Aktiv- und Passivsumme Aussagen zur endogenen Änderungswahrscheinlichkeit einer Anforderung abgeleitet. Abhängigkeiten höherer Ordnung können in die Berechnung einbezogen werden. Die exogene Änderungswahrscheinlichkeit wird nicht berücksichtigt. Dies gilt auch für den Ansatz zur Bewertung von Änderungs-

effekten nach **DEUBEL** [CDK07], der die CPM mit der Logik einer Fehlermöglichkeitsanalyse und -einflussanalyse verknüpft und die endogene Änderungswahrscheinlichkeit auf einer Skala von 1-10 bewerten lässt. Während durch das manuelle Vorgehen bei der CPM und dem Ansatz nach DEUBEL der Anwendungsaufwand für umfangreiche Anforderungssets in der Entwicklungspraxis zu hoch ist, wird dieses Problem bei der Weiterentwicklung durch **HAMRAZ** [Ham13] gelöst. Abhängigkeiten werden automatisiert anhand von Attributen identifiziert und zur Ermittlung der endogenen Änderungswahrscheinlichkeit verwendet. Dieses Vorgehen lässt sich jedoch nicht auf Anforderungen übertragen, da komponentenspezifische Attribute (z. B. Strukturelement, Funktionselement und Verhaltenselement) und die Hierarchiebeziehungen des dekomponierten Systems als Bezuggröße für die Abhängigkeitsanalyse verwendet werden. In den frühen Phasen ist weder eine Systemhierarchie als Informationsgrundlage verfügbar, noch können Anforderungen vollständig anhand von Struktur, Funktion und Verhalten kategorisiert werden. Darüber hinaus bleibt bei dem Ansatz die exogene Änderungswahrscheinlichkeit unberücksichtigt.

Die Methodik zur datenbasierten Analyse der Änderungsausbreitung nach **WICKEL** [Wic17] nutzt historische Änderungsdaten zur Identifikation und Modellierung von änderungsbedingten Abhängigkeiten zwischen Systemkomponenten. Unter Anwendung von Data Mining Algorithmen und statistischen Verfahren werden aus historischen Daten Änderungshäufigkeiten und die Wahrscheinlichkeit einer Änderungspropagation zwischen zwei Komponenten automatisiert ermittelt. Ein Vorteil der Auswertung historischer Daten gegenüber Expertenbewertungen ist, dass das Änderungsverhalten von Elementen indirekt berücksichtigt wird, da nur tatsächlich erfolgte Änderungen in die Bewertung einfließen. Nachteilig ist dagegen, dass das Änderungsverhalten von vielen kontextspezifischen Einflussfaktoren abhängt und in den Daten nicht nachvollziehbar ist, welche Faktoren die Änderungsentscheidung wie stark beeinflusst haben. Die exogene Änderungswahrscheinlichkeit wird nicht bewertet. Aufgrund des automatisierten Ansatzes ist der Anwendungsaufwand gering. Ebenso stehen historische Daten bereits in frühen Entwicklungsstadien zur Verfügung. Die Feldstudie (vgl. Kapitel 3) hat gezeigt, dass umfangreiche Datensätze – wie für den Ansatz nach WICKEL erforderlich – für den Kontext von Anforderungsänderungen nicht vorausgesetzt werden können [GOS20, S. 12]. Aus diesem Grund ist die Anwendbarkeit im Anforderungskontext eingeschränkt.

**KOCAR** und **AKGUNDUZ** haben eine virtuelle Umgebung für das Management von Komponentenänderungen entwickelt (ADVICE) [KA10]. Ziel ist es, den Prüf- und Entscheidungsprozess zu einem Änderungsbedarf zu beschleunigen. Dafür wird unter anderem die endogene Änderungswahrscheinlichkeit bewertet, indem Sequential Pattern-Mining Techniken zur Verarbeitung von historischen Änderungsdaten angewandt werden. Die endogene Änderungswahrscheinlichkeit wird als prozentualer Kennwert ausgegeben, der beschreibt, wie häufig bei einer initialen Änderung eine Folgeänderung an der betrachteten Komponente durch Propagation auftritt. Dabei wird nicht eine inhaltliche Abhängig-

keit als Beleg für den Zusammenhang der Änderungen zugrunde gelegt, sondern die zeitliche Nähe des Auftretens. Dementsprechend wird für alle Änderungen, die innerhalb eines definierten Zeitintervalls nach der initialen Änderung durchgeführt wurden, Änderungspropagation als Ursache angenommen. Dies ermöglicht einen hohen Automatisierungsgrad der Methode und erfordert eine weniger differenzierte Datengrundlage als der Ansatz nach WICKEL. Die Annahme reduziert jedoch die Genauigkeit der Ergebnisse, weil keine inhaltlichen Zusammenhänge berücksichtigt werden. Zudem wird durch die Eingrenzung der betrachteten Änderungsdaten auf ein kurzes Zeitintervall eine deutlich umfangreichere Datengrundlage gefordert, um statistisch aussagekräftige Wahrscheinlichkeiten abzuleiten.

Der Ansatz Automated Requirement Change Propagation Prediction (ARCPP) nach **MORKOS** [Mor12] und dessen Weiterentwicklung durch **HEIN ET AL.** [HVM18; HKC21] zielt auf die Vorhersage von Propagationseffekten zwischen Anforderungen ab. Dafür werden Algorithmen zum Part-of-speech-Tagging angewandt, die automatisiert Substantive innerhalb von Anforderungsspezifikationen erkennen. Falls zwischen zwei Anforderungen eine Übereinstimmung mindestens eines Substantivs besteht, wird eine Abhängigkeit geschlussfolgert. Durch die ausschließliche Betrachtung der Semantik können Abhängigkeiten unberücksichtigt bleiben, die beispielsweise synonyme Begriffe verwenden oder inhaltlich und logisch in Zusammenhang stehen [GPO20, S. 204]. Durch die Auswertung von Netzwerk-Metriken werden den Anforderungen spezifische Propagationsindizes zugewiesen, die der endogenen Änderungswahrscheinlichkeit entsprechen. Dabei werden auch Abhängigkeiten höherer Ordnung berücksichtigt. Abhängigkeitsarten oder ein anderer Indikator für das Propagationsverhalten werden nicht unterschieden. Durch die Verwendung von Substantiven zur Identifikation von Abhängigkeiten werden diese grundsätzlich als physikalische Abhängigkeiten mit hoher Propagationswahrscheinlichkeit angenommen. Die exogene Änderungswahrscheinlichkeit wird nicht berücksichtigt. Der Anwendungsaufwand für umfangreiche Anforderungssets ist trotz der Automatisierung hoch, da als Absicherung der automatisierten Identifikation von Substantiven eine Prüfung jeder Anforderung durch Expert:innen vorgesehen ist. Für den Ansatz ist ausschließlich die Anforderungsbeschreibung als Informationsgrundlage erforderlich, weshalb die Anwendbarkeit in frühen Entwicklungsstadien gewährleistet ist. Derzeitige Forschung zur ARCPP zielt darauf ab, durch die Berechnung von unterschiedlichen Netzwerkmetriken und Techniken des maschinellen Lernens, die endogene Änderungswahrscheinlichkeit hinsichtlich der Charakteristika Multiplizität, Absorption, Durchlässigkeit und Robustheit zu differenzieren [HKC21]. Die Untersuchungen zeigen das Potenzial von maschinellem Lernen in diesem Kontext auf.

## Fazit und Abgrenzungskriterium

Kein Ansatz unterstützt eine systematische Bewertung der exogenen Änderungswahrscheinlichkeit. Aus diesem Grund bietet keiner der Ansätze die Möglichkeit, eine ganzheitliche Änderungswahrscheinlichkeit von Anforderungen abzuschätzen. Die Bewertung der endogenen Änderungswahrscheinlichkeit wird bei allen bisherigen Ansätzen in den Fokus gerückt. Bei den automatisierten Ansätzen fehlt die Unterscheidung der Abhängigkeiten nach Propagationsverhalten und die erforderliche Datengrundlage ist im Kontext von Anforderungen unzureichend verfügbar. Im Gegensatz dazu erfordern die manuellen Ansätze keine Datengrundlage und im Rahmen der Expertenbewertung kann das Propagationsverhalten berücksichtigt werden. Die Ansätze weisen durch den hohen Anwendungsaufwand jedoch ein Defizit in der Anwendbarkeit für umfangreiche Anforderungssets auf. Aus der Analyse wird **Abgrenzungskriterium 4** abgeleitet: Bewertung der exogenen und endogenen Änderungswahrscheinlichkeit bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Rahmenbedingungen des proaktiven Managements von Anforderungsänderungen (vgl. Kapitel 3).

## 4.5 Proaktive Handhabung von Anforderungsänderungen

Maßnahmen zur proaktiven Handhabung von Anforderungsänderungen werden in bisherigen Ansätzen des Änderungsmanagements nicht berücksichtigt (vgl. Kapitel 2.4). Stattdessen werden Ansätze zur Risikosteuerung betrachtet, die Methoden zur Herleitung und Auswahl von Maßnahmen oder Handlungsstrategien beinhalten.

Methoden, die für eine proaktive Handhabung von Anforderungsänderungen geeignet sind, werden beispielsweise in [Neu16, S. 150 f.; SM02, S. 101 ff.; GB11, S. 118 f.] erläutert. Das Vorgehen ist jeweils allgemeingültig. Eine Hilfestellung für die Herleitung kontextspezifischer Maßnahmen bieten die Ansätze jedoch nicht. In Bezug auf Handlungsstrategien werden vier Strategien zur Risikosteuerung unterschieden: Vermeiden, Reduzieren, Transferieren und Akzeptieren [Die12, S. 124 ff.; SM02, S. 104 ff.] (vgl. Abbildung 4-4). Jede Handlungsstrategie steht repräsentativ für Maßnahmen mit einer bestimmten Wirkintention.

**Vermeidung** ist eine Präventionsstrategie, die darauf abzielt, die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Risikos zu eliminieren, indem die Ursache des Risikos beseitigt wird [SHB19, S. 3754]. In der Projektinitiierungsphase kann dies bedeuten, das Entwicklungsprojekt abzulehnen, beispielsweise aufgrund einer hohen Anzahl von Risiken mit hoher Wahrscheinlichkeit und Auswirkung. In späteren Phasen kann Vermeidung bedeuten, dass ein Änderungsantrag oder die Verwendung risikoreicher Technologien abgelehnt oder Anforderungen gestrichen werden.

Die Strategie zur **Reduzierung** eines Risikos zielt darauf ab, das Risiko auf ein akzeptables Maß abzuschwächen. Zugehörige Maßnahmen verringern die Auswirkungen oder die Eintrittswahrscheinlichkeit des Risikos. Beispiele für die Reduktion der Änderungsauswirkungen sind das Einfrieren der Spezifikation [FGN00, S. 173], die Begrenzung der Arbeitszeit für die Umsetzung der Änderung [Die12, S. 126] oder die Erhöhung des Budgetpuffers [SM02, S. 114]. Maßnahmen zur Reduktion der Eintrittswahrscheinlichkeit stimmen mit Maßnahmen zur Identifikation und Reduktion von Unsicherheiten überein [GPO21, S. 1694] (vgl. Kapitel 4.2).

Der **Transfer** zielt darauf ab, Risiken mit anderen Stakeholdern zu teilen oder sie auf Versicherungen zu übertragen [GB11, S. 58]. Der Risikotransfer kann beispielsweise durch das Auslagern von Entwicklungsaktivitäten an Dienstleister erfolgen. Falls das Risiko versicherbar ist, können Versicherungsanbieter diese Rolle gegen eine Gebühr übernehmen.

**Akzeptanz** bedeutet, dass keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden [Die12, S. 127]. Dementsprechend werden keine spezifischen Maßnahmen definiert und ein situatives reagieren angestrebt.

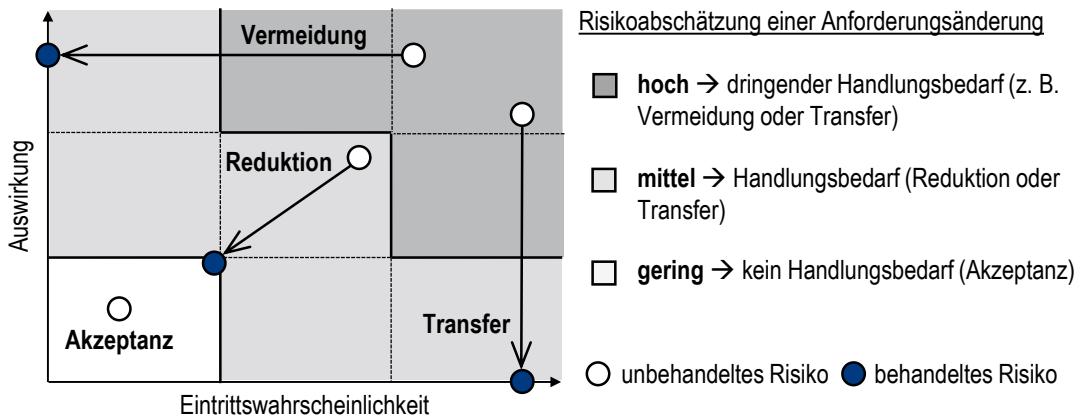


Abbildung 4-4: *Handlungsstrategien für die proaktive Handhabung von Anforderungsänderungen (in Anlehnung an [GPO21, S. 1694; Die12, S. 126])*

Neben der Strategie können Handlungsmaßnahmen anhand verschiedener **Differenzierungskriterien** strukturiert werden; beispielsweise nach dem Zeitpunkt der Ausführung oder dem Anwendungsaufwand [GB11, S. 118 ff.; GPO21, S. 1693]. Mit Blick auf das Timing kann zwischen präventiven, proaktiven und reaktiven Maßnahmen unterschieden werden. Sowohl präventive als auch proaktive Gegenmaßnahmen werden vor der Erstellung eines Änderungsantrags eingeleitet (z. B. vordefinierter Design Freeze), während reaktive Gegenmaßnahmen im Nachhinein eingeleitet werden (z. B. Anpassung des Entwicklungsauftrags) [GB11, S. 118 ff.]. Reaktive Gegenmaßnahmen können daher nicht als Teil des Risikomanagements bzw. des proaktiven Änderungsmanagements angesehen werden [GB11, S. 69].

Sowohl die Handlungsstrategien als auch die Differenzierungskriterien sind für den Kontext von Anforderungsänderungen verwendbar, es gibt jedoch weder eine Übersicht kontextspezifischer Maßnahmen, noch eine darauf aufbauende Unterstützung bei deren Auswahl, welche die kontextspezifischen Risikofaktoren (z. B. exogene und endogene Änderungswahrscheinlichkeit oder lokale und kollektive Änderungsauswirkungen) berücksichtigt. Beides wurde im Rahmen der Feldstudie als wichtig für die industrielle Anwendung bewertet [GOS20, S. 17 ff.].

## Fazit und Abgrenzungskriterium

Es existiert eine Vielzahl an allgemeingültigen Vorgehensweisen zur Identifikation und Auswahl von risikobezogenen Maßnahmen. Konkret benannte Maßnahmen bleiben jedoch ohne Bezug zu Anforderungsänderungen. Daraus resultieren zwei Defizite. Zum einen fehlt eine kontextspezifische Unterstützung bei der Identifikation möglicher Maßnahmen. Zum anderen wird keine Hilfestellung für die Selektion einer geeigneten Maßnahme geboten, weil die Wirkung der Maßnahmen auf die Risikodimensionen Änderungswahrscheinlichkeit und -auswirkungen unklar ist. Aus der Analyse wird **Abgrenzungskriterium 5** abgeleitet: Unterstützung bei der risikospezifischen Zuordnung von Maßnahmen.

## 4.6 Forschungslücke und Forschungsfragen

Die Analyse des Stands der Forschung zeigt Forschungslücken im Kontext des proaktiven Managements von Anforderungsänderungen auf. Die fünf Abgrenzungskriterien (vgl. Kapitel 4.1 bis 4.5) resultieren aus kontextspezifischen Bedarfen eines proaktiven Änderungsmanagements und dienen in Tabelle 4-1 zur Visualisierung der Forschungslücke. Die Forschungslücke wird in dem dieser Arbeit zugrundeliegenden Ansatz behandelt, so dass sie zugleich die Kernaspekte des vorliegenden Dissertationsmanuskripts aufzeigt.

*Tabelle 4-1: Abgrenzungsmatrix*

Abgrenzungskriterien		Forschungsansätze <sup>5</sup>												
		[SM02] P. G. Smith	[Neu16] Prof. B. Bender (LPE)	[Gru08] Prof. R. Schmitt (WZL/IFT)	[Eng13] Prof. H. Birkhofer (pmd)	[GB11] Prof. L. Blessing (mpm)	[CSE04] Prof. P. J. Clarkson (EDC)	[KCC12] Prof. P. J. Clarkson (EDC)	[Wic17] Prof. U. Lindemann (LPL)	[CDK07] Prof. C. Weber (LKT)	[GRS08] Prof. C. M. Schlick (IAW)	[CC12] X. Chu (Shanghai - SJTU)	[KA10] Prof. M. Pugh (MIAE)	[HVM18] Prof. B. Morkos (fit)
Risikoanalyse für Anforderungsänderungen														
	initiale Änderungseffekte	○	-	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-	●
	konsekutive Änderungseffekte	-	○	-	-	-	●	○	○	○	○	○	-	●
	Änderungsauswirkungen	○	○	○	-	-	○	○	○	○	○	○	-	●
	Änderungswahrscheinlichkeit	○	●	-	-	-	●	-	●	●	-	-	●	●
	Reduktion von Unsicherheiten in der Anforderungsbeschreibung	○	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-	-	●
	Änderungsrisikospezifische Zuordnung von proaktiven Maßnahmen	●	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-	-	●
	Referenzprozess für proaktives Anforderungsänderungsmanagement	●	●	●	○	○	-	-	-	-	-	-	-	●

<sup>5</sup> Bei Wissenschaftlichen Mitarbeiter:innen wird die organisatorische Verankerung benannt.

Die Auswertung des Stands der Forschung zeigt folgende Handlungsbedarfe bezüglich des proaktiven Managements von Anforderungsänderungen. Die Ansätze zum Risikomanagement in der Produktentwicklung sind auf die Reduktion von Unsicherheiten in der Anforderungsbeschreibung anzupassen. Für die Risikoanalyse fehlt einerseits eine Methode zur systematischen Bewertung der kollektiven Änderungsauswirkungen auf Basis der initialen und konsekutiven Effekte sowie der Einbeziehung lokaler Auswirkungen. Andererseits fehlt eine Methode zur Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Anforderungsänderung auf Grundlage exogener und endogener Änderungswahrscheinlichkeiten. Weiter wird Handlungsbedarf bei der Zuordnung konkreter Maßnahmen für den proaktiven Umgang mit Anforderungsänderungsrisiken erkannt. Ein Referenzprozess für die prozessuale und organisatorische Einordnung des proaktiven Managements von Anforderungsänderungen in die Produktentwicklung fehlt ebenso. Auf Basis der Handlungsbedarfe werden folgende Forschungsfragen definiert:

- F1) Wie lassen sich in der industriellen Praxis Unsicherheiten in der Anforderungsbeschreibung reduzieren?
- F2) Wie lässt sich die Änderungsauswirkung von Anforderungen ganzheitlich abschätzen?
- F3) Wie lässt sich die endogene und exogene Änderungswahrscheinlichkeit von Anforderungen abschätzen?
- F4) Wie kann die Zuordnung von proaktiven Maßnahmen zur Handhabung der Änderungsrisiken von Anforderungen unterstützt werden?
- F5) Wie lässt sich das proaktive Management von Anforderungsänderungen komplexer technischer Systeme in die Produktentwicklung einordnen?

Die übergeordnete Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zum proaktiven Management von Anforderungsänderungen in der Entwicklung komplexer technischer Systeme (vgl. Kapitel 1.1). Die Forschungsfragen stellen die wissenschaftlichen Teilziele dar, welche in dieser Arbeit zur Erfüllung des Ziels behandelt werden.

## 5 Anforderungen an die Methodik

Auf Grundlage der Forschungsfragen folgt in diesem Kapitel die Definition von Anforderungen an die Methodik. Die Anforderungen bilden das konkrete Zielsystem für die Entwicklung der Methodik.

Im Rahmen der **Feldstudie** wurden der Anwendungszusammenhang analysiert, Einflussfaktoren ermittelt und Rahmenbedingungen definiert (vgl. Kapitel 3). Anhand der **Literaturstudie** wurden darauf aufbauend Abgrenzungskriterien ermittelt (vgl. Kapitel 4), die in inhaltliche Anforderungen an die Methoden übersetzt werden. Die Entwicklung der Methodik erfolgte in Zusammenarbeit mit einem führenden Entwicklungsdienstleister der Automobilbranche (vgl. Kapitel 1.2). Zur Erhebung der unternehmensspezifischen Anforderungen wurden vier **Workshops** durchgeführt. Darüber hinaus erfolgte begleitend zur Entwicklung der Methodik ein kontinuierlicher Austausch mit dem Industriepartner, in welchem die Anforderungen und deren Erfüllungskriterien präzisiert und aktualisiert wurden:

- H-W1<sup>6</sup>: Workshop zur Anforderungserhebung (Dauer: 180 Minuten / Teilnehmer:innen: Abteilungsleiter, Projektleiter, Teamleiter, Prozessverantwortliche, Anforderungsmanager, Anforderungsmanagerin, Entwickler und Fachreferent)
- H-W2: Workshop zur Spezifizierung und Priorisierung der Anforderungen (Dauer: 120 Minuten / Teilnehmer:innen: siehe H-W1)
- H-W3: Workshop zur Finalisierung der Anwendungsszenarien der Methodik (Dauer: 120 Minuten / Teilnehmer:innen: Anforderungsmanagerin und Prozessverantwortlicher)
- H-W6: Workshop zur Erfassung der Ist-Prozesse und Definition der Soll-Prozesse zur Anwendung der Methodik (Dauer: 120 Minuten / Teilnehmer:innen: Abteilungsleiter, Anforderungsmanagerin, Prozessverantwortlicher, Fachreferent und Anwenderin)
- H-KA1: Monatlicher Austausch während zweijähriger Projektlaufzeit mit Industrieunternehmen auf Basis von Mock-Up und Prototypen (Dauer: ca. 60 Minuten / Teilnehmer:innen: in der Regel Abteilungsleiter, Anforderungsmanagerin, Prozessverantwortlicher und ein bis drei wechselnde Anwender:innen)

Der Austausch wurde zunächst durch ein begleitend entwickeltes Software-Vorführmodell (engl. Mockup) unterstützt (vgl. Kapitel 6.4). Ziel dabei war es, durch die visuelle Unterstützung konkreter auf Praxisbedarf eingehen zu können. Im Entwicklungsverlauf wurde das Vorführmodell durch das funktionale Software-Werkzeug ersetzt.

---

<sup>6</sup> Im Folgenden werden Verweise genutzt, um auf Details zu den jeweiligen Aktivitäten im Anhang A2 zu referenzieren.

Eine ausreichende Qualität der Anforderungsbeschreibung wurde durch die Verwendung von Anforderungsschablonen [RS14, S. 215 ff.] und die Berücksichtigung von Gütekriterien [PR15, S. 47 f.] sichergestellt. Zur Strukturierung der Anforderungen werden vier Kategorien unterschieden: Methoden, Eingangsdaten, Anwendung und Ergebnis [Wic17, S. 45 ff.]. Im Folgenden wird die Herleitung der Anforderungen je Kategorie erläutert (vgl. Tabelle 5-1).

Anforderungen an die **Methoden** resultieren aus Feldstudien-Erkenntnissen zu Einflussfaktoren und Wechselwirkungen (vgl. Kapitel 3) und daraus abgeleiteten Abgrenzungskriterien (vgl. Kapitel 4) sowie dem Austausch mit Industrievertreter:innen im Rahmen der Methodik-Entwicklung. Von den Industrieanwender:innen wurde in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Literaturstudie gefordert, die Dimensionen Änderungsausbreitung (A1), -auswirkung (A2) und -wahrscheinlichkeit (A3) zu berücksichtigen [Quelle: H-W1, H-W2 und H-KA1]. Ein Ziel war es, Daten über Anforderungsabhängigkeiten zu erzeugen. Ein weiteres Ziel war es, Einschätzungen zu Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkung eines Risikos bzw. Auswirkungen einer Änderung zu ermitteln, da solche Einschätzungen bereits jetzt für Unternehmensprozesse des Änderungs- und Risikomanagements gefordert werden. Bisher werden diese Einschätzungen manuell und ohne methodische Unterstützung vorgenommen. In der Literatur werden die drei Dimensionen bestätigt und um Aspekte zur Differenzierung von Abhängigkeitstypen und der Einbeziehung von Propagationseffekten detailliert [MSS12, S. 923; HCW13; JL18, S. 179]. Die zu berücksichtigenden Einflussfaktoren zur Bewertung der Änderungswahrscheinlichkeit resultieren aus den Erkenntnissen der Feldstudie. Darüber hinaus wurde von Seiten der Industrie ein Empfehlungsmechanismus für die Auswahl anforderungsspezifischer Maßnahmen gefordert, um für Anwender:innen die Auswahl von Maßnahmen zur Identifikation von Unsicherheiten und zur proaktiven Handhabung von Änderungsrisiken zu erleichtern (A4) [Quelle: H-W2]. Derzeit fehlt diesbezüglich sowohl eine Übersicht verfügbarer Maßnahmen als auch eine Unterstützung bei der Auswahl (vgl. Kapitel 4.2 und 4.5).

Anforderungen an die **Eingangsdaten** der Methodik resultieren unmittelbar aus dem Anwendungszusammenhang der Methodik. Komplexen technischen Systemen liegen Anforderungen aus unterschiedlichen Disziplinen (z. B. Mechanik, Optik, Elektrotechnik / Elektrotechnik und Softwaretechnik [VDI/VDE2206]) zugrunde. Daher müssen Anforderungen aus unterschiedlichen Disziplinen bewertbar sein (A5) [GOS20, S. 19]. Hinsichtlich des Anwendungsaufwands wurde industrieseitig die Anforderung formuliert, dass Anforderungsdaten als gesamtes Set und ohne manuelle Umwandlung oder Anpassung verwendbar sein sollten. Aus diesem Grund wurde die Verarbeitbarkeit einiger hundert Anforderungen (A6) sowie die Verwendung der standardmäßigen Dokumentationsform (z. B. natürlichsprachiger Text) gefordert (A7) [Quellen: F-F1, F-I1, H-W1]. Ergänzendes Material wie Bilder oder Skizzen sind nicht für jede Anforderung verfügbar und müssen nicht berücksichtigt werden.

Anforderungen an die **Anwendung** der Methodik resultieren überwiegend aus industriebezogenen Aktivitäten und decken sich mit Anforderungen an existierende Lösungsansätze [Wic17, S. 45 ff.; HCW13, S. 770 ff.]. Es wurden eine einfache Anwendung ohne gesonderten Schulungsbedarf (A8) [Quellen: F-W1, F-KA1 und H-W1], die kostengünstige Verfügbarkeit verwendeter Software im industriellen Kontext (A9) [Quellen: H-W1 und H-KA1] sowie die Verfügbarkeit benötigter Informationen in der Projektinitiierungsphase (A10) [Quellen: F-KA1, H-W2 und H-KA1] gefordert. Dabei ist es zulässig, wenn Informationen in Form von Expertenwissen verfügbar gemacht werden. Industrieanwender:innen haben zudem eine generische Anwendbarkeit der Methodik in unterschiedlichen Abteilungen und somit für unterschiedliche Produktkategorien als wesentlich erachtet (A11) [Quelle: H-W1]. Hinsichtlich des Anwendungsaufwands konnte kein absoluter Richtwert definiert werden. Stattdessen ist ein von Industrieanwender:innen als akzeptabel empfundener Anwendungsaufwand anzustreben, der abhängig vom Umfang des Projekts und des Anforderungssets ist (A12) [Quellen: F-I1 und H-W2]. Ein hoher Initiierungsaufwand zu Beginn eines Projekts wurde dabei als zulässig erachtet, sofern dadurch der Anwendungsaufwand im weiteren Projektverlauf reduziert werden kann. Die Anforderung an die Integrierbarkeit der Methodik in unternehmensspezifische Entwicklungsprozesse (A13) resultierte aus Erkenntnissen der Untersuchung des Anwendungszusammenhangs (vgl. Kapitel 3).

Als letzte Kategorie wurden Anforderungen an das **Ergebnis** der Methodik erhoben. Industrieanwender:innen haben eine Weiterverwendbarkeit der erzeugten Datenbasis gefordert (A14) [Quelle: F-I1 und H-W1], um das Nutzen-Aufwand-Verhältnis zu steigern. Hierbei stehen die Modelle zur Abhängigkeitsanalyse im Vordergrund, da deren Weiterverwendung in anderen Entwicklungsprojekten nicht nur den Anwendungsaufwand reduziert, sondern auch die Ergebnisgüte der Abhängigkeitsanalyse verbessert (Lerneffekte). Die Ergebnisgüte der Methodik wurde durch die Anforderung an eine hinreichende Genauigkeit berücksichtigt. Das in der Literatur aufgezeigte Problem einer fehlenden Wissens- und Informationsgrundlage zur quantitativen Überprüfung der Genauigkeit [HCW13, S. 770 ff.; Wic17, S. 53] wurde durch die Industrieanwender:innen bestätigt. Als Hilfsgröße zur Prüfung der Anforderungserfüllung wurde definiert, dass Industrieanwender:innen die Ergebnisgüte als hinreichend genau bewerten (A15) [Quelle: H-KA1].

Für jede Anforderung wurde vor der Validierung ein konkretes Erfüllungskriterium definiert und in einem Workshop mit den sechs Industrieanwender:innen abgestimmt (H-W7). Die Erfüllungskriterien werden im Rahmen der Validierung aufgeführt (vgl. Kapitel 7), sodass unmittelbar Bezug zu den Validierungsmethoden genommen werden kann.

Tabelle 5-1: Anforderungen an die Methodik

Anforderung		Beschreibung
Methoden	A1: Änderungsausbreitung	Die Abhängigkeitsanalyse muss Abhängigkeiten zwischen Anforderungen hinsichtlich des Propagationspotenzials differenzieren.
	A2: Änderungsauswirkung	Die Auswirkungsanalyse muss lokale und kollektive Auswirkungen einer potenziellen Anforderungsänderung bewerten.
	A3: exogene und endogene Änderungswahrscheinlichkeit	Die Wahrscheinlichkeitsanalyse muss die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Änderung durch exogene und endogene Initiatoren bewerten.
	A4: anforderungsspezifische Maßnahmen	Die Identifikation potenzieller Änderungsursachen sowie die Auswahl proaktiver Maßnahmen muss anforderungsspezifische Handlungsmaßnahmen vorschlagen.
Eingangsdaten	A5: Interdisziplinarität der Anforderungen	Ein Anforderungsset mit Anforderungen aus verschiedenen Disziplinen (z. B. Mechanik, Elektronik / Elektrotechnik und Softwaretechnik) und Spezifikationsleveln muss hinsichtlich des Änderungsrisikos bewertbar sein.
	A6: hohe Anforderungsanzahl	Ein Anforderungsset mit einer hohen Anzahl an Anforderungen muss hinsichtlich des Änderungsrisikos bewertbar sein.
	A7: standardmäßige Dokumentationsform	Eine Anforderung muss in natürlichsprachiger Dokumentationsform auswertbar sein.
Anwendung	A8: einfache Anwendung	Die Anwendung der Methodik muss als einfach wahrgenommen werden.
	A9: Verfügbarkeit benötigter Software	Die Methodik muss so gestaltet sein, dass die benötigte Software für eine industrielle Nutzung kostengünstig verfügbar ist.
	A10: frühzeitige Verfügbarkeit benötigter Informationen	Die Methodik muss so gestaltet sein, dass die benötigten Informationen in der Projektinitiierungsphase verfügbar sind.
	A11: generische Anwendbarkeit	Die Methodik muss so gestaltet sein, dass eine generische Anwendbarkeit in der Entwicklung komplexer technischer Systeme gegeben ist.
	A12: akzeptabler Anwendungsaufwand	Die Anwendung der Methodik muss so aufwandsarm sein, dass Industrieanwender:innen den Anwendungsaufwand in der Praxisanwendung als „akzeptabel“ beurteilen.
	A13: Integrierbarkeit in den Entwicklungsprozess	Die Methodik muss so gestaltet sein, dass sie in den Entwicklungsprozess eines Unternehmens integriert werden kann.
Ergebnis	A14: Wiederverwendbarkeit der Datenbasis	Die Datenbasis muss für die Anwendung in anderen Produktentwicklungsprojekten wiederverwendbar sein.
	A15: hinreichende Genauigkeit	Das Ergebnis der Methodik muss in den primär unterstützten Entscheidungssituationen hinreichend genau sein.

## 6 Methodik zum proaktiven Management von Anforderungsänderungen

Auf Grundlage der zuvor beschriebenen Anforderungen wird in diesem Kapitel die Entwicklung der Methodik zum proaktiven Management von Anforderungsänderungen (ProMaRC<sup>7</sup>) in der Entwicklung komplexer technischer Systeme erläutert.<sup>8</sup> Die ProMaRC-Methodik setzt sich aus drei aufeinander aufbauenden Methoden zur Identifikation von Änderungsursachen (M1), der ganzheitlichen Risikoanalyse (M2) und der Auswahl proaktiver Maßnahmen (M3) sowie einem Software-Werkzeug als Hilfsmittel zur industriellen Anwendung der Methoden zusammen (vgl. Abbildung 6-1). Die ganzheitliche Risikoanalyse wird in die Abhängigkeitsanalyse (A), Auswirkungsanalyse (B) und Wahrscheinlichkeitsanalyse (C) unterteilt. Deren Detaillierung erfolgt in den Unterkapiteln 6.1 bis 6.4. Abschließend wird in Kapitel 6.5 der Referenzprozess für die Einführung und Anwendung der Methodik erläutert.

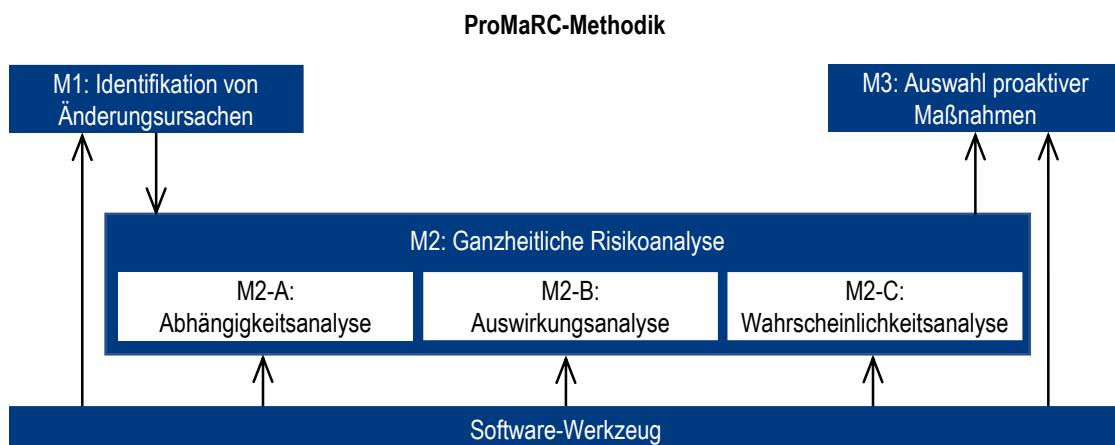


Abbildung 6-1: Konzeption der ProMaRC-Methodik

Zur Veranschaulichung der Methodik wird in den folgenden Ausführungen Bezug zu einem Fallbeispiel-Projekt genommen, welches für die entwicklungsbegleitende Einbindung von Industrieanwender:innen als Referenz diente. In dem Projekt wurde von einem führenden Entwicklungsdienstleister der Automobilindustrie ein Motorsteuergerät entwickelt, das aus positionsbezogenen Daten einer digitalen Straßenkarte die verbleibende Zeit bis zum Eintreten eines Ereignisses ermittelt. Beispiele hierfür sind Analysen von verbleibenden Zeitfenstern bis zu einer Steigung oder dem Inkrafttreten einer Geschwindigkeitsvorgabe. Das übergeordnete Ziel ist die Steigerung der Motoreffizienz, indem der Verbrennungsprozess vorausschauend optimiert wird (z. B. Gemischverhältnis).

<sup>7</sup> engl. Proactive Management of Requirement Changes

<sup>8</sup> Zentrale Inhalte der ProMaRC-Methodik wurden in [GOP22] vorveröffentlicht.

Das Projekt konnte nur mit mehrmonatigem Zeitverzug und zusätzlichen finanziellen Mitteln abgeschlossen werden. Der Grund war eine Anforderungsänderung des Kunden im fortgeschrittenen Projektstadium. Entgegen der ursprünglichen Planung sollte das Eingangssignal (Positionsdaten) nicht mehr verteilt in unterschiedlichen Softwaremodulen verarbeitet werden, sondern in einem zentralen Modul (vgl. Abbildung 6-2). Ziel der Änderung war es, den Wartungs- und Wiederverwendungsaufwand der Software zu reduzieren. Die Auswirkungen der Änderung waren für das Entwicklungsteam schwer ab- schätzbar, sodass dem Änderungswunsch mit geringfügiger Kostensteigerung entspro- chen wurde. Die Änderungsimplementierung zeigte jedoch zahlreiche Propagationsef- fekte und führte zu erheblich größeren Auswirkungen als zunächst angenommen.

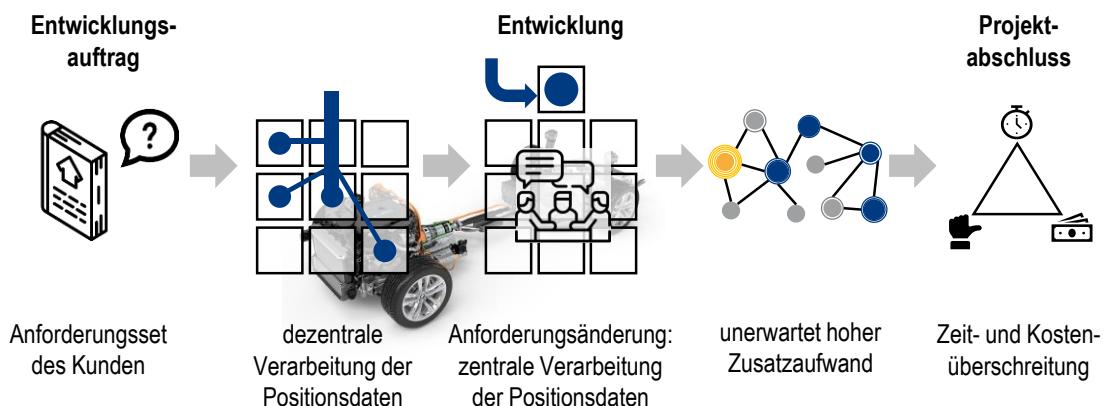


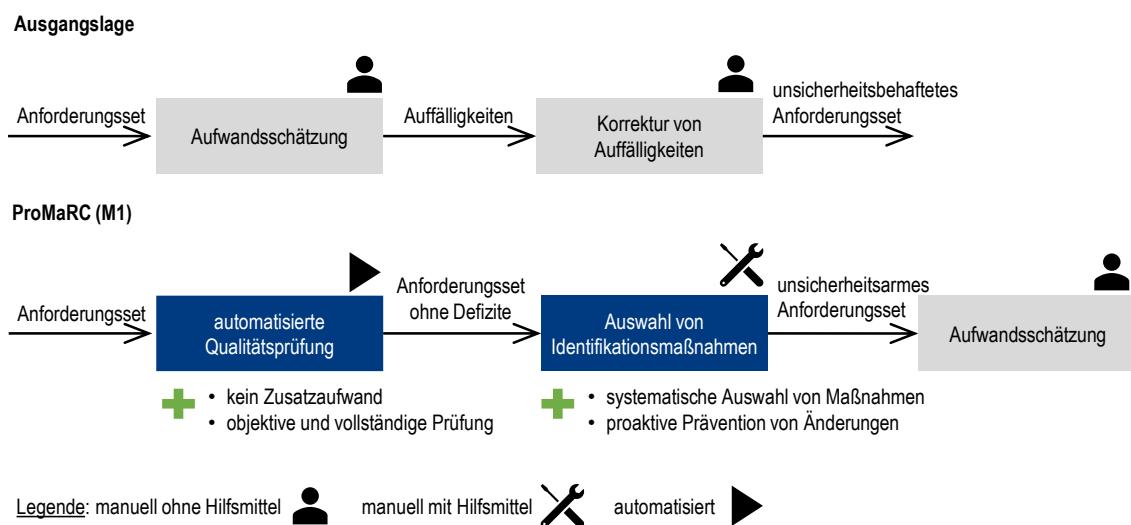
Abbildung 6-2: Anforderungsänderung im Fallbeispiel Motorsteuerung  
(Bildquelle Antriebsstrang: bmw.de)

Um aufzuzeigen, bei welchen Schritten die ProMaRC-Methodik unterstützt, wurde der Entwicklungsprozess des Unternehmens analysiert und Schritte mit Bezug zum proakti- ven Management von Anforderungsänderungen extrahiert. Die extrahierten Schritte wer- den im Folgenden als Bezugspunkt verwendet, um die Neuerungen der ProMaRC-Me- thodik darzulegen. Dies ist damit zu begründen, dass das Unternehmen den Entwick- lungsprozess an das industriell etablierte V-Modell angelehnt hat und die Organisations- einheit A-SPICE konform ist. Außerdem entsprechen die Schritte den Vorgehensweisen der aus der Feldstudie bekannten Unternehmen, sodass die Gültigkeit der Erläuterungen über das Unternehmen hinaus angenommen wird.

## 6.1 Identifikation von Änderungsursachen

Eine explizite Identifikation von Änderungsursachen erfolgt im Referenzablauf des Fallbeispiels nicht. Für die Angebotserstellung und Auftragsfreigabe wird das Anforderungsset mit dem Kunden verhandelt (Pflichtenheft). Dabei werden die Anforderungen hinsichtlich des Erfüllungsaufwands bewertet. Es werden vereinzelt Unsicherheiten erkannt (z. B. Qualitätsdefizite in der Anforderungsbeschreibung), jedoch findet keine systematische Ermittlung von Unsicherheiten für alle Anforderungen statt. Falls Unsicherheiten erkannt wurden, entscheiden die Projektleiter:innen zusammen mit den Anforderungsingenieur:innen über Korrekturmaßnahmen. Die Identifikation potenzieller Änderungsursachen ist daher unvollständig und von der Fachkompetenz sowie dem Erfahrungswissen der Beteiligten abhängig.

Die Methode zur Identifikation von Änderungsursachen (M1) greift die beiden Verbesserungspotenziale hinsichtlich Vollständigkeit und Objektivität der Analyse auf (vgl. Abbildung 6-3). In einem ersten Schritt wird automatisiert die Qualität der Anforderungen geprüft. Die Automatisierung ermöglicht die vollständige Analyse aller Anforderungen und zugleich eine objektive Prüfung auf Basis eines umfangreichen Regelsatzes. Anschließend werden die Qualitätsdefizite korrigiert und Maßnahmen zur Identifikation weiterer Unsicherheiten im Anforderungsset ausgewählt. So können sämtliche Änderungsursachen berücksichtigt und Änderungen präventiv vermieden werden. Die Aufwandsschätzung kann durch die Anwendung von M1 auf einem aussagekräftigen Anforderungsset aufbauen und ermöglicht es, die Wirtschaftlichkeit des Projekts bereits in der Verhandlungsphase verlässlich zu bewerten.



Bei der Konzeptionierung der Methode werden die zwei Schritte zur Qualitätsprüfung des Anforderungsets und zur unsicherheitsspezifischen Auswahl von Identifikationsmaßnahmen beibehalten (vgl. Abbildung 6-4). Grundlage für die Methode sind die Unsicherheitsarten im Kontext von Anforderungsänderungen nach GRÄBLER ET AL. (vgl. Abbildung 4-1). Für jede dieser Unsicherheitsarten ist zu prüfen, ob die Initiierung einer Anforderungsänderung zu erwarten ist. Aufgrund der Vielzahl an Anforderungsänderungen durch Qualitätsdefizite in der Anforderungsbeschreibung [FHS15, S. 46] wird diese Unsicherheitsart in einem vorgelagerten Schritt gesondert behandelt. Dafür wird zunächst in einer automatisierten anforderungsspezifischen Analyse die Einhaltung von Qualitätskriterien bewertet. Anschließend werden die detektierten Defizite durch Anwender:innen korrigiert (z. B. vage Formulierungen). Im zweiten Schritt werden Maßnahmen zur Identifikation weiterer Änderungsursachen ausgewählt. Dafür prüfen Anwender:innen alle Unsicherheitsarten hinsichtlich Relevanz für das Entwicklungsvorhaben und wählen aus einer Übersichtstabelle geeignete Maßnahmen aus. Deren Durchführung erfolgt im Rahmen bestehender Prozesse der Anforderungsentwicklung. Das Ergebnis ist entweder die unmittelbare Behebung (Prävention oder Vorverlagerung) oder die Kenntnisnahme und Erfassung im Risikomanagement.

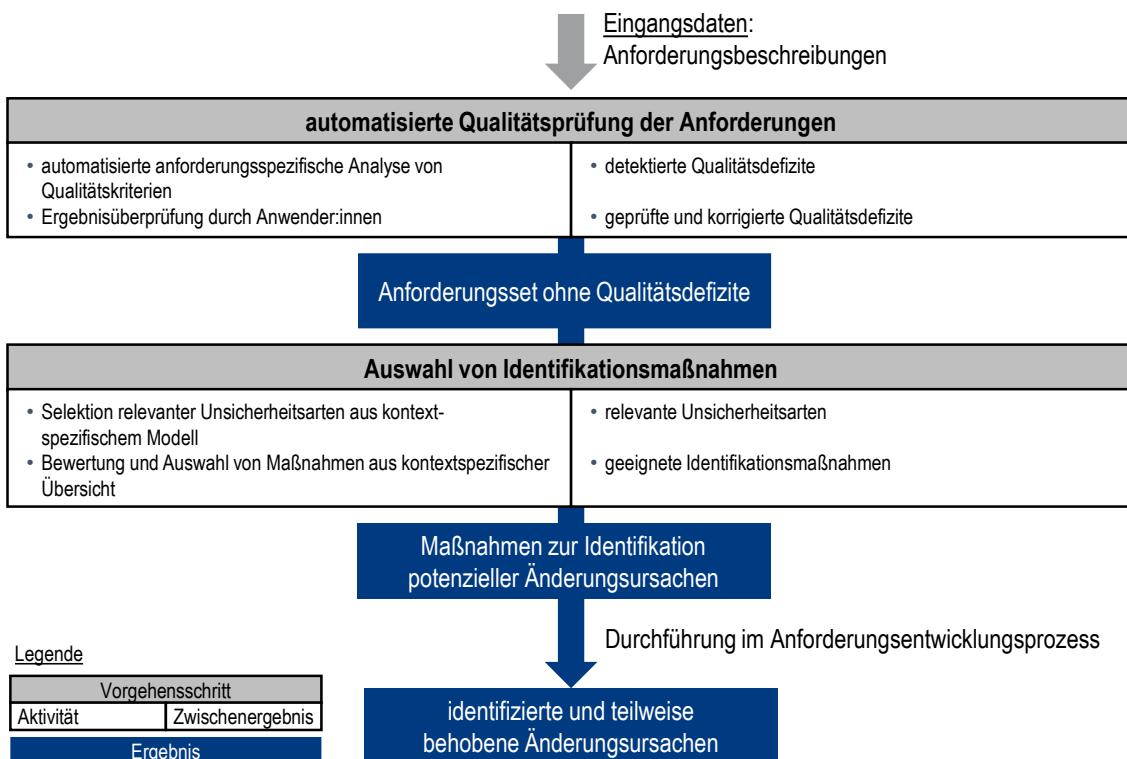


Abbildung 6-4: Übersicht der Methode zur Identifikation von Änderungsursachen

## Schritt 1: Automatisierte Qualitätsprüfung der Anforderungen

Qualitätsdefizite sind den Unsicherheitsarten „Datenunvollständigkeit“ und „unpräzise Daten“ zuzuordnen (vgl. Abbildung 4-1). Da eine manuelle Qualitätsprüfung jeder Anforderung aufgrund des Umfangs der Anforderungssets aufwändig ist, wird eine **automatisierte Analyse** durchgeführt. Jede Anforderung wird anhand eines Sets an Qualitätskriterien (vgl. Anhang A4) geprüft. Dazu werden Begrifflichkeiten und Satzkonstellationen erkannt, die auf Defizite hindeuten. Die Auswahl der Begrifflichkeiten und Satzkonstellationen basiert auf dem Ansatz nach BOURAFFA [Bou19] und wurde ins Deutsche überführt. Ausgewählt wurde der Ansatz, weil BOURAFFA eine Vielzahl an empirischen Studien zur automatisierten Detektion von Qualitätsdefiziten in Anforderungsbeschreibungen ausgewertet und in einem ganzheitlichen sowie automatisiert auswertbarem Regelsatz mit 22 Kategorien zusammengeführt hat. Begrifflichkeiten, die als Defizit detektiert werden, sind beispielsweise „angemessen“ (vage Formulierung), „normalerweise“ (Spekulation) oder „übertreffen“ (Superlativ). Anwender:innen können die Kategorien sowie die dazugehörigen Begrifflichkeiten bedarfsgerecht konfigurieren, sodass Konventionen und kontextspezifische Besonderheiten des Unternehmens Berücksichtigung finden.

Ein Großteil der Qualitätsdefizite kann unmittelbar nach der automatisierten Prüfung durch die Anwender:innen korrigiert werden (z. B. unklare Assoziativität oder passive Sprachmehrdeutigkeit). Jene Qualitätsdefizite, bei denen das Wissen für die Korrektur fehlt, werden im nachfolgenden Schritt mit zusätzlichen Maßnahmen adressiert. Beispielsweise ist dies der Fall, wenn die Korrektur eines Qualitätsdefizits nur nach Rücksprache mit dem Kunden möglich ist. Da diese nicht mehr als Qualitätsdefizit, sondern als Unsicherheit zu betrachten sind, ist das Ergebnis von Schritt 1 ein Anforderungsset ohne Qualitätsdefizite.

## Schritt 2: Auswahl von Identifikationsmaßnahmen

Die Auswahl von Identifikationsmaßnahmen wird durch eine Übersichtstabelle unterstützt, in der alle Unsicherheitsarten benannt sowie dazugehörige Identifikationsmaßnahmen vorgeschlagen werden (vgl. Tabelle 6-1). Anwender:innen prüfen zunächst die **Relevanz der Unsicherheitsarten** für das vorliegende Entwicklungsvorhaben. Beispielsweise kann die „Modellierungsunschärfe“ vernachlässigt werden, falls keine Modellierung vorgenommen wird.

Anschließend sind die vorgeschlagenen **Identifikationsmaßnahmen zu bewerten und auszuwählen**. Dafür sind situationsspezifisch Aufwand, Machbarkeit sowie die erwartete Ergebnisgüte der Maßnahmen zu vergleichen. Dabei sind Synergieeffekte zu berücksichtigen, bei denen durch eine einzelne Maßnahme mehrere Unsicherheitsarten untersucht werden. Die vorgeschlagenen Identifikationsmaßnahmen je Unsicherheitsart wurden aus bestehenden Forschungsergebnissen [PG20, S. 81; Neu16, S. 138; GO19, S. 54 ff.; Wan15, S. 48 ff.; Gle11, S. 58 ff.] abgeleitet, in einem Industrieworkshop (H-W5) angereichert und den Unsicherheitsarten zugeordnet.

Das Ergebnis des zweiten Schritts sind Maßnahmen zur Identifikation von Unsicherheiten, die im Rahmen des übergeordneten Änderungs- und Anforderungsmanagementprozesses geplant und umgesetzt werden. Die Maßnahmen dienen zur Identifikation und Charakterisierung von potenziellen Änderungsursachen.

*Tabelle 6-1: Übersichtstabelle von Maßnahmen zur Identifikation von Änderungsursachen [GPO21, S. 1693]*

Unsicherheitsart	Identifikationsmaßnahmen
Daten-unvollständigkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>innerhalb einer Anforderung: Software für automatisierte Qualitätsprüfung (siehe Vorgehensschritt „Qualitätsprüfung der Anforderungen“)</li> <li>fehlende Anforderung: Fragetechniken, Kreativitätstechniken, dokumentenzentrierte Techniken, Beobachtungstechniken, Unterstützungstechniken</li> </ul>
unpräzise Daten	<ul style="list-style-type: none"> <li>initiale Erhebung: Richtlinien und Werkzeuge für die Dokumentation (Schablonen sowie Qualitätskriterien für Anforderungen und Anforderungssets)</li> <li>Überprüfung und Verbesserung: Software für automatisierte Qualitätsprüfung</li> </ul>
Datenvarianz	<ul style="list-style-type: none"> <li>initiale Erhebung: Reflektion mit komplementärer Stakeholder-Gruppe</li> <li>Überprüfung und Verbesserung: Annäherung anhand stochastischer Analysen</li> </ul>
Kontext-ungenauigkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>Simulationen (z. B. in virtueller Realität), Kundenbewertungen, Prototypenentwicklung, Use Cases, Mockups, System / Kontext Abgrenzung, Stakeholder-Analyse, User Stories, Personas</li> <li>Techniken zur Anforderungserhebung</li> </ul>
Interaktions-ungenauigkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>Interaktion mit Stakeholdern (siehe „Kontext Ungenauigkeit“)</li> <li>Interaktion mit dem Entwicklungsteam: Kommunikationsstrategien, Modellierung des System of Interest / der Ziele (Struktur und Verhalten), Glossar</li> </ul>
Entwicklungs-unschärfe	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anwendung von Prozessmodellen, Methoden und Werkzeugen aus Entwicklungsmethodik</li> <li>Überprüfung hinsichtlich Inkonsistenzen</li> <li>agile Ansätze, Rapid Product Development, Experience Design</li> <li>Tests (Machbarkeit und Grad der Bedürfnis- / Anforderungserfüllung)</li> </ul>
Modellierungs-unschärfe	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anwendung von Modellierungsmethoden (z. B. SYSMOD oder OOSEM)</li> <li>Anwendung von Modellierungssprachen (z. B. UML oder SysML)</li> <li>Anwendung von Modellierungswerkzeugen (Konsistenzprüfung, Status-Management etc.)</li> </ul>

Die Anwendung der Maßnahmen wird im Rahmen der bestehenden Prozesse zur Anforderungsentwicklung vorgenommen. In einigen Fällen kann mit der Identifikation einer Änderungsursache auch dessen Behebung einhergehen, beispielsweise wenn zur Identifikation von Kontext-Ungenauigkeiten ein Prototyp erstellt wird. In diesem Fall kann bei der Vorstellung des Prototyps (Stakeholder-Interaktion) eine potenzielle Änderungsursache gemeinsam identifiziert und unmittelbar behoben werden. Falls die Unsicherheit weiterhin besteht, ist diese als Risiko zu dokumentieren und im Zusammenspiel von Risiko- und Anforderungsmanagement zu handhaben.

## Exemplarische Anwendung im Kontext des Fallbeispiels

Zur Anwendung der Methode wird zunächst das 200 Anforderungen umfassende Anforderungsset des Kunden aus der Anforderungsmanagement-Software IBM Doors als Tabelle (.csv Datei) exportiert. Statt einer manuellen Prüfung hinsichtlich Auffälligkeiten werden nun alle Anforderungen automatisiert auf Qualitätsdefizite geprüft. Dieser Schritt erfolgt zu Beginn des Projekts und wird wiederholt, sobald neue Anforderungen (z. B. aufgrund von Detaillierung) ergänzt werden. Dabei zeigten sich mehr als 30 Qualitätsdefizite, obwohl das Anforderungsset von den Anwender:innen im Rahmen der Vertragsverhandlung bereits gesichtet wurde. Dass diese Defizite bei der manuellen Prüfung nicht erkannt wurden, zeigt die Fehleranfälligkeit des Vorgehens und zugleich die Bedeutung einer unzureichenden Anforderungsqualität in der industriellen Praxis.

Im Folgenden werden die zwei anonymisierten Anforderungen A13 („Das Motorsteuergerät muss die Zeit bis zum Ereigniseintritt in [Einheit-tbd] ausgeben.“) und A147 („Nur ein Modul sollte die eingehenden Positionsdaten verarbeiten.“) betrachtet. Für A13 wird „tbd“ als Defizit (fehlender Inhalt) erkannt und farblich hervorgehoben. Für A147 wird „sollte“ als unpräzise Begrifflichkeit bewertet und ebenfalls markiert. Nun wird geprüft, ob eine unmittelbare Korrektur des Defizits möglich ist. Bei A13 ist dies der Fall und die Einheit kann als [Sekunde] ausgewiesen werden. Bei A147 ist dem Entwicklungsteam die Verbindlichkeit der Anforderung unklar. Daher wird anhand der Übersichtstabelle eine geeignete Maßnahme ausgewählt („Interaktion mit Stakeholder“). Der Stakeholder ist in diesem Fall der Kunde. Bevor ein Abstimmungstermin anberaumt wird, werden zunächst die weiteren Qualitätsdefizite im Anforderungsset gesichtet und anschließend gesammelt mit dem Kunden besprochen. Daraus resultiert, dass die zentrale Verarbeitung der Positionsdaten verpflichtend ist. Im tatsächlichen Projektverlauf war diese Änderung ausschlaggebend für die Zeit- und Kostenüberschreitung und erfolgte, bevor M1 Anwendung fand. Sie hätte jedoch mittels M1 deutlich früher erkannt und mit geringerem Korrekturaufwand umgesetzt werden können.

Da das Motorsteuergerät unter anderem im Kontext des autonomen Fahrens verwendet werden soll und einen hohen Neuheitsgrad hat, wird darüber hinaus anhand der Übersichtstabelle die Unsicherheitsart „Kontextungenauigkeit“ als wichtiger Änderungursprung eingeschätzt und eine dazugehörige Maßnahme initiiert („Erarbeitung von Use Cases“). Dabei fällt auf, dass beispielsweise auch das Head-Up-Display die ermittelten Zeitangaben bis zum Eintritt eines Ereignisses verwerten soll. Dies wird entsprechend in das Anforderungsset integriert, sodass eine spätere Änderung präventiv vermieden werden kann. Ohne M1 wäre keine Maßnahme initiiert und diese Änderung somit erst später erkannt worden.

Die Anwendung der Methode zur Identifikation von Änderungsursachen hat zwei Ziele. Das erste Ziel beinhaltet, dass keine Qualitätsdefizite im Anforderungsset vorhanden sind. Qualitätsdefizite können zwar nicht gänzlich ausgeschlossen werden, die automatisierte Prüfung auf Basis eines umfassenden Regelwerks ermöglicht aber selbst für umfangreiche Anforderungssets eine vollständige und objektive Analyse. Damit wird die Zahl der verbleibenden Qualitätsdefizite gegenüber dem bisher vorherrschenden manuellen Vorgehen deutlich reduziert. Zudem entfällt der bisher erforderliche manuelle Prüfaufwand.

Das zweite Ziel umfasst, dass die Anwender:innen Änderungsursachen frühzeitig erkennen und beheben können. Die Methode hilft mit einer neu erarbeiteten Maßnahmenübersicht bei der systematischen Identifikation anforderungsspezifischer Maßnahmen. Deren Umsetzung erfolgt im Rahmen der bestehenden Prozesse zur Anforderungsentwicklung. Bisher wurden Maßnahmen zur Identifikation von Unsicherheiten kaum durchgeführt. Mit M1 wird daher ein wichtiger Beitrag zu den Zielen des Änderungs- und Risikomanagements (insb. Prävention und Vorverlagerung) geleistet und ressourcenintensive Korrekturen in späteren Projektphasen reduziert. Das Ergebnis der Methoden-Anwendung ist ein Anforderungsset ohne Qualitätsdefizite und mit reduzierten Unsicherheiten, welches als Datengrundlage für die nachfolgende Methode zur ganzheitlichen Risikoanalyse verwendet werden kann (vgl. Abbildung 6-5).

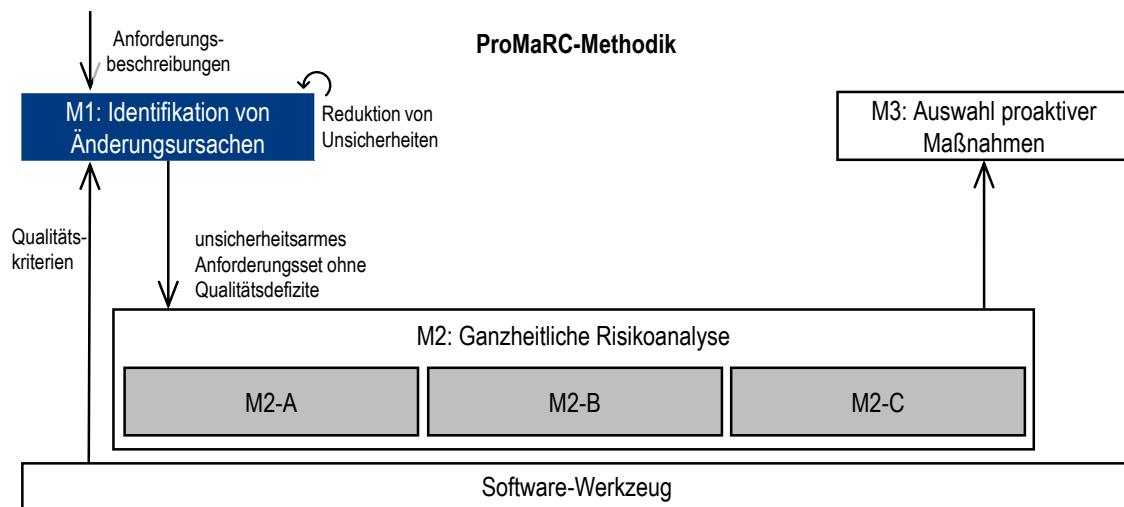


Abbildung 6-5: Einordnung der Methode zur Identifikation von Änderungsursachen in die ProMaRC-Methodik

## 6.2 Ganzheitliche Risikoanalyse

Die Methode zur ganzheitlichen Risikoanalyse (M2) umfasst drei Teile: Abhängigkeitsanalyse (M2-A), Auswirkungsanalyse (M2-B) und Wahrscheinlichkeitsanalyse (M2-C). Die Auswirkung einer Änderung und dessen Eintrittswahrscheinlichkeit sind die grundlegenden Ergebnisgrößen einer Risikoanalyse [SM02, S. 19; GOS20, S. 7]. Sowohl die Auswirkungsanalyse als auch die Wahrscheinlichkeitsanalyse erfordern die Einbeziehung von Propagationseffekten (vgl. Kapitel 3 und 4). Daher wird die Abhängigkeitsanalyse gesondert betrachtet (vgl. Abbildung 6-1).

### 6.2.1 Abhängigkeitsanalyse

Im Fallbeispiel erfolgt die Abhängigkeitsanalyse reaktiv und manuell. Grund für das reaktive Vorgehen ist die aufwändige und bei umfangreichen Anforderungssets fehleranfällige Vorgehensweise (vgl. Kapitel 3; H-W1). Auslöser einer Analyse ist häufig die Forderung von Kunden nach Abhängigkeitsinformationen, um Zertifizierungen wie beispielsweise A-SPICE (vgl. Kapitel 4.1) oder UN ECE 156 [UNECE 156] zu entsprechen. In diesem Fall ermitteln die Anforderungsingenieur:innen für die relevanten Teilbereiche des Anforderungssets manuell die Abhängigkeiten. Relevant können beispielsweise sicherheitskritische Anforderungen sein. Die Dokumentation der Abhängigkeiten erfolgt in gesonderten Tabellen oder Anforderungsmanagementssoftware wie etwa IBM Doors (vgl. Kapitel 4.1). Da keine Leitlinie zur Identifikation oder Differenzierung der Abhängigkeiten existiert (H-W1), herrscht ein hohes Maß an Subjektivität. Zudem sind Abhängigkeitsinformationen aufgrund der Unvollständigkeit kaum für sonstige Entwicklungsaktivitäten (z. B. Auswirkungsanalysen von Änderungen) weiterverwertbar.

Durch die Verwendung von neuartigen Ansätzen, die auf künstlicher Intelligenz (KI) [Sta22, S. 381 ff.] basieren, ermöglicht die ProMaRC-Methodik einen bisher nicht erreichten Automatisierungsgrad der Analyse von Anforderungsabhängigkeiten. Die damit einhergehende Aufwandsreduzierung lässt neben dem bisherigen manuellen Vorgehen auch für die industrielle Praxis eine proaktive Identifikation von Abhängigkeiten zu. Die Analyse ist zudem vollständiger und weniger subjektiv als das bisherige Vorgehen (vgl. Abbildung 6-6). Eine weitere Neuerung gegenüber bestehenden Ansätzen ist, dass die manuelle Erfassung der Abhängigkeiten als optionaler Schritt beibehalten werden kann. Das ermöglicht Lerneffekte und eine kontinuierliche Verbesserung der Analysegenauigkeit, indem das implizite Wissen aller Anwender:innen systematisch in einem KI-Modell gebündelt wird.

Für die Konzeptionierung der Analyse von Anforderungsabhängigkeiten (M2-A) wird zunächst ein Vergleich von Ansätzen zur Abhängigkeitsanalyse durchgeführt. Anschließend wird der vielversprechendste Ansatz ausgewählt und implementiert.

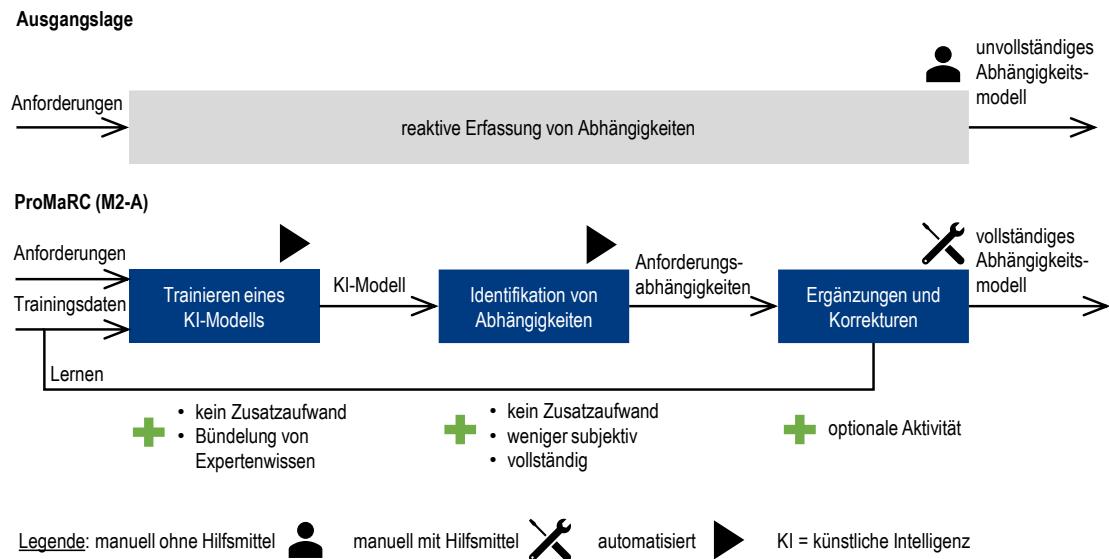


Abbildung 6-6: Verbesserung der Ausgangslage durch die Analyse von Anforderungsabhängigkeiten (M2-A)

### Vergleich von Ansätzen zur Abhängigkeitsanalyse

Um den vielversprechendsten Ansatz für die Abhängigkeitsanalyse im Kontext von Anforderungen zu finden, werden in einem dreistufigen Vorgehen verschiedene Lösungsalternativen getestet und miteinander verglichen. Im Rahmen der Feldstudie wurde ein manueller Ansatz verwendet [GOS20, S. 11 ff.]. Ein Nachteil manueller Ansätze ist der nicht-lineare Anstieg des Anwendungsaufwands pro Anforderung aufgrund des auf einem paarweisen Vergleich beruhenden Analyseverfahrens:

$$x_{\text{Anzahl der Bewertungen}} = y_{\text{Anzahl der Anforderungen}} * (y_{\text{Anzahl der Anforderungen}} - 1)$$

Dies macht manuelle Experteneinschätzungen ungeeignet für Anforderungssätze mit mehr als etwa 30 Anforderungen, da bereits für 30 Anforderungen 870 Anforderungspaare auf Abhängigkeit geprüft werden müssen. Um diesen Nachteil zu mindern, werden die Anforderungen gruppiert (vgl. Kapitel 3). Das exponentielle Wachstum kann dadurch aufgelöst werden. Dennoch wurde der Anwendungsaufwand im Rahmen der Feldstudie als zu hoch bewertet. Als Grund wurde benannt, dass neben der generischen Bewertung von Abhängigkeiten eine manuelle Gruppenzuweisung aller Anforderungen durchzuführen ist. Zudem reduziert die Verallgemeinerung die Genauigkeit der Ergebnisse im Vergleich zu einer anforderungsspezifischen Analyse [GOS20, S. 16 ff.].

Der zweite getestete Ansatz basiert auf einer Ontologie. Wie von FELFERNIG ET AL. [FSF17] vorgeschlagen, werden Anforderungen Ontologieelementen zugeordnet. Die Ontologie wird im Vorfeld von Expert:innen erarbeitet. Die Zuordnung der Anforderungen zu Ontologieelementen kann manuell oder automatisiert erfolgen, zum Beispiel durch maschinelles Lernen. Diskussionen mit Industrieanwender:innen [H-KA1] zeigten jedoch, dass aufgrund der Komplexität sowohl bei Neuentwicklungen als auch bei Anpas-

sungsentwicklung das unzureichende Systemverständnis der Expert:innen in frühen Entwicklungsphasen die Vollständigkeit und Genauigkeit der Ontologie selbst einschränkt. Daher wird dieser Ansatz verworfen und stattdessen ein vollautomatisierter Lösungsansatz angestrebt, der kein Systemverständnis der Expert:innen erfordert. Dafür wird eine Literaturstudie zu möglichen Lösungsklassen durchgeführt (vgl. [GPO20]).

Auf Grundlage der Ergebnisse wird ein auf maschinellen Lernverfahren basierender Ansatz zur Abhängigkeitsanalyse ausgewählt. Dieser ermöglicht eine vollautomatische Abhängigkeitsanalyse ohne Einbindung von Expert:innen. Da die semantische Ähnlichkeitsanalyse (z. B. angewandt von [Mor12]) weder in der Lage ist, alle Abhängigkeiten zu detektieren (z. B. Synonyme oder physikalische Effekte), noch die Unterscheidung von Abhängigkeitstypen (Indikator für Propagationsverhalten) ermöglicht, wird ein Ansatz zur inhaltsbasierten Abhängigkeitsanalyse verwendet. [GPO20]

Der Ansatz Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT) lernt aus kontextuellen Beziehungen von Wörtern in Textkorpora und ermöglicht eine inhaltliche Analyse von Anforderungsabhängigkeiten sowie eine Unterscheidung von Abhängigkeitstypen [GG20]. Um die Leistungsfähigkeit von BERT im Anforderungskontext zu bewerten, wird der Ansatz mit alternativen Verfahren zur inhaltsbasierten Abhängigkeitsanalyse verglichen [GOH22]. Die Gegenüberstellung zeigt, dass BERT bessere Leistungskennwerte als die alternativen Ansätze erreicht (Details vgl. Tabelle 7-2). Daher wird der BERT-Ansatz für die Abhängigkeitsanalyse ausgewählt.

## **Ansatz zur Anforderungsabhängigkeitsanalyse**

Zur Vorbereitung der Abhängigkeitsanalyse ist im ersten Schritt eine Datenvorverarbeitung vorgesehen, um die Anforderungsdaten in die gewünschte Form (Vektoren) zu bringen (vgl. Abbildung 6-7). Parallel zur Vorbereitung erfolgt im zweiten Schritt die kontextspezifische Feinabstimmung eines KI-Modells. Im dritten Schritt werden die Anforderungsabhängigkeiten mithilfe des KI-Modells klassifiziert und ein Abhängigkeitsmodell erzeugt. Die Transformation der ermittelten Abhängigkeitsdaten in gängige Datenformate zur weiteren Verwendung (z. B. csv) wird im letzten Schritt vorgenommen.

### **Schritt 1: Vorverarbeitung der Daten**

Um die Anforderungsdaten in ein für die Abhängigkeitsanalyse geeignetes Datenformat umzuwandeln, ist eine Vorverarbeitung der Daten erforderlich. Die Eingangsdaten (textuelle Anforderungsbeschreibungen wie z. B. „maximale Traglast 5 kg“ und „maximale Breite des Objekts 10 cm“) müssen bereinigt und in eine mathematische Darstellung (Vektoren) umgewandelt werden. Zunächst werden die Anforderungen zu einem Fließtext aus zwei Eingangsanforderungen (Textfeld wie „maximale Traglast 5 kg maximale Breite des Objekts 10 cm“) geformt, dem ein Dummy-Label (Labelfeld) hinzugefügt wird. Die Dummy-Labels werden später in eine Abhängigkeitsart umgewandelt.

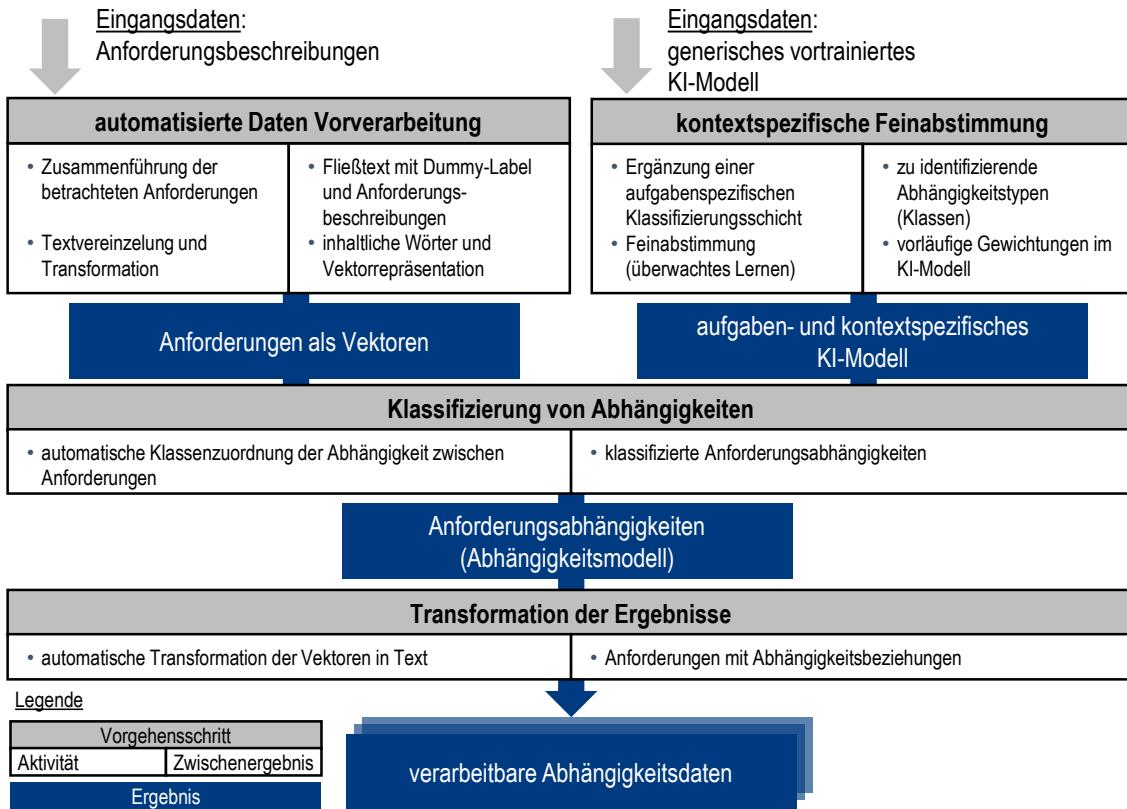


Abbildung 6-7: Vorgehensschritte zur Identifikation von Anforderungsabhängigkeiten

Dann wird der Anforderungstext in Teilelemente vereinzelt (engl. tokenized). Der Satz wird in einzelne Wörter zerlegt und die Wörter anschließend kategorisiert (Stopp-Wort oder inhaltliches Wort wie z. B. „Traglast“ als inhaltliches Wort und „des“ als Stopp-Wort). Stopp-Wörter haben einen grammatischen Zweck und unterstützen die Aussage der inhaltlichen Wörter [RM20, S. 32]. Hierfür wurde der BERT-Tokenizer verwendet [Hug20]. Abschließend können die Textdaten in eine Vektorrepräsentation umgewandelt und als Eingabe für das KI-Modell verwendet werden. [GOH22]

## Schritt 2: Kontextspezifische Feinabstimmung

Um Encoder-Decoder-Modelle wie BERT zu trainieren, sind zwei verschiedene Arten von Training erforderlich: Basistraining (engl. pre-training) und kontextspezifische Feinabstimmung. Das Basistraining wird mit großen Mengen an Textdaten durchgeführt (z. B. aus Wikipedia und Buchkorpora). Ziel ist es, dem Modell anzutrainieren, inhaltlich zusammenhängende Begrifflichkeiten zu identifizieren [DCL19]. Modelle, die das Basistraining durchlaufen haben, sind generisch und können aus Open-Source-Datenbanken verwendet werden (in diesem Fall aus [Hug18]). [GOH22]

Nach dem Basistraining wird das Modell auf die jeweilige Aufgabe und den Kontext feinabgestimmt. Für die Abhängigkeitsanalyse wird eine Klassifizierungsschicht ergänzt, damit durch das KI-Modell vordefinierte (Abhängigkeits-)Klassen bestimmt werden können. Die Feinabstimmung erfolgt als überwachtes Lernen mit einem gelabelten Datensatz.

Falls im Laufe der Methodik-Anwendung manuell Abhängigkeiten von Anwender:innen erfasst oder korrigiert werden, können diese in den Datensatz aufgenommen werden. Dadurch entsteht ein Lerneffekt und die Genauigkeit des KI-Modells steigt. Nach der Feinabstimmung ist ein aufgaben- und kontextspezifisches KI-Modell für die Abhängigkeitsanalyse verwendbar. [GOH22]

### **Schritt 3: Klassifizierung von Abhängigkeiten**

Um Abhängigkeiten zu identifizieren, werden die vorverarbeiteten Eingabedaten mit einem feinabgestimmten KI-Modell analysiert. Die Aufgabe ist es, den Abhängigkeitstyp zwischen zwei Anforderungen zu ermitteln. Zur Kennzeichnung des Propagationsverhaltens sind die Abhängigkeitstypen „none“, „refines“, „refined by“, „requires“ und „required by“ von Bedeutung [GOP21, S. 6; GKv14, S. 959; ZLZ14, S. 53 ff.]. Dementsprechend werden diese fünf Typen klassifiziert. Die Klassifizierung erfolgt vollautomatisch, indem vereinfacht die in Schritt 1 erzeugten Vektoren mit Vektoren des KI-Modells verglichen werden. Die Abhängigkeitsart, die für den Vektor des KI-Modells mit der größten Ähnlichkeit hinterlegt ist, wird dem neu erzeugten Vektor als Abhängigkeitsart zugewiesen. Optional haben Anwender:innen die Möglichkeit, die Ergebnisse der Analyse zu bestätigen oder zu korrigieren. Beides führt dazu, dass die Eingabe in den gelabelten Datensatz überführt wird (Lerneffekt). [GOH22]

### **Schritt 4: Transformation der Ergebnisse**

Für die weitere Verwendung der Abhängigkeitsinformationen muss die vektorbasierte Ausgabe des KI-Modells in ein geeignetes Datenformat transformiert werden - z. B. csv oder ReqIF. Welches Datenformat am besten geeignet ist, hängt von der beabsichtigten Verwendung ab. Das Ergebnis ist eine Liste der Anforderungen und ihrer klassifizierten Abhängigkeitstypen, die für die Auswirkungs- und Wahrscheinlichkeitsanalyse verwendet werden kann. [GOH22]

### **Exemplarische Anwendung im Kontext des Fallbeispiels**

Zunächst wählen die Anwender:innen ein KI-Modell für die Abhängigkeitsanalyse aus. In diesem Fall wird ein KI-Modell verwendet, das für die Abteilung „Motorsteuergeräte Antriebsstrang“ feinabgestimmt ist. Anschließend wird die Anforderungsliste importiert und automatisiert analysiert. Abhängig vom KI-Modell und den aufgabenspezifischen Bedürfnissen wird definiert, welche Abhängigkeitstypen zu differenzieren sind (z. B. „none“, „requires“ und „refines“). In diesem Fall reicht eine binäre Unterscheidung zwischen „none“ und „dependent“. Das Ergebnis ist ein Abhängigkeitsnetz aller Anforderungen, welches als Tabellen- oder Matrixdarstellung exportiert werden kann (vgl. Abbildung 6-8). Die Rechenzeit ist abhängig von der verfügbaren Rechenleistung und der Anzahl an Anforderungen. In diesem Beispiel werden die 200 Anforderungen auf einem Cloud-Sever (Google Colab) verarbeitet, sodass das Abhängigkeitsmodell nach wenigen

Sekunden verfügbar ist. Mit dem bisherigen manuellen Vorgehen wären 39.800 Anforderungspaare zu prüfen gewesen, was bei zehn Sekunden Bedenktzeit je Anforderungspaar über 110 Stunden Arbeitszeit erfordert hätte. Daher wäre die Analyse nur für sicherheitskritische Anforderungen oder bei Anforderungsänderungen durchgeführt worden und ist in jedem Fall mit einem hohen Arbeitsaufwand verbunden. Dieser manuelle Aufwand entfällt durch die Automatisierung. Das Ergebnis ist ein vollständiges Abhängigkeitsmodell. Optional kann nach der Berechnung eine Prüfung vorgenommen werden. Dies ist beispielsweise für zertifizierungsrelevante Anforderungen sinnvoll.

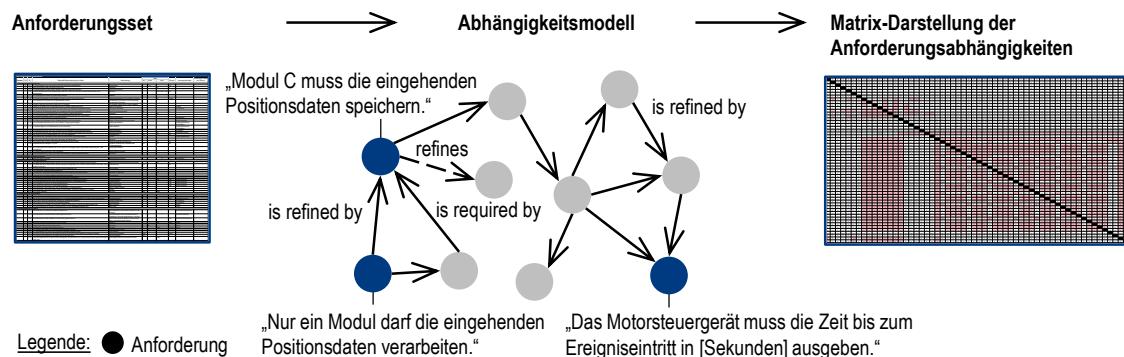


Abbildung 6-8: Exemplarische Anwendung der Abhängigkeitsanalyse

Der neue entwickelte Ansatz zur Identifikation von Anforderungsabhängigkeiten erzeugt das Abhängigkeitsmodell für die nachfolgende Auswirkungs- und Wahrscheinlichkeitsanalyse (vgl. Abbildung 6-9). Im Vergleich zum manuellen Vorgehen und bestehenden Forschungsansätzen können folgende Verbesserungen erreicht werden:

- 1) Die Analyse ist automatisiert und manuelle Aufwände sind minimal,
- 2) es wird ein vollständiges Abhängigkeitsmodell ermittelt,
- 3) aufgrund von Lerneffekten nimmt die Genauigkeit kontinuierlich zu.

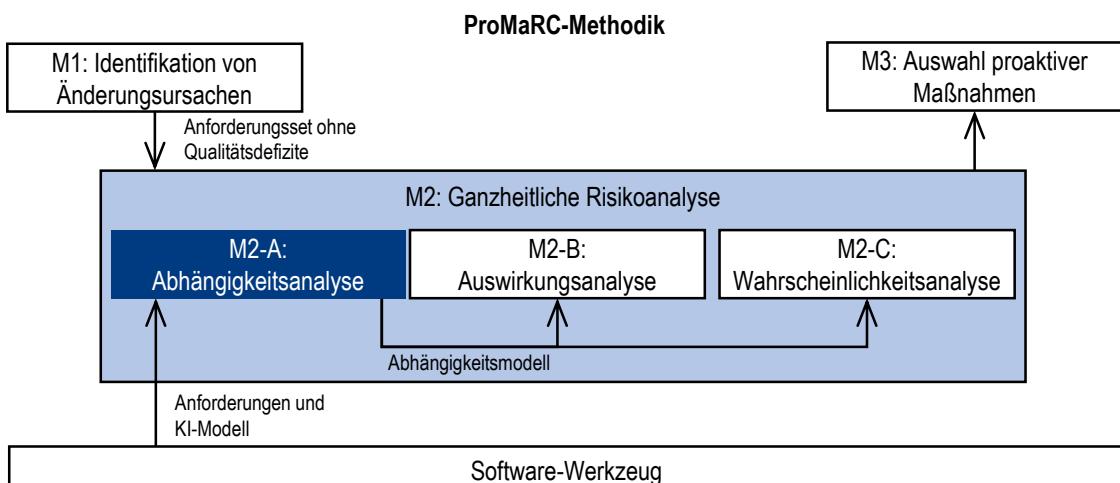


Abbildung 6-9: Einordnung der Abhängigkeitsanalyse in die ProMaRC-Methodik

## 6.2.2 Auswirkungsanalyse

Ohne proaktives Änderungsmanagement wird eine Auswirkungsanalyse in der Regel erst nach dem Bekanntwerden eines Änderungsbedarfs initiiert. Dann erfolgt im ersten Schritt die Entscheidung, ob ein Expertengremium (Change Control Board) informiert wird oder die Bewertung durch das Entwicklungsteam erfolgt. Anschließend wird eine Machbarkeitsanalyse durchgeführt, die manuell und ohne Hilfsmittel erfolgt. Das Ergebnis der Analyse wird auf einem Risikoblatt als Kommentar vermerkt und gibt Auskunft über die erwarteten Änderungsaufwände. Hintergründe zur Abschätzung werden nicht dokumentiert (z. B. Propagationseffekte und anforderungsspezifische Änderungsauswirkungen). Abschließend wird über den Änderungsbedarf entschieden („Ablehnung“, „Annahme unter Bedingungen“ oder „Annahme“). Die Machbarkeitsanalyse hat zwei Schwächen. Zum einen ist die Analyse subjektiv. Zum anderen liegt der Bewertung eine unvollständige Informationsgrundlage zugrunde. Insbesondere die interdisziplinären Propagationseffekte einer Änderung sind für Entwickler:innen schwer abschätzbar, sodass die Ergebnisse vielfach ungenau sind. Das zeigt beispielsweise auch das dargestellte Fallbeispiel, bei dem die tatsächlichen Änderungen weit größer waren als initial abgeschätzt.

Die ProMaRC-Methodik greift diese Schwachstellen auf und kann sowohl proaktiv (Risikoanalyse) als auch reaktiv (Machbarkeitsstudie) angewandt werden. Durch das zuvor erzeugte vollständige Abhängigkeitsmodell, kann ein Auswirkungsmodell erstellt werden, welches erstmals eine systematische Bewertung der kollektiven Änderungsauswirkungen zulässt. Dafür wird ein neuer Algorithmus entwickelt, mit dem selbst für umfangreiche Anforderungssets die lokalen Auswirkungen und konsekutiven Effekte einer Änderung (vgl. Kapitel 4.3) automatisiert bewertet werden können. Die abschließende Quantifizierung der kollektiven Auswirkungen wird weiterhin von Anwender:innen vorgenommen, da zahlreiche kontextspezifische Einflussfaktoren zu beachten sind (z. B. alternative Vorgehensweisen bei der Änderungsimplementierung). Zur Reduzierung der Subjektivität und zur Verbesserung der Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses, wird als Hilfsmittel ein Leitfaden verwendet. Der Leitfaden unterstützt zudem dabei, die Vollständigkeit der Betrachtung durch vordefinierte Auswirkungsdimensionen zu verbessern.

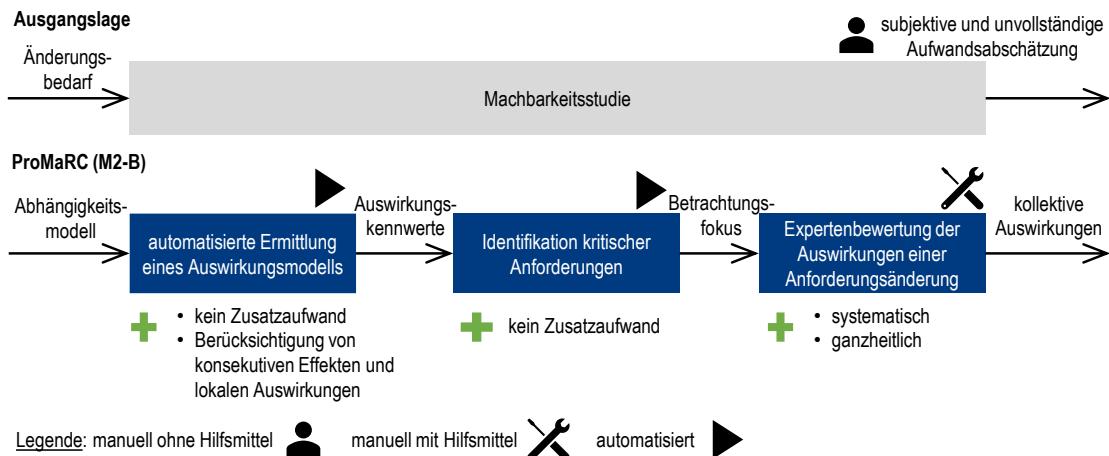


Abbildung 6-10: Verbesserung der Ausgangslage durch die Auswirkungsanalyse (M2-B)

Die Bewertung der Änderungsauswirkungen (M2-B) wird in drei Schritte unterteilt (vgl. Abbildung 6-11). Zunächst wird anhand der zuvor ermittelten Anforderungsabhängigkeiten ein gewichtetes Anforderungsnetz (Auswirkungsmodell) erzeugt: Knoten repräsentieren Anforderungen und Kanten repräsentieren Anforderungsabhängigkeiten. Die Gewichtung beruht auf Indikatoren für die Höhe der zu erwartenden Änderungsauswirkungen. Anhand des Auswirkungsmodells werden im zweiten Schritt durch eine kontextspezifische Weiterentwicklung des recheneffizienten PageRank-Algorithmus kritische Anforderungen identifiziert. Im letzten Schritt werden zur Reduzierung des Anwendungsaufwands von Expert:innen nur die kritischen Anforderungen betrachtet. Dafür werden anhand vordefinierter Auswirkungsdimensionen die kollektiven Änderungsauswirkungen abgeschätzt. Ein manuelles Vorgehen ist hierbei unumgänglich, da die Anwendung von KI eine Datengrundlage für das Training erfordern würde, die in der industriellen Praxis nicht verfügbar ist (vgl. Kapitel 3). In Übereinstimmung mit dem Fallbeispiel kann bei besonders kritischen Änderungen eine Diskussion und Anpassung der Ergebnisse innerhalb eines Expertengremiums erfolgen. Hierbei hilft die durch M2-A erzeugte Informationsgrundlage.

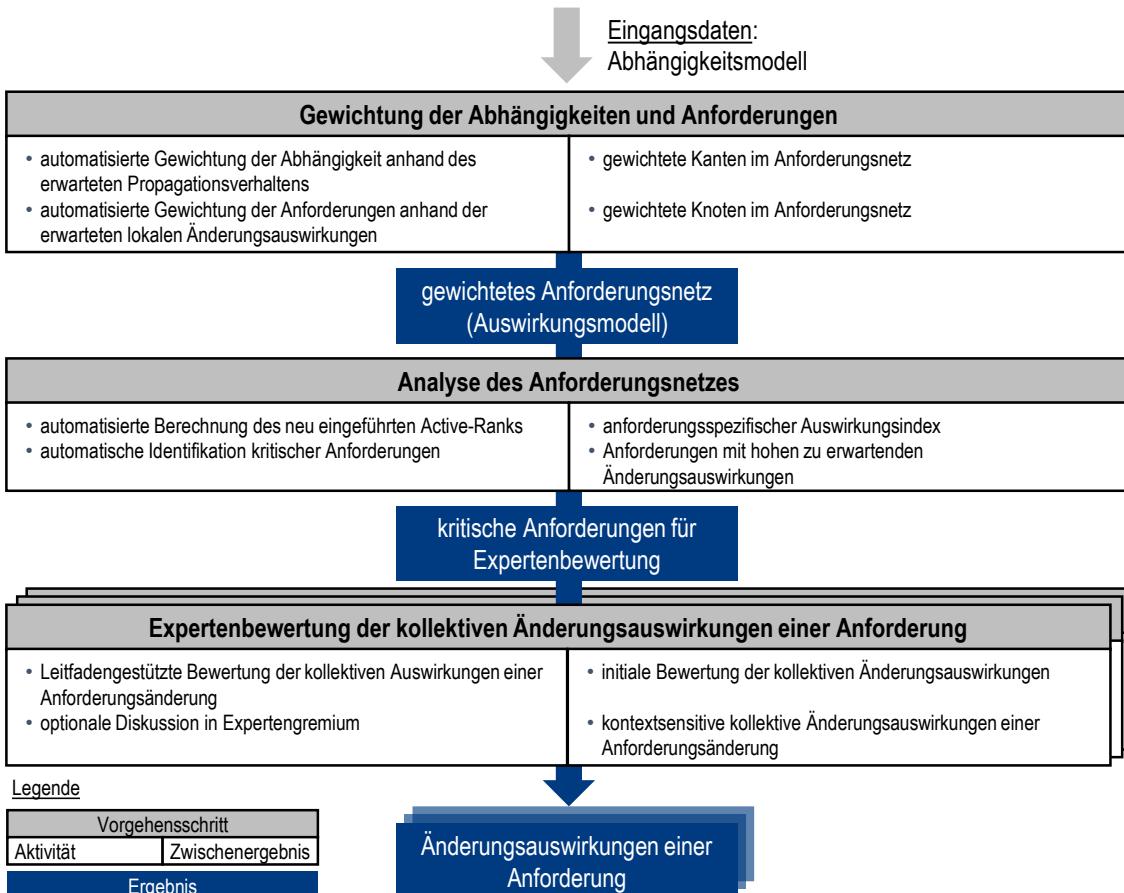


Abbildung 6-11: Vorgehensschritte zur Bewertung der Änderungsauswirkungen

## Schritt 1: Gewichtung der Abhängigkeiten und Anforderungen

Die Gewichtung der Anforderungen und Abhängigkeiten erfolgt in zwei Schritten. Zunächst werden die Abhängigkeiten gewichtet, um die konsekutiven Effekte einer Anforderungsänderung abzuschätzen. Anschließend werden anhand der zu erwartenden lokalen Auswirkungen die Anforderungen gewichtet.

### Konsekutive Effekte einer Anforderungsänderung (gewichtete Kanten im Anforderungsnetz)

Die Bewertung der konsekutiven Effekte einer Anforderungsänderung erfolgt anhand des Propagationsverhaltens der Anforderungsabhängigkeiten. Die Existenz einer Abhängigkeit legt fest, ob eine weitere Anforderung durch die ursprüngliche Änderung beeinflusst werden kann. Die Art der Abhängigkeit lässt auf das **Propagationsverhalten zwischen zwei Anforderungen** schließen. Um Abhängigkeiten zu identifizieren, die zu einer Änderungspropagation führen können, werden Abhängigkeitsarten existierender Referenzmodelle (vgl. Kapitel 2.3) in die drei Kategorien „zwanghafte Propagation“, „mögliche Propagation“ und „keine Propagation“ eingeordnet (vgl. Tabelle 6-2).

Zunächst wird die Annahme getroffen, dass alle Abhängigkeiten ein zwanghaftes Propagationsverhalten haben. Dann wird anhand von exemplarischen Anforderungen je Abhängigkeitstyp eine Falsifizierung der Annahme vorgenommen [Böh21]. Dafür werden folgende Fragen verwendet:

- 1) *Gibt es eine Anforderungskonstellation ohne zwanghafte Propagation?*

Falls eine Konstellation identifiziert wird, folgte die Einordnung in die Klasse „mögliche Propagation“.

- 2) *Gibt es eine Anforderungskonstellation mit Propagation?*

Falls keine Konstellation identifiziert wird, folgt die Einordnung in die Klasse „keine Propagation“.

Die Ergebnisse wurden zur Absicherung der übergreifenden Gültigkeit mit zwei existierenden Untersuchungen zum Propagationsverhalten je Abhängigkeitsart aus der Software-Entwicklung [ZLZ14, S. 44 f.; GKv14, S. 958] abgeglichen. Dabei wurden keine Inkonsistenzen festgestellt. Zur Vermeidung von Ungenauigkeiten der Übersetzung werden die englischen Originalbegriffe beibehalten.

*Tabelle 6-2: Kategorisierung von Abhängigkeitsarten entsprechend des Propagationsverhaltens*

zwanghafte Propagation	mögliche Propagation	keine Propagation
requires	positive correlation	elaborates
is required by	negative correlation	refines
is refined by	unknown	cost
		value

Die **Gewichtung der Abhängigkeitsarten** einer Kategorie beruht auf der Propagationswahrscheinlichkeit. Für die Kategorie „zwanghafte Propagation“ ist dies 100% (Gewichtung = 1) und für die Kategorie „keine Propagation“ ist dies 0% (Gewichtung = 0). Die Gewichtung der Kategorie „mögliche Propagation“ erfolgt kontextspezifisch in Abhängigkeit von der Risikoaffinität des Entwicklungsteams oder statistischen Daten zur Propagationswahrscheinlichkeit. Exemplarisch wird in Abbildung 6-12 eine Gewichtung von 0,5 angenommen.

Die Kategorisierung der Abhängigkeiten anhand des Propagationsverhaltens wird verwendet, um die Kanten im Anforderungsnetz zu gewichten und damit eine Aussage über die konsekutiven Effekte zu ermöglichen (vgl. Abbildung 6-12). Gegenüber existierenden Ansätzen mit binärer Unterscheidung hinsichtlich Existenz einer Abhängigkeit ermöglicht die Differenzierung der Abhängigkeitsarten eine genauere Bewertung.

### **Lokale Auswirkungen einer Anforderungsänderung entlang von Propagationspfaden (gewichtete Knoten im Anforderungsnetz)**

Anhand der gewichteten Kanten im Anforderungsnetz können Propagationspfade identifiziert und die auf dem Pfad liegenden Anforderungen hinsichtlich lokaler Änderungsauswirkungen untersucht werden. Voraussagen über die lokalen Auswirkungen werden zur Gewichtung der Knoten im Anforderungsnetz verwendet (vgl. Abbildung 6-12). Als geeigneter Indikator für die lokalen Auswirkungen einer Anforderungsänderung wurde die Anforderungspriorität gewählt. Diese lässt eine Aussage hinsichtlich Bedeutung für den Projekterfolg zu und weist durch eine hohe Verfügbarkeit in industriellen Anforderungsdaten sowie die automatisierte Auswertbarkeit zwei Vorteile auf. Die Alternative ist eine manuelle Bewertung durch Expert:innen, bei der zwar eine höhere Genauigkeit in der Bewertung erreicht werden kann. Diese Alternative wurde als Lösungsansatz in der Feldstudie untersucht und durch die Anwender:innen jedoch als zu aufwändig für die industrielle Praxis beurteilt, weil auch bei umfangreichen Anforderungssets jede einzelne Anforderung zu untersuchen ist (vgl. Kapitel 3).

Abhängig vom unternehmensspezifisch verwendeten Priorisierungsschema von Anforderungen können Gewichtungsfaktoren festgelegt werden. Da viele Priorisierungsschemata einer Dreigliederung folgen (z. B. Begeisterungsmerkmal, Leistungsmerkmal und Basismerkmal [SBM96]), wird exemplarisch eine Unterscheidung in hohe (Gewichtung = 3), mittlere (Gewichtung = 2) und geringe Priorität (Gewichtung = 1) zugrunde gelegt. Das Ergebnis dieses Schritts ist die Gewichtung der Knoten im Anforderungsnetz als Indikator für die lokalen Auswirkungen einer Änderung.

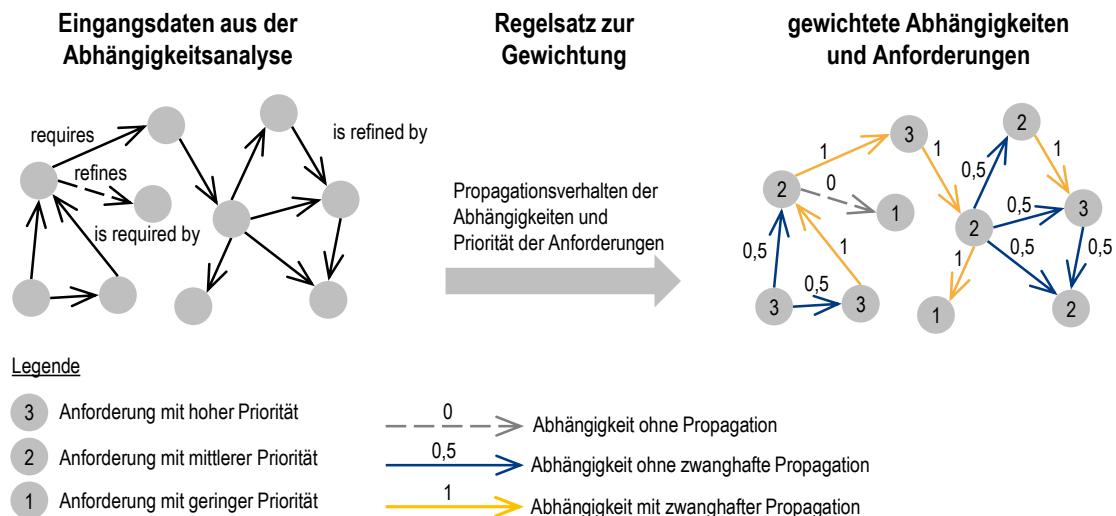


Abbildung 6-12: Gewichtung der Abhängigkeiten (Kanten) und Anforderungen (Knoten) im Anforderungsnetz

## Schritt 2: Analyse des Anforderungsnetzes

Das gewichtete Anforderungsnetz wird hinsichtlich erwarteter Änderungsauswirkungen automatisiert ausgewertet und die kritischen Anforderungen werden selektiert. Die Auswertung des Anforderungsnetzes erfolgt anhand einer Rechenvorschrift, die auf dem gewichteten PageRank-Algorithmus [XG04] aufbaut [GOP21]. Die Anpassung ist erforderlich, um die Gewichtung der Abhängigkeiten und Anforderungen sowie die Richtung der Abhängigkeiten zu berücksichtigen. Für die Auswirkungsanalyse sind lediglich die ausgehenden Abhängigkeiten einer Anforderung relevant, da nur über solche Abhängigkeiten eine Änderungspropagation erfolgen kann. Das Ergebnis ist das Auswirkungsmodell.

Die grundlegende Funktion des **PageRank-Algorithmus** ist die recheneffiziente Analyse von Abhängigkeiten zwischen einer Vielzahl von Elementen. Ziel der Analyse ist es, eine Rangfolge zu ermitteln. Die Rangfolge erlaubt eine Aussage über die Konnektivität eines Elements innerhalb des Netzwerks. Die ursprüngliche Funktionalität des PageRank-Algorithmus nach BRIN und PAGE [BP98] ist eine iterative Anpassung des Konnektivitätswerts eines Elements  $PR(i)$  anhand ausgehender und eingehender Abhängigkeiten  $c_y$  (vgl. Gleichung 1). Darüber hinaus ist ein Dämpfungsfaktor  $d$  [0; 1] erforderlich, um Endlosschleifen in zirkulären Abhängigkeiten aufzulösen. Die iterative Berechnung wird abgebrochen, sobald die Konnektivitätswerte stabil sind. Die Rechenlogik des PageRank-Algorithmus wurde zur Ermittlung einer Rangfolge von Suchtreffern für Internet-Suchmaschinen entwickelt [BP98] und ist sehr recheneffizient in der Analyse einer hohen Anzahl an Netzwerkelementen bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Abhängigkeiten höherer Ordnungen. Damit löst der Algorithmus das Problem eines exponentiell steigenden Bedarfs an Rechenleistung je zusätzlicher Anforderung [GTO19].

$$PR(i) = \frac{1-d}{n} + d \sum_{j=1}^n \frac{PR(j)}{c_j}$$

*Gleichung 1: Rechenvorschrift des PageRank-Algorithmus [BP98]*

Für den **modifizierten PageRank-Algorithmus** (vgl. Gleichung 2) wird in einem ersten Schritt die Gewichtung der Abhängigkeit  $v_{ij}$  zwischen zwei Anforderungen  $r_i$  und  $r_j$  berücksichtigt. Unverändert wird zudem die Menge der eingehenden Abhängigkeiten  $E_i^{in}$  und ausgehenden Abhängigkeiten  $E_i^{out}$  einer Anforderung  $r_i$  berücksichtigt. Als Startwert für die iterative Anpassung wird eine Gleichgewichtung der Anforderungen angenommen  $\frac{1}{n}$ , bei der  $n$  die Gesamtzahl der Anforderungen im Netzwerk ist. Der Dämpfungsfaktor gibt im Kontext von Anforderungsänderungen an, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine zufällige Propagation erfolgt. Inhaltlich ist dies mit der Unsicherheit zu begründen, ob im Rahmen der Abhängigkeitsanalyse alle existierenden Abhängigkeiten erkannt werden. Je genauer die Ergebnisse der Abhängigkeitsanalyse sind, desto geringer fällt die Differenz zu  $d = 1$  aus. In diesem Kontext hat sich  $d = 0,85$  als robust erwiesen [GTO19]. Die Rechenvorschrift für den modifizierten PageRank einer Anforderung lautet wie folgt:

$$PR(r_i) = \frac{1-d}{n} + d \sum_{r_j \in E_i^{in}} \frac{PR(r_j)}{\sum_{r_k \in E_j^{out}} v_{kj}}$$

*Gleichung 2: Rechenvorschrift für den Konnektivitätswert einer Anforderung anhand eines modifizierten PageRank-Algorithmus [GTO19]*

Zur Bewertung der Auswirkungen einer Anforderungsänderung ist die Rechenvorschrift in einem zweiten Schritt an die Richtung der Abhängigkeiten sowie die Gewichtung einer Anforderung anzupassen. Als neuer Kennwert wird der **gewichtete Active-Rank**  $AR_w(r_i)$  eingeführt (vgl. Gleichung 3). Im Gegensatz zum konventionellen PageRank-Algorithmus sind die ausgehenden Abhängigkeiten und nicht die eingehenden Abhängigkeiten für die Propagation aussagekräftig. Zur Berücksichtigung der Richtung der Abhängigkeiten werden daher  $E_i^{in}$  und  $E_i^{out}$  in der Rechenvorschrift vertauscht. Das Auftreten von lokalen Änderungsauswirkungen (Gewichtung einer Anforderung) hängt von der Propagationswahrscheinlichkeit ab (Gewichtung einer Abhängigkeit). Daher wird die spezifische Gewichtung einer Anforderung  $P(r_j)$  mit der spezifischen Gewichtung der Abhängigkeit  $v_{ij}$  multipliziert. Dies resultiert in der nachfolgenden Rechenvorschrift für den gewichteten Active-Rank einer Anforderung:

$$AR_w(r_i) = \frac{1-d}{n} + d \sum_{r_j \in E_i^{out}} \frac{AR_w(r_j)}{\sum_{r_k \in E_j^{in}} P(r_k) \cdot v_{kj}}$$

*Gleichung 3: Rechenvorschrift für den gewichteten Active-Rank [GOP22]*

Nach der Analyse werden die Anforderungen in absteigender Reihenfolge mit einem Rang versehen. Je höher der Rang ist, desto größer sind die erwarteten Änderungsauswirkungen.

Die **Selektion der kritischen Anforderungen** basiert auf dem gewichteten Active-Rank der Anforderungen (vgl. Abbildung 6-13). Hier sind kontextspezifisch alternative Vorgehensweisen möglich. Grundsätzlich kann zwischen einem Schwellwert  $S_K$  und einer vorab festgelegten Anzahl kritischer Anforderungen unterschieden werden. Bei der Verwendung eines Schwellwerts werden alle Anforderungen als kritisch kategorisiert, für die  $AR_w(r_i) \geq S_K$  gilt.  $S_K$  wird in Abhängigkeit von der Risikoaffinität individuell festgelegt. Bei umfangreichen Anforderungssets können zur Reduktion des manuellen Bewertungsaufwands auch Methoden wie beispielsweise die Top-10-Methode [Lau02] genutzt werden, bei der die zehn Anforderungen mit dem höchsten  $AR_w(r_i)$  als kritisch kategorisiert werden.

Ergänzend zur Auswahl kritischer Anforderungen anhand des  $AR_w$  besteht die Möglichkeit, aus situativen Gründen Anforderungen manuell als kritisch zu klassifizieren. Das ist beispielsweise sinnvoll, wenn sich bereits ein Änderungsbedarf bei einer Anforderung andeutet oder trotz geringer Konnektivität erhebliche Änderungsauswirkungen erwartet werden (Erfahrungswissen der Anwender:innen). Bei der Motorsteuergerät-Entwicklung könnte dies der Fall sein, wenn vom Kunden Zusatzschnittstellen für neue Komponenten des autonomen Fahrens angefragt, aber noch nicht beauftragt werden.

## Active-Rank einer Anforderung:

- Anzahl und Art der ausgehenden Abhangigkeiten
  - Gewichtung der Anforderungen

## **kritische Anforderung:**

- kritischer Active-Rank
  - optionale Expertenselektion

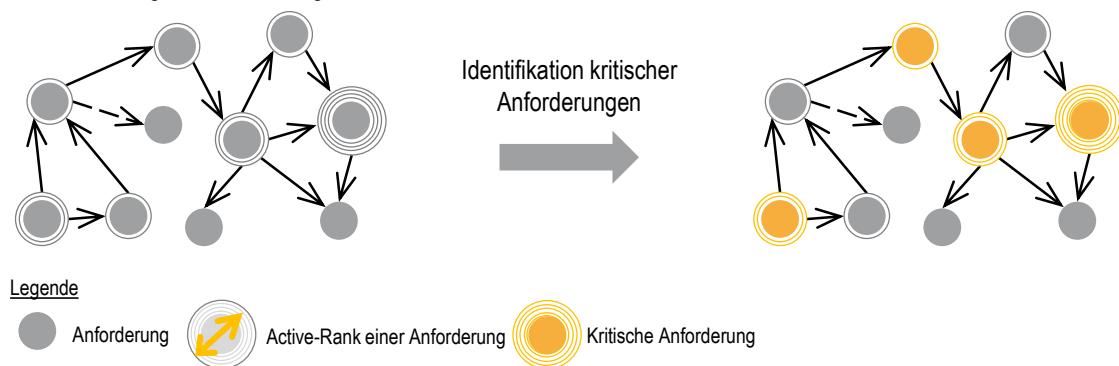


Abbildung 6-13: Analyse des Auswirkungsmodells zur Auswahl kritischer Anforderungen

## **Schritt 3: Expertenbewertung der kollektiven Änderungsauswirkungen einer Anforderung**

Die Analyse des Auswirkungsmodells dient zum einen der vollständigen Bewertung von Änderungsauswirkungen aller Anforderungen und zum anderen der Auswahl kritischer Anforderungen. Diese Auswahl ist erforderlich, um den Anwendungsaufwand für die Expertenbewertung der kollektiven Änderungsauswirkungen auf ein praxistaugliches Maß

zu reduzieren. Die kollektiven Auswirkungen sind nicht automatisiert bewertbar, da eine Berücksichtigung des Anforderungsinhalts ebenso notwendig ist, wie die Einbeziehung kontextspezifischer Einflussgrößen (z. B. Unternehmensstruktur, vertragliche Vereinbarungen oder Restriktionen aus dem Lebenszyklusabschnitt Realisierung / Produktion [GY16, S.657]).

Für die Erfassung der kollektiven Auswirkungen einer Anforderungsänderung werden sowohl die Ergebnisse der Analyse des Auswirkungsmodells als auch ein **Leitfaden** zur Identifikation betroffener Entwicklungsaktivitäten zugrunde gelegt. Der Leitfaden wurde auf Grundlage der Systems Engineering-Prozesslandschaft [WRF15] erarbeitet und umfasst alle potenziell von einer Änderung betroffenen Prozessaktivitäten. So wird die Vollständigkeit der Analyse sichergestellt und zudem die Subjektivität der Bewertung reduziert. Der Leitfaden ist anhand von vier Kategorien strukturiert:

- 1) Architektur und Design,
- 2) Integration und Implementierung,
- 3) Verifizierung und Validierung,
- 4) Weitere.

Da bei einer Anforderungsänderung stets Anforderungsmanagementprozesse betroffen sind, wird diese Kategorie nicht abgefragt. Jeder Kategorie sind eine übergeordnete Frage hinsichtlich der Existenz von Auswirkungen sowie Detailfragen zugeordnet. Anhand der Fragen können die Auswirkungen einer Änderung konkreten Entwicklungsaktivitäten zugeordnet werden (vgl. Tabelle 6-3). Ermittelt wurden die Kategorien und Detailfragen auf Grundlage einer Überprüfung aller Systems Engineering Prozesse und Aktivitäten. Entscheidend für die Auswahl war, ob es eine direkte Beeinflussung durch Anforderungsänderungen geben kann. Anschließend wurden die Leitfragen mit drei Industrievertreter:innen (Anforderungsmanagerin, Prozessverantwortlicher und Projektleiter) diskutiert und als vollständig und praxistauglich beurteilt [Böh21].

Zur Bewertung der kollektiven Auswirkungen wählen die Anwender:innen eine kritische Anforderung für die Analyse aus und füllen den Leitfaden aus (vgl. Abbildung 6-14). Dabei werden die Informationen aus der Analyse des Anforderungsnetzes ( $AR_w$  der Anforderungen und Informationen zu Anforderungsabhängigkeiten mit Propagationspotenzial) mit berücksichtigt, um Auswirkungen durch Propagationseffekte zu erkennen. Je Frage ist zwischen den **Auswahloptionen** „Ja“, „Nein“ und „Unsicher“ zu wählen. Die Auswahloption „Unsicher“ ist zu wählen, falls zusätzliche Expertise für die Einschätzung erforderlich ist oder zum aktuellen Zeitpunkt noch keine Auswahl getroffen werden kann. Als „Unsicher“ gekennzeichnete Fragen werden mit einer Markierung versehen und zu einem späteren Zeitpunkt durch die Anwender:innen einer der beiden anderen Auswahloptionen zugewiesen.

Tabelle 6-3: Leitfaden zur Abschätzung der Änderungsauswirkungen

Kategorie 1: Architektur und Design
Müssten neue Systemelemente entwickelt werden?
Müssten Systemelemente überarbeitet werden?
Müsste die Systemgrenze neu definiert werden?
Müsste die Funktionsstruktur überarbeitet werden?
Müsste die Wirkstruktur überarbeitet werden?
Müssten interne Schnittstellen <sup>1</sup> überarbeitet werden?
Müssten externe Schnittstellen <sup>1</sup> überarbeitet werden?
Müssten neue Flüsse <sup>2</sup> berücksichtigt werden?
Müssten neue Störflüsse berücksichtigt werden?
Kategorie 2: Implementierung und Integration
Müssten Verfahren zur Implementierung verändert werden (z. B. Fertigung)?
Müssten Verfahren zur Integration verändert werden (z. B. Montage)?
Müssten neue Betriebsmittel beschafft werden?
Müssten zusätzliche Ressourcen <sup>3</sup> beschafft werden?
Kategorie 3: Verifizierung und Validierung
Müssten Verifizierungspläne überarbeitet werden?
Müssten Validierungspläne überarbeitet werden?
Müssten neue Simulationen / Analysen durchgeführt werden?
Müsste ein neuer Prototyp entworfen werden?
Müsste ein Prototyp überarbeitet werden?
Müssten neue Testfälle definiert werden?
Müssten Testfälle überarbeitet werden?
Kategorie 4: Weitere
Müsste neues Personal eingestellt werden?
Müssten Schulungen durchgeführt werden?
Müssten Qualitätsstandards neu überprüft werden?
Müssten Sicherheitsstandards neu überprüft werden?
Müssten Make-or-Buy-Entscheidungen überdacht werden?
Hinweise:
<sup>1</sup> interne Schnittstellen: innerhalb des Systems, externe Schnittstellen: zum Umfeld
<sup>2</sup> Stoffflüsse, Energieflüsse, Informationsflüsse
<sup>3</sup> Betriebsstoffe, Hilfsstoffe, Rohstoffe

Je Kategorie ist eine **übergeordnete Frage** vorgesehen, anhand derer ermittelt wird, ob Auswirkungen in diesem Bereich erwartet werden. Diese Frage hat den Charakter einer K. O.-Frage: Falls „Nein“ ausgewählt wird, ist keine Beantwortung der Detailfragen mehr nötig. Diese Vereinfachung wurde von den Industrieanwender:innen zur Reduzierung des Anwendungsaufwands vorgeschlagen [H-KA1], da auf höheren Detaillierungsebenen sehr klar abgrenzbare Änderungsauswirkungen vorliegen.

Für eine bessere Vergleichbarkeit und Kommunikation der Auswirkungen wird exemplarisch eine kontinuierliche **Skala** verwendet, die von „keine Auswirkungen“ bis „maximale Auswirkungen“ reicht. Die Skala ist auf die vorgegebenen Kategorien des unternehmensspezifischen Risikomanagements anzupassen, weil die erwarteten Auswirkungen als eines der beiden Charakteristika eines Risikos in den übergeordneten Risikomanagement-Prozess übergeben werden müssen. Für eine initiale Bewertung der Auswirkungen wird jede „Ja“-Auswahl im Leitfaden aufsummiert. Dabei wird vereinfacht eine Gleich-

gewichtung angenommen. Es besteht die Möglichkeit, die Einordnung in der Skala manuell anzupassen, um kontextspezifisches Wissen zu berücksichtigen und von der Gleichgewichtung abzuweichen.

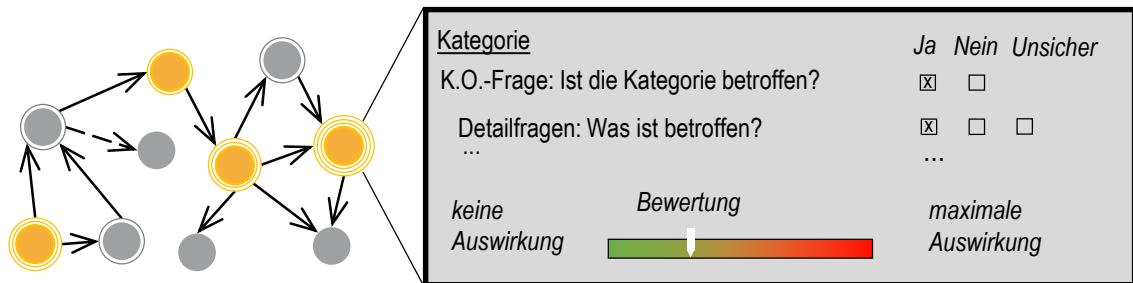


Abbildung 6-14: Leitfaden für die Expertenbewertung der kollektiven Änderungsauswirkungen einer Anforderung

### Exemplarische Anwendung im Kontext des Fallbeispiels

Für die Auswirkungsanalyse wird das Abhängigkeitsmodell zunächst um die Gewichtungen der Knoten (Anforderungen) und Kanten (Abhängigkeiten) angereichert. Anschließend wird mittels kontextspezifisch modifiziertem PageRank-Algorithmus der  $AR_w(r_i)$  jeder Anforderung ermittelt. Da der Algorithmus recheneffizient ist, kann das Ergebnis nach wenigen Sekunden für alle 200 Anforderungen angezeigt werden. In dieser Zeit wird, ausgehend von der Annahme, dass alle Anforderungen einen identischen  $AR_w(r_i)$  haben, innerhalb von vier bis fünf Recheniterationen der finale  $AR_w(r_i)$  ermittelt (vgl. Abbildung 6-15). Anschließend werden die Anforderungen absteigend nach dem  $AR_w(r_i)$  sortiert. Alle Anforderungen, für die  $AR_w(r_i) > S_K$  gilt, werden als kritisch markiert. Der Schwellwert wurde vorab auf  $S_K = 0,8$  festgelegt, da sich dieser Wert bei anderen Anwendungen der Auswirkungsanalyse als geeignet bewährt hat. Entscheidend ist die Balance zwischen der Anzahl als kritisch klassifizierter Anforderungen (Anwendungsaufwand) und der vollständigen Erfassung jener Anforderungen, deren Änderung den Projekterfolg stark beeinflussen. Alle bisherigen Schritte sind automatisiert erfolgt. Für zehn kritische Anforderung wird nun anhand des Leitfadens von den Expert:innen eine Bewertung der kollektiven Änderungsauswirkungen vorgenommen. Der Aufwand gegenüber der bisherigen Machbarkeitsanalyse ist dabei unverändert, da lediglich systematischer vorgegangen wird.

Bei der Bewertung wird zunächst abgeschätzt, ob im Falle einer Änderung der kritischen Anforderung „Modul C muss die eingehenden Positionsdaten speichern.“ Auswirkungen auf die Architektur und das Design zu erwarten sind. Dies wird bejaht, weshalb die Detailfragen bewertet werden. Dabei zeigt sich, dass beispielsweise die internen Schnittstellen von einer Änderung betroffen sein können. Die Änderung von einer dezentralen zu einer zentralen Verarbeitung der eingehenden Positionsdaten hat im Fallbeispiel exakt diese Auswirkung gezeigt, da die weiteren Module des Motorsteuergeräts die Positionsdaten nach der Vorverarbeitung in Modul C als eindimensionale Kennzahl anstelle eines

Vektors abgreifen. Die Änderung hatte weitreichende Auswirkungen, da unter anderem sämtliche Schnittstellen überarbeitet werden mussten. Vor diesem Hintergrund wird entschieden, dass das geschätzte Ausmaß der Auswirkungen nach Beantwortung aller Fragen manuell um 10% erhöht wird. Verglichen mit der Ausgangslage könnte mit dieser Aufwandsschätzung eine wesentlich realistischere Bewertung des Änderungsantrags vorgenommen werden.

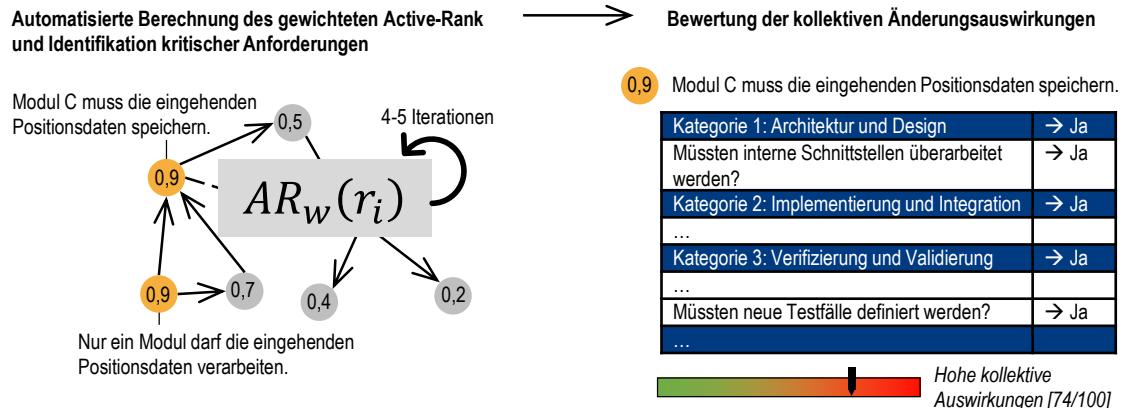


Abbildung 6-15: Exemplarische Anwendung der Auswirkungsanalyse

Die Auswirkungsanalyse leistet damit in zweierlei Hinsicht einen Beitrag für eine aussagekräftigere Abschätzung der Änderungsauswirkungen. Zum einen kann durch das vollständige Auswirkungsmodell und den Leitfaden erstmals eine Aussage zu den kollektiven Änderungsauswirkungen getroffen werden. Eine Besonderheit ist, dass auch interdisziplinäre Propagationseffekte erfasst werden. Zum anderen wird durch die transparente Rechenvorschrift des gewichteten Active-Ranks und den vordefinierten Leitfaden die bisher fehlende Nachvollziehbarkeit der Bewertung verbessert. So kann ein aussagekräftiges Ergebnis über die Änderungsauswirkungen der Anforderungen für die übergeordnete Risikoanalyse bereitgestellt und durch die Änderungswahrscheinlichkeit ergänzt werden (vgl. Abbildung 6-16). Mehraufwand gegenüber der Ausgangslage entsteht dabei nicht.

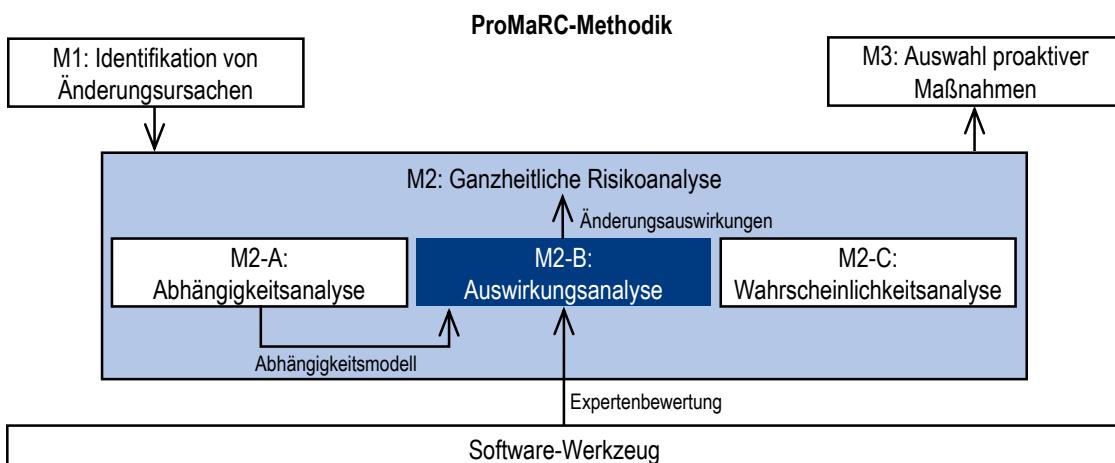


Abbildung 6-16: Einordnung der Auswirkungsanalyse in die ProMaRC-Methodik

### 6.2.3 Wahrscheinlichkeitsanalyse

Im Fallbeispiel wird eine Wahrscheinlichkeitsanalyse ausschließlich als Teil des Risikomanagements auf Projektebene durchgeführt. Hierbei gibt es weder ein Hilfsmittel für die Analyse noch eine Differenzierung der spezifischen Einflussfaktoren auf die Eintrittswahrscheinlichkeit (z. B. exogene und endogene Änderungswahrscheinlichkeit). Die Wahrscheinlichkeit einer Anforderungsänderung kann als Risiko in dem bestehenden Vorgehen erfasst werden. Dies geschieht jedoch nur vereinzelt. Ein Grund dafür ist, dass die Projektleitung das Risikomanagement verantwortet und Anforderungsingenieur:innen üblicherweise nicht einbezogen werden. Hinsichtlich Anforderungsänderungen wird in der Regel ausschließlich auf Änderungsanträge reagiert, ohne im Sinne des proaktiven Änderungsmanagements vorab risikobehaftete Anforderungen zu managen.

Mit der ProMaRC-Methodik wird eine systematische Bewertung der Änderungswahrscheinlichkeit von Anforderungen ermöglicht, um vorausschauend agieren zu können. Sämtliche Anforderungen des Anforderungssets werden analysiert, statt im Risikomanagement auf Projektebene nur vereinzelt Berücksichtigung zu finden (vgl. Abbildung 6-17). Bei der Analyse werden zur Verbesserung der Ergebnisgenauigkeit die spezifischen Einflussfaktoren der Änderungswahrscheinlichkeit von Anforderungen berücksichtigt. Beispielsweise können durch die Analyse des Abhängigkeitsmodells die Auswirkungen von Propagationseffekten auf die Änderungswahrscheinlichkeit vollständig erfasst werden. Abschließend wird automatisiert die ganzheitliche Änderungswahrscheinlichkeit einer Anforderung ermittelt, sodass kein Mehraufwand gegenüber der Ausgangslage entsteht.

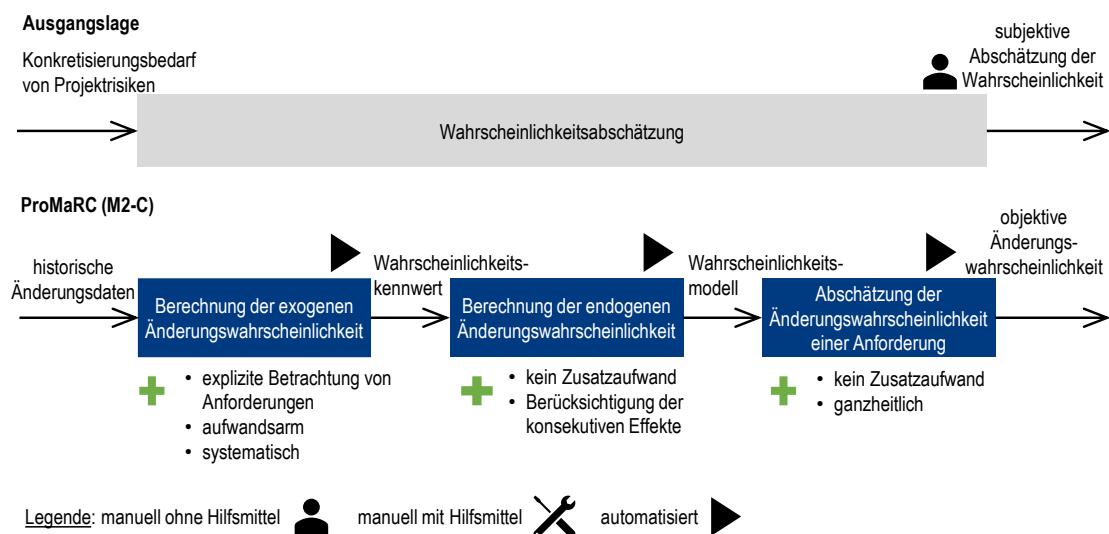


Abbildung 6-17: Verbesserung der Ausgangslage durch die Wahrscheinlichkeitsanalyse (M2-C)

Die Bewertung der Änderungswahrscheinlichkeit einer Anforderung (M2-C) wird als Vorgehen mit drei Schritten konzipiert (vgl. Abbildung 6-18). Im Rahmen der ersten beiden Schritte werden unabhängig voneinander repräsentative Kennzahlen für die endogene

und exogene Änderungswahrscheinlichkeit jeder Anforderung berechnet. Zur Berechnung der exogenen Änderungswahrscheinlichkeit werden historische Änderungsdaten ausgewertet. Falls diese fehlen, dienen empirische Studien als Datengrundlage. Die endogene Änderungswahrscheinlichkeit wird auf Grundlage des Propagationsverhaltens einer Anforderung berechnet. Hilfsmittel ist wie bei der Auswirkungsanalyse ein angepasster PageRank-Algorithmus. Anschließend wird anhand der Kennzahlen die ganzheitliche Änderungswahrscheinlichkeit einer Anforderung ermittelt und in einem Wahrscheinlichkeitsmodell erfasst. Die Änderungswahrscheinlichkeit wird quantitativ über einen Erwartungswert zur Änderungshäufigkeit und qualitativ über die Zuordnung zu einer Wahrscheinlichkeitskategorie (z. B. „gering“ oder „hoch“) abgebildet.

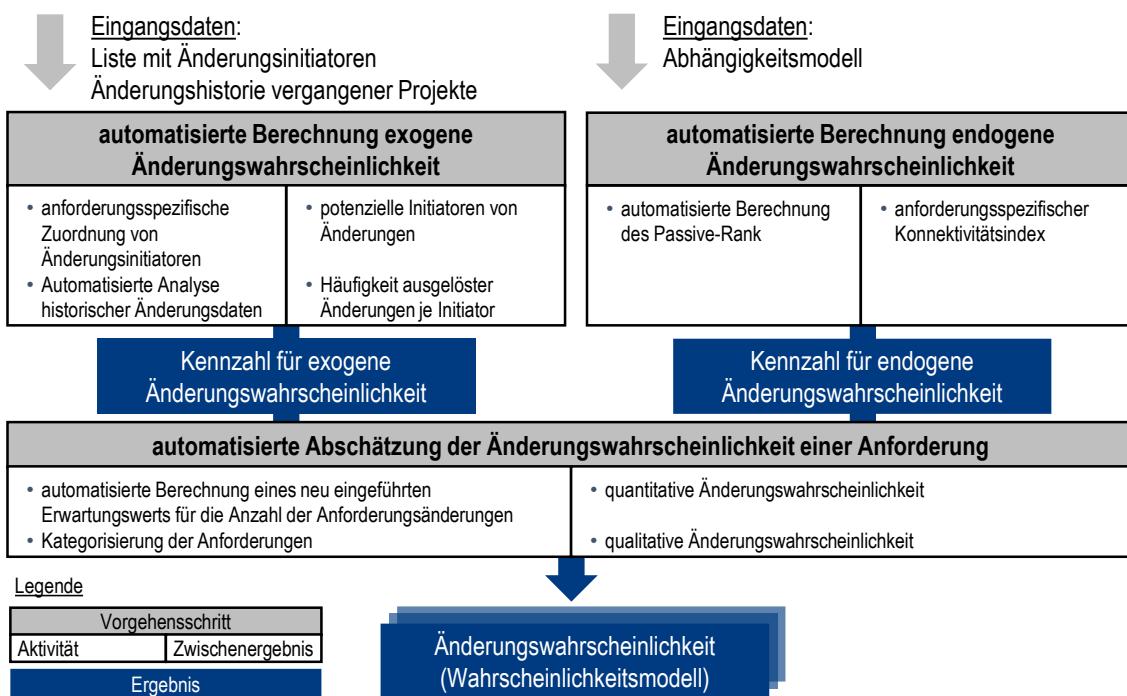


Abbildung 6-18: Vorgehensschritte zur Bewertung der Änderungswahrscheinlichkeit

### Schritt 1: Automatisierte Berechnung der exogenen Änderungswahrscheinlichkeit

Exogene Änderungen werden von Initiatoren außerhalb des Anforderungssets ausgelöst. Daher ist es erforderlich, die Wahrscheinlichkeit abzuschätzen, mit der eine Anforderung einen Änderungsimpuls von einem Änderungsinitiator aus dem Umfeld empfängt. Zu diesem Zweck werden zunächst exogene Änderungsinitiatoren identifiziert, die eine Änderung auslösen können. Die Auswahl von relevanten Änderungsinitiatoren für eine Anforderung erfolgt manuell durch die Anwender:innen. Als Hilfsmittel dient eine Liste mit 13 Änderungsinitiatoren. Hergleitet wurden die Änderungsinitiatoren aus den Ursprungsbereichen von Änderungen (vgl. Kapitel 4.4).

Mit den Industrieanwender:innen wurde diese Einteilung als zu ungenau bewertet [H-KA1] und unter Bezugnahme auf McGEE und GREER [MG09, S. 54] in die folgenden 13 Änderungsinitiatoren detailliert:

- externer Markt: Politik (z. B. neue Regularien), Zulieferer (z. B. veränderte Marktstabilität) und Markt (z. B. Reaktion auf Wettbewerber)
- Kundenorganisation(en): Kunde (z. B. angepasste Strategie) und Kundenorganisationstruktur (z. B. Restrukturierung oder Hardware / Software-Änderungen)
- Projektvision: Geschäftsmodell (z. B. Budgetüberschreitung), Technologie (z. B. neue Leistungsgrenzen) und Wissen (z. B. neue Stakeholder)
- Anforderungsspezifikation: Anforderungsmanager:innen und Projektleiter:innen (z. B. verbessertes Verständnis)
- Lösung: Software-Entwicklung, Hardware-Entwicklung und Produktion (z. B. Verbesserung des Entwurfs)

Exemplarische Änderungsimpulse für eine nachvollziehbarere Differenzierung der Initiatoren in der Praxisanwendung sind Anhang A5.1 zu entnehmen. Abhängig vom Ursprung und Inhalt einer Anforderung werden relevante Änderungsinitiatoren von den Anwender:innen zugeordnet. Zur Reduzierung des Anwendungsaufwands kann sowohl eine anforderungsspezifische Zuordnung als auch eine Zuordnung für Gruppen von Anforderungen (z. B. Anforderungen an ein Systemelement) vorgenommen werden.

Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Änderungsinitiator einen Änderungsimpuls an die Anforderung abgibt, wird durch die Analyse von historischen Änderungsdaten abgeschätzt. Historische Änderungsdaten vergangener Entwicklungsprojekte werden als Indikator mit der höchsten Aussagekraft angenommen. Als alternatives Vorgehen wurde eine subjektive Experteneinschätzung betrachtet. Aufgrund unterschiedlich umfassender und auf einzelne Fachbereiche begrenzter Erfahrungswerte der Anwender:innen wurde diese Alternative als ungenauer, weniger nachvollziehbar und nicht vergleichbar bewertet.

Die erforderliche Datenbasis umfasst die Anzahl von Anforderungsänderungen, die von einem Änderungsinitiator ausgelöst wurden. So können kontextspezifische Einflussgrößen wie beispielsweise die Bedeutung der Bedürfniserfüllung eines Initiators für den Projekterfolg berücksichtigt werden. Falls die erforderlichen Daten zur Häufigkeit von Änderungen je Initiator nicht vorliegen, können diese entweder anhand von Projektunterlagen reproduziert oder Erkenntnisse aus empirischen Studien als Ausgangsgrößen verwendet werden (vgl. Anhang A5.2). Auf eine Unterscheidung des Entwicklungszeitpunkts als Einflussgröße (vgl. Kapitel 4.4) wird verzichtet, da empirische Studien (z. B. [ABN06; AK07; FHS15; AHH18]) diesbezüglich eine hohe Varianz aufweisen.

Um die Aussagekraft der analysierten Änderungsdaten zu verbessern, können optional ausschließlich Projekte mit vergleichbaren Charakteristika in die Analyse einbezogen. Ziel davon ist es, Verzerrungen in der statistischen Auswertung der historischen Daten

durch stark abweichende Rahmenbedingungen zu minimieren. Projekte mit vergleichbaren Rahmenbedingungen werden als Vergleichsprojekte bezeichnet und anhand von 12 Projektcharakteristika und einer Kurzbeschreibung des Projekts ausgewählt. Beispieldhafte Charakteristika sind der Innovationsgrad, die Kundenkategorie (Neukunde oder Bestandkunde) und die Komplexität des Systems. Eine vollständige Übersicht ist Anhang A5.3 zu entnehmen. Ausgewählt wurden die Projektcharakteristika anhand ihres Einflusses auf die Änderungsinitiatoren und unter Berücksichtigung der Bewertbarkeit in der Initiierungsphase eines Entwicklungsprojekts.

Zur Berechnung eines Kennwerts für die exogene Änderungswahrscheinlichkeit werden die historischen Änderungsdaten der Vergleichsprojekte oder der empirischen Studien in einem Datensatz zusammengeführt. Anschließend wird für jede Anforderung die Anzahl der Änderungen aufsummiert, die von den zugeordneten Änderungsinitiatoren ausgelöst wurden. Dividiert durch die gesamte Anzahl an Änderungen wird ein Kennwert für die exogene Änderungswahrscheinlichkeit ermittelt (vgl. Gleichung 4).

$$P_{\text{exogen}}^*(r_i) = \frac{\sum \text{Anzahl Änderungen der } r_i \text{ zugeordneten Initiatoren}}{\text{Gesamte Anzahl der Änderungen}}$$

$$0 \leq P_{\text{exogen}}^*(r_i) \leq \frac{\text{Gesamte Anzahl exogener Änderungen}}{\text{Gesamte Anzahl der Änderungen}} \leq 1$$

*Gleichung 4: Rechenvorschrift und Wertebereich des Kennwerts der exogenen Änderungswahrscheinlichkeit einer Anforderung*

Der Kennwert  $P_{\text{exogen}}^*(r_i)$  beschreibt, wie stark eine Anforderung von exogenen Änderungsimpulsen beeinflusst wird. Je höher der Kennwert ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass durch einen exogenen Initiator eine Anforderungsänderung ausgelöst wird. Eine absolute Änderungswahrscheinlichkeit kann nicht ermittelt werden, da spezifische Einflussgrößen zur Art des Änderungsimpulses und der verfügbaren Realisierungsalternativen im Kontext des proaktiven Änderungsmanagements nicht bekannt sind. Ebenso kann aufgrund der bedingten Wahrscheinlichkeit die Änderungswahrscheinlichkeit eines Initiators nicht auf alle zugeordneten Anforderungen übertragen werden.

## **Schritt 2: Automatisierte Berechnung der endogenen Änderungswahrscheinlichkeit**

Endogene Änderungen werden durch Propagationseffekte innerhalb des Anforderungsnetzes ausgelöst. Daher ist ein Kennwert erforderlich, der die Konnektivität einer Anforderung hinsichtlich der Änderungspropagation beschreibt. Die Konnektivität kann anforderungsspezifisch oder ganzheitlich für das gesamte Anforderungsnetz bestimmt werden. Die anforderungsspezifische Analyse aller Propagationspfade kann mathematisch durch den Additionssatz aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung [Bou12, S. 101 ff.] beschrieben werden. Dafür werden die Propagationswahrscheinlichkeiten entlang aller Propagationspfade einer Anforderung schrittweise, im Sinne eines Entscheidungsbaums, ermittelt und

in einem übergreifenden Wahrscheinlichkeitswert zusammengeführt. Dieser Ansatz ist präzise, für umfangreiche Anforderungssets ist jedoch eine zu hohe Rechenleistung erforderlich [GTO19, S. 3687; CSE04, S. 795]. Aus diesem Grund wird der ganzheitliche Ansatz zur Ermittlung des Konnektivitätswerts verwendet. Eine ganzheitliche Analyse des Anforderungsnetzes kann recheneffizient für umfangreiche Anforderungssets durch die Verwendung des PageRank-Algorithmus erreicht werden. Im Rahmen der zuvor erläuterten Auswirkungsanalyse wird mittels modifiziertem PageRank der Active-Rank ermittelt (vgl. Kapitel 6.2.2). Dieser verarbeitet ausgehende Abhängigkeiten einer Anforderung. Für die Wahrscheinlichkeitsanalyse sind die eingehenden Abhängigkeiten relevant, da nur über eingehende Abhängigkeiten Propagationsimpulse auf die betrachtete Anforderung einwirken können. Mathematisch wird die Anpassung erreicht, indem die ursprüngliche Rechenlogik des PageRank verwendet wird (vgl. Gleichung 1). Das Ergebnis ist ein Konnektivitätswert einer Anforderung, der als Passive-Rank bezeichnet wird. Gemäß dem „Zufallssurfermodell“ wird der PageRank normiert, um eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die einzelnen Anforderungen zu generieren (vgl. Gleichung 5).

$$PR'(r_i) = \frac{PR(r_i)}{\max(PR)}$$

*Gleichung 5: Rechenvorschrift für den normierten PageRank*

Um den Passive-Rank in ein geeignetes Verhältnis zu  $P_{exogen, i}^*$  setzen zu können, wird der normierte Passive-Rank mit dem Anteil der endogenen Änderungen im Verhältnis zur Gesamtzahl der Änderungen multipliziert (vgl. Gleichung 6).

$$P_{endogen}^*(r_i) = PR'(r_i) * \frac{\text{Gesamte Anzahl endogener Änderungen}}{\text{Gesamte Anzahl der Änderungen}}$$

$$0 \leq P_{endogen}^*(r_i) \leq \frac{\text{Gesamte Anzahl endogener Änderungen}}{\text{Gesamte Anzahl der Änderungen}} \leq 1$$

*Gleichung 6: Rechenvorschrift und Wertebereich des Passive-Rank*

$P_{endogen}^*(r_i)$  beschreibt die Stärke aller eingehenden Propagationseinflüsse einer Anforderung. Es ist ein repräsentativer Kennwert für die endogene Änderungswahrscheinlichkeit und keine absolute Wahrscheinlichkeit.

### **Schritt 3: Automatisierte Abschätzung des Erwartungswerts für Anforderungsänderungen**

Anstelle einer absoluten Änderungswahrscheinlichkeit wird im dritten Schritt ein Erwartungswert abgeschätzt, der die Anzahl der zu erwartenden Anforderungsänderungen im Projektverlauf beschreibt. Ein Erwartungswert wird gegenüber einer absoluten Änderungswahrscheinlichkeit bevorzugt, weil er mehr Informationsgehalt für die Auswahl von proaktiven Maßnahmen bietet. Die absolute Wahrscheinlichkeit beschreibt ausschließlich, wie wahrscheinlich sich eine Anforderung ändert. Der Erwartungswert gibt hingegen

auch Aufschluss darüber, ob mehr als eine Änderung erwartet wird. Das ist bei Anforderungen häufig der Fall und relevant für die spätere Handhabung.

Zur Abschätzung des Erwartungswerts werden die zuvor ermittelten Kennwerte für die exogene und endogene Änderungswahrscheinlichkeit verwendet.  $P_{exogen}^*(r_i)$  und  $P_{endogen}^*(r_i)$  beschreiben, wie stark eine Anforderung durch exogene oder endogene Änderungsimpulse beeinflusst wird. Deren Wertebereich ist in Gleichung 7 definiert:

$$0 \leq P_{exogen}^*(r_i) + P_{endogen}^*(r_i) \leq 1$$

*Gleichung 7: Wertebereich der Kennwerte für die exogene und endogene Änderungswahrscheinlichkeit*

Anhand der Änderungsdaten wird zunächst ein unspezifischer Erwartungswert pro einzelner Anforderung ermittelt (vgl. Gleichung 8):

$$\mu_{\text{Änderungen}} = \frac{\text{Gesamte Anzahl der Änderungen}}{\text{Gesamte Anzahl der Anforderungen}}$$

$$0 \leq \mu_{\text{Änderungen}} < \infty$$

*Gleichung 8: Rechenvorschrift und Wertebereich des unspezifischen Erwartungswerts pro einzelner Anforderung*

$\mu_{\text{Änderungen}}$  ist die Ausgangsgröße, die durch die Einbeziehung der anforderungsspezifischen Ausprägung von  $P_{exogen}^*(r_i)$  und  $P_{endogen}^*(r_i)$  erhöht oder verringert wird. Dafür werden die folgenden zwei Annahmen getroffen:

Annahme 1: Die Kennwerte  $P_{exogen}^*(r_i)$  und  $P_{endogen}^*(r_i)$  sind proportional zur Anzahl der erwarteten Änderungen pro Anforderung  $E_{\text{Änderungen}}(r_i)$ . Je höher  $P_{gesamt}^*(r_i) = P_{exogen}^*(r_i) + P_{endogen}^*(r_i)$ , desto höher ist  $E_{\text{Änderungen}}(r_i)$ . Wenn  $P_{gesamt}^*(r_i)$  den Erwartungswert  $\mu_{\text{Kennwert}}$  annimmt, dann nimmt  $E_{\text{Änderungen}}(r_i)$  den Erwartungswert  $\mu_{\text{Änderungen}}$  an:

$$\mu_{\text{Kennwert}} = \frac{\sum(P_{exogen}^*(r_i) + P_{endogen}^*(r_i))}{\text{Anzahl der Anforderungen im aktuellen Projekt}}$$

*Gleichung 9: Rechenvorschrift für Annahme 1*

Begründet wird Annahme 1 damit, dass bei einer höheren Wahrscheinlichkeit einer exogenen ausgelösten Änderung davon auszugehen ist, dass durch Propagationseffekte auch die Wahrscheinlichkeit für endogen ausgelöste Änderungen zunimmt.

Annahme 2: Es existiert ein linearer Zusammenhang zwischen  $P_{gesamt}^*$  und der erwarteten Anzahl an Änderungen pro Anforderung  $E_{Änderungen}(r_i)$ .

$$E_{Änderungen}(r_i, P_{gesamt}^*) = \frac{\mu_{Änderungen}}{\mu_{Kennwert}} * P_{gesamt}^*(r_i)$$

*Gleichung 10: Rechenvorschrift für Annahme 2*

Die vereinfachte Betrachtung des Zusammenhangs zwischen  $P_{gesamt}^*(r_i)$  und  $E_{Änderungen}(r_i)$  ist erforderlich, da es bisher keine empirischen Untersuchungen zu dem Zusammenhang gibt. Begründet liegt die Annahme darin, dass bei einer höheren Änderungswahrscheinlichkeit auch die erwartete Anzahl an Änderungen im Projektverlauf steigt. Die Wahrscheinlichkeit beruht auf mehreren Einflussfaktoren (z. B. relevante Änderungsinitiatoren), weshalb beim Auslösen einer Änderung durch einen den Einflussfaktoren die Wahrscheinlichkeit einer Änderung durch die sonstigen Initiatoren unvermindert existiert. Die Wahrscheinlichkeit nimmt in diesem Fall leicht ab. Da die Abnahme ohne empirische Daten nicht eindeutig quantifiziert werden kann, wird dennoch ein linearer Verlauf angenommen.

Das Ergebnis  $E_{Änderungen}(r_i)$  legt die erwartete Anzahl an Anforderungsänderungen  $E_{Änderungen}(r_i)$  fest, die stellvertretend für die Änderungswahrscheinlichkeit steht. Im Falle von  $E_{Änderungen}(r_i) = 1,2$  wird beispielsweise erwartet, dass sich die Anforderung  $r_i$  im Verlauf des Projekts 1,2-mal ändert. Falls  $E_{Änderungen}(r_i) = 0,8$  wird erwartet, dass für die Anforderung  $r_i$  eine Änderung wahrscheinlicher ist als keine Änderung.

Anhand der Höhe des Werts für die erwartete Anzahl an Änderungen pro Anforderung wird ein Rückschluss auf die Änderungswahrscheinlichkeit der Anforderung gezogen. Aufbauend auf dem Abhängigkeitsmodell wird mit dieser Kennzahl das Wahrscheinlichkeitsmodell erzeugt. Zur leichteren Interpretierbarkeit in der industriellen Praxis wird zudem eine Kategorisierung vorgenommen. Diese kann unternehmensspezifisch ausgestaltet werden. Exemplarisch wird das in Tabelle 6-4 dargestellte Schema verwendet.

*Tabelle 6-4: Exemplarische Kategorisierung der Erwartungswerte*

Erwartete Anzahl an Änderungen einer Anforderung	Änderungswahrscheinlichkeit
$E_{Änderungen}(r_i) \leq 0,25$	<b>niedrig</b> (Es werden weniger als 0,25 Änderungen für diese Anforderung erwartet.)
$0,25 < E_{Änderungen}(r_i) \leq 0,75$	<b>mittel</b> (Es werden mehr als 0,25 bis 0,75 Änderungen für diese Anforderung erwartet.)
$0,75 < E_{Änderungen}(r_i) \leq 1$	<b>hoch</b> (Es werden mehr als 0,75 bis 1 Änderung für diese Anforderung erwartet.)
$1 < E_{Änderungen}(r_i)$	<b>sehr hoch</b> (Es werden mehr als 1 Änderung für diese Anforderung erwartet.)

## Exemplarische Anwendung im Kontext des Fallbeispiels

Zu Beginn werden den sogenannten Anforderungskapiteln Änderungsinitiatoren zugewiesen. Anforderungskapitel sind thematisch gruppierte Anforderungen (z. B. „interne Schnittstellen“ oder „Wartbarkeit“). Da zu Beginn historische Änderungsdaten fehlten, wurde anhand von Projektunterlagen ähnlicher Entwicklungsvorhaben die Anzahl von Anforderungsänderungen je Initiator erfasst. Entsprechende Daten lassen sich aus Anforderungsmanagement-Software wie IBM Doors aufwandsarm extrahieren. Um die Datengrundlage aufzuweiten, wurden neben den unternehmensspezifischen Änderungsdaten auch die Daten der empirischen Studien für die Analyse ausgewählt. Die anschließende Analyse erfolgt automatisiert und dauert wenige Sekunden. Das Ergebnis ist eine Übersicht des Erwartungswerts  $E_{\text{Änderungen}}(r_i)$  je Anforderung. Hierbei zeigt sich beispielsweise, dass die stark vernetzte Anforderung „dezentrale Verarbeitung der Positionsdaten“ einer hohen Änderungswahrscheinlichkeit unterliegt. Im proaktiven Änderungsmanagement kann auf Grundlage dieser Erkenntnis nun eine Gegenmaßnahme initiiert werden.

Da die Wahrscheinlichkeitsanalyse für eine hohe Anzahl an Anforderungen durchgeführt wird, wurde bei der Konzeptionierung der Methode Wert auf einen geringen Anwendungsaufwand gelegt. Dieses Ziel konnte erreicht werden und die Analyse erfolgt nach der initialen Zuweisung von Änderungsinitiatoren automatisiert. Das Ergebnis ist zudem deutlich differenzierter als eine subjektive Expertenschätzung, da die kontextspezifischen Einflussfaktoren berücksichtigt werden.

Nachdem die Änderungswahrscheinlichkeit berechnet wurde, ist die Risikoausprägung aller Anforderungen bekannt. Die Risikoausprägung setzt sich aus Auswirkung und Wahrscheinlichkeit einer Anforderungsänderung zusammen und steht am Ende der Methode zur ganzheitlichen Risikoanalyse. Auf Grundlage der Risikoausprägung kann die im Folgenden erläuterte Methode zur Auswahl proaktiver Maßnahmen durchgeführt werden (vgl. Abbildung 6-19).

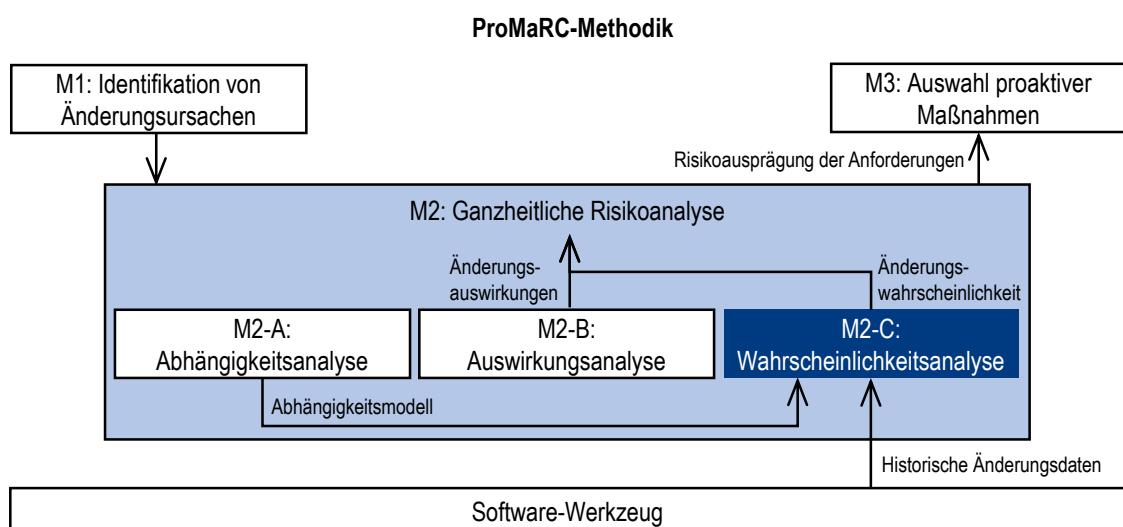


Abbildung 6-19: Einordnung der Wahrscheinlichkeitsanalyse in die ProMaRC-Methodik

### 6.3 Auswahl proaktiver Maßnahmen

Übereinstimmend mit der Wahrscheinlichkeitsanalyse wird im Fallbeispiel die Auswahl proaktiver Maßnahmen nur im Rahmen des Risikomanagements auf Projektebene durchgeführt. Verantwortlich ist die Projektleitung. Dabei werden Anforderungen nur betrachtet, falls diese zuvor als Risiko identifiziert wurden. Eine Hilfestellung bei der Auswahl von Maßnahmen gibt es nicht, sodass ausschließlich persönliche Erfahrungswerte der Anwender:innen zu verfügbaren Maßnahmen und deren Wirksamkeit herangezogen werden.

Die ProMaRC-Methodik überführt die Auswahl von Maßnahmen in das proaktive Änderungsmanagement von Anforderungen und bietet damit die bisher fehlende spezifische Hilfestellung für Anwender:innen. Aufbauend auf dem Risikoprofil der Anforderungen (vgl. M2) kann eine automatisierte Priorisierung vorgenommen werden. Statt einzelne Anforderungen in Form von Projektrisiken zu betrachten, werden durch den neuen Ansatz sämtliche Anforderungen berücksichtigt. Diese Vollständigkeit wird erstmalig im Kontext von umfangreichen Anforderungssets erreicht. Zudem wird eine Unterstützung bei der Zuordnung von Maßnahmen geboten. Dafür wird eine kontextspezifische Übersicht mit Maßnahmen verwendet und die Eignung von Maßnahmen aus Daten vergangener Anwendungen abgeleitet. So kann eine konkrete Maßnahmenempfehlung ausgegeben und im Änderungs- und Risikomanagement umgesetzt werden.

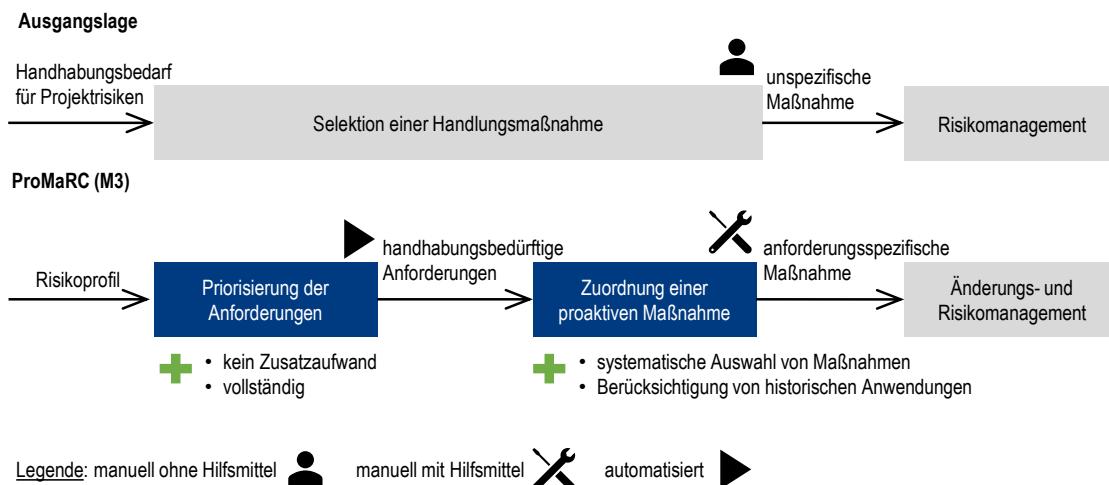


Abbildung 6-20: Verbesserung der Ausgangslage durch die Auswahl proaktiver Maßnahmen (M3)

Die Methode zur Auswahl von proaktiven Maßnahmen (M3) wird in zwei Schritte gegliedert (vgl. Abbildung 6-21). Zunächst werden die Anforderungen anhand eines Risikoportfolios automatisiert priorisiert. Anschließend werden jeder Anforderung eine Handlungsstrategie und dazugehörige Maßnahmenvorschläge zugeordnet. Grundlage dafür ist die in M2 ermittelte Risikoausprägung der Anforderungen. Darüber hinaus wird die individuelle Eignung der Maßnahmen im Unternehmenskontext berücksichtigt,

indem Nutzungsdaten aus vergangenen Anwendungen ausgewertet werden. Aus dem Empfehlungen wählen die Anwender:innen die präferierte proaktive Maßnahme aus und setzen diese im Rahmen des übergeordneten Änderungs- und Risikomanagements um.

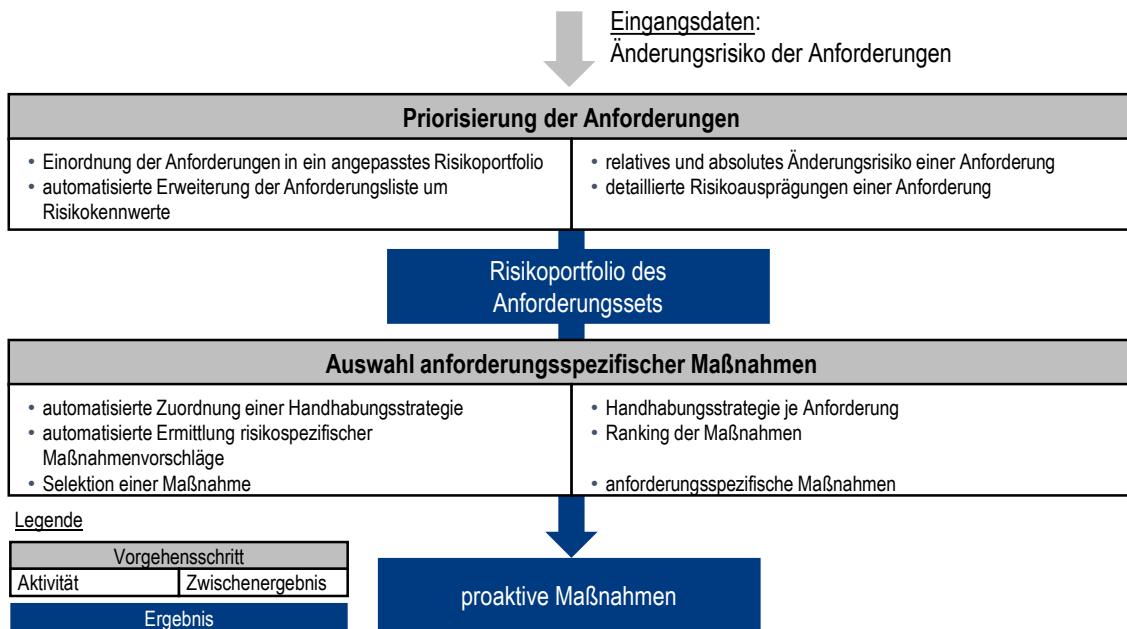


Abbildung 6-21: Vorgehensschritte der Methode zur Auswahl von proaktiven Maßnahmen

### Schritt 1: Priorisierung der Anforderungen

Zur Priorisierung der Anforderungen wird ein **Risikoportfolio** mit den Dimensionen Änderungsauswirkungen durch Propagation und Änderungswahrscheinlichkeit verwendet (vgl. Abbildung 6-22). Ein Risikoportfolio als Priorisierungstechnik wurde gewählt, da es industriell verbreitet und leicht zu interpretieren ist, sich zur unternehmensweiten Kommunikation eignet und einen relativen Vergleich zwischen Anforderungen ermöglicht.

Abweichend zu einem konventionellen Risikoportfolio (vgl. Kapitel 4.5), in dem ausschließlich die Position entlang von Abszisse und Ordinate entscheidend ist, wurde der Kreisumfang eines Anforderungspunkts als dritte Dimension ergänzt. Grund dafür ist, dass neben der Änderungswahrscheinlichkeit lediglich die Propagationsauswirkungen ( $AR_w$ ) für alle Anforderungen bekannt sind. Die kollektiven Auswirkungen einer Änderung werden ausschließlich für kritische Anforderungen bewertet und liegen daher nur teilweise vor (vgl. Kapitel 6.2.2).

Der Kreisumfang weicht in Abhängigkeit von den kollektiven Auswirkungen von der einheitlichen Referenzgröße unkritische Anforderungen ab. Alternativ wäre die Verwendung einer anderen Priorisierungstechnik (z. B. ABC-Analyse) oder die Vernachlässigung

gung von Anforderungen ohne kollektive Auswirkungen im Risikoportfolio möglich gewesen. In Abstimmung mit den Industrieanwender:innen wurde die Einführung des Kreisumfangs als zusätzliche Dimension gewählt (H-W2, H-W4). Gründe waren die hohe Verbreitung und Akzeptanz der Portfoliotechnik sowie die Möglichkeit einer vollständigen Übersicht aller Anforderungen in einem Schaubild.

Zur Priorisierung der Anforderungen wird je Achsen-Dimension ein Schwellwert definiert. Anhand der Schwellwerte wird das Portfolio in vier Quadranten unterteilt, denen jeweils eine **Risikokategorie** („hoch“, „mittel“ und „gering“) zugewiesen ist. Die Anforderungen werden entsprechend des zugehörigen Quadranten klassifiziert und priorisiert. Die Schwellwerte können abhängig von der Risikoaffinität angepasst werden. Exemplarisch werden in Abbildung 6-22 die jeweiligen Durchschnittswerte verwendet. Bei Bedarf kann die Kategorisierung an die Konventionen und Erfordernisse des Unternehmens angepasst werden (z. B. in eine 9-Felder-Matrix). Ziel der Priorisierung ist eine leicht interpretierbare Darstellung des Änderungsrisikos von Anforderungen, die abseits des Risikoportfolios verwendet und dokumentiert werden kann (z. B. tabellarische Darstellungsformen etablierter Anforderungsmanagement-Software oder gängige Austauschformaten wie das Requirements Interchange Format (ReqIF) [Ebe19, S. 315 ff.]).

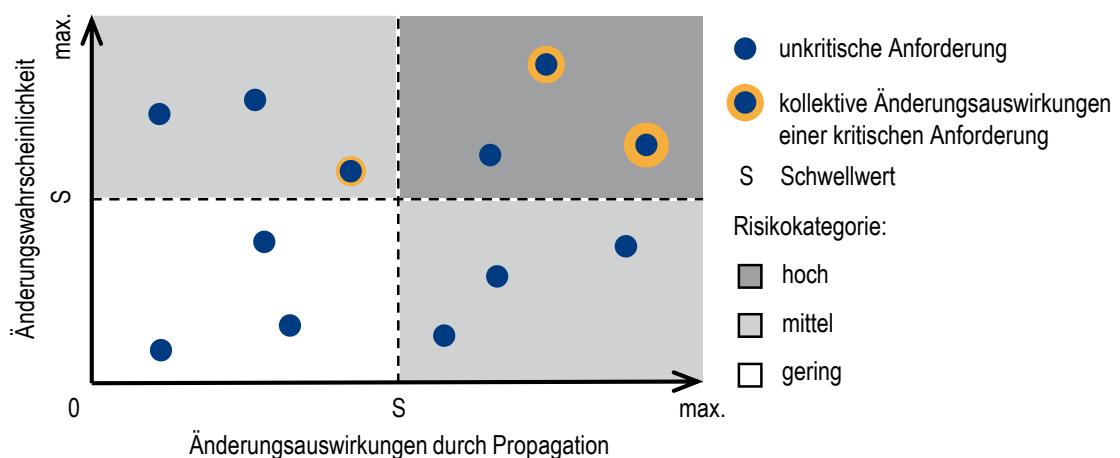


Abbildung 6-22: Risikoportfolio zur Priorisierung von Anforderungen

Ergänzend zum Risikoportfolio kann ein Anforderungssteckbrief erstellt werden, in welchem die neu ermittelten Informationen dokumentiert sind. Ziel ist es, neben den Ergebnisdimensionen auch Detailinformationen verfügbar zu machen. Die Detailinformationen können im nachfolgenden Schritt zur Auswahl einer Maßnahme hilfreich sein und im Laufe der Entwicklung um Aktivitäten zum proaktiven Änderungsmanagement angereichert werden. Der Steckbrief umfasst die Zwischenergebnisse der einzelnen Methoden (z. B. Active- und Passive-Rank) sowie die jeweilige Risikoausprägung einer Anforderung. Die Kategorien des Steckbriefs sind die Anzahl Qualitätsdefizite, die Anzahl Abhängigkeiten, die Änderungswahrscheinlichkeit (Kategorie, Erwartungswert, Kennwerte

für endogene und exogene Änderungswahrscheinlichkeit), der Active-Rank, die Kollektive Änderungsauswirkungen, die Risikokategorie, die ausgewählte Risikosteuerungsmaßnahme und der Status der Risikosteuerungsmaßnahme.

## Schritt 2: Auswahl anforderungsspezifischer Maßnahmen

Im zweiten Schritt werden proaktive Maßnahmen für die Anforderungen vorgeschlagen. Die Maßnahmen werden in die vier **Handlungsstrategien** Vermeidung, Transfer, Reduktion und Akzeptanz unterteilt (vgl. Kapitel 4.5). Abhängig von der Risikokategorie einer Anforderung werden die Handlungsstrategien zugeordnet (vgl. Abbildung 6-23). Diese Zuordnung bildet die Grundlage für den nachfolgenden Schritt zur Auswahl konkreter Maßnahmen.

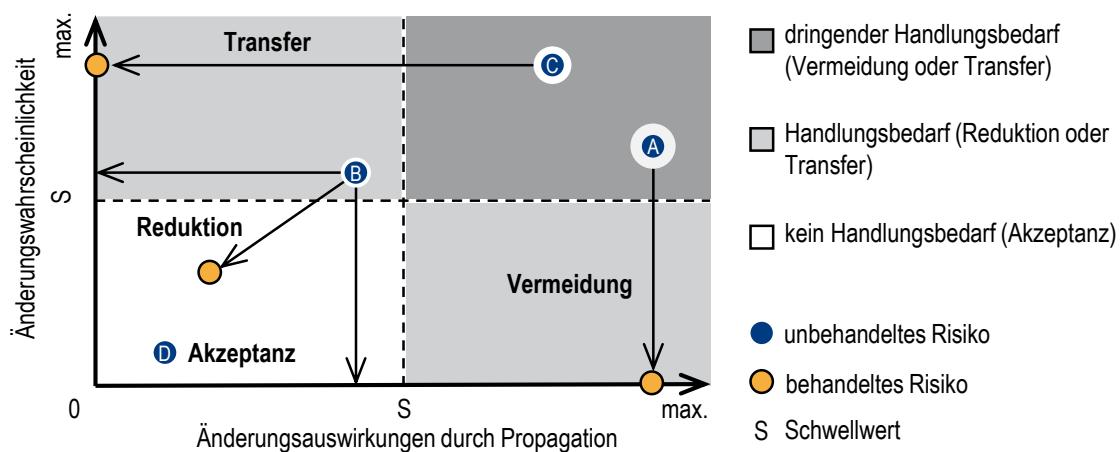


Abbildung 6-23: Intendierte Wirkung der vier Handlungsstrategien im Umgang mit Anforderungen je Risikokategorie

Da es derzeit noch keine kontextspezifische Übersicht von proaktiven Maßnahmen für Anforderungsänderungen gibt (vgl. Kapitel 4.5), wurde eine solche erstellt (vgl. Tabelle 6-5). Dafür wurden Maßnahmen aus anderen Kontexten (insb. Änderungs- und Risikomanagement) übernommen und angepasst [Wic17, S. 83 ff.; GB11, S. 58 ff.; FGN00, S. 172 ff.; Dah02, S. 90 f.; BG21, S. 859 f.; Gle11, S. 181 ff.; Die12, S. 124 ff.]. Anschließend wurde die Übersicht in Abstimmung mit den Industrieanwender:innen auf Eignung geprüft und angereichert (H-W5). Dennoch ist die Übersicht als Referenzliste zu verstehen, für die kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird und die bedarfsgerecht angepasst werden kann.

Als Differenzierungsmerkmal der Maßnahmen wird eine Kombination aus Handlungsstrategie und Zielgröße verwendet. Zudem wird gekennzeichnet, ob die Maßnahme das Änderungsrisiko einer einzelnen Anforderung adressiert oder das gesamte Anforderungsset. Entscheidungen zur Auswahl der Maßnahmen und Strukturierung der Übersicht, können Anhang A6 entnommen werden.

Tabelle 6-5: Übersicht proaktiver Maßnahmen

Vermeidung oder Reduktion der Änderungswahrscheinlichkeit	Reduktion der Änderungsauswirkungen	Transfer der Änderungsauswirkungen
exogene Änderungswahrscheinlichkeit <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfrieren einer Anforderung (Freeze) zur Verlagerung der Kostenverantwortung für Änderungen zum Stakeholder (A, S)</li> <li>• Anwendung von bewährten Methoden und Methodiken für die Entwicklung (z. B. Entwicklungsmethodiken, Projektmanagement oder CMMI)</li> <li>• Qualitätsprüfung aus M1 (A, S)</li> </ul>	Vorverlagerung durch: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zwischenvalidierung (A, S)</li> <li>• Machbarkeitsstudie (A)</li> <li>• angepasste Entwicklungsreihenfolge (A)</li> <li>• Unsicherheitssteuerungsmaßnahmen (A, S)</li> <li>• Anwendung von bewährten Methoden und Methodiken für die Entwicklung (z. B. Entwicklungsmethodiken, Projektmanagement oder CMMI) (S)</li> <li>• Modularisierung (S)</li> </ul>	Versicherung (S) Auslagerung (A, S)
endogene Änderungswahrscheinlichkeit <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wahl einer Lösungsalternative zur Änderungsimplementierung, die wenig Propagationseffekte verursacht (A)</li> <li>• Modularisierung im Lösungsraum (A, S)</li> <li>• Reduktion der Änderungswahrscheinlichkeit beeinflussender Anforderungen – siehe „exogene Änderungswahrscheinlichkeit“ (A)</li> </ul>	Nachverhandlung mit Stakeholder(n) bezüglich <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zeit- / Kostenvorgaben (A)</li> <li>• Anforderung (löschen, ändern, (um-) priorisieren) (A)</li> </ul> Rückfallebene oder Alternativen ausarbeiten (A)	Vertragsgestaltung <ul style="list-style-type: none"> <li>• (vertragliche) Limitierung der Arbeitsstunden (A, S)</li> <li>• Einfrieren einer Anforderung (Freeze) zur Verlagerung der Kostenverantwortung für Änderungen zum Stakeholder (A, S)</li> </ul>
	Zeit- / Kostenpuffer vorsehen / erhöhen (A, S)	<u>Legende</u> (A) = Maßnahme für eine Anforderung (S) = Maßnahme für ein Anforderungsset
	Terminierung/Ablehnung des Auftrags (S)	

Zur Unterstützung der Anwender:innen bei der Auswahl einer geeigneten Maßnahme wird neben der Übersicht proaktiver Maßnahmen ein **Empfehlungsmechanismus** verwendet. Der Empfehlungsmechanismus hebt alle Maßnahmen hervor, die den anforderungsspezifischen Risikokategorie(n) zugeordnet sind (vgl. Abbildung 6-23). Deren Rangfolge wird durch einen Lernmechanismus bestimmt. Entscheidend für die Rangfolge ist, wie häufig die Maßnahme in vergangenen Anwendungen ausgewählt wurde. So können kontextspezifische Einflussfaktoren (z. B. Machbarkeit, Aufwand-Nutzen-Verhältnis und Verantwortlichkeiten) teilweise berücksichtigt werden. Bei der Erstanwendung wird eine Gleichgewichtung der Maßnahmen vorgenommen.

Abschließend erfolgt die **Selektion der durchzuführenden Maßnahme(n)**. Die Selektion wird auf Basis der vorgeschlagenen Maßnahmen-Rangfolge durch die Anwender:innen vorgenommen. Grundlage sind die Maßnahmenvorschläge sowie die Detailinformationen zu jeder Anforderung im Anforderungssteckbrief. Die Selektion erfolgt durch die Anwender:innen, da die Verfügbarkeit und erwartete Wirkung der Maßnahmen kontextspezifisch ist und anhand des Empfehlungsmechanismus nicht hinreichend abgeschätzt werden kann. Die Umsetzung der Maßnahme erfolgt im Rahmen des übergeordneten Änderungsmanagementprozesses und kann mithilfe existierender Methoden (vgl. Kapitel 4.1) unterstützt werden.

## Exemplarische Anwendung im Kontext des Fallbeispiels

Zu Beginn werden die Anforderungen des Fallbeispiels in das Risikoportfolio eingeordnet und mit Maßnahmenvorschlägen versehen. Dieser Schritt erfolgt automatisiert innerhalb weniger Sekunden. Die Anforderung „dezentrale Verarbeitung der Positionsdaten“ wurde dabei in die höchste Risikokategorie eingeordnet. Im Fallbeispiel wurden fünf Risikokategorien unterschieden (sehr niedrig = 1 bis sehr hoch = 5). Zu den empfohlenen Maßnahmen gehörte beispielsweise „Einfrieren einer Anforderung (Freeze) zur Verlagerung der Kostenverantwortung für Änderungen zum Stakeholder“ und „angepasste Entwicklungsreihenfolge“. Das Einfrieren der Anforderungen wurde in diesem Fall aufgrund des Konfliktpotenzials und der strategischen Bedeutung des Kunden verworfen. Stattdessen wurde die Maßnahme „Anpassung der Entwicklungsreihenfolge“ ausgewählt und umgesetzt. Diese Maßnahme hatte sich bereits in vorherigen Projekten bewährt.

Ziel der Methode zur Auswahl proaktiver Maßnahmen ist es, die Entscheidungsfindung ohne Mehraufwand zu systematisieren. Beide Ziele werden durch M3 erfüllt. Die Priorisierung und Zuordnung erfolgt ebenso wie der Empfehlungsmechanismus automatisiert. Übereinstimmend mit der Ausgangslage obliegt ausschließlich die Entscheidungsfindung den Anwender:innen. Dabei können jedoch erstmals alle Anforderungen berücksichtigt und anhand der kontextspezifischen Maßnahmenübersicht systematisch gehandhabt werden. Darüber hinaus ist es auf Basis des Empfehlungsmechanismus gelungen, Lerneffekte zwischen Anwender:innen zu ermöglichen und damit die Entscheidungsgüte zu fördern. Im Ergebnis befähigt M3 zum proaktiven Management von Anforderungsänderungen (vgl. Abbildung 6-24).

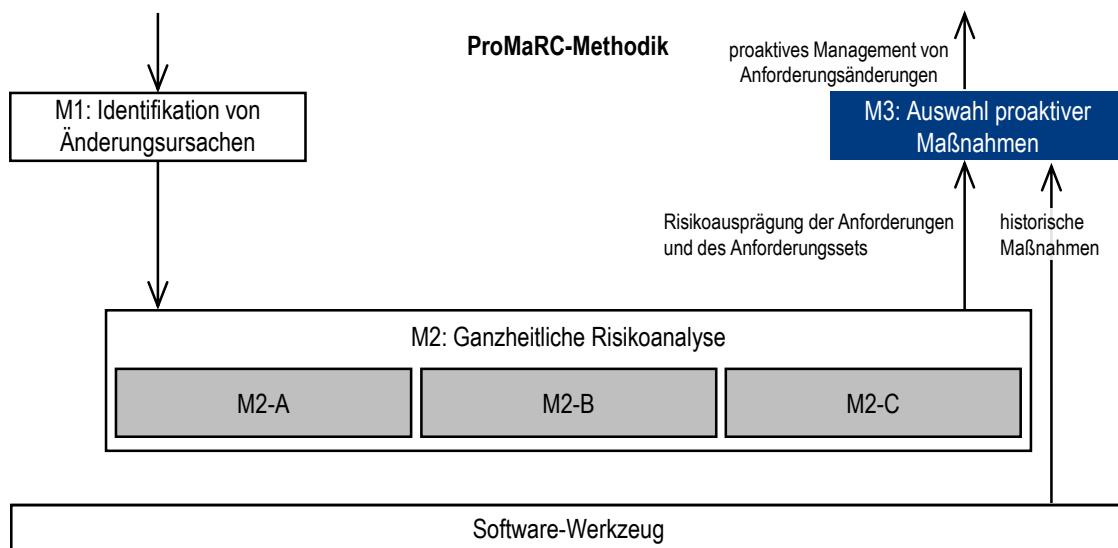


Abbildung 6-24: Einordnung der Methode zur Auswahl proaktiver Maßnahmen in die ProMaRC-Methodik

## 6.4 Software-Werkzeug

Zur industriellen Anwendung der ProMaRC-Methodik wurde ein Software-Werkzeug implementiert (vgl. Abbildung 6-25). Darin sind alle Methoden der Methodik implementiert und verknüpft. Zusätzlich zur Funktionalität wird die Nutzerfreundlichkeit mittels grafischer Darstellung, Nutzerführung (Workflow) und Ergebnisaufbereitung verbessert. Das Software-Werkzeug umfasst auch das Datenmanagement. Ziel ist es, im Laufe der Anwendungen Lerneffekte auf Basis historischer (Anwendungs-)Daten zu ermöglichen. Lerneffekte sind zur Generierung genauerer Abhängigkeitsmodelle, Wahrscheinlichkeitsanalysen und Empfehlungen für proaktive Maßnahmen implementiert.

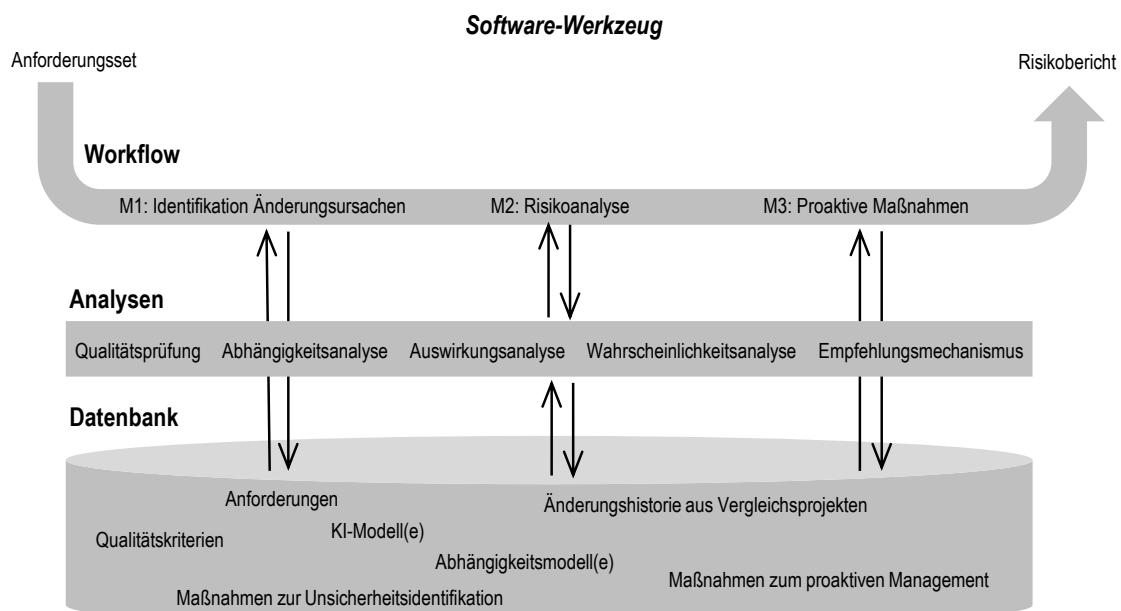


Abbildung 6-25: Architektur des Software-Werkzeugs

Zur Sicherstellung einer bedarfsgerechten Gestaltung des Funktionsumfangs, des Workflows und der grafischen Benutzeroberfläche (GUI) wurde zunächst ein Vorführmodell erstellt. Das **Vorführmodell** wurde in Adobe XD erarbeitet und den Pilotanwender:innen browserbasiert zu Testzwecken bereitgestellt (Details siehe Anhang A7.1). Durch eine Kommentarfunktion wurden sukzessive der Funktionsumfang, der Workflow und die GUI-Gestaltung abgestimmt. Im Rahmen der Abstimmung wurde auch die Entscheidung getroffen, ein alleinstehendes (engl. stand-alone) Software-Werkzeug zu entwickeln. Gründe waren die anbieter- und lizenzunabhängige sowie kostenlose Nutzbarkeit. Die anschließende Entwicklung des funktionsfähigen Software-Werkzeugs wird modellbasiert durchgeführt. Die **modellbasierte Entwicklung** auf Basis der Unified Modeling Language (UML) ermöglicht eine nachvollziehbare und nachträglich modifizierbare Architekturgestaltung. Die erzeugten UML-Modelle sind Anhang A7.2 zu entnehmen.

Als Programmiersprache wird **Python** gewählt. Vorteile von Python sind die umfangreichen und erprobten Open-Source Bibliotheken sowie die Verfügbarkeit der Python-Erweiterung PyQt 6 [Riv21] zur Gestaltung von GUIs. Open-Source Bibliotheken der Python-Erweiterung *hugging-face / transformers* werden für die KI-Modelle [Hug18] verwendet. Scikit-learn wird im Rahmen der Abhängigkeitsanalyse für die Vorverarbeitung der Anforderungen genutzt [PVG11]. Die zugrunde liegende Datenbank ist die PyQt-Implementierung von SQLite [Riv21]. Der gesamte Softwarecode hat einen Umfang von ca. 8500 Zeilen.

Das Software-Werkzeug kann alleinstehend angewandt und als ausführbare Datei im Unternehmen verteilt werden. Bearbeitungsstände können gespeichert und bedarfsgerecht weiterverwendet werden. Der im Software-Werkzeug implementierte Workflow besteht aus acht Schritten (Abbildung 6-26). Falls nur einzelne Analysen erforderlich sind, kann bedarfsgerecht vom Workflow abgewichen werden. Für Eingangsdaten (csv) und Ausgangsdaten (csv, pdf und docx) wurden in der Industrie gebräuchliche Dateiformate verwendet. Direkte Schnittstellen zu Software-Produkten (z. B. IBM Doors) wurden aufgrund des prototypischen Charakters nicht implementiert, können aber nachträglich integriert werden.

Um die Einführung zu erleichtern, wurde **zusätzliches Material** erarbeitet. Zum einen wurde ein Benutzerhandbuch erstellt (vgl. Anhang A7.3). Es enthält grundlegende Informationen zum proaktiven Änderungsmanagement von Anforderungsänderungen, den Workflow sowie eine Anleitung zur Installation und Informationsbeschaffung. Zum anderen wurde ein Einführungsvideo aufgezeichnet (ca. 53 Minuten), das als Alternative zum Benutzerhandbuch den Workflow erläutert. So können Nutzer:innen entsprechend ihrer persönlichen Präferenzen die Anwendung der ProMaRC-Methodik lernen.

Im Workflow wird zunächst ein **Entwicklungsprojekt** erstellt (Schritt 1). Die Projektdatei wird im Laufe der Anwendung sukzessive mit Daten angereichert und kann beliebig ausgetauscht und weiterverwendet werden. Initial werden Metadaten (Projektname und -beschreibung) sowie die Projekteigenschaften (vgl. Kapitel 4.4) erfasst. Projektbegleitend können zusätzliche Informationen (z. B. Anforderungsänderungen) dokumentiert werden. Über die GUI können Benutzer:innen zwischen verschiedenen Detailansichten wechseln und bedarfsgerecht die Anforderungstabelle, die Abhängigkeitstabelle, die Projektdatenbank, die Auswirkungsanalyse und das Risikoportfolio anzeigen lassen.

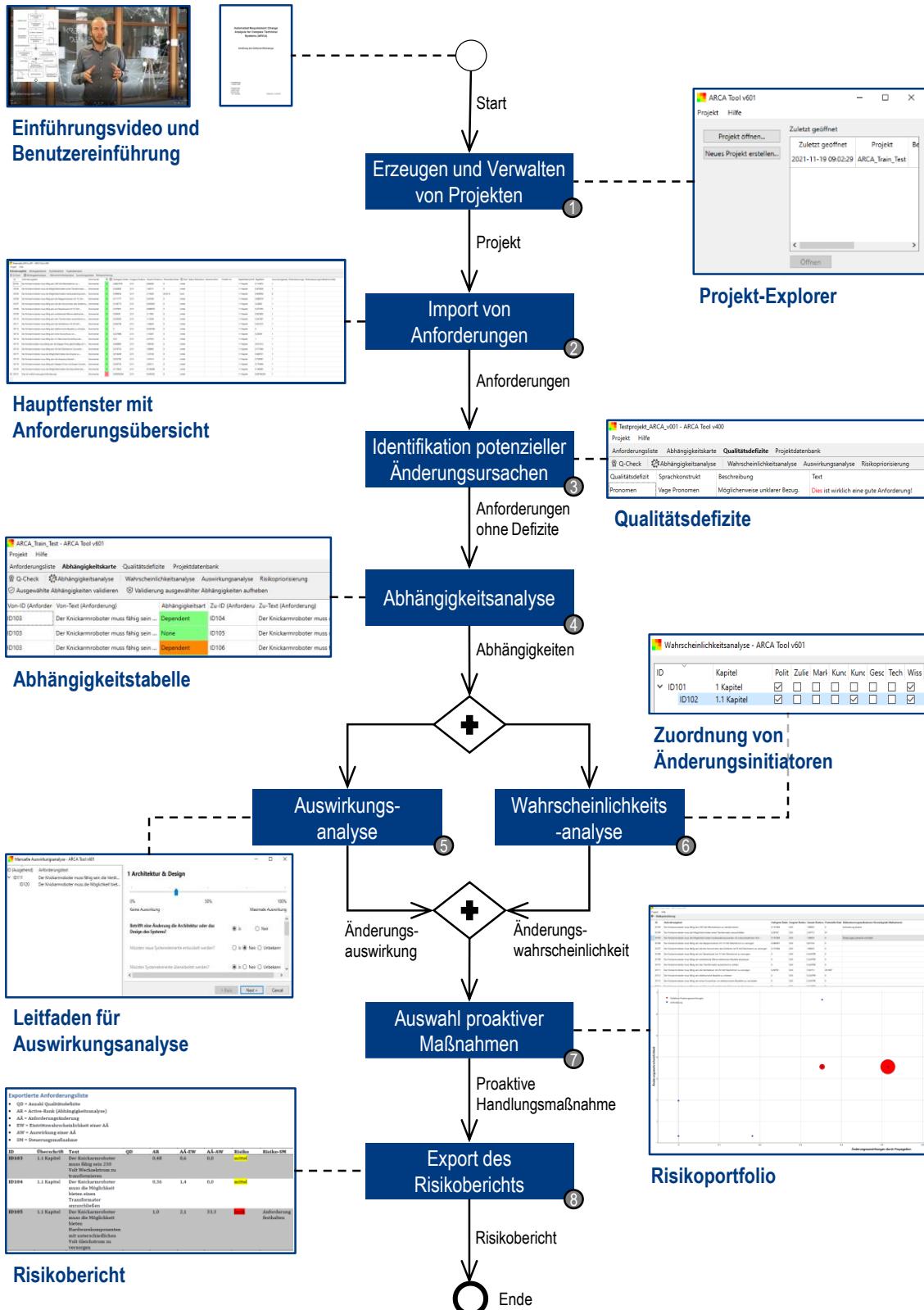


Abbildung 6-26: Workflow zur Anwendung der ProMaRC-Methodik mit dem Software-Werkzeug

Dann wird die **Anforderungsliste** für das jeweilige Projekt importiert (Schritt 2). Die Einträge in der Anforderungsliste haben zunächst die Attribute ID, Beschreibung und Typ. Der Typ unterscheidet, ob ein Eintrag eine Anforderung oder eine Überschrift (Bettitelung einer Gruppe von Anforderungen) ist. Anhand der Überschriften können im Rahmen der Wahrscheinlichkeitsanalyse alle zugehörigen Anforderungen teilautomatisiert den Änderungsinitiatoren zugewiesen werden (vgl. Kapitel 4.4). Die Anforderungen und ihre Attribute werden im Hauptfenster als Tabelle angezeigt (vgl. Abbildung 6-27).

ID	Kommentar	Anforderungstext	Kommentar	Potenzielle Änderung	Risk	Status	Risikosteuer	Verantwortlich	Erstellt von	Kapitelüberschrift	PageRank	Auswirkungsanalyse	Risikosteuerungsmaßnahme (Alle)	Risikosteuerungsmaßnahme (Alle)
<b>Grundfunktionalitäten</b>														
<b>Analysen</b>														
ID106	Der Knickarmroboter muss fähig sein die Steppenmotoren mit 12 Volt ...	Kommentar	0	0,000000	0	mittel			1.1 Kapitel	0,114872	1			
ID107	Der Knickarmroboter muss fähig sein die den Servomotor des Grahams ...	Kommentar	0	0,148773	0,15	0	mittel		1.1 Kapitel	0,475038	1			
ID108	Der Knickarmroboter muss fähig sein ein Steuerboard mit 12 Volt ...	Kommentar	0	0,197851	0,15	0,989676	0	mittel	1.1 Kapitel	0,274793	1			
ID109	Der Knickarmroboter muss fähig sein eine enthehlte Wärme elektrischer ...	Kommentar	0	0,194938	0,15	2,11842	0	mittel	1.1 Kapitel	0,823805	1			
ID110	Der Knickarmroboter muss fähig sein den Transformatoren ausreichend zu ...	Kommentar	0	0,245583	0,15	1,12548	0	mittel	1.1 Kapitel	0,341087	1			
ID111	Der Knickarmroboter muss fähig sein die Ventilatoren mit 24 Volt ...	Kommentar	0	0,340758	0,15	1,39626	0	mittel	1.1 Kapitel	0,473275	1			
ID112	Der Knickarmroboter muss fähig sein elektronische Bauteile zu schützen ...	Kommentar	0	0,426766	0,15			mittel	1.1 Kapitel	0	1			
ID113	Der Knickarmroboter muss fähig sein einen Kurzschluss von ...	Kommentar	0	0,237988	0,15	1,10387	0	mittel	1.1 Kapitel	0,33054	1			
ID114	Der Knickarmroboter muss fähig sein im Falle eines Kurzschlusses die ...	Kommentar	0	0,15	2,47125	0	mittel		1.1 Kapitel	1	1			
<b>Anforderungen</b>														
<b>Attribute</b>														
ID115	Der Knickarmroboter muss fähig sein die Ansteuerung der Stepper Driver ...	Kommentar	0	0,160000	0,15	0,001206	0	mittel	1.1 Kapitel	0,612312	1			
ID116	Der Knickarmroboter muss fähig sein die Ansteuerung der Stepper Driver ...	Kommentar	0	0,160000	0,15	0,001206	0	mittel	1.1 Kapitel	0,771764	1			
ID117	Der Knickarmroboter muss fähig sein die Ansteuerung der Stepper Driver ...	Kommentar	0	0,160000	0,15	0,001206	0	mittel	1.1 Kapitel	0,436721	1			
ID118	Der Knickarmroboter muss fähig sein die Ampere je Baudate ...	Kommentar	0	0,522783	0,15	1,91415	0	mittel	1.1 Kapitel	0,726087	1			
ID119	Der Knickarmroboter muss fähig sein Stepper Driver mit Anger Convert ...	Kommentar	0	0,534735	0,15	2,00511	0	mittel	1.1 Kapitel	0,770494	1			
ID120	Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten die Gesundheit des ...	Kommentar	0	0,115823	0,15	0,756296	0	mittel	1.1 Kapitel	0,160865	1			
ID121	Dies ist wirklich eine gute Anforderung!	Kommentar	1	0,00550264	0,15	0,442423	0	mittel	1.1 Kapitel	0,00754256	1			

Abbildung 6-27: Hauptfenster mit Anforderungstabelle

Anschließend kann die Methode zur Identifikation von Änderungsursachen (M1) ausgeführt werden (Schritt 3), indem Nutzer:innen die Funktion „Qualitätsprüfung“ aktivieren. Falls Defizite erkannt wurden, wird die Anforderung farblich gekennzeichnet. In der Detailansicht wird das Qualitätsdefizit im Anforderungstext markiert und eine Erläuterung dargestellt (vgl. Abbildung 6-28). Zudem sind die Maßnahmen zur Identifikation von Unsicherheiten abrufbar (vgl. Abbildung 6-28).

Für die **Abhängigkeitsanalyse** wird zunächst ein KI-Modell ausgewählt (Schritt 4). Die KI-Modelle werden als separate Datei gespeichert, sodass ein Austausch zwischen Nutzer:innen und Abteilungen möglich ist. Auf Basis des KI-Modells werden die Anforderungsabhängigkeiten klassifiziert und in einer Abhängigkeitstabelle dargestellt. In der Tabelle haben Nutzer:innen die Möglichkeit, ermittelte Abhängigkeiten zu prüfen und anzupassen (vgl. Abbildung 6-28). Sobald Abhängigkeiten als geprüft markiert oder angepasst werden, fließen diese in eine separate Datenbank zum Anlernen neuer KI-Modelle (Lerneffekt) ein.

Qualitätsprüfung		Anforderungsabhängigkeiten	
Von-ID (Anforderung)	Von-Text (Anforderung)	Abhängigkeit	Zu-Text (Anforderung)
ID103	Der Knickarmroboter muss fähig sein ...	Dependent	ID104
ID103	Der Knickarmroboter muss fähig sein ...	None	ID105
ID103	Der Knickarmroboter muss fähig sein ...	Dependent	ID106

Abbildung 6-28: Funktionalitäten der Methode zur Identifikation potenzieller Änderungsursachen

Als Voraussetzung für die Bestimmung der Auswirkungen und der Wahrscheinlichkeit von Anforderungsänderungen müssen die Abhängigkeiten bekannt sein. Zur intuitiven Handhabung sind die beiden Funktionalitäten ausgegraut, solange diese Voraussetzung nicht erfüllt ist. Die Funktionalität **Auswirkungsanalyse** zeigt Nutzer:innen die Anforderungen sortiert nach Active-Rank (Schritt 5) an. Der Active-Rank wird automatisch berechnet, sobald die Abhängigkeiten ermittelt wurden. Die Sortierung unterstützt die Selektion kritischer Anforderungen für eine manuelle Bewertung. Sobald eine Anforderung für die manuelle Bewertung ausgewählt wurde, werden der Leitfaden und die Anforderungsabhängigkeiten der betrachteten Anforderung dargestellt (vgl. Abbildung 6-29). Die abhängigen Anforderungen werden zur Handhabung der Komplexität als aufklappbare Baumstruktur dargestellt und zur besseren Übersichtlichkeit auf die dritte Abhängigkeitsordnung limitiert. Im Leitfaden werden die Fragekategorien nacheinander bewertet. Dabei wird der derzeitige Bewertungsstand fortlaufend in Form eines Schiebereglers dargestellt. So wird die Veränderung der Bewertung für jede Entscheidung sichtbar. Falls die Einschätzung der Nutzer:innen von der vordefinierten Gewichtung abweicht, kann der Schieberegler manuell bewegt und damit die Höhe der kollektiven Auswirkungen angepasst werden. Nach der Bewertung der Auswirkungsdimensionen wird die Änderungsauswirkung der betrachteten Anforderung als Attribut zugewiesen.

Für die Berechnung der **Änderungswahrscheinlichkeit** werden zunächst Referenzprojekte definiert (Schritt 6). Zur Auswahl stehen alle existierenden Projektdaten. Hilfestellung bei der Auswahl bieten die Metadaten (Projektbeschreibung und -charakteristika). Anschließend ordnen die Nutzer:innen den Anforderungen oder Anforderungsgruppen aus einer vordefinierten Liste exogenen Änderungsinitiatoren zu (vgl. Abbildung 6-29). Dann werden automatisiert die endogene und exogene Änderungswahrscheinlichkeit sowie der Erwartungswert berechnet. Hierbei kommt ein Lerneffekt zum Tragen, da im Laufe der Anwendungen die Anzahl der Vergleichsprojekte steigt und die Ergebnisse statistisch aussagekräftiger werden. Die drei Werte werden einer Anforderung als Attribute zugewiesen und im Hauptfenster dargestellt.

Der letzte Schritt ist die **Auswahl proaktiver Maßnahmen** (Schritt 7). Die Funktionalität erzeugt ein Risikoportfolio mit allen Anforderungen. Auf der Abszisse ist der Active-Rank und auf der Ordinate der Erwartungswert zur Änderungswahrscheinlichkeit aufgetragen. Falls die kollektiven Änderungsauswirkungen einer Anforderung bewertet wurden, wird proportional der Kreisdurchmesser skaliert und farblich hervorgehoben. Für die Nutzerfreundlichkeit wird durch Anklicken einer Anforderung im Risikoportfolio im oberen Bereich der Risikoportfolioansicht (Anforderungstabelle) die Anforderungszeile hervorgehoben. So können Nutzer:innen anhand von Risikokennzahlen unmittelbar eine proaktive Maßnahme auswählen (vgl. Abbildung 6-29). Die Vorschläge sind entsprechend des Empfehlungsmechanismus sortiert. Die ausgewählte proaktive Maßnahme wird als Attribut an die Anforderung übergeben.

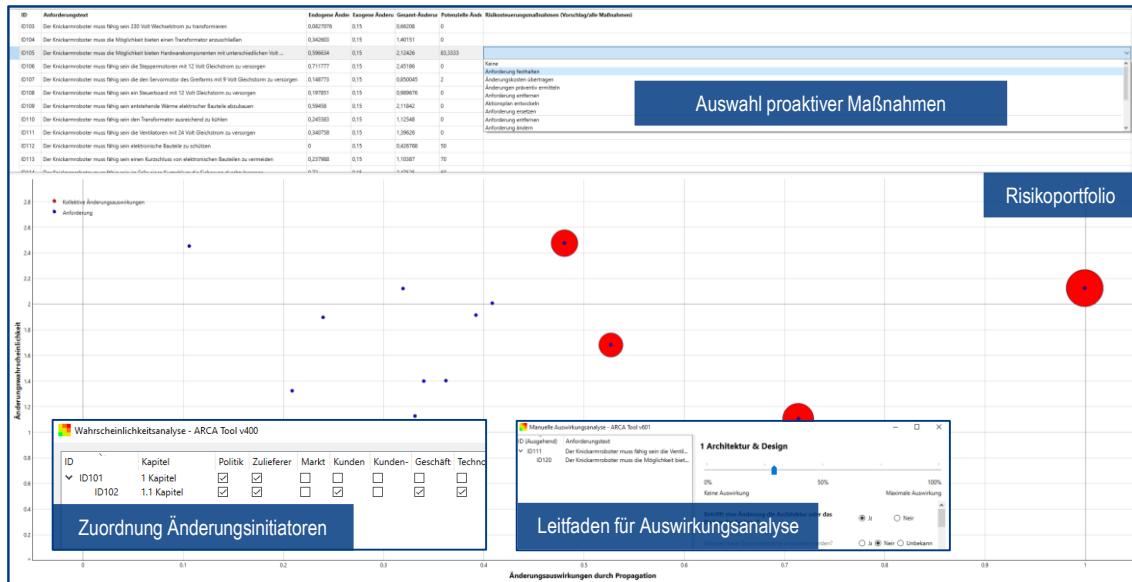


Abbildung 6-29: Funktionen für die Risikoanalyse und Auswahl proaktiver Maßnahmen

Abschließend können Nutzer:innen die Ergebnisse der Methodik-Anwendung als **Risikobericht** exportieren (Schritt 8). Der Bericht enthält eine Tabelle, welche die Anforderungen mit den folgenden Risikoattributen darstellt: Active-Rank, erwartete Anzahl der Änderungen, Änderungsauswirkungen und ausgewählte proaktive Maßnahme.

## 6.5 Einführung und Anwendung der ProMaRC-Methodik

Die Feldstudie hat gezeigt, dass Industrieanwender:innen eine Unterstützung bei der Einführung und Anwendung der Methodik benötigen (vgl. Kapitel 3). Dafür wird im Folgenden ein Referenzprozess erläutert, der die Einführung und Anwendung der ProMaRC-Methodik aufzeigt. Verwendet wird der Referenzprozess, indem er Industrieanwender:innen als Ausgangspunkt für eine unternehmensspezifische Ausgestaltung dient.

Der Referenzprozess ist als Vorgehen mit drei Schritten definiert (vgl. Abbildung 6-30):

- 1) Potenzialanalyse für eine Organisationseinheit
- 2) inhaltliche Einordnung der Methodik
- 3) projektspezifische Einordnung

Die Unterscheidung von Organisations- und Projektebene folgt dem Tailoring-Ansatz nach INCOSE [WRF15, S. 163 ff.]. Jeder Schritt im Referenzprozess wird durch zwei Aktivitäten mit dazugehörigem Referenzmodell detailliert. Ein Referenzmodell ist ein generisches Zielbild für einen Teilaспект (z. B. Integration in Entwicklungsprozesse) und dient als Grundlage für das kontextspezifische Tailoring. Strukturiert wird das Tailoring anhand von Leitfragen (vgl. Anhang A8.1).

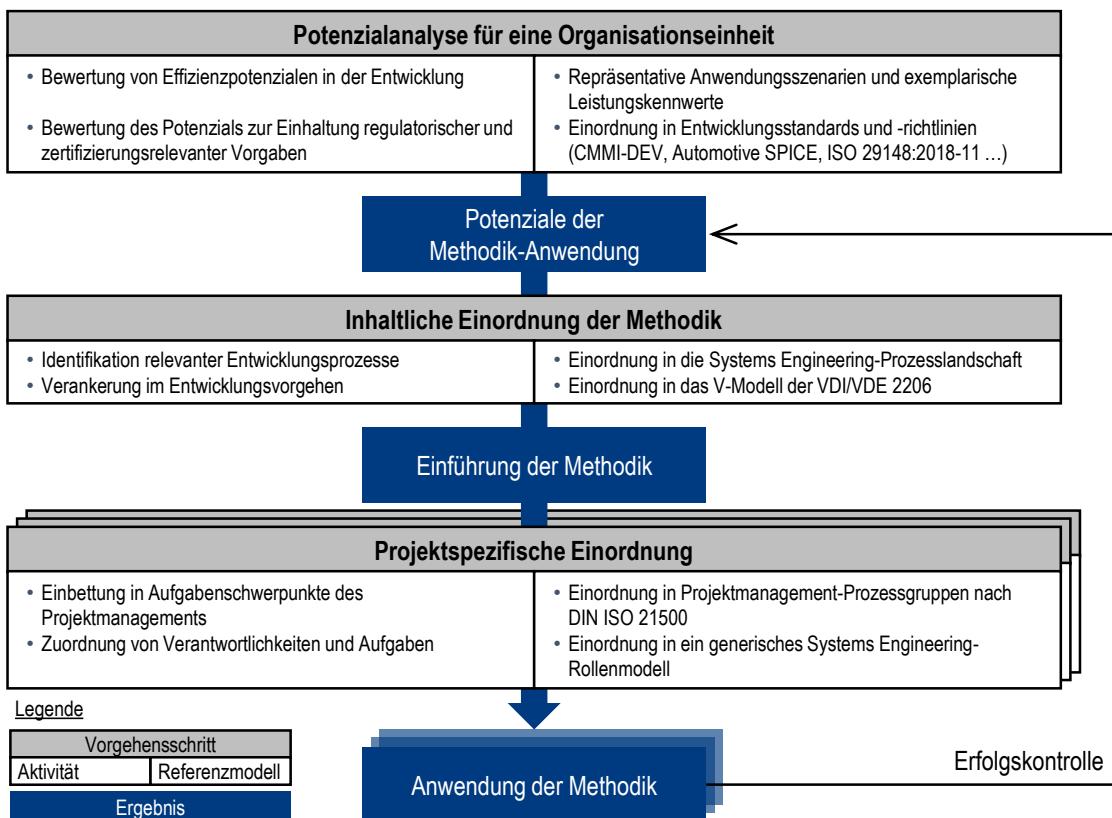


Abbildung 6-30: Vorgehensschritte zur Einführung und Anwendung der Methodik

## Schritt 1: Potenzialanalyse für eine Organisationseinheit

Im ersten Schritt des Referenzprozesses werden auf Grundlage von repräsentativen Anwendungsszenarien und exemplarischen Leistungskennwerten die Verbesserungspotenziale in der Entwicklung beurteilt. Entscheidungsträger:innen und Anwender:innen prüfen die **Anwendungsszenarien** der Methodik und selektieren die relevanten Rollen und Entwicklungsaktivitäten. Es werden drei primäre Anwendungsszenarien und ein sekundäres Anwendungsszenario definiert. Die primären Anwendungsszenarien zeigen auf, welche Informationsbedarfe des proaktiven Änderungsmanagements durch die ProMaRC-Methodik abgedeckt werden. Das sekundäre Anwendungsszenario bildet Verbesserungspotenziale bei sonstigen Entwicklungsaktivitäten ab (z. B. Änderungsimplementierung). Die Anwendungsszenarien können Anhang A8.2.1 entnommen werden.

Ergänzend zu den Anwendungsszenarien werden zur Bewertung der Verbesserungspotenziale **exemplarische Leistungskennwerte** benannt. Ein mittelfristig bewertbarer Leistungskennwert ist beispielsweise die Veränderung des durchschnittlichen Erfüllungsgrads der Projektziele. Da durch zahlreiche weitere Einflussfaktoren die Aussagekraft auf Ebene der Projektziele eingeschränkt ist, sind auch spezifische Leistungskennwerte wie beispielsweise die Anzahl der Änderungsanträge im Projektverlauf, die Personaleinsatzquote oder die Anzahl an Korrekturbedarf und Reklamationen aufgeführt. Eine umfassendere Auflistung von Leistungskennwerten ist in Anhang A8.2.2 aufgeführt.

Potenzielle zur **Einhaltung regulatorischer Vorgaben** sind abhängig vom Geschäftsfeld und regulatorischen Rahmenbedingungen. Als generische Bezugspunkte werden das etablierte und branchenunabhängig verwendete Reifegradmodell CMMI-DEV sowie die Richtlinien Automotive SPICE (Entwicklungsprozesse), ISO/IEC/IEEE 29148:2018-11 (Requirements Engineering) und ISO/IEC/IEEE 15288:2015 (Systems Engineering) analysiert. Übergreifend zeigt sich, dass die Methodik zur Einhaltung der Vorgaben des Risiko- und Änderungsmanagements in mehreren Bereichen beiträgt (z. B. Verfolgbarkeit von Anforderungen und Bewertung von Änderungsauswirkungen). Eine detaillierte Einordnung ist Anhang A8.2.3 zu entnehmen.

Nachdem Industrieanwender:innen Schritt 1 durchgeführt haben, sind die Potenziale einer Anwendung der ProMaRC-Methodik bekannt. In den Schritten 2 und 3 kann nun selektiv deren Realisierung ausgestaltet werden.

## Schritt 2: Inhaltliche Einordnung der Methodik

Im zweiten Vorgehensschritt erfolgt die inhaltliche Einordnung der Methodik-Anwendung in die Entwicklung des betrachteten Unternehmens. Die Einordnung wird auf Organisationsebene (z. B. Gesamtunternehmen oder Organisationseinheit) von Beteiligten mit projektaufliegendem Verantwortungsbereich durchgeführt (z. B. Abteilungsleiter:innen und Prozessverantwortliche). Unterschieden wird für die Einordnung in die Identifikation relevanter Entwicklungsprozesse und die Verankerung der Methodik im sachlogisch vernetzten Entwicklungsablauf.

Entwicklungsprozesse sind in jedem Unternehmen unterschiedlich. Daher wird die generische **Systems Engineering (SE) Prozesslandschaft** nach INCOSE [WRF15] als Grundlage gewählt (vgl. Anhang A1.2). Ausschlaggebend für die Auswahl sind der Fokus auf die Entwicklung komplexer technischer Systeme, die detaillierte Prozessbeschreibung bis auf die Ebene der Informationsbedarfe sowie die Vollständigkeit der Prozesslandschaft durch die Berücksichtigung von entwicklungsbegleitenden Prozessen (z. B. Management- und Verhandlungsprozesse).

Die Analyse der SE-Prozesse zeigt, dass primäre Anwendungspotenziale der ProMaRC-Methodik bei zwei Technischen Prozessen zur Anforderungsentwicklung (Definition von Stakeholderbedürfnissen und -anforderungen sowie Definition von Systemanforderungen), drei Technischen Management Prozessen (Projektplanung, Risikomanagement und Entscheidungsmanagement) sowie den Verhandlungsprozessen vorhanden sind. In Anhang A8.3 ist eine detaillierte Zuordnung von Prozessen und Prozess-Aktivitäten zu den Informationen aus der ProMaRC-Methodik dargestellt. Anhand der Zuordnung können Nutzer:innen bewerten, welche etablierten Unternehmensprozesse für das proaktive Änderungsmanagement anzupassen sind. Neben den primären Anwendungspotenzialen werden in Anhang A8.3 auch sekundäre Anwendungspotenziale aufgeführt. Dazu zählen Prozesse, die nicht Teil des proaktiven Managements von Anforderungsänderungen sind (z. B. Konfigurations- und Informationsmanagement).

Für die Einordnung der ProMaRC-Methodik in den **sachlogisch vernetzten Entwicklungsablauf** wird die Richtlinie VDI/VDE 2206:2021 [VDI/VDE2206] zur Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme als Grundlage verwendet. In der Richtlinie wird der sachlogisch vernetzte Entwicklungsablauf anhand eines V-Modells dargestellt [GH20; Grä17]. In Abbildung 6-31 wird illustriert, in welchen Bereichen die Methodik zu verorten ist.

Der sachlogische Ablauf wird im V-Modell anhand von drei Entwicklungssträngen erläutert. Im Zentrum steht der **mittlere Strang**, welcher alle Kernaufgaben der Systementwicklung beschreibt [VDI/VDE2206]. Unmittelbares Anwendungspotenzial der ProMaRC-Methodik ist für die Anforderungserhebung vorhanden, indem die Methode zur Identifikation von Änderungsursachen Qualitätsdefizite und Unsicherheiten im Anforderungsset aufzeigt (vgl. Kapitel 6.1). Der **innere Strang** illustriert die begleitende Anforderungsentwicklung, die neben der Anforderungserhebung das Änderungsmanagement von Anforderungen umfasst [VDI/VDE2206]. Dieser Strang stellt das vorrangige Anwendungsfeld der Methodik dar, in welchem alle Methoden Anwendung finden. Anhand der Methodik kann ein proaktiver Bestandteil des Änderungsmanagements in den Strang zur Anforderungsentwicklung integriert werden. Im **äußeren Strang** stehen die Modellbildung und Analyse im Vordergrund [VDI/VDE2206]. Hier kann die Methodik bei der Prognose von Systemeigenschaften und Systemverhalten für den Teilbereich der Anforderungen verwendet werden. Dazu sind die Anforderungsabhängigkeiten und deren Propagationsverhalten als Ergebnisse der Risikoanalyse geeignet. Das Ergebnis von Schritt 2 ist die Verankerung der Methodik auf Organisationsebene.

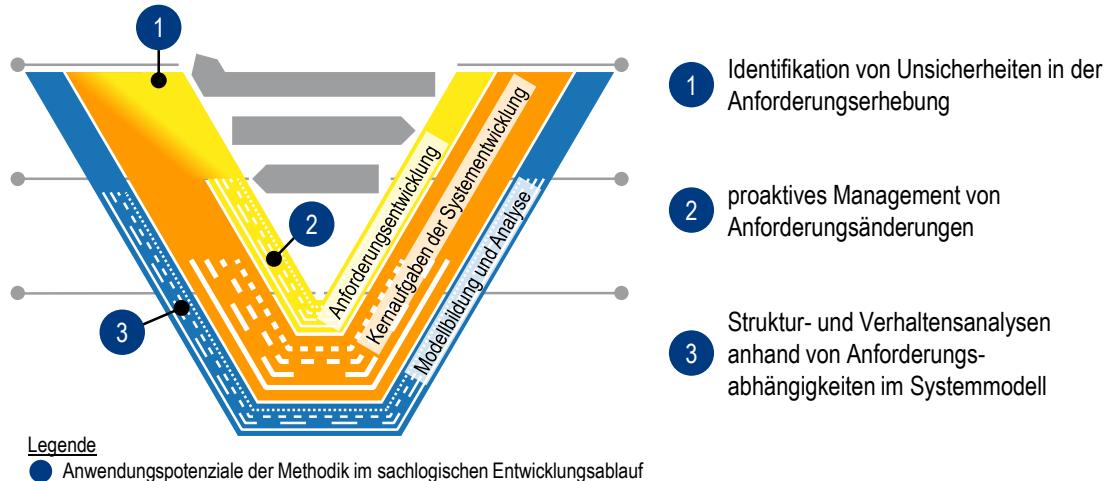


Abbildung 6-31: Anwendungspotenziale der ProMaRC-Methodik im V-Modell der VDI/VDE 2206:2021 [VDI/VDE2206]

### Schritt 3: Projektspezifische Einordnung

Im dritten Schritt des Referenzprozesses erfolgt die projektspezifische Einordnung der ProMaRC-Methodik. Die Durchführung erfolgt auf Ebene der Entwicklungsprojekte durch Projektbeteiligte (z. B. Projektleiter:innen). Ziel ist die Befähigung des Entwicklungsteams zur Anwendung der Methodik in konkreten Entwicklungsprojekten. Dafür werden zwei Bereiche unterschieden. Aufgabenbereiche im Projektmanagement, die von der Methodik-Anwendung profitieren und Rollen in der Entwicklung, welche die ProMaRC-Methodik anwenden.

Die Projektmanagement-Prozessgruppen nach DIN ISO 21500:2016 [DIN 21500-02] dienen zur allgemeingültigen Differenzierung von **Aufgabenbereichen im Projektmanagement**. Jede der fünf in Wechselwirkung stehenden Prozessgruppen repräsentiert einen Abschnitt im Lebenszyklus eines Projekts und den jeweiligen Aufgabenbereich. Folgende Prozessgruppen werden unterschieden: Initiierung, Planung, Umsetzung, Controlling sowie Abschluss. Die Methodik kann in den ersten vier Prozessgruppen Anwendung finden.

Im Rahmen der Projektinitiierung können mit der Methodik anforderungsbezogene Unsicherheiten ermittelt werden. So lassen sich bereits vor Vertragsschluss eindeutige Formulierungen für die Projektanforderungen ermitteln. In Kombination mit den Informationen der Risikoanalyse wird die Verhandlung eines wirtschaftlichen Projektauftrags unterstützt, beispielsweise indem Risikoaufschläge einkalkuliert werden.

In der Projektplanung können durch die Methodik fortlaufend Risiken ermittelt (M1) und analysiert werden (M2). Mit dieser Informationsgrundlage kann beispielsweise eine risikooptimierte Abfolge von Arbeitspaketen und Aktivitäten ermittelt werden. Ebenso kann unter Einbeziehung der Risikoinformationen die Dauer der Aktivitäten sowie die Kostenabschätzung präzisiert werden. Während der Projektumsetzung wird die Handhabung der

Risiken durch die Unterstützung bei der Auswahl proaktiver Maßnahmen (M3) unterstützt. Für das parallel ablaufende Projektcontrolling bietet die Risikoanalyse (M2) Hilfestellung bei der Überwachung und Aktualisierung der Risikolage. Eine detaillierte Einordnung der Methodik-Anwendung in die Aufgabenbereiche des Projektmanagements ist Anhang A8.4.1 zu entnehmen.

Zur Anwendung der ProMaRC-Methodik sind den Beteiligten spezifische Verantwortlichkeiten und Aufgaben zuzuweisen. Vergleichbar mit den Entwicklungsprozessen (Schritt 2) unterscheiden sich je nach Unternehmen die **Rollen in der Produktentwicklung**. Daher wird das Systems Engineering-Rollenmodell nach GRÄBLER, OLEFF und HENTZE [GOH19] für eine allgemeingültige Einordnung verwendet (vgl. Anhang A1.2). Das Rollenmodell wurde aus zwei Gründen erarbeitet: Zum einen, um eine auf die Systems Engineering-Prozesse und deren Anwendung abgestimmte Strukturierung der Aufgaben und Verantwortlichkeiten zugrunde legen zu können. Zum anderen, um den Fokus ausschließlich auf Rollen mit direktem Bezug zur Entwicklung zu legen.

Das Rollenmodell umfasst 15 Rollen, denen jeweils Aufgaben und Verantwortlichkeiten zugeordnet sind. Sechs Rollen sind für die Methodik-Anwendung relevant. Stakeholder Schnittstellen Manager:innen und Anforderungsmanager:innen können die Methoden zur Identifikation potenzieller Änderungsursachen (M1) und Risikoanalyse (M2) für die Spezifizierung und das Änderungsmanagement von Stakeholder- bzw. Systemanforderungen verwenden. Technische Manager:innen können auf Basis der Risikoanalyse (M2) und vorausgewählter Maßnahmen (M3) eine risikogerechte Entscheidungsfindung vorbereiten. Projektleiter:innen können die Ergebnisse der Risikoanalyse (M2) zur internen Kommunikation sowie bei kontinuierlicher Anwendung für Projektkontrolle und -steuerung nutzen. Prozessverantwortlichen wird durch den Referenzprozess zur Einführung und Anwendung der Methodik eine Unterstützung bei der Identifikation und Anpassung des Änderungsmanagement- und Risikomanagementprozesses geboten. Modellierungsingenieur:innen können darüber hinaus die im Rahmen der Risikoanalyse (M2) ermittelten Anforderungsabhängigkeiten für die Pflege des Systemmodells verwenden. Eine detaillierte Einordnung der Methodik-Anwendung in die Aufgabenfelder der jeweiligen Rolle kann Anhang A8.4.2 entnommen werden.

Das Ergebnis von Schritt 3 ist die Befähigung des Entwicklungsteams zur Anwendung der Methodik in einem konkreten Entwicklungsprojekt. Eine laufende **Erfolgskontrolle** während der Methodik-Anwendung (vgl. Abbildung 6-30) dient zur Überprüfung, ob die im ersten Schritt des Referenzprozesses identifizierten Potenziale ausgeschöpft werden oder Anpassungsbedarfe in der Einordnung erforderlich sind.

## 7 Validierung der Methodik in der Automobilindustrie

Im folgenden Kapitel wird die Validierung der ProMaRC-Methodik erläutert<sup>9</sup>. Auf die Beschreibung des Validierungskonzepts folgen die Erläuterungen zu verwendeten Fallstudien (Kapitel 7.1), der Anforderungserfüllung (Kapitel 7.2 bis 7.6) und abschließend der Diskussion der Validierungsergebnisse (Kapitel 7.7).

Zur Vereinfachung wird auf eine Differenzierung der Begriffe Verifizierung („Wurde die Methodik richtig entwickelt?“) und Validierung („Wurde die richtige Methodik entwickelt?“) (vgl. z. B. [WRF15]; [VDI/VDE2206]) verzichtet. Validierung wird als primär verwendeter Begriff ausgewählt. Grund dafür ist, dass die Überprüfung der Zielerreichung, eine Unterstützung für das proaktive Management von Anforderungsänderungen zu bieten (vgl. Kapitel 1.1), im Vordergrund steht.

Das **Validierungskonzept** beruht, dem Ansatz nach ULRICH folgend, auf einer engen zyklischen Einbindung der Praxis (vgl. Kapitel 1.2) [Ulr81]. Die Ebenen des Validierungskonzepts sind angelehnt an die DRM: entwicklungsbegleitende Validierung (Support Evaluation), Validierung der Anwendung (Application Evaluation) und Validierung des Erfolgs (Success Evaluation) [BC09]. In der entwicklungsbegleitenden Validierung wird die Erfüllung der Bedürfnisse von Industrieanwender:innen auf konzeptioneller Ebene geprüft. Dies wurde im Rahmen des kontinuierlichen Austauschs (H-KA1) vorgenommen und wird nicht weiter detailliert. Stattdessen steht die abschließende Validierung der Methodik-Anwendung und damit die Beantwortung der Forschungsfragen im Fokus des Validierungskonzepts. Anhand der in Kapitel 5 definierten Anforderungen wird dafür die Eignung der Methodik im intendierten Anwendungszusammenhang untersucht und bewertet. Darüber hinaus wird eine initiale Validierung des Methodik-Erfolgs [BC09, S. 195] durchgeführt. Der Zielsetzung entsprechend bemisst sich der Erfolg durch einen Beitrag zur effizienten Handhabung von Anforderungsänderungen in der Entwicklung.

Je Ebene des Validierungskonzepts wurden geeignete **Untersuchungsmethoden** ausgewählt (z. B. aus [BC09]). Insgesamt wurden folgende Methoden zur Datensammlung und -analyse verwendet, die jeweils auf einen engen Einbezug von Industrieanwender:innen ausgelegt sind: fünf Fallstudien im Anwendungszusammenhang, neun Workshops mit zwei bis sechs thematisch ausgewählten Industrieanwender:innen, ein Fragebogen sowie drei darauf aufbauende Interviews (Details vgl. Anhang A2). Beteiligt an der Validierung waren insgesamt folgende Rollen: Abteilungsleiter, Projektleiter, Teamleiter, Prozess-/Tool-Verantwortliche, Anforderungsmanager:innen, Entwickler und Fachreferenten. Eine Übersicht über die verwendeten Methoden je Anforderung bietet Tabelle 7-1. Die Begründung der Methodenauswahl wird in den Erläuterungen zu jeder Anforderung detailliert (vgl. Kapitel 7.2 bis 7.5).

---

<sup>9</sup> Zentrale Inhalte der Validierung wurden in [GOP22] vorveröffentlicht.

Tabelle 7-1: Übersicht des Vorgehens und der Methoden zur Validierung der Methodik

Anforderung		Validierungsvorgehen und -methoden
Methoden	A1: Änderungsausbreitung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fallstudie 4</li> <li>• Workshops mit Industrieanwender:innen [H-W8, H-W10 und H-W11]</li> </ul>
	A2: Änderungsauswirkung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fallstudie 4</li> <li>• Workshop mit Industrieanwender:innen [H-W9]</li> </ul>
	A3: exogene und endogene Änderungswahrscheinlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fallstudie 4</li> <li>• Workshop mit Industrieanwender:innen [H-W8 und H-W10]</li> </ul>
	A4: anforderungsspezifische Handlungsmaßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fallstudie 4</li> <li>• Workshop mit Industrieanwender:innen [H-W4, H-W5 und H-W11]</li> </ul>
Eingangsdaten	A5: Interdisziplinarität der Anforderungen	Fallstudie 4
	A6: hohe Anforderungsanzahl	Fallstudie 4
	A7: standardmäßige Dokumentationsform	Fallstudie 4
Anwendung	A8: einfache Anwendung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fallstudien 1-3</li> <li>• Workshop mit Industrieanwender:innen [H-W4, H-W5, H-W8, H-W9, H-W10 und H-W11]</li> <li>• Befragung von Industrieanwender:innen (Fragebogen [H-F1] und Interview [H-I1])</li> </ul>
	A9: Verfügbarkeit benötigter Software	Befragung von Industrieanwender:innen (kontinuierlicher Austausch [H-KA1])
	A10: frühzeitige Verfügbarkeit benötigter Informationen	Befragung von Industrieanwender:innen (Fragebogen [H-F1] und Interview [H-I1])
	A11: generische Anwendbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fallstudien 1-5 sowie Fallstudien der Untersuchung des Anwendungszusammenhangs (Kapitel 3)</li> <li>• Literaturanalyse</li> </ul>
	A12: akzeptabler Anwendungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fallstudien 1-3</li> <li>• Befragung von Industrieanwender:innen (Fragebogen [H-F1] und Interview [H-I1])</li> </ul>
	A13: Integrierbarkeit in den Entwicklungsprozess	Workshop mit Industrieanwender:innen [H-W12]
Ergebnis	A14: Wiederverwendbarkeit der Datenbasis	Fallstudien 1,2,4 und 5
	A15: hinreichende Genauigkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fallstudien 1-5</li> <li>• Befragung von Industrieanwender:innen (Fragebogen [H-F1] und Interview [H-I1])</li> </ul>

## 7.1 Fallstudien – Motorsteuergeräte, Knickarmroboter und weitere

Für die Fallstudien wurde die Automobilindustrie als industrieller Anwendungskontext gewählt, weil dort komplexe technische Systeme entwickelt werden und durch regulatorische Vorgaben ein systematisches Anforderungs- und Änderungsmanagement etabliert ist. Dementsprechend wurden die Fallstudien 1 bis 3<sup>10</sup> im Rahmen des BMBF-Projekts ARCA (vgl. Kapitel 1.2) mit einem weltweit führenden Entwicklungsdienstleiter der Automobilbranche untersucht. Darüber hinaus wurden zur Generierung großer Datensätze unter kontrollierten Bedingungen zwei weitere Fallstudien erzeugt. Die Fallstudien behandeln die Entwicklung eines Kickarmroboters [Hie21] und vier studentische Entwicklungsprojekte zu mechatronischen Heimwerker-Produkten.

### Fallstudie 1: Motorsteuergerät Thermosteuerung (Kfz-Antriebsstrang)

Die Entwicklung eines Antriebsstrang-Steuengeräts zur Thermosteuerung wird als führende Industrie-Fallstudie verwendet. Das Projekt wurde sowohl für die entwicklungsbegleitende Validierung (vgl. Kapitel 6) als auch für die abschließende Validierung als Referenzprojekt für den Austausch mit Industrieanwender:innen genutzt. Die Fallstudie umfasst 200 Anforderungen. Das Motorsteuergerät dient dazu, positionsbezogene Daten eines Navigationsgeräts zu zeitbezogenen Daten umzurechnen (vgl. Abbildung 7-1). Durch zeitbezogene Daten kann berechnet werden, zu welchem Zeitpunkt eine bestimmte Motorleistung erforderlich ist. Mit dieser Information wird durch effizientes Thermomanagement der Kraftstoffverbrauch gesenkt. Weitere Anwendungsfelder sind die Darstellung von Informationen in Head-Up Displays und das autonome Fahren.

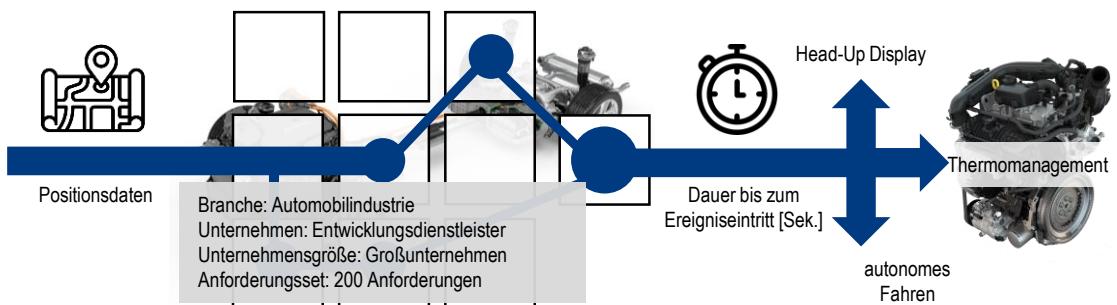


Abbildung 7-1: Übersicht der Fallstudie 1 - Motorsteuergerät Thermosteuerung  
(Bildquellen: Antriebsstrang [bmw.de], Motor [vw.de])

<sup>10</sup> Aufgrund von Vorgaben zur Geheimhaltung sind die Daten dieser Fallstudien nicht öffentlich.

## Fallstudie 2: Motorsteuergerät Verbrennungsprozess (Kfz-Antriebsstrang)

Die Entwicklung eines Antriebsstrang-Steuergeräts zur Konfiguration des Verbrennungsprozesses (sogenannte „Bedatung“) mit 100 Anforderungen wird im Rahmen von Fallstudie 2 betrachtet. Ziel der Konfiguration ist eine Kraftstoffeinsparung durch situative Parametrisierung der Steuerungssoftware (z. B. des Zündsystems und der Kraftstoffeinspritzung) (vgl. Abbildung 7-2). Abhängig von der zu erwartenden Fahrsituation (vgl. Fallstudie 1) werden die Parameter entsprechend vordefinierter Konfigurationen variiert.



Abbildung 7-2: *Übersicht der Fallstudie 2 - Motorsteuergerät Verbrennungsprozess*  
(Bildquellen: Antriebsstrang [vw.de] und Kolben [iav.de])

## Fallstudie 3: Austauschplattform für Entwicklungsdaten

Die dritte Fallstudie ist die Entwicklung einer Austauschplattform für Entwicklungsdaten innerhalb des Unternehmens. Diese Fallstudie wurde gewählt, weil die Pilotanwender:innen aus einer anderen Entwicklungsabteilung stammen und nicht in die Entwicklung der ProMaRC-Methodik eingebunden waren. So kann eine unvoreingenommene Bewertung der Methodik erfolgen. Die Fallstudie umfasst 400 Anforderungen.

## Fallstudie 4: Knickarmroboter

Als führende Fallstudie für die Datenanalyse wurde die Entwicklung eines Knickarmroboters ausgewählt (vgl. Abbildung 7-3). Dieser basiert auf dem Open-Source Entwicklungsprojekt BCN3D Moveo [BCN16]. Die frei verfügbaren Entwicklungsdaten (CAD-Daten sowie Montage- und Benutzeranleitung) wurden genutzt, um eine Anforderungsliste mit 145 Anforderungen und eine dazugehörige Abhängigkeitsmatrix mit 21.025 Einträgen zu erzeugen [Hie21].

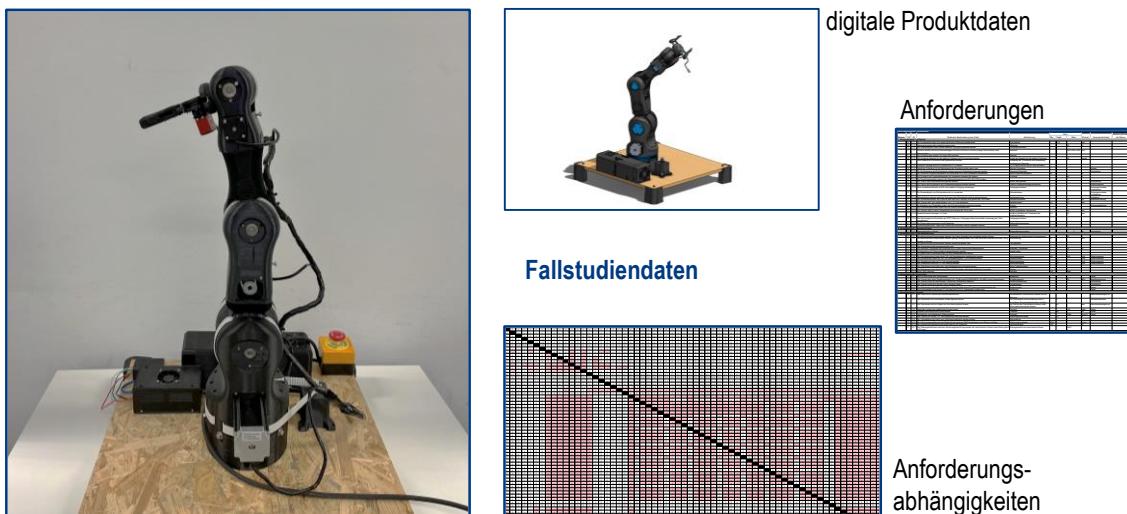


Abbildung 7-3: *Übersicht der Fallstudie 4 - Knickarmroboter*

### Fallstudie 5: Heimwerkerprodukte (Studienprojekte)

Als weitere Fallstudie wurden Entwicklungsprojekte von Master-Studierenden (Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen) begleitet. In 12 Kleingruppen (4-6 Personen) wurden über eine Dauer von drei Monaten mechatronische Heimwerkerprodukte (z. B. Akku-Bohrschrauber oder Lasermessgeräte) entworfen. Beginnend beim Geschäftsmodell wurde eine systematische Anforderungserhebung durchgeführt, Funktionen definiert, logische Lösungselemente erarbeitet und anhand der Systems Modeling Language (SysML) in Diagrammen ausgestaltet. Während der Entwicklung wurden neu gewonnene Erkenntnisse in Form von Anforderungsänderungen in die Anforderungsliste und die Abhängigkeitsmatrix integriert. Die vier besten Ergebnisse wurden für die Validierung der Methodik verwendet. Die Anforderungslisten hatten jeweils ca. 20 Anforderungen.

### Auswahl der Fallstudien

Bei der Auswahl der Fallstudien wurde berücksichtigt, dass alle für die Validierung erforderlichen Charakteristika abgedeckt sind. Fallstudien 1 und 2 beinhalten ähnliche Anforderungen. Deshalb kann die Veränderung der Methodik-Genauigkeit bei einer Wiederverwendung (insb. des KI-Modells) für Produkte einer Produktkategorie bewertet werden (Details siehe Kapitel 7.5). Fallstudie 3 wurde in einem anderen Kontext durchgeführt und umfasst inhaltlich abweichende Anforderungen (z. B. datenrechtliche Anforderungen oder Anforderungen an die Nutzer:innen-Interaktion). So kann die Veränderung der Methodik-Genauigkeit für andere Produktkategorien untersucht werden. Fallstudie 4 ist erforderlich, da es eine ausreichend große Datengrundlage für die Feinabstimmung des Abhängigkeitsnetzes bietet (vgl. Kapitel 6.2.1) und Anforderungen aus mehreren Disziplinen umfasst. Fallstudie 5 ermöglicht in Kombination mit Fallstudie 4 die Bewertung der Genauigkeit der Abhängigkeitsanalyse bei unterschiedlich heterogenen Trainingsdaten (Details siehe Kapitel 7.5).

## 7.2 Validierung der Methoden

Zur Untersuchung der Anforderungserfüllung wurde für die vier Anforderungen an die Methoden (A1-A4) ein gleichbleibendes Vorgehen gewählt (vgl. Abbildung 7-4). Zunächst erfolgte eine **Überprüfung der korrekten Funktionalität** anhand der Daten der Fallstudie 4. Dafür wurden die Methoden als Funktionalität im Software-Werkzeug implementiert. Anschließend wurden die Ergebnisse des Software-Werkzeugs mit einer manuellen Methoden-Anwendung verglichen.

Die Einbindung der Industrieanwender:innen wurde mithilfe von insgesamt sechs **Validierungsworkshops** per Videokonferenz durchgeführt. Die jeweils betrachtete Methode wurde zunächst in einem Vortrag auf konzeptioneller Ebene vorgestellt und diskutiert. Dann wurde die Funktionalität im Software-Werkzeug demonstriert. Im letzten Schritt wurde die Anforderungserfüllung von den Industrieanwender:innen bewertet. Differenziert wurden bei der Bewertung jeweils die Aspekte „akzeptabler Anwendungsaufwand“, „Verfügbarkeit der benötigten Informationen“ und „Qualität der Ergebnisse“ (nachvollziehbar und hinreichend genau). Neben einer mündlichen Erläuterung zur Anforderungserfüllung wurde eine der drei folgenden Klassen zugeordnet: „erfüllt“, „teilweise erfüllt“ oder „nicht erfüllt“. Zudem wurde nach unberücksichtigten Fehlerquellen und Einflussgrößen gefragt, um bisher unerkannte Korrekturbedarfe aufzudecken.

Nach dem Workshop wurde das Software-Werkzeug für **Pilotanwendungen** der Industrieanwender:innen bereitgestellt (Fallstudien 1-3). Ziel war es, dass Erfahrungen in der Praxisanwendung gesammelt werden konnten und die Methode bei Bedarf angepasst und erneut validiert wurde. Im Folgenden sind die Ergebnisse der Validierung je Methode und dazugehöriger Anforderung erläutert.

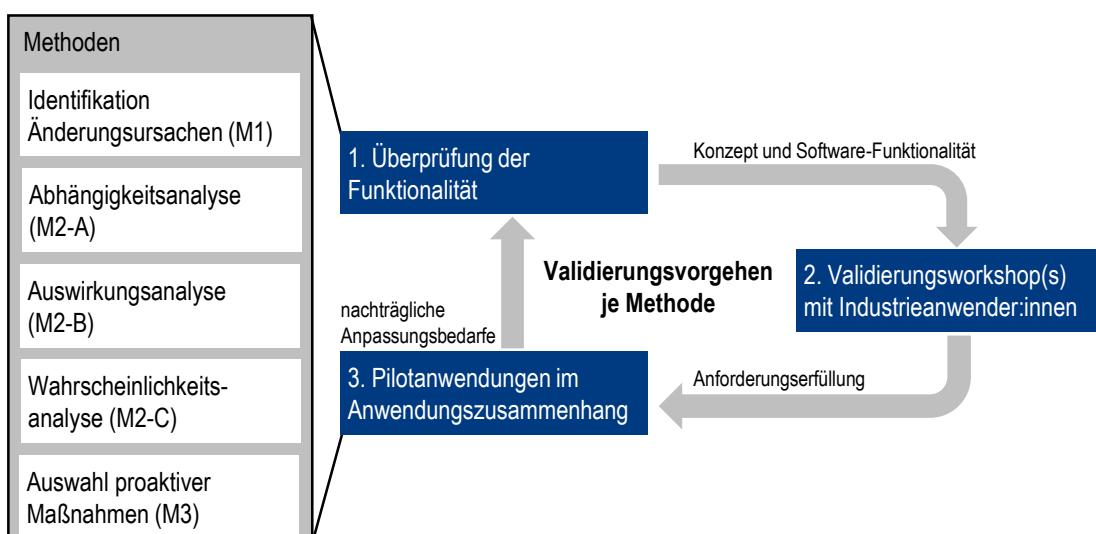


Abbildung 7-4: Aktivitäten zur Validierung der Methoden

## A1: Änderungsausbreitung

*Die Abhängigkeitsanalyse muss Abhängigkeiten zwischen Anforderungen hinsichtlich des Propagationspotenzials differenzieren.*

### Erfüllungskriterium

Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn die Abhängigkeitsanalyse (M2-A) bessere Leistungskennzahlen als alternative Ansätze aufweist (Funktionsprüfung) und die Industrieanwender:innen im Validierungsworkshop die Aspekte „akzeptabler Anwendungsaufwand“, „Verfügbarkeit der Informationen“ sowie „hinreichende Genauigkeit und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse“ als erfüllt bewertet haben.

### Bewertungsgrundlage

#### Funktionsprüfung

Für die Funktionsprüfung der Methode zur Abhängigkeitsanalyse wurde zunächst ein Datensatz zu **Fallstudie 4** (Knickarmroboter) aufgebaut. Der Datensatz besteht aus 145 Anforderungen und einer manuell erstellten Abhängigkeitsmatrix mit 21.025 Einträgen. In der Abhängigkeitsmatrix wurde neben der Existenz einer Abhängigkeit auch deren Typ differenziert (Propagationsverhalten). Der Datensatz wurde für die Prüfung in einen Test- und einen Trainingsdatensatz untergliedert (80% Trainingsdaten und 20% Testdaten). Da keine vollständig objektiven Daten zu Abhängigkeiten existieren, wird die systematische Bewertung von Expert:innen, die an der Systementwicklung beteiligt sind, als beste verfügbare Datenqualität (engl. Ground Truth) angenommen. Um dieser Annahme zu entsprechen, wurde der Datensatz vom Projektverantwortlichen für das Entwicklungsprojekt des Knickarmroboters erstellt [Hie21]. [GOH22]

Für den **Vergleich des Lösungsansatzes mit Alternativen** wurden im Rahmen einer Literaturstudie etablierte Ansätze für die Abhängigkeitsanalyse identifiziert [Hie21; GOH22; GPO20]. Die Alternativen sind: *Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT)*, *Multinomiale logistische Regression (MLR)*, *Support Vector Machine (SVM)* und *Recurrent Neural Network (RNN)*. Diese Alternativen wurden zum Zwecke des Vergleichs prototypisch implementiert [GOH22; Hie21].

Da nicht alle Ansätze fähig sind, den Typ der Abhängigkeiten zu unterscheiden, wurden individuelle **statistische Klassifikatoren zur Bewertung** der Ergebnisgüte definiert. Leistungskennwerte für den Vergleich sind „Precision“, „Sensitivität“, „F1-Score“ und „Receiver Operating Characteristic Area Under the Curve“ (ROC\_AUC). Precision (positiver prädiktiver Wert) nahe 1 weist auf zuverlässige Modelle hin. Sensitivität (Richtig-Positiv-Rate) nahe 1 deutet auf die Erkennung relevanter Elemente hin. Der F1-Score ist das harmonische Mittel aus Precision und Sensitivität. Der F1-Score misst das Ausmaß, in dem die Klassen ausgewogen verteilt sind. Der Wert zeigt die Genauigkeit des Modells an. ROC\_AUC misst die Leistung eines Klassifizierers und zeigt das Verhältnis zwischen

der Richtig-Positiv-Rate und der Falsch-Positiv-Rate. Diese Metrik wird häufig zur Bewertung unausgewogener Daten verwendet. Werte nahe 1 werden als zuverlässig angesehen. [Alp19, S. 580 ff.; GOH22]

### Bewertung der Industrieanwender:innen

Die Bewertung der Industrieanwender:innen wurde aufgrund der Komplexität der Abhängigkeitsanalyse im Rahmen der folgenden drei Workshops schrittweise durchgeführt: H-W8 (3 Teilnehmer), H-W10 (2 Teilnehmer) und H-W11 (3 Teilnehmer).

## **Validierungsergebnis**

### Funktionsprüfung

Um bei der Funktionsprüfung die Aussagekraft der Ergebnisse zu gewährleisten, mussten die Vergleichskriterien als Makro-Durchschnitt (engl. macro-average) betrachtet werden („gleiches Gewicht für alle Klassen“). Das ist notwendig, da der Datensatz unausgewogen ist und eine Hauptklasse (none) und mehrere Nebenklassen (Abhängigkeitstypen wie requires oder refines) aufweist. Bei Verwendung von Random-Oversampling und Class-Weighted als etablierte Ansätze zur Datenerweiterung (engl. data augmentation) erreicht BERT bessere Leistungskennwerte als die anderen Modelle (vgl. Tabelle 7-2). [GOH22]

*Tabelle 7-2: Leistungsvergleich unterschiedlicher Lösungsansätze für die Erkennung von Anforderungsabhängigkeiten [GOH22, S. 4]*

Leistungskennwerte	MLR	SVM	RNN	BERT
Precision (macro average)	20.47 %	24.00 %	22.07 %	<b>54.10 %</b>
Sensitivität (macro average)	21.30 %	23.43 %	60.92 %	<b>56.98 %</b>
F1 (macro average)	6.29 %	23.92 %	32.92 %	<b>55.12 %</b>
ROC_AUC (weighted average)	0.64	0.74	0.81	<b>0.93</b>

Die Werte von BERT für Precision, Recall und F1 sind im Hinblick auf ein Mehrklassen-Klassifikationsproblem akzeptabel, denn es wurde noch keinerlei Optimierung der Ansätze vorgenommen. Bei einer Zufallsauswahl wäre beispielsweise eine Precision von 25% zu erwarten. ROC\_AUC liegt für den BERT-Ansatz nahe am Optimum von 1. Daher wird BERT für die Abhängigkeitsanalyse verwendet (vgl. Kapitel 6.2.1) und die Funktionsfähigkeit festgestellt.

### Bewertung der Industrieanwender:innen

Im ersten Validierungsworkshop erfolgte die Überprüfung der industriellen Tauglichkeit von Ansätzen auf Basis von Künstlicher Intelligenz zur Sprachauswertung der Anforderungsbeschreibungen (insb. künstliche neuronale Netze). Diskutiert wurden die Aspekte **Anwendungsaufwand** und **Verfügbarkeit der Informationen** (H-W8). Dabei wurde unabhängig vom spezifischen Lösungsansatz abgefragt, ob das Erfordernis umfangreicher Trainingsdaten zum „Anlernen“ der künstlichen neuronalen Netze sowie die feh-

lende Nachvollziehbarkeit akzeptabel sind. Beides wurde von den drei Industrieanwendern:innen als akzeptabel eingeschätzt. Der hohe erforderliche Rechenaufwand des BERT-Ansatzes und die damit einhergehende Rechenzeit wurden mit den Industrievertreter:innen besprochen und mit Lösungsalternativen verglichen. Die Industrievertreter:innen bestätigten dabei die Wahl des BERT-Ansatzes, da die höhere Genauigkeit der Ergebnisse gegenüber dem Rechenaufwand als wichtiger eingeschätzt wurde (H-W10).

Die **Qualität der Ergebnisse** wurde von den Industrieanwender:innen als „erfüllt“ eingestuft, weil sowohl die Abhängigkeiten erkannt als auch deren Typ differenziert werden. Ein weiteres Ergebnis des Workshops war, dass eine Differenzierung zwischen Typen mit zwanghafter Propagation nicht erforderlich ist, wenn durch die Vereinfachung eine schnellere oder genauere Berechnung der Abhängigkeiten möglich wird. Davon wurde für die Validierung von Anforderung 15 „hinreichende Genauigkeit“ Gebrauch gemacht.

In einem abschließenden Workshop wurde der **Lernmechanismus** der Abhängigkeitsanalyse validiert H-W11. Dabei wurde von den drei Industrieanwender:innen sowohl der Anwendungsaufwand als auch die Verfügbarkeit der Informationen als „erfüllt“ und die kontinuierliche Verbesserung der Analyseergebnisse als positiv eingestuft.

**Validierungsergebnis: Anforderung 1 ist vollständig erfüllt.**

## A2: Änderungsauswirkung

*Die Auswirkungsanalyse muss lokale und kollektive Auswirkungen einer potenziellen Anforderungsänderung bewerten.*

### Erfüllungskriterium

Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn die Funktionsfähigkeit der Auswirkungsanalyse (M2-B) im Abgleich mit einer manuellen Methoden-Anwendung demonstriert werden konnte und die Industrieanwender:innen im Validierungsworkshop die folgenden drei Aspekte als „erfüllt“ bewertet haben: akzeptabler Anwendungsaufwand, Verfügbarkeit der Informationen sowie hinreichende Genauigkeit und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse.

### Bewertungsgrundlage

Für die Funktionsprüfung wird bei den mathematischen Berechnungen der konsekutiven Änderungseffekte ein Abgleich der automatisiert berechneten Kennwerte mit einer manuellen Durchführung der Methode vorgenommen (Datenbasis: Fallstudie 4). Die anschließende Bewertung der Industrieanwender:innen wurde im Rahmen der Workshops H-W8 und H-W10 durchgeführt.

## Validierungsergebnis

### Funktionsprüfung

Die interne Funktionsprüfung der Methode zur Auswirkungsanalyse hatte zwei Schwerpunkte: die Abschätzung der konsekutiven Änderungseffekte im Anforderungsnetz und die Abschätzung der kollektiven Auswirkungen. Die Abschätzung der lokalen Auswirkungen wird aus den genormten Systems Engineering-Prozessen abgeleitet, deren Validität als gegeben angenommen wird. Die Bewertung der **konsekutiven Änderungseffekte** beruht auf einem angepassten PageRank-Algorithmus. Als Vorgehen zur Absicherung der mathematischen Korrektheit der Anpassungen wurde manuell die Plausibilität der Ergebnisse geprüft [Kif21]. Die Bewertung der **kollektiven Änderungsauswirkungen** ist eine kombinierte Darstellung der lokalen Auswirkungen und konsekutiven Effekte, sodass für die Validierung deren korrekte Funktionalität im Software-Werkzeug sichergestellt wurde.

### Bewertung der Industrieanwender:innen

Im ersten Workshop mit Industrieanwender:innen H-W8 wurde die **Qualität der Ergebnisse** geprüft. Die Kriterien hierfür waren hinreichende Genauigkeit und Nachvollziehbarkeit. Die hinreichende Genauigkeit der Analyse wurde von den Industrieanwender:innen als „erfüllt“ eingeschätzt (vgl. Abbildung 7-5). Eine Rangfolge der Anforderungen entsprechend der erwarteten Auswirkungen im Anforderungsnetz schien angemessen zur Auswahl von Anforderungen für die manuelle Analyse. Da die Nachvollziehbarkeit beim PageRank-Algorithmus aufgrund des Rechenaufwands manuell kaum möglich ist, wurde als Alternative eine pfadspezifische Analyse auf Basis des Additionssatzes der Wahrscheinlichkeitsrechnung vorgestellt (vgl. Kapitel 6.2.3). Die pfadspezifische Analyse bietet für kleine Anforderungssets eine bessere Nachvollziehbarkeit. Durch die langen Propagationspfade nimmt die Nachvollziehbarkeit jedoch bereits ab der 3. Ordnung von Abhängigkeiten und bei mehr als 10 Anforderungen stark ab. Zudem steigt der Rechenaufwand exponentiell mit der Anzahl an Anforderungen an, sodass lange Verarbeitungszeiten entstehen. Die Industrieanwender:innen werteten den Vorteil in der Nachvollziehbarkeit als weniger bedeutsam gegenüber der längeren Rechenzeit und dem damit einhergehenden **Anwendungsaufwand**. Das Defizit einer unzureichenden Nachvollziehbarkeit wurde als tolerabel eingestuft, weil mit dem PageRank ein minimaler Anwendungsaufwand erreicht werden kann. Der Priorisierung folgend wurde der PageRank gewählt und der Anwendungsaufwand als „erfüllt“ bewertet.

Die **Verfügbarkeit der benötigten Informationen** wurde im zweiten Workshop H-W10 adressiert und als „erfüllt“ eingeschätzt. Während die Bewertung der konsekutiven Effekte vollautomatisiert erfolgt, ist für die Abschätzung der Auswirkungen Expertenwissen erforderlich. Durch die Möglichkeit, bedarfsgerecht Fachexpert:innen für den Fragebogen hinzuzuziehen, wurde dies als praxistauglich eingestuft. Die im Vorfeld angegebene Integration einer KO-Frage je Leitfaden-Kategorie (vgl. Kapitel 6.2.2) wurde als

hilfreich bestätigt. Zudem wurde zur Übersichtlichkeit der Darstellung das Filtern erkannter Abhängigkeiten hinsichtlich ausgehender Abhängigkeiten bis maximal 2. Ordnung bestätigt. Die Möglichkeit, das vorkalkulierte Ergebnis manuell anzupassen, wurde ebenfalls als vorteilhaft zur Sicherstellung der hinreichenden Genauigkeit bewertet.

### Validierungsergebnis: Anforderung 2 ist vollständig erfüllt.

**1**

**Manuelle Auswirkungsanalyse**

ID	Anforderungstext	ActiveRank
ID117	Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten Hardwarekomponenten mit unterschiedlichen Volt Gleichstrom zu versorgen	1
ID116	Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten ein Arduino Mega mit 12 Volt Gleichstrom zu versorgen	0,9
ID115	Der Knickarmroboter muss fähig sein 230 Volt Wechselstrom zu transformieren	0,83
ID114	Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten Hardwarekomponenten mit unterschiedlichen Volt Gleichstrom zu versorgen	0,75
ID113	Der Knickarmroboter muss fähig sein 230 Volt Wechselstrom zu transformieren	0,75
ID112	Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten einen Transformator anzuschließen	0,62
		0,55
		0,43
		0,42

**2**

**1 Architektur & Design**

Betrifft eine Änderung die Architektur oder das Design des Systems?

Müssten neue Systemelemente entwickelt werden?  Ja  Nein  Vielleicht

Müssten Systemelemente überarbeitet werden?  Ja  Nein  Vielleicht

Müsste die Systemgrenze neu definiert werden?  Ja  Nein  Vielleicht

Müsste die Funktionsstruktur überarbeitet werden?  Ja  Nein  Vielleicht

Müsste die Wirkstruktur überarbeitet werden?  Ja  Nein  Vielleicht

Müssten interne Schnittstellen überarbeitet werden?  Ja  Nein  Vielleicht

Müssten neue Flüsse berücksichtigt werden?  Ja  Nein  Vielleicht

Müssten neue Störflüsse berücksichtigt werden?  Ja  Nein  Vielleicht

**3**

**Abschätzung von lokalen Änderungsauswirkungen - ARCA Tool 2.1**

**Ergebnis: Bewertung der lokalen Änderungsauswirkungen**

Skalierung des Ergebnisses auf 0-100 ist intuitiv

Ergebnis manipulierbar durch Anwender:innen programmieren

**Abhängigkeiten bis zur 2. Ordnung werden dargestellt --> für eine nähere Betrachtung kann die Abhängigkeitskarte aufgerufen werden**

**Abhängigkeiten**

- ID117 Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten Hardwarekomponenten mit unterschiedlichen Volt Gleichstrom zu versorgen
- ID104 Die Welle muss einen Durchmesser von 10 mm haben.
- ID113 Der Knickarmroboter muss fähig sein 230 Volt Wechselstrom zu transformieren
- ID105 Die Welle sollte aus DIN EN-AW 7075 oder ähnlich sein.
- ID109 Die Lagetoleranz liegt zwischen 0,1 und 0,2 Millimetern.

**Bewertung der Anforderungserfüllung (Ampelsystem)**

- grün erfüllt
- gelb teilweise erfüllt
- rot nicht erfüllt

**Aufgaben**

- A<sub>1</sub>: Verarbeitbarkeit von komplexen Anforderungssets
- A<sub>2</sub>: Einfache Anwendung
- A<sub>3</sub>: Akzeptabler Anwendungsaufwand Zeitbedarf für Berechnung unklar
- A<sub>4</sub>: Integration in Systems Engineering Ansatz
- A<sub>5</sub>: Verfügbarkeit der benötigten Software
- A<sub>6</sub>: Verfügbarkeit der benötigten Informationen z.T. ergänzende Bilder
- A<sub>7</sub>: Industrielle Anwendbarkeit falls wiederverwendbar
- A<sub>8</sub>: Flexibilität
- A<sub>9</sub>: Wiederverwendbarkeit in ähnlichen Produktentwicklungsprojekten
- A<sub>10</sub>: Qualität der Ergebnisse (nachvollziehbar und hinreichend genau) Hinreichend genau: noch unklar die quantitative Genauigkeit
- A<sub>11</sub>: Unberücksichtige Fehlerquellen und Einflussgrößen

**Hinreichend genau: noch unklar die quantitative Genauigkeit**

**Differenzierung der Typen (refines, requires): vorteilhaft nicht zwingend erforderlich**

**Nachvollziehbar: In Ordnung in der Praxisanwendung**

Abbildung 7-5: Auszug aus H-W10 Workshop-Ergebnissen

### A3: Exogene und endogene Änderungswahrscheinlichkeit

*Die Wahrscheinlichkeitsanalyse muss die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Änderung durch exogene und endogene Initiatoren bewerten.*

#### Erfüllungskriterium

Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn die Funktionsfähigkeit der Wahrscheinlichkeitsanalyse (M2-C) im Abgleich mit einer manuellen Methoden-Anwendung demonstriert werden konnte und die Industrieanwender:innen im Validierungsworkshop die folgenden drei Aspekte als „erfüllt“ bewertet haben:

- 1) akzeptabler Anwendungsaufwand,
- 2) Verfügbarkeit der Informationen sowie hinreichende Genauigkeit und
- 3) Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse.

#### Bewertungsgrundlage

Für die Funktionsprüfung wird auf Basis der Daten von Fallstudie 4 ein Abgleich der automatisiert berechneten Kennwerte mit einer manuellen Durchführung der Methode vorgenommen. Differenziert werden dafür die Funktionalitäten zur Ermittlung der exogenen Änderungswahrscheinlichkeit, der endogenen Änderungswahrscheinlichkeit und des daraus berechneten Erwartungswerts. Die Bewertung der Industrieanwender:innen wurde im Rahmen des Workshops H-W9 (5 Teilnehmer) durchgeführt.

#### Validierungsergebnis

##### Funktionsprüfung

Zunächst wurde die Bewertung der **exogenen Änderungswahrscheinlichkeit** untersucht. Da die Kategorien von Änderungsinitiatoren aus bestehenden Literaturansätzen abgeleitet wurden, erfolgte ausschließlich eine Funktionsprüfung der Software-Funktionalitäten (Zuweisung von Initiatoren, Auswahl von Vergleichsprojekten) durch Abgleich mit manueller Berechnung. Die Bewertung der **endogenen Änderungswahrscheinlichkeit** baut auf dem wissenschaftlich erprobten PageRank-Algorithmus auf, sodass hier ausschließlich die kontextspezifischen Anpassungen auf mathematische Korrektheit überprüft wurden. Dafür wurden Testdatensätze analysiert und die Bewertung manuell auf Plausibilität (Korreliert der ermittelte Rang mit dem Grad der Vernetztheit und der Abhängigkeitsrichtung?) geprüft [Kif21].

Die Zusammenführung der exogenen und endogenen Änderungswahrscheinlichkeit zu einem übergreifenden **Erwartungswert der Änderungswahrscheinlichkeit** folgt mathematisch vorgegebenen Regeln. Zur Prüfung der Korrektheit wurden die Ergebnisse von Software-Analyse und manueller Analyse verglichen.

### Bewertung der Industrieanwender:innen

Im Rahmen des Validierungsworkshops wurden die Aspekte **akzeptabler Anwendungsaufwand** und **Verfügbarkeit der Informationen** als „erfüllt“ bewertet. Explizit einbezogen wurden dabei das Integrieren historischer Projekte als Vergleichsprojekte und die damit einhergehende Erfassung der Änderungsursachen. Die **Qualität der Ergebnisse** wurde als „teilweise erfüllt“ bewertet, weil die Nachvollziehbarkeit nicht vollständig gewährleistet ist. Als Verbesserungsvorschlag wurde eine Erläuterung in der Benutzeranleitung empfohlen. Der Vorschlag wurde umgesetzt (vgl. Anhang A7.3), sodass auch die Qualität der Ergebnisse als „erfüllt“ bewertet wurde.

**Validierungsergebnis: Anforderung 3 ist vollständig erfüllt.**

### **A4: Anforderungsspezifische Maßnahmen**

*Die Identifikation potenzieller Änderungsursachen sowie die Auswahl proaktiver Maßnahmen muss anforderungsspezifische Handlungsmaßnahmen vorschlagen.*

### **Erfüllungskriterium**

Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn die Funktionsfähigkeit der Identifikation von Änderungsursachen (M1) und proaktiver Maßnahmen (M3) im Abgleich mit einer manuellen Methoden-Anwendung demonstriert werden konnte und die Industrieanwender:innen im Validierungsworkshop die folgenden drei Aspekte als „erfüllt“ bewertet haben: akzeptabler Anwendungsaufwand, Verfügbarkeit der Informationen sowie hinreichende Genauigkeit und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse.

### **Bewertungsgrundlage**

Für die Funktionsprüfung der Methoden zur Identifikation potenzieller Änderungsursachen und zur Auswahl von proaktiven Maßnahmen wurde der Fokus auf die Software-Funktionalitäten gelegt, da die Maßnahmen und Strategien aus der Literatur abgeleitet und als valide angenommen wurden. Zur Prüfung der Software-Funktionalitäten wird ein Abgleich der automatisiert berechneten Ergebnisse mit einer manuellen Durchführung der Methode als Bewertungsgrundlage verwendet (Datenbasis: Fallstudie 4). Die Bewertung der Industrieanwender:innen wurde im Rahmen der Workshops H-W4 (2 Teilnehmer), H-W5 (2 Teilnehmer) und H-W11 (3 Teilnehmer) durchgeführt.

### **Validierungsergebnis**

#### Funktionsprüfung

Bei der Funktionsprüfung wurden folgende drei Aspekte gegenüber einer manuellen Ermittlung auf Übereinstimmung geprüft:

- 1) Darstellung der Qualitätsdefizite,
- 2) Darstellung im Risikoportfolio und
- 3) Empfehlungsmechanismus.

Dabei wurden in mehreren Entwicklungsiterationen auch Anregungen der Industrieanwender:innen integriert. Beispielsweise, dass Wörter mit Qualitätsdefiziten innerhalb eines Anforderungstextes farblich markiert werden. In mehreren Entwicklungsiterationen konnten alle Anregungen implementiert und die Funktionsfähigkeit festgestellt werden.

#### Bewertung mit Industrieanwender:innen

Im ersten Workshop H-W4 wurden die Qualitätsprüfung und das Risikoportfolio hinsichtlich **Qualität der Ergebnisse** bewertet. Hier wurde die Nachvollziehbarkeit anhand der Achsenbeschriftung als „erfüllt“ und die hinreichende Genauigkeit (Punkte mit variablen Umfang) als „teilweise erfüllt“ eingestuft. Zwei Verbesserungspotenziale wurden benannt. Bei der Qualitätsprüfung könnte die Übersichtlichkeit der Darstellung verbessert werden, wenn erkannte und tolerierte Defizite dauerhaft ausgeblendet werden. Hinsichtlich des Risikoportfolios wurde als Verbesserungspotenzial die vollständige Darstellung aller Anforderungen im Portfolio gesehen, denn zu diesem Zeitpunkt wurden ausschließlich die manuell bewerteten Anforderungen visualisiert.

Im zweiten Workshop H-W5 stand die Validierung der Maßnahmen zur Identifikation von Änderungsursachen, die proaktiven Maßnahmen zur Handhabung von Änderungsrisiken und der Auswahlmechanismus im Fokus. Die Maßnahmen wurden vorgestellt und um Vorschläge der zwei Industrieanwender:innen angereichert bzw. in der Formulierung angepasst (vgl. Abbildung 7-6). Anschließend wurde die hinreichende Genauigkeit als „erfüllt“ bestätigt. Beim Auswahlmechanismus standen der Anwendungsaufwand und die Verfügbarkeit der erforderlichen Informationen zur Diskussion. Der **Anwendungsaufwand** wurde positiv bewertet, da auf Basis der Empfehlungen lediglich eine Auswahl zu treffen ist. Auch die **Verfügbarkeit der Informationen** wurde als „erfüllt“ eingeschätzt, weil durch die Detailansichten im Software-Werkzeug zusätzliche Informationen zu Qualitätsdefiziten und dem Änderungsrisiko abrufbar sind.

Im dritten Workshop H-W11 wurde die Möglichkeit aufgezeigt, die Kriterien der Qualitätsprüfung flexibel im Softwarecode anzupassen. Außerdem wurden das angepasste Risikoportfolio sowie der Empfehlungsmechanismus validiert. Im Risikoportfolio wurden nun alle Anforderungen visualisiert und die Ergebnisse der manuellen Analyse durch eine Farbmarkierung hervorgehoben. Die hinreichende Genauigkeit der Ergebnisse wurde nach dieser Anpassung als „erfüllt“ bewertet. Da der Empfehlungsmechanismus vollautomatisiert ist, entfielen die Abfrage zum Arbeitsaufwand und der Informationsverfügbarkeit. Stattdessen wurden die Nachvollziehbarkeit und hinreichende Genauigkeit bewertet. Die Nachvollziehbarkeit wurde durch eine Erläuterung in der Benutzeranleitung als ausreichend eingeschätzt. Ebenso wurde die hinreichende Genauigkeit als gegeben

gesehen, weil durch die Verwertung historischer Nutzungsdaten ausschließlich eine Tendenz ermittelt wird und Expert:innen weiterhin die Möglichkeit haben aus der vollständigen Liste von Maßnahmen eine geeignete Maßnahme auszuwählen.

### Validierungsergebnis: Anforderung 4 ist vollständig erfüllt.



★ Aktuell angewandt in der Unternehmenspraxis

Abbildung 7-6: Auszug aus H-W5 Workshop-Ergebnissen

## 7.3 Validierung der Verarbeitbarkeit unterschiedlicher Eingangsdaten

Die Erfüllung der Anforderungen an die Eingangsdaten wurde auf Grundlage von Eingangsdaten aus Fallstudie 4 bewertet. Die Absicherung der Validierungsergebnisse in der industriellen Praxis erfolgte durch die Pilotanwendungen der Industrieanwender:innen (Fallstudien 1-3).

### A5: Interdisziplinarität der Anforderungen

*Ein Anforderungsset mit Anforderungen aus verschiedenen Disziplinen (z. B. Mechanik, Elektronik / Elektrotechnik und Softwaretechnik) und Spezifikationsleveln muss hinsichtlich des Änderungsrisikos bewertbar sein.*

#### Erfüllungskriterium

Als „vollständig erfüllt“ gilt die Anforderung, wenn der Workflow des Software-Werkzeugs (vgl. Kapitel 6.4) ohne Einschränkung mit einem interdisziplinären Anforderungsset durchgeführt werden kann.

#### Bewertungsgrundlage

Ob Anforderungen aus verschiedenen Disziplinen bewertet werden können, wurde auf Grundlage des Software-Werkzeug und des Anforderungssets der Fallstudie 4 untersucht. Das Anforderungsset eignet sich, da es 145 Anforderungen aus der Mechanik, Elektronik und Softwaretechnik beinhaltet. Zudem sind Anforderungen unterschiedlicher Spezifikationslevel vorhanden (vgl. Anhang A9).

#### Validierungsergebnis

Die Anwendung der ProMaRC-Methodik für das Anforderungsset des Knickarmroboters konnte mittels Software-Werkzeug ohne Einschränkung durchgeführt werden. Gleiches gilt für die Pilotanwendungen (Fallstudien 1-3), in denen ebenfalls alle Schritte durchlaufen wurden. Da die Abhängigkeitsanalyse vollautomatisiert erfolgt und durch die Einbindung des BERT-Ansatzes nicht manuell nachvollzogen werden kann, wurden Leistungskennwerte zur Absicherung der korrekten Durchführung geprüft. Hier zeigte sich, dass gute Ergebnisse (vgl. Anforderung 1) eine korrekt erfolgte Abhängigkeitsanalyse zwischen Anforderungen gleicher sowie unterschiedlicher Disziplinen annehmen lassen. Aus den Ergebnissen geht auch die Annahme hervor, dass die Analyse für Anforderungen unterschiedlicher Spezifikationslevel korrekt erfolgt. Daher wird die Anforderung als „vollständig erfüllt“ bewertet.

**Validierungsergebnis: Anforderung 5 ist vollständig erfüllt.**

## A6: Hohe Anforderungsanzahl

*Ein Anforderungsset mit einer hohen Anzahl an Anforderungen muss hinsichtlich des Änderungsrisikos bewertbar sein.*

### Erfüllungskriterium

Als „vollständig erfüllt“ gilt die Anforderung, wenn die Rechenzeit der Abhängigkeitsanalyse einen Schwellwert von fünf Stunden nicht überschreitet. Der Schwellwert wurde definiert, indem Industrieanwender:innen befragt wurden, ab welcher Rechenzeit die Durchführbarkeit als eingeschränkt gilt (H-W10). Die mehrstündige Rechenzeit ist akzeptabel, da die Berechnung parallel zu anderen Aufgaben erfolgen kann. Eine exakte Anzahl an Anforderungen, die innerhalb dieser Zeit zu verarbeiten sind, konnte von den Industrieanwender:innen nicht definiert werden. In der Regel umfassen die zu analysierenden Anforderungssets 50 bis 500 Anforderungen.

### Bewertungsgrundlage

Die Prüfung der Verarbeitbarkeit einer hohen Anzahl von Anforderungen erfolgte in zwei Schritten. Im ersten Schritt wurde ermittelt, für welche Methode die Durchführbarkeit durch die Anzahl der Anforderungen beeinflusst wird. Dabei zeigte sich, dass die Durchführbarkeit der Abhängigkeitsanalyse aufgrund der erforderlichen Rechenleistung zu prüfen ist. Die weiteren Methoden werden manuell durchgeführt oder es werden Ansätze verwendet, die als recheneffizient erprobt sind (PageRank in M2-B und M2-C siehe [GTO19; BP98] und Qualitätsprüfung in M1 siehe [Bou19]). Der steigende Anwendungsaufwand für manuelle Aktivitäten wird im Rahmen von Anforderung 12 bewertet.

Im zweiten Schritt fand die Prüfung der Abhängigkeitsanalyse statt. Dafür wurde die Rechenzeit für ein einzelnes Anforderungspaar ermittelt. Anhand dieser Kennzahl kann die Rechenzeit für beliebig umfangreiche Anforderungssets mathematisch ermittelt werden, da der Algorithmus sukzessive alle Anforderungspaaare analysiert. Zur Ermittlung der Kennzahl wurden zufällige Anforderungssets mit 150, 250, 500 und 1500 Anforderungen geprüft. Durch die Analyse unterschiedlicher Anforderungssets konnte ausgeschlossen werden, dass entgegen der Erwartung weitere Einflussgrößen vorhanden sind.

Ermittelt wurde die Rechenzeit je Anforderungspaar für zwei repräsentative Rechenleistungen: 16 GB RAM/i7 CPU (handelsüblicher Arbeitslaptop; Lenovo ThinkPad) und 13 GB RAM / P100-GPU (leistungsfähiger Cloud-Sever; Google Colab). [GOH22]

## Validierungsergebnis

Die Rechenzeit für die Abhängigkeitsanalyse liegt für alle Anforderungssets konstant bei 2 Sekunden (handelsüblicher Laptop) bzw. 0,001 Sekunden (leistungsfähiger Cloud-Sever) je Anforderungspaar. Für einen handelsüblichen Laptop sind bis zu 95 Anforderungen und bei Verwendung eines Cloud-Severs bis zu 4250 Anforderungen innerhalb von fünf Stunden und damit ohne Einschränkung verarbeitbar (vgl. Abbildung 7-7). Zum Vergleich wird die manuelle Bearbeitungszeit ergänzt (Annahme: 10 Sekunden je Anforderungspaar). Hier zeigt sich, dass bereits für 43 Anforderungen 5 Stunden manueller Aufwand entstehen. Die Abhängigkeitsanalyse eliminiert diesen Aufwand vollständig, kann eine höhere Anzahl an Anforderungen verarbeiten und eröffnet damit die Möglichkeit neben Komponenten auch Teil- und Gesamtsysteme mit deutlich mehr Anforderungen zu verarbeiten.

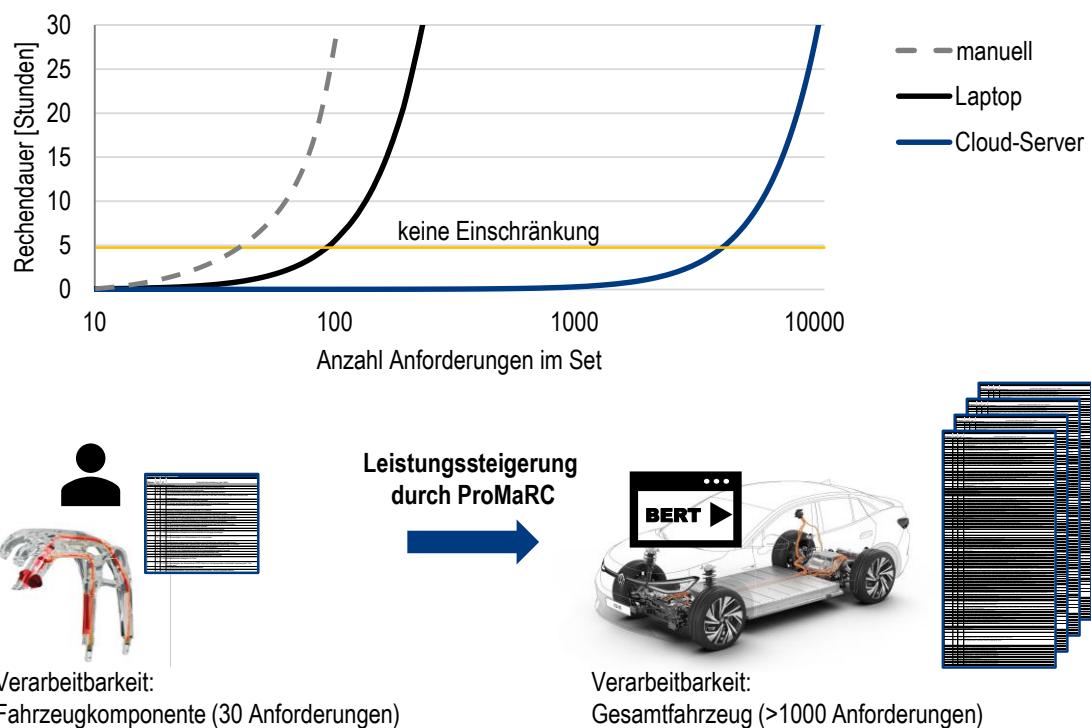


Abbildung 7-7: Rechenzeit der Abhängigkeitsanalyse für unterschiedlich umfangreiche Anforderungssets und dadurch erreichte Leistungssteigerung (Bildquellen: Heckflügelhalter [EDAG AG] und Fahrzeug [vw.de])

Da nur bei ausreichender Rechenleistung sehr umfangreiche Anforderungssets verarbeitbar sind, wird die Anforderung trotz der Leistungssteigerung in Abstimmung mit den Industrieanwender:innen als „teilweise erfüllt“ bewertet.

**Validierungsergebnis: Anforderung 6 ist teilweise erfüllt.**

## A7: Standardmäßige Dokumentationsform

*Eine Anforderung muss in natürlichsprachiger Dokumentationsform auswertbar sein.*

### Erfüllungskriterium

Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn eine natürlichsprachige Dokumentationsform korrekt in die Datenbank importiert und verarbeitet werden kann.

### Bewertungsgrundlage

Das Anforderungsset des Knickarmroboters ist die Datenbasis der Untersuchung. Das Anforderungsset eignet sich, weil alle Anforderungen über einen natürlichsprachigen Beschreibungstext in deutscher Sprache verfügen.

### Validierungsergebnis

Die Funktionsfähigkeit von Import und Export wurde über die Speicherung in der Datenbank des Software-Werkzeugs (Import) bzw. der korrekten Darstellung im Ausgabeformat (Export) manuell geprüft. Hinsichtlich der dazwischen stattfindenden Verarbeitung liegt der Fokus auf der Abhängigkeitsanalyse, da nur für diese Methode die Anforderungsbeschreibungen ausgewertet werden. Hier wurden im Programmcode die korrekte Funktionsweise und die Plausibilität der Ergebnisse manuell geprüft. Zudem erfolgte im Rahmen der Validierung von Anforderung 15 eine Überprüfung der Analysegenauigkeit, welche die korrekte Funktionsweise bestätigt.

Bei Import, Verarbeitung und Export fand eine fehlerfreie Verarbeitung der natürlichsprachigen Beschreibung statt, sofern die Vorgaben an Formatierung und Layout der Ein- und Ausgabedaten eingehalten wurden. Daher wird die Anforderung als „vollständig erfüllt“ bewertet.

**Validierungsergebnis: Anforderung 7 ist vollständig erfüllt.**

## 7.4 Validierung der Anwendbarkeit

Als übergreifende Methode zur Validierung der Anwendbarkeit wurde die Erprobung in einem industriellen Kontext (Pilotanwendungen von Industrieanwender:innen) mit anschließender Befragung gewählt. Den Industrieanwender:innen stand neben dem Software-Werkzeug ein Benutzerhandbuch und ein Einführungsvideo (vgl. Kapitel 6.4) zur Verfügung. Auf eine Begleitung bei der Anwendung wurde verzichtet, damit die Bewertung möglichst unbeeinflusst bleibt.

Die Industrieanwender:innen wurden so ausgewählt, dass Erfahrung in der Anforderungsentwicklung vorhanden ist und die Methodik-Anwendung in ihren derzeitigen Aufgabenbereich fällt. Um die Einschätzungen der Industrieanwender:innen zu objektivieren und Verzerrungen (z. B. emotionale Voreingenommenheit [MK11]) zu reduzieren, wurde bei der Befragung in einem ersten Schritt Feedback über einen selbst auszufüllenden **Fragebogen** gesammelt. Der Fragebogen (H-F1; vgl. Anhang A2.1) orientiert sich an den Empfehlungen nach PORST [Por14] und beinhaltet 33 Fragen zu den Kategorien „Allgemeines“, „Nutzerfreundlichkeit“, „Verfügbarkeit von Informationen“, „Anwendungsaufwand“, „Genauigkeit der Ergebnisse“ sowie „Methodik-Erfolg“.

Die Kategorien resultierten aus den zu bewertenden Anforderungen und wurden um die Validierung des Methodik-Erfolgs angereichert (vgl. Kapitel 7.6). Die Bewertung erfolgte anhand der ungeraden Likert Skala mit 5 Merkmalsausprägungen verwendet [Lik32]: „stimme zu“ (2), „stimme eher zu“ (1), „teils / teils“ (0), „stimme eher nicht zu“ (-1) „und stimme nicht zu“ (-2).

Die Likert Skala wurde Alternativen (z. B. Guttman-Skalen, Kunin-Skalen, semantische Differentiale oder Thurstone-Skalen [Por14, S. 95]) vorgezogen, da Sie einen hohen Bekanntheitsgrad hat und vielseitig ist. Der Bekanntheitsgrad reduziert das Risiko einer fehlerhaften Anwendung und die Vielseitigkeit ermöglicht die einheitliche Verwendung der Skala für die überwiegende Anzahl der Fragenkategorien. Lediglich für die Kategorie „Verfügbarkeit von Informationen“ hat eine binäre Skala mit „verfügbar“ und „nicht-verfügbar“, weil in diesem Fall eine Differenzierung nicht für sinnvoll erachtet wurde.

Auf Grundlage der Fragebogen-Ergebnisse wurde in einem zweiten Schritt ein semi-strukturiertes **Einzelinterview** (ca. 45 Minuten) mit den Industrieanwender:innen (H-I1) durchgeführt. Inhalt der Interviews waren Auffälligkeiten im Fragebogen (z. B. stark abweichende Bewertungen zwischen den Industrieanwender:innen oder negative Bewertungen) sowie offenes Feedback abseits der Fragebogen-Kategorien. Ziel der Interviews war es, Details zu Kritikpunkten und persönlichen Einschätzungen zu sammeln. Durch die Gestaltung als Einzelinterview sollten Beeinflussungen auf persönlicher Ebene vermieden und allen Pilotanwender:innen ausreichend Gesprächszeit eingeräumt werden. Bei einzelnen Anforderungen weicht die Validierungsmethode von der Befragung ab (vgl. Tabelle 7-1).

## A8: Einfache Anwendung

*Die Anwendung der Methodik muss als einfach wahrgenommen werden.*

### Erfüllungskriterium

Bei der einfachen Anwendung (im Sinne der Nutzerfreundlichkeit nach [ISO/IEC 25010]) wird zwischen den Methoden und der Benutzerschnittstelle differenziert. Wenn die Anforderung für die Methoden (M1-3) und die Benutzerschnittstelle vollständig erfüllt ist, gilt die Anforderung für die Methodik als „vollständig erfüllt“.

Für die einzelnen Methoden ist die Anforderung „vollständig erfüllt“, wenn in Validierungsworkshops die einfache Anwendung von Industrieanwender:innen bestätigt wurde. Für die Benutzerschnittstelle gilt die Anforderung als „vollständig erfüllt“, wenn auf der System Usability Scale (SUS) [Bro96] ein Wert über 51% [0; 100] erreicht wird. Die SUS basiert auf einem etablierten Fragebogen und wird verwendet, da im Gegensatz zu anderen standardisierten Fragebögen (z. B. User Experience Questionnaire [LHS08]) eine ein-dimensionale Gesamtbewertung errechnet wird und anhand empirisch belegter Schwellwerte (z. B. aus [BKM09]) interpretiert werden kann. Auf die Formulierung individueller Fragen wurde verzichtet, weil standardisierte und erprobte Fragebögen zur Nutzerfreundlichkeit von Benutzerschnittstellen verfügbar sind und eine wenig verzerrte Bewertung ermöglichen.

51% wird als Schwellwert angegeben, ab dem eine ausreichende gute Nutzerfreundlichkeit vorliegt (SUS-Kategorie „OK“) [BKM09]. Durch den prototypischen Charakter wird keine höhere Wertung gefordert. Primär soll ausgeschlossen werden, dass eine zu geringe Nutzerfreundlichkeit der Benutzerschnittstelle die Anwendbarkeit der ProMaRC-Methodik insgesamt einschränkt.

### Bewertungsgrundlage

Als Bewertungsgrundlage werden die Workshops H-W4, H-W5, H-W8, H-W9, H-W10 und H-W11 sowie die Auswertung der Befragung der Industrieanwender:innen (H-F1 und H-I1) verwendet.

Die Bewertung der Anwendbarkeit der Methodik wird zweischrittig durchgeführt, um Verzerrungen zu reduzieren, die durch die Benutzerschnittstelle des Software-Werkzeugs verursacht werden [BC09, S. 300]. Beispielsweise können Schwächen eines Prototypens wie fehlende Sekundärfunktionalitäten (z. B. Rollen- und Rechtemanagement) zu Nutzerfrustration und Verzerrungen führen [BC09, S. 300].

Der erste Schritt beruht auf der experimentellen Methode „Participative design“ [BC09, S. 301] und prüft die Erfüllung der Anforderung „einfache Anwendung“ für die einzelnen **Methoden**. Dafür wurde in den Workshops zur Validierung der Methoden (vgl. Kapi-

tel 7.2) die jeweilige Methode vorgeführt. Anschließend haben die Industrieanwender:innen bewertet, ob die vorgestellte Methode einfach anwendbar ist oder Anpassungen erforderlich sind. Durch das Vorführen der Methode konnten Rückmeldungen aktiv auf die Methode fokussiert und der Einfluss der Benutzerschnittstelle sowie fehlender Sekundärfunktionalitäten reduziert werden.

Die Überprüfung der einfachen Anwendbarkeit der **Benutzerschnittstelle** erfolgte im zweiten Schritt. Dafür haben die Industrieanwender:innen die Methodik eigenständig im Praxiskontext (Fallstudien 1-3) angewendet und anhand des SUS-Fragebogens bewertet. So konnte eine Bewertung unter realen Umgebungsbedingungen ermittelt werden. Der SUS-Fragebogen umfasst folgende Thesen [Bro96]:

- 1) Ich kann mir sehr gut vorstellen, das System regelmäßig zu nutzen.
- 2) Ich empfinde das System als unnötig komplex.
- 3) Ich empfinde das System als einfach zu nutzen.
- 4) Ich denke, dass ich technischen Support brauchen würde, um das System zu nutzen.
- 5) Ich finde, dass die verschiedenen Funktionen des Systems gut integriert sind.
- 6) Ich finde, dass es im System zu viele Inkonsistenzen gibt.
- 7) Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Leute das System schnell zu beherrschen lernen.
- 8) Ich empfinde die Bedienung als sehr umständlich.
- 9) Ich habe mich bei der Nutzung des Systems sehr sicher gefühlt.
- 10) Ich musste eine Menge Dinge lernen, bevor ich mit dem System arbeiten konnte.

## **Validierungsergebnis**

### **Einfache Anwendung der Methoden**

Falls Anpassungen an der Methodenanwendung oder der Software-Funktionalität im Rahmen der Workshops vorgeschlagen wurden (z. B. die Integration einer Statusanzeige bei der Abhängigkeitsanalyse), erfolgte nach einer Machbarkeitsabschätzung deren Umsetzung. Die Anpassungen wurden im Rahmen des nachfolgenden Workshops erneut vorgestellt und diskutiert. Da alle Anpassungsbedarfe mit Bezug zu den Methoden integriert und als zufriedenstellend bewertet wurden, gilt die einfache Anwendbarkeit der Methoden als „erfüllt“.

## Einfache Anwendung der Benutzerschnittstelle

Die Benutzerfreundlichkeit des Software-Werkzeugs wurde durchschnittlich mit einem SUS-Wert von 69,2 bewertet (vgl. Abbildung 7-8). Die Bewertung liegt über dem vordefinierten Schwellenwert von 51% und an der Grenze zur nächsten Kategorie ("gut"), die eine Bewertung  $SUS \geq 71\%$  erfordert. Damit sind die einfache Anwendbarkeit der Benutzerschnittstelle und insgesamt die Erfüllung der übergreifenden Anforderung an die einfache Anwendung der Methodik nachgewiesen.

**Validierungsergebnis: Anforderung 8 ist vollständig erfüllt.**

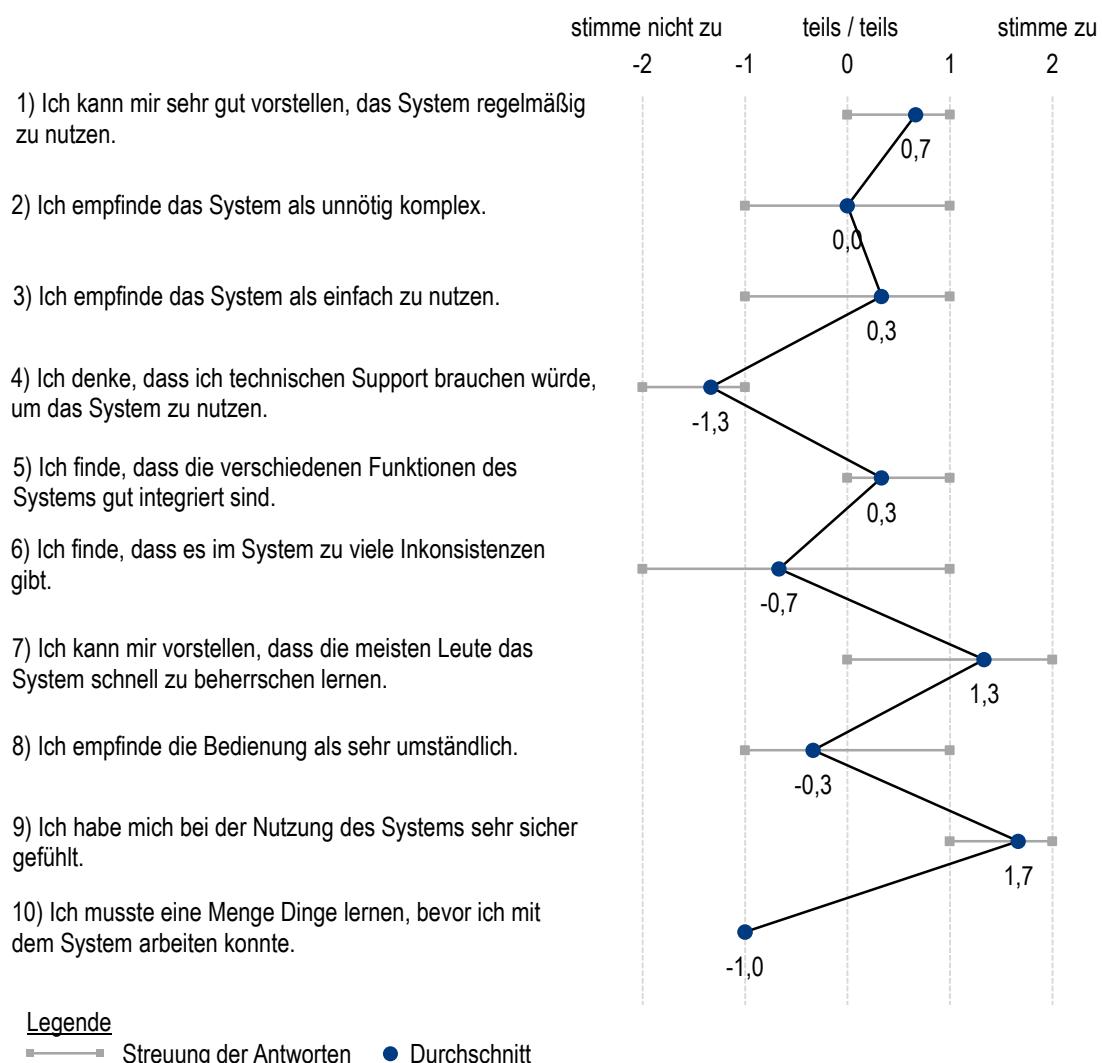


Abbildung 7-8: Auswertung der Thesen zur einfachen Anwendung der Benutzerschnittstelle

## A9: Verfügbarkeit benötigter Software

*Die Methodik muss so gestaltet sein, dass die benötigte Software für eine industrielle Nutzung kostengünstig verfügbar ist.*

### Erfüllungskriterium

Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn die Kosten für eine Nutzung im industriellen Kontext von Industrieanwender:innen als akzeptabel eingeschätzt werden.

### Bewertungsgrundlage

Als Bewertungsgrundlage werden bei Open-Source Software die Lizenzbedingungen und bei kommerzieller Software die Produktkosten und Marktdurchdringung verwendet. Die Marktdurchdringung wird hinzugezogen, weil bei standardmäßig verfügbaren Produkten keine Beschaffungskosten für das Unternehmen erwartet werden (z. B. Microsoft Office).

### Validierungsergebnis

Die Software Python 3.9.3 (oder höher) und Microsoft Excel wird für die Anwendung der Methode benötigt. Es wird davon ausgegangen, dass Microsoft Excel aufgrund der hohen Marktdurchdringung kostenlos erhältlich ist [Pre20]. Die Zulässigkeit der Annahme bestätigten auch die Industrieanwender:innen [H-KA1]. Python unterliegt einer Open Source Lizenz [van22] und ist kostenlos im industriellen Kontext anwendbar. Somit fallen keine Kosten für die erforderlichen Software-Produkte an und die Anforderung wurde von den Industrieanwender:innen als erfüllt bewertet [H-KA1].

*Validierungsergebnis: Anforderung 9 ist vollständig erfüllt.*

## A10: Frühzeitige Verfügbarkeit benötigter Informationen

*Die Methodik muss so gestaltet sein, dass die benötigten Informationen in der Projektinitiierungsphase verfügbar sind.*

### Erfüllungskriterium

Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn für alle erforderlichen Eingangsdaten und Experteneinschätzungen von mindestens einer Person die Verfügbarkeit ab der Projektinitiierungsphase bestätigt wird. Die Verfügbarkeit bei mindestens einer Person wird als Erfüllungskriterium verwendet, da in diesem Fall durch interne Kommunikation innerhalb des Entwicklungsteams alle benötigten Informationen ermittelt werden können. Ein Anspruch auf vollständige Verfügbarkeit aller Informationen bei allen Beteiligten wird durch die Spezialisierung von Aufgaben und Kompetenzen innerhalb der Entwicklungsteams als unverhältnismäßig eingeschätzt.

## Bewertungsgrundlage

Zur Bewertung der Anforderung werden alle Informationsbedarfe zur Anwendung der ProMaRC-Methodik (Eingangsdaten und Expertenwissen) mittels Befragung der Industrieanwender:innen (H-F1 und H-I1) bewertet. Acht Kategorien wurden abgefragt und binär bewertet („verfügbar“ oder „nicht-verfügbar“):

- 1) Natürlichsprachige Anforderungsspezifikation /-beschreibung [Import],
- 2) Priorität von Anforderungen [Import],
- 3) Initiatoren, die eine Änderung auslösen können [Wahrscheinlichkeitsanalyse],
- 4) Anzahl der von einem Initiator ausgelösten Änderungen in einem laufenden Projekt [Lerneffekt – Wahrscheinlichkeitsanalyse],
- 5) Anzahl der von einem Initiator ausgelösten Änderungen in vergangenen Projekten [Lerneffekt – Wahrscheinlichkeitsanalyse],
- 6) Korrektheit der Abhängigkeiten zwischen Anforderungen - i.d.R. Expertenwissen [Abhängigkeitsanalyse],
- 7) Existenz von Auswirkungen in einer der vorgegebenen Dimensionen [manuelle Auswirkungsanalyse],
- 8) Eignung der vorgeschlagenen Risikosteuerungsmaßnahmen - i.d.R. Expertenwissen [Auswahl proaktiver Maßnahmen].

Die abgefragten Informationen bilden alle für den Workflow erforderlichen Eingaben (Daten oder Expertenwissen) ab. Deren grundsätzliche Verfügbarkeit im Entwicklungsverlauf wurde durch die entwicklungsbegleitende Validierung sichergestellt und wird nicht gesondert ermittelt.

## Validierungsergebnis

Die Befragung der Industrieanwender:innen belegt, dass alle erforderlichen Informationen verfügbar sind. Für alle Thesen wurde mindestens einmal die Verfügbarkeit bestätigt (vgl. Abbildung 7-9). Aufgrund der Aufgabenverteilung innerhalb des Entwicklungsteams wurden vereinzelt Informationsbedarfe als „Nicht-Verfügbar“ angegeben. Eine Anforderungsmanagerin antwortete, dass sie die Eignung proaktiver Maßnahmen nicht bewerten könne, da dies in der Verantwortung der Projektleitung liegt. Gleiches gilt für die Initiatoren einer Änderung. Dies wird nicht als Defizit der Methodik beurteilt, weil kein Rollen- und Rechtemanagement im Rahmen des Prototyps umgesetzt wurde und die Projektleiter:innen ebenso zu den Anwender:innen zählen wie die Anforderungsmanager:innen.

Eine Erkenntnis aus den Interviews ist, dass die Verfügbarkeit von Daten begrenzt ist und häufiger als erwartet Expertenwissen erforderlich ist. Die Dokumentation wird abhängig vom Entwicklungsteam und den projektspezifischen Bedarfen unterschiedlich ausführlich umgesetzt. Oftmals werden Initiatoren von Änderungen, Informationen über Anforderungsabhängigkeiten und Auswirkungen von Änderungen nicht erfasst, obwohl Standards solche Informationen verlangen (z. B. Anforderungsabhängigkeiten [VDA QMC 3.1]). Da alle Pilotanwender:innen bestätigten, dass Informationen entweder als Daten vorhanden sind oder innerhalb des Entwicklungsteams ermittelt werden können, wird die Anforderung als „vollständig erfüllt“ bewertet.

**Validierungsergebnis: Anforderung 10 ist vollständig erfüllt.**

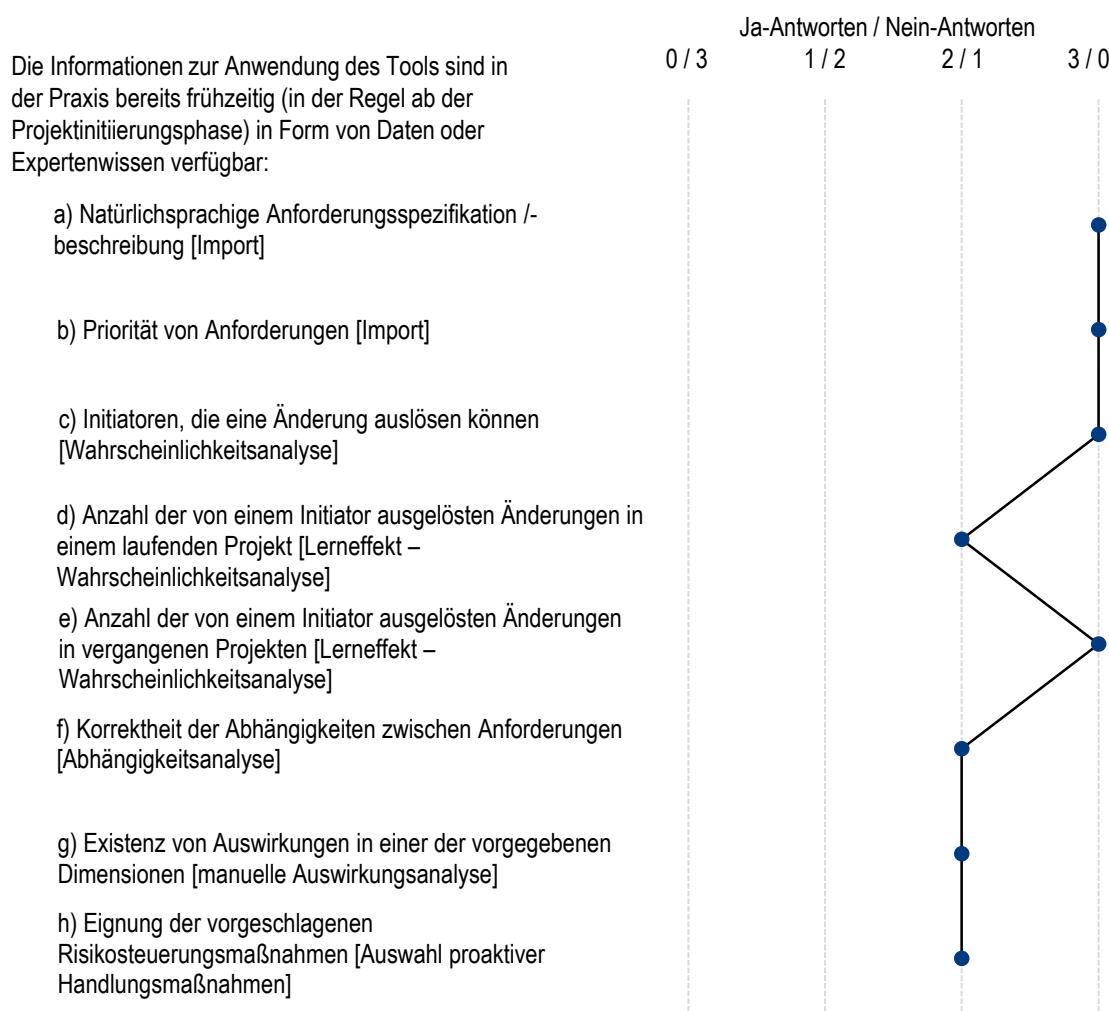


Abbildung 7-9: Auswertung der Thesen zur Verfügbarkeit von Informationen

## A11: Generische Anwendbarkeit

*Die Methodik muss so gestaltet sein, dass eine generische Anwendbarkeit in der Entwicklung komplexer technischer Systeme gegeben ist.*

### Erfüllungskriterium

Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn die Anwendbarkeit der Methodik für unterschiedliche Fallstudien demonstriert werden kann. Zur Absicherung des generischen Anspruchs müssen darüber hinaus auch branchenübergreifende Richtlinien und Standards zum entwicklungsmethodischen Vorgehen die Anwendungsvoraussetzungen für die Methodik schaffen. Als Anwendungsvoraussetzung werden die mindestens erforderlichen Eingangsdaten verstanden, die nicht durch Expertenwissen kompensiert werden können.

### Bewertungsgrundlage

Zur Bewertung der generischen Anwendbarkeit wird die Methodik im Rahmen aller Fallstudien angewandt. Dazu zählen auch die drei Fallstudien aus der Feldstudie (vgl. Kapitel 3). Insgesamt umfassen die Fallstudien unterschiedliche Branchen und Unternehmensgrößen ebenso wie unterschiedlich geartete Anforderungssets ab. Abgedeckt sind drei Großunternehmen und ein Mittelständler aus den Branchen Entwicklungsdienstleitung, produzierendes Gewerbe (Massivumformung) und Maschinenbau. Zudem werden Anforderungssets mit Anforderungen aus nur einer Disziplin (z. B. nur Mechanik oder nur Software) sowie interdisziplinäre Anforderungssets untersucht.

Darüber hinaus werden die Datenerfordernisse der Methodik auf Übereinstimmung mit den Richtlinien VDI 2206, VDI 2221 und dem ISO/IEC/IEEE 15288 Standard geprüft. Diese Richtlinien und Standards werden als repräsentativ für den Stand der Technik in der Entwicklung komplexer technischer Systeme eingeschätzt und finden in unterschiedlichen Branchen Anwendung.

### Validierungsergebnis

Für alle acht Fallstudien (vgl. Kapitel 3 und 7.1) konnte die Methodik angewandt werden, weil mindestens erforderlichen Eingangsdaten (natürlichsprachige Anforderungsbeschreibungen) vorlagen. Für die Fallstudien aus der Feldstudie (vgl. Kapitel 3) erfolgte die Anwendung retrospektiv anhand der Anforderungssets. In Kombination zeigt die Untersuchung der Fallstudien die Anwendbarkeit für unterschiedliche Kontexte.

Die generische Anwendbarkeit der Methodik wird auch im Hinblick auf Richtlinien und Standards belegt. Die VDI2206:2021 (Entwicklung mechatronischer und cyberphysischer Systeme) sowie die VDI 2221:2019 (Entwicklung technischer Produkte und

Systeme) verlangen die Definition von Anforderungen zu Beginn eines Entwicklungsvorhabens [VDI/VDE2206; VDI2221]. Gleches gilt für die ISO/IEC/IEEE 15288 [ISO15288]. Die Methodik definiert als Restriktion an die Eingangsdaten die natürlichsprachige Form (vgl. Anforderung 7). Unabhängig von der Dokumentationspraktik (Anforderungsdokument oder Anforderungsmodell (z. B. [GMD21]; strukturiert oder unstrukturiert) wird Text in natürlicher Sprache verwendet [PR21, S. 61 ff.], sodass diese Restriktion als erfüllt angenommen werden kann. Etwaige Vorgaben zur Form von Eingangs- und Ausgangsdaten (Dateiformat und Formatierung) sind im Software-Werkzeug veränderbar und können an die Unternehmensbedürfnisse angepasst werden. Damit gilt die generische Anwendbarkeit der Methodik als gewährleistet.

**Validierungsergebnis: Anforderung 11 ist vollständig erfüllt.**

## A12: Akzeptabler Anwendungsaufwand

*Die Anwendung der Methodik muss so aufwandsarm sein, dass Industrieanwender:innen den Anwendungsaufwand in der Praxisanwendung als „akzeptabel“ beurteilen.*

### Erfüllungskriterium

Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn Industrieanwender:innen den Anwendungsaufwand durchschnittlich als akzeptabel bewerten.

### Bewertungsgrundlage

Als Bewertungsgrundlage wird die Auswertung folgender Thesen bei der Befragung der Industrieanwender:innen (H-F1 und H-I1) verwendet. Die abgefragten Kategorien bilden alle für den Anwendungsablauf erforderlichen Aktivitäten ab:

- 1) Den einmaligen Vorbereitungsaufwand, bevor die Anwendung möglich ist, empfinde ich als akzeptabel: *Erstellung eines Abhängigkeitsmodells*.
- 2) Den wiederkehrenden Vorbereitungsaufwand, bevor die Anwendung möglich ist, empfinde ich als akzeptabel: *Anforderungsdaten in Excel-Template überführen*.
- 3) Den Durchführungsaufwand empfinde ich als akzeptabel: Import, Analysen, Prüfung / Korrekturen, Auswahl Risikosteuerungsmaßnahme, Export/Auswertung.
- 4) Die Durchlaufzeit der Durchführung empfinde ich als akzeptabel.
- 5) Den Nachbereitungsaufwand empfinde ich als akzeptabel: Erfassung der Anzahl an Änderungen je Initiator für die Projektdatenbank.

## Validierungsergebnis

Die Bewertungen der Industrieanwender:innen variieren, deuten aber insgesamt auf Verbesserungspotenziale beim Anwendungsaufwand hin (vgl. Abbildung 7-10). Im Rahmen der Interviews wurden folgende Problemfelder ermittelt. Der einmalig erforderliche Vorbereitungsaufwand (Erstellung des Abhängigkeitsmodells) wird als zu hoch empfunden, falls die dafür erforderliche Datengrundlage (Trainings- und Testdaten) neu erstellt werden muss. Beim Anwendungsaufwand wird der Schritt zur Prüfung und Korrektur von Anforderungsabhängigkeiten bemängelt. Außerdem kann die Rechenzeit der Abhängigkeitsanalyse auf einem Arbeitslaptop den Arbeitsfluss unterbrechen (vgl. Anforderung 6) und muss bei veränderten oder ergänzten Anforderungen erneut ausgeführt werden.

Es wurde angeregt, dass zukünftig die manuelle Erfassung von Änderungen durch eine Schnittstelle zu Requirements-Engineering-Softwaretools automatisiert wird und ausschließlich neue oder veränderte Anforderungen bei einer erneuten Durchführung der Abhängigkeitsanalyse betrachtet werden. Insgesamt fällt die Abhängigkeitsanalyse als dominante Ursache für den als teilweise nicht akzeptabel wahrgenommenen Anwendungsaufwand auf. Dennoch haben alle Pilotanwender:innen bestätigt, dass die Methode eine wesentliche Verbesserung zur derzeit vorherrschenden manuellen Abhängigkeitsanalyse darstellt. Es ist festzuhalten, dass der Anwendungsaufwand bereits jetzt deutlich unter dem des Status Quo liegt, aber weiter reduziert werden sollte. Insgesamt wird der Aufwand für die Anwendung als „teilweise akzeptabel“ bewertet.

### Validierungsergebnis: Anforderung 12 ist teilweise erfüllt.

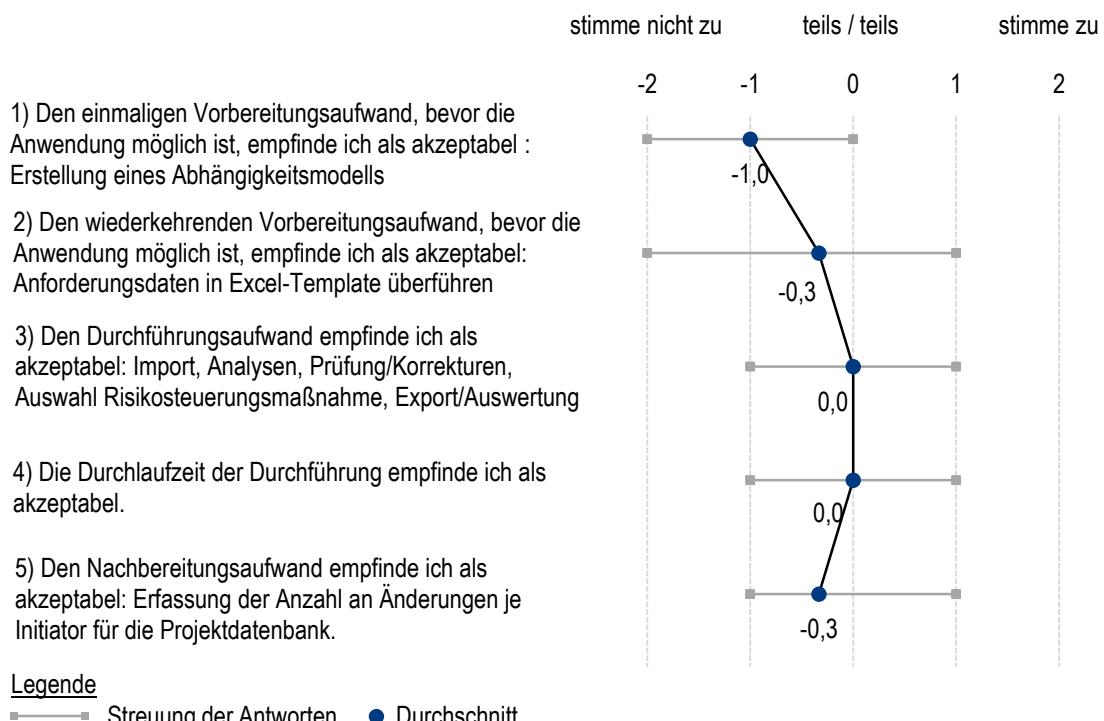


Abbildung 7-10: Auswertung der Thesen zum Anwendungsaufwand der Methodik

## A13: Integrierbarkeit in den Entwicklungsprozess

*Die Methodik muss so gestaltet sein, dass sie in den Entwicklungsprozess eines Unternehmens integriert werden kann.*

### Erfüllungskriterium

Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn die Industrieanwender:innen die Integrierbarkeit der Methodik in den Entwicklungsprozess bestätigen und den Referenzprozess als hilfreiche Unterstützung bewerten. Experteneinschätzungen werden als hinreichend aussagekräftig angenommen und der Analyse einer realen Einführung der Methodik vorgezogen. Eine reale Einführung wird aufgrund des Ressourcen- und Zeitbedarfs erst im Anschluss an eine positive Expertenbewertung als sinnvoll erachtet (vgl. Kapitel 7.6) und im Ausblick behandelt.

### Bewertungsgrundlage

Zur Bewertung der Integrierbarkeit der Methodik in den Entwicklungsprozess wurde der Referenzprozess für die Einführung und Anwendung der Methodik (vgl. Kapitel 6.5) in einem Workshop mit drei Industrieanwender:innen (H-W12) vorgestellt. Anschließend wurden die folgenden drei Thesen anhand der Likert-Skala bewertet:

- 1) Unternehmen werden anhand des Referenzprozesses in die Lage versetzt, die individuellen Potenziale der Methodik-Anwendung abzuschätzen.
- 2) Unternehmen werden anhand des Referenzprozesses in die Lage versetzt, die Methodik-Anwendung bedarfsgerecht in den Entwicklungsprozess zu integrieren.
- 3) Unternehmen können anhand des Referenzprozesses Prozesse, Abläufe und Verantwortlichkeiten bedarfsgerecht auf die Methodik-Anwendung anpassen.

Aufgrund des Referenzprozess-Umfangs wurde dieser zur nachträglichen Verbreitung und Diskussion im Unternehmen bereitgestellt. So ließ sich eine interne Durchsprache mit Unternehmensverantwortlichen auf verschiedenen Hierarchieebenen ermöglichen.

### Validierungsergebnis

Im Workshop haben die Teilnehmer:innen jeder der drei Thesen zugestimmt. Erweiterungspotenziale des Referenzprozesses wurden hinsichtlich der Einbettung der Methodik in eine RFLP-Logik (Requirements, Functions, Logics und Physics [EGZ12]) benannt. So könnten beispielsweise die Abhängigkeitsinformationen auch für nachfolgende Entwicklungsaktivitäten (z. B. Wirkkettenmodellierung [GWK22]) genutzt werden. Zudem wurde als Problematik erläutert, dass es in der industriellen Praxis keine etablierten Kennzahlen und Kennzahlensysteme zur Bewertung von Effizienz in der Produktentwicklung gibt. Dies gilt unter anderem auch für den Umgang mit Anforderungsänderungen.

An dieser Stelle bietet der Referenzprozess eine sinnvolle Hilfestellung, die Auswahl und Etablierung der Kennwerte erfordert jedoch eine grundlegende Diskussion in Unternehmen und kann durch den Referenzprozess nur angeregt werden. Da nach der unternehmensinternen Diskussion keine Revision der Workshop-Ergebnisse erfolgte, gilt die Anforderung als „erfüllt“.

**Validierungsergebnis: Anforderung 13 ist vollständig erfüllt.**

## 7.5 Validierung des Ergebnisses

Die Anforderungen an das Ergebnis werden wie die Anforderungen an die Anwendung auf Basis der Fallstudiendaten (vgl. Kapitel 7.1) und der Befragung der Industrieanwender:innen (H-F1 und H-I1) bewertet.

### A14: Wiederverwendbarkeit der Datenbasis

*Die Datenbasis muss für die Anwendung in anderen Produktentwicklungsprojekten wiederverwendbar sein.*

#### Erfüllungskriterium

Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn alle Eingangsdaten, mit Ausnahme der projektspezifischen Daten (Anforderungen), durch Ausgangsdaten vorheriger Anwendungen generiert werden können.

#### Bewertungsgrundlage

Als Bewertungsgrundlage für die Wiederverwendbarkeit werden die Ausgangsdaten der Methoden untersucht und mit den für eine Methodik-Anwendung erforderlichen Eingangsdaten abgeglichen. Die Eingangsdaten werden in der Datenbasis abgelegt und im Laufe der Anwendung mit externalisiertem Expertenwissen angereichert (z. B. Bewertung der Korrektheit ermittelter Abhängigkeiten).

Projektspezifische Inhalte (Anforderungsdaten) sind bei der Betrachtung ausgenommen. Ebenfalls nicht betrachtet wird Expertenwissen, das nicht über das betrachtete Projekt hinaus verwendet werden kann (z. B. Auswirkungsdimensionen einer spezifischen Anforderungsänderung). Zur Absicherung der Analyse werden exemplarisch, im Rahmen der Fallstudien 2 und 5, die Datensätze der Fallstudien 1 bzw. 4 wiederverwendet.

## Validierungsergebnis

Folgende Eingangsdaten wurden als relevant für die Wiederverwendung eingestuft:

- Abhängigkeitsanalyse (M2-A): Korrektheit der Abhängigkeiten zwischen Anforderungen,
- Wahrscheinlichkeitsanalyse (M2-C): Anzahl der von einem Initiator ausgelösten Änderungen in vergangenen Projekten,
- Auswahl proaktiver Maßnahmen (M3): Eignung der vorgeschlagenen Risikosteuerungsmaßnahmen.

Die manuell von Expert:innen geprüfte Korrektheit der ermittelten Anforderungsabhängigkeiten wird automatisch in der Projektdatenbank hinterlegt und kann zudem als separate Datei exportiert werden. Damit kann ein neues verbessertes KI-Modell trainiert werden. Für die Abhängigkeitsanalyse sind das KI-Modell sowie projektspezifische Daten (Anforderungsdaten) erforderlich, sodass die Anforderung an Wiederverwendung für die Abhängigkeitsanalyse erfüllt ist.

Die Anzahl der von einem Initiator ausgelösten Änderungen wird im Projektverlauf dokumentiert und in der Projektdatei hinterlegt. Die Änderungshistorie kann von nachfolgenden Projekten ausgewertet werden, indem das Projekt als Vergleichsprojekt selektiert wird. Damit ist die Wiederverwendbarkeit gegeben und es sind keine gesonderten Daten zur Wahrscheinlichkeitsanalyse für nachfolgende Projekte erforderlich.

Die Eignung der vorgeschlagenen Risikosteuerungsmaßnahmen wird durch die Selektion einer Maßnahme in der Projektdatei erfasst und mittels Empfehlungsmechanismus in nachfolgenden Projekten berücksichtigt. Damit ist auch hier die Möglichkeit einer Wiederverwendung gegeben. Da die drei relevanten Eingangsdaten durch vorherige Projekte erzeugt werden können und auch im Rahmen der exemplarischen Fallstudienanwendung die Wiederverwendbarkeit demonstriert werden konnte, wird die Wiederverwendbarkeit als „vollständig erfüllt“ bewertet.

**Validierungsergebnis: Anforderung 14 ist vollständig erfüllt.**

## A15: Hinreichende Genauigkeit

*Das Ergebnis der Methodik muss in den primär unterstützten Entscheidungssituationen hinreichend genau sein.*

## Erfüllungskriterium

Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn die Industrieanwender:innen die Genauigkeit der Ergebnisse unter Praxisbedingungen im Durchschnitt als hinreichend bewerten.

## Bewertungsgrundlage

Als Bewertungsgrundlage für die Genauigkeit der Methodik-Ergebnisse werden zum einen Leistungskennwerte der Abhängigkeitsanalyse im industriellen Kontext (Fallstudie 1-3) ermittelt. Für die weiteren Ergebnisse werden Industrieanwender:innen nach der Pilotanwendung befragt (H-F1 und H-I1).

Für die Bewertung der Genauigkeit nach Wiederverwendung des KI-Modells wurden Daten der Fallstudien 4 und 5 kombiniert. Die Leistungsmerkmale der Abhängigkeitsanalyse werden gesondert behandelt, weil sie einen Rückschluss auf die Genauigkeit der automatisch generierten Informationen zulassen und die Genauigkeit nur bei dieser Analyse nach Wiederverwendung variiert.

Ob die darauf aufbauenden Methoden (Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkungen) eine hinreichend genaue Einschätzung des Änderungsrisikos bieten, wird durch die Bewertung folgender Thesen von den Industrieanwender:innen ermittelt:

- 1) Die Ergebnisse sind hinreichend genau für die Identifikation von Unsicherheiten im Anforderungsset.
- 2) Die Ergebnisse sind hinreichend genau für die Verhandlung des Entwicklungsauftrags (Risikoanalyse).
- 3) Die Ergebnisse sind hinreichend genau für die Definition des Projektplans (Risikoanalyse).
- 4) Die Ergebnisse sind hinreichend genau für das Herstellen und Verwalten der Nachverfolgbarkeit zwischen Anforderungen (Abhängigkeiten).
- 5) Die Ergebnisse sind hinreichend genau für die Risikoanalyse von Anforderungen und Anforderungssets (anforderungsspezifisches Risiko und Detailinfos).
- 6) Die Ergebnisse sind hinreichend genau für die risikospezifische Auswahl von Steuerungsmaßnahmen.

Die abgefragten Entscheidungssituationen ergeben sich aus den Anwendungsszenarien (vgl. Kapitel 6.5). Die Bewertung basiert auf Expertenschätzungen, da eine empirische Genauigkeitsbewertung nicht möglich ist. Eine empirische Untersuchung würde eine Dokumentation der Historie von Unsicherheiten und Anforderungsänderungen (inkl. Initiator und Auswirkungen) sowie der proaktiv eingeleiteten Maßnahmen über einen längeren Zeitraum erfordern. Eine solche Langzeituntersuchung ist für nachfolgende Forschungsaktivitäten anzustreben (vgl. Kapitel 7.6), falls die Expertenbewertungen als Indikator für die Genauigkeit positiv sind.

## Validierungsergebnis

### Leistungskennwerte der Abhängigkeitsanalyse

Mit den Daten der Fallstudie „Knickarmroboter“ liefert die Abhängigkeitsanalyse eine gute Genauigkeit (vgl. Tabelle 7-3). *None* als Majoritätsklasse hat mit  $F1 = 99\%$  eine sehr hohe Genauigkeit. Auch die Minoritätsklasse *Dependent* erreicht mit  $F1 = 84\%$  eine gute Genauigkeit. Aufgrund des begrenzten Umfangs der Trainingsdaten werden die Abhängigkeitstypen nicht nach Typ unterschieden und in der Klasse *Dependent* aggregiert. So kann die Anzahl der zu unterscheidenden Klassen reduziert und die Genauigkeit verbessert werden. Ohne diese Aggregation würden je Abhängigkeitstyp Genauigkeiten von 35% bis 58% ermittelt (vgl. Anforderung 1). Im Kontext von Anforderungsänderungen ist diese Vereinfachung zulässig, weil alle betrachteten Abhängigkeitstypen ein zwanghaftes Propagationsverhalten aufweisen (vgl. Kapitel 6.2.2) und somit kein Informationsverlust durch die Aggregation resultiert. [GOH22; GOP22]

Da der Datensatz eine Majoritätsklasse (*None*) mit vielen Einträgen und eine Minoritätsklasse (*Dependent*) mit wenigen Einträgen enthält, müssen die Kriterien als Makro-Durchschnitt (gleiches Gewicht für alle Klassen) betrachtet werden, um aussagekräftig zu sein [GOH22, S. 7].

*Tabelle 7-3: Leistungskennwerte der Abhängigkeitsanalyse für die Fallstudie „Knickarmroboter“ [GOH22, S. 7]*

Abhängigkeiten	Anzahl	Precision	Recall	F1
None	3081	99,12 %	99,06 %	<b>99,09 %</b>
Dependent	92	69,15 %	70,65 %	69,89 %
Macro avg.	-	84,14 %	84,86 %	<b>84,49 %</b>
Weighted avg.	-	98,25 %	98,24 %	98,24 %

Zur Validierung der Genauigkeit für andere Anwendungsbeispiele wurde die Abhängigkeitsanalyse auch im Rahmen der Fallstudien 1 und 2 angewandt. Die Anwendung zeigt, wie wichtig ein kontextspezifisches KI-Modell für die Genauigkeit der Analyse ist. Bei der Verwendung eines kontextunabhängigen KI-Modells (Knickarmroboter) für Fallstudie 1 (Motorsteuerung) liegt die Genauigkeit für die Minoritätsklasse *Dependent* bei  $F1 = 14\%$  (Überprüfung von 170 als *Dependent* bewerteten Abhängigkeiten). Die Genauigkeit konnte durch ein heterogenes Trainingsset ohne kontextspezifische Daten auf  $F1 = 30\%$  gesteigert werden. Dafür wurden die Daten des Knickarmroboters und der studentischen Entwicklungsprojekte für das Training des KI-Modells kombiniert. Für Fallstudie 2 wurde mit dem heterogenen Trainingsset eine Genauigkeit von  $F1 = 43\%$  (Überprüfung von 152 als *Dependent* bewerteten Abhängigkeiten) für die Minoritätsklasse *Dependent* erzielt. Die Majoritätsklasse erreichte für beide Industrie-Fallstudien hohe Genauigkeiten im Bereich von  $F1 = 90\%$ .

Um den Einfluss kontextspezifischer Trainingsdaten auf die Genauigkeit weiter zu untersuchen, wurden Daten aus Fallstudie 5 (Heimwerkzeuge) analysiert. Die Genauigkeit stieg von  $F1 = 92\%$  (*None*) und  $F1 = 47\%$  (*Dependent*) ohne kontextspezifische Daten (Trainingsdaten: Knickarmroboter) auf  $F1 = 98\%$  (*None*) und  $F1 = 94\%$  (*Dependent*) mit kontextspezifischen Daten als Teil des Trainingssatzes (Trainingsdaten: Knickarmroboter und Heimwerkzeuge) (vgl. Tabelle 7-4). Die Ergebnisse belegen die Bedeutung kontextspezifischer Daten für das Training des KI-Modells. Ebenso wird die Fähigkeit demonstriert, klassenübergreifend hohe Genauigkeiten in unterschiedlichen Anwendungskontexten zu erzielen.

*Tabelle 7-4: Leistungskennwerte der Abhängigkeitsanalyse für die Fallstudien „Knickarmroboter“ und „Elektrowerkzeuge“ [GOH22, S. 8]*

Abhängigkeiten	Anzahl	Precision	Recall	F1
None	2054	98,44 %	98,25 %	98,34 %
Dependent	556	93,57 %	94,24 %	93,91 %
Macro avg.	-	96,01 %	96,25 %	96,12 %
Weighted avg.	-	97,40 %	97,39 %	97,40 %

Aufgrund des hohen Aufwands für die Erstellung kontextspezifischer Trainingsdaten (vgl. Anforderung 12) wurde von den Industrieanwender:innen im Rahmen der Interviews empfohlen, die dafür benötigten Abhängigkeitsdaten sukzessive in zukünftigen Entwicklungsprojekten zu sammeln. Die vorgeschlagene Vorgehensweise besteht darin, die Dokumentationsrichtlinien anzupassen und die Entwickler:innen zu verpflichten, Abhängigkeitsdaten zu erfassen. So kann eine kontextspezifische Datenbank erstellt und zugleich die Erfüllung von Entwicklungsstandards (vgl. Anforderung 10) erreicht werden.

#### Bewertung der Industrieanwender:innen

Die Befragung der Industrieanwender:innen zeigt eine ausreichende Genauigkeit für alle Entscheidungssituationen, die von der ProMaRC-Methodik unterstützt werden. Vier der sechs Thesen wurden durchschnittlich mit 0,7 (stimme eher zu) bewertet. Verbesserungspotenzial gibt es bei der Abhängigkeitsanalyse und der Definition des Projektplans (vgl. Abbildung 7-11). Für die Definition des Projektplans wäre eine Verknüpfung mit unternehmensspezifischen Kennwertsystemen (z. B. Wahrscheinlichkeitskategorien) vorteilhaft. Bisher sind die Ergebnis-Metriken der Methodik allgemeingültig und nicht auf unternehmensspezifische Auswahl-Metriken angepasst. Eine solche Anpassung wird als Verbesserungspotenzial benannt. Die Anpassung wäre für den industriellen Einsatz jederzeit möglich und das Defizit schränkt die Genauigkeit des Ergebnisses selbst nicht ein.

Aufgrund der guten Ergebnisse der Abhängigkeitsanalyse und der Rückmeldungen der Pilotanwender:innen wird insgesamt von einer ausreichenden Genauigkeit ausgegangen. Im Rahmen zukünftiger Forschungen muss diese Einschätzung durch empirische Studien belegt werden (vgl. Kapitel 7.6).

**Validierungsergebnis: Anforderung 15 ist vollständig erfüllt.**

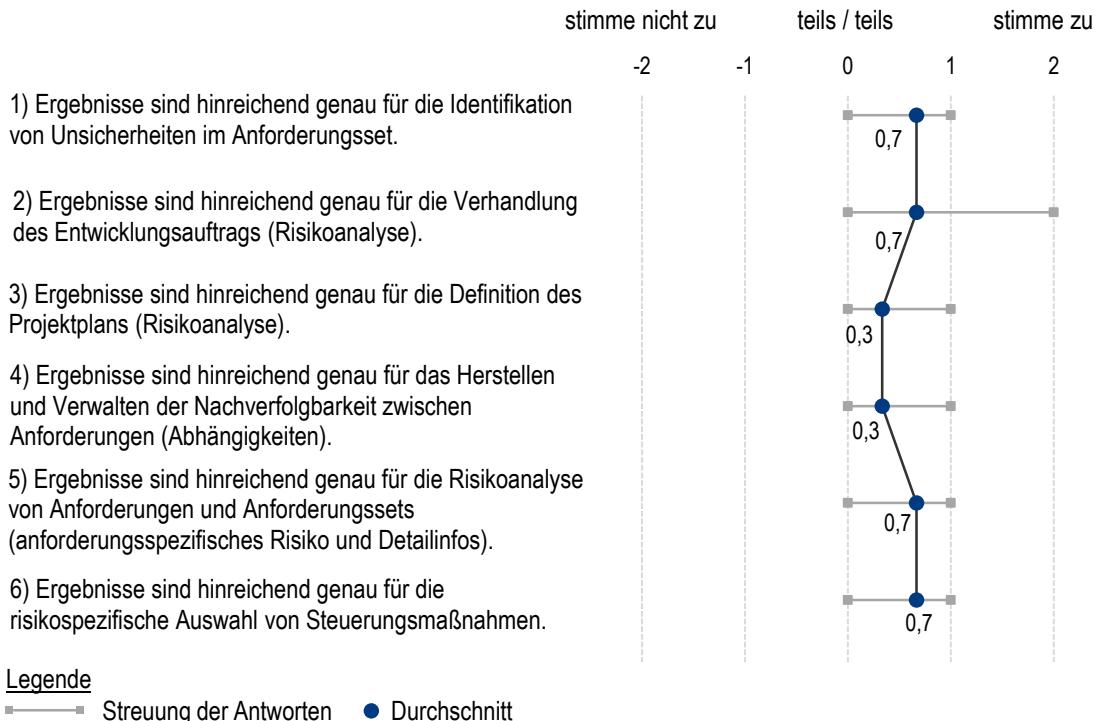


Abbildung 7-11: Auswertung der Thesen zur Genauigkeit der Methodik-Ergebnisse

## 7.6 Methodik-Erfolg

Die Effizienz der Produktentwicklung wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst und ist dadurch schwer messbar. Auswirkungen des proaktiven Änderungsmanagements auf die Effizienz können ebenso wie Auswirkungen des Risikomanagements nicht direkt erfasst werden. Beispielsweise können keine vermiedenen Anforderungsänderungen oder reduzierten Änderungsauswirkungen erfasst werden. Nur durch hohen Ressourcenaufwand für eine umfassende empirische Untersuchung mit einer Vielzahl an vergleichbaren Entwicklungsprojekten, die mit und ohne die ProMaRC-Methodik durchgeführt werden, ließen sich Schlussfolgerung ableiten. Eine solche Studie wird als nicht realistisch eingestuft. Stattdessen wird die Verbesserung der Ausgangssituation durch proaktives Management von Anforderungsänderungen auf Basis der ProMaRC-Methodik zur Bewertung des Methodik-Erfolgs herangezogen. Als Indikator für die Verbesserung werden Industrieanwender:innen befragt (H-F1 und H-I1). Messbare Erfolgsfaktoren, anhand derer die Thesen der Befragung strukturiert sind, werden aus einem Einflussmodell abgeleitet (vgl. Abbildung 7-12). Dabei müssen auf Ebene der messbaren Erfolgsfaktoren (vgl. [BC09, S. 27 ff.]) Annahmen über den Einfluss auf Effektivität und Effizienz getroffen werden, da es keine Untersuchungen zu den Leistungskennwerten des proaktiven Änderungsmanagements spezifisch für Anforderungsänderungen gibt (vgl. Kapitel 1.1).

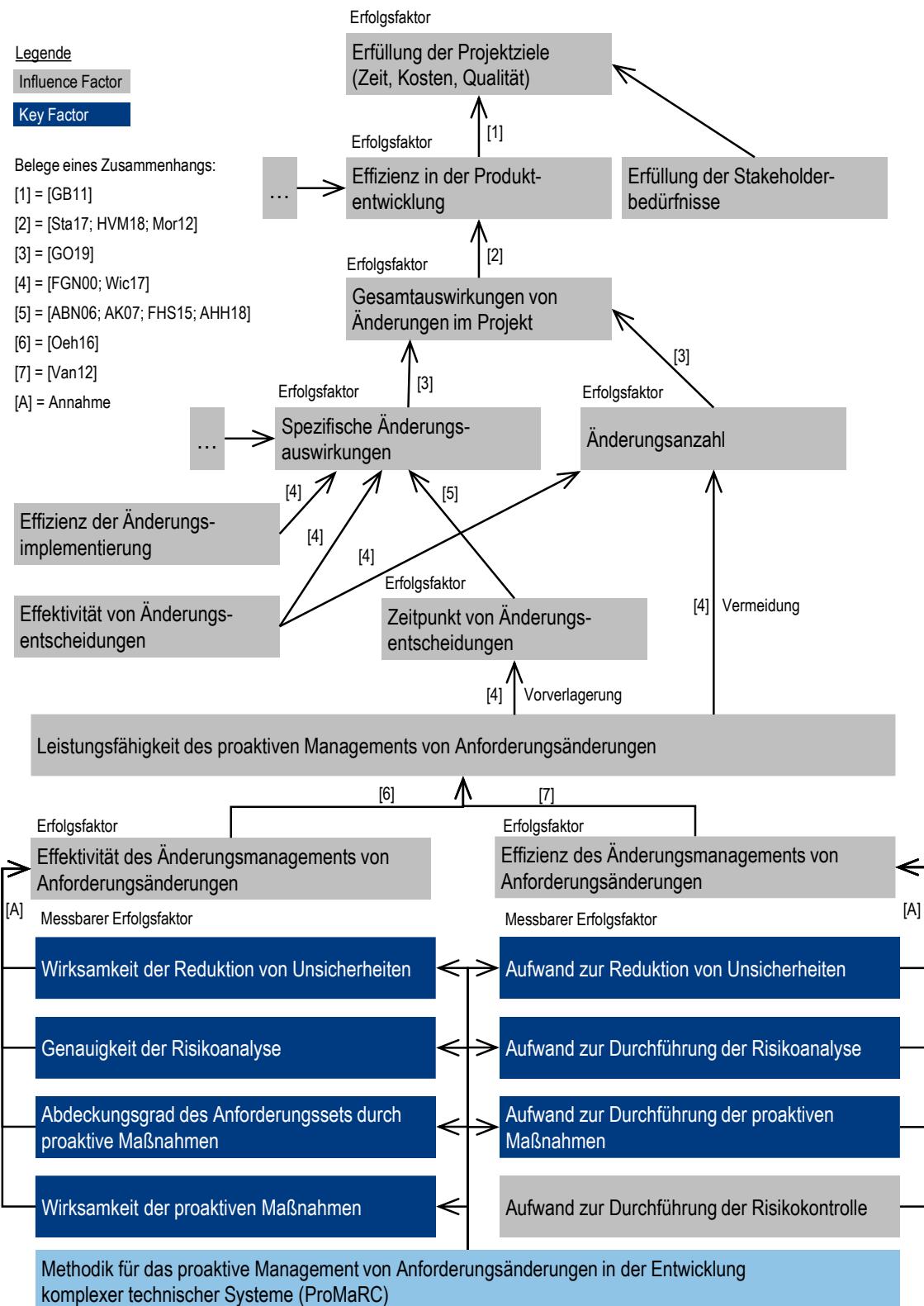


Abbildung 7-12: Einflussmodell der Methodik auf den Projekterfolg (in Anlehnung an das Impact-Model nach [BC09]) [GOP22, S. 40]

Aus dem Einflussmodell wurden folgende Thesen für die Befragung abgeleitet:

- 1) Auf Grundlage der Informationen zu Maßnahmen der Unsicherheitsidentifikation und des Q-Checkers können Unsicherheiten effizienter identifiziert werden als zuvor.
- 2) Auf Grundlage der Informationen zu Maßnahmen der Unsicherheitsidentifikation und des Q-Checkers können Unsicherheiten vollständiger identifiziert werden als zuvor.
- 3) Auf Grundlage der Informationen zum Änderungsrisiko von Anforderungen können Risiken effizienter identifiziert werden als zuvor.
- 4) Auf Grundlage der Informationen zum Änderungsrisiko von Anforderungen können Risiken realistischer abgeschätzt werden als zuvor.
- 5) Anhand der teilautomatisierten Risikoanalyse kann ein höherer Anteil an Anforderungen eines Anforderungssets auf Änderungsrisiken untersucht werden.
- 6) Auf Grundlage der Informationen und Vorschläge zu Risikosteuerungsmaßnahmen können wirksamere Handlungsoptionen ausgewählt werden.
- 7) Auf Grundlage des Änderungsrisikos und der darauf aufbauenden Vorschläge zu Risikosteuerungsmaßnahmen können effizienter Maßnahmen definiert werden.
- 8) Die Anwendung des Software-Werkzeugs trägt zur Effizienzsteigerung in der Entwicklung komplexer technischer Systeme bei.

Falls im jeweiligen Entwicklungsteam der Befragten, unabhängig vom ARCA-Projekt, kein proaktives Änderungsmanagement von Anforderungsänderungen vorgenommen wird, ist die Vergleichsgröße die Berücksichtigung von Anforderungsänderungen im Rahmen des allgemeinen Risikomanagements.

Die Einschätzungen der Industrieanwender:innen weisen auf die Nützlichkeit der Methodik hin, komplexe technische Systeme effizienter zu entwickeln. In allen Kategorien wurde die ProMaRC-Methodik als hilfreiche Unterstützung eingeschätzt (vgl. Abbildung 7-13). In den Interviews wurde die **Abhängigkeitsanalyse** als besonders hilfreich und vielversprechend hervorgehoben. Der hohe manuelle Aufwand zur Identifikation und Dokumentation von Abhängigkeiten ist in der heutigen Entwicklungspraxis ein Hindernis, um Entwicklungsvorgaben (vgl. Anforderung 10) zu erfüllen und in frühen Projektphasen ein umfassendes Systemverständnis zu erreichen. Die automatisierte Abhängigkeitsanalyse erschließt neue Handlungsspielräume, beispielsweise für die Auswirkungsanalyse, die sowohl als Teil des proaktiven als auch des reaktiven Änderungsmanagements (vgl. Kapitel 2.4) für hilfreich befunden wird. Komplementär zur Aufwandsreduktion werden stark nachgefragte Kompetenzen (z. B. Anforderungsmanagement) frei.

Rückmeldungen zur Methodik zeigen darüber hinaus, dass methodische und software-technische **Schnittstellen** zum übergeordneten Risiko- und Änderungsmanagementverfahren anzustreben sind. Anforderungsänderungen können dann vollständiger und anhand einer objektiven Entscheidungsgrundlage behandelt werden. Insgesamt zeigt die Befragung, dass die Methodik einen Mehrwert für die industrielle Entwicklungspraxis bietet und durch eine Weiterentwicklung und Integration des Software-Werkzeugs in die Softwarelandschaft des Unternehmens weitere Nutzenpotenziale realisiert werden können.

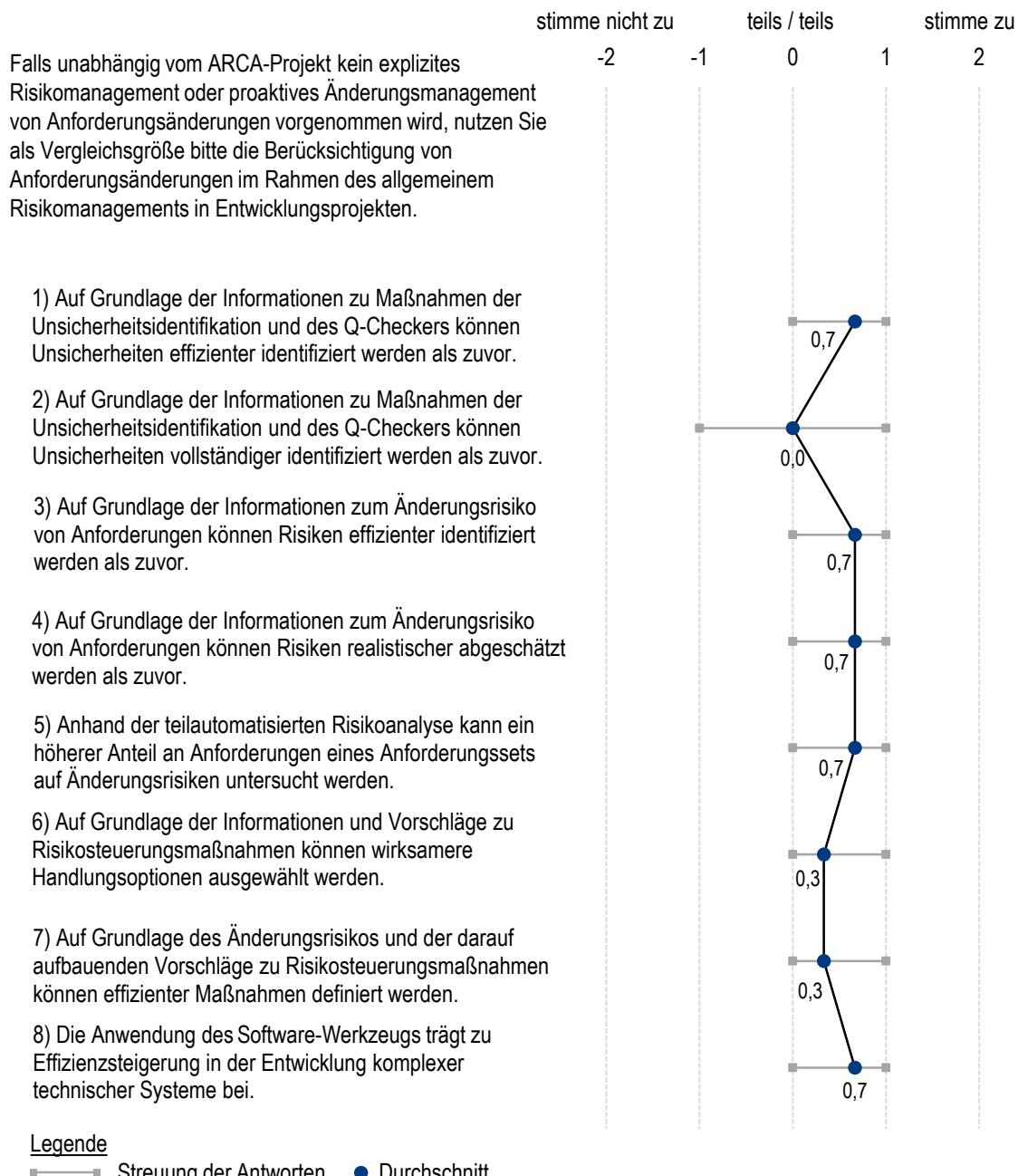


Abbildung 7-13: Auswertung der Thesen zum Mehrwert der Methodik

## 7.7 Anforderungserfüllung und Diskussion

Die Validierungsergebnisse zeigen, dass mit der ProMaRC-Methodik 13 von 15 Anforderungen vollständig erfüllt und 2 von 15 Anforderungen teilweise erfüllt werden (vgl. Tabelle 7-5). Dazu hat das auf die Anwendung ausgerichtete wissenschaftliche Vorgehen beigetragen. Die Feldstudie hat Bedarfe der industriellen Praxis offen gelegt und die Möglichkeit für einen frühzeitigen Vergleich von Lösungsalternativen geboten. Die kontinuierliche Einbindung von Industrieanwender:innen in die Entwicklung der Methodik hat eine Fokussierung auf praxisrelevante Aspekte ermöglicht und damit wesentlich zur fortwährenden Prüfung und Optimierung der Methodik beigetragen. So konnte ein wichtiger Beitrag für Wissenschaft und Praxis geleistet werden, der im Folgenden anhand der Forschungsfragen (vgl. Kapitel 5) erläutert wird. Anschließend werden die Verbesserungspotenziale der ProMaRC-Methodik sowie Limitationen der Validierungsergebnisse diskutiert.

*Tabelle 7-5: Grad der Erfüllung der Anforderungen an die Methodik*

Anforderung		Grad der Erfüllung
Methoden	A1: Änderungsausbreitung	●
	A2: Änderungsauswirkung	●
	A3: exogene und endogene Änderungswahrscheinlichkeit	●
	A4: Anforderungsspezifische Maßnahmen	●
Eingangsdaten	A5: Interdisziplinarität der Anforderungen	●
	A6: hohe Anforderungsanzahl	○
	A7: standardmäßige Dokumentationsform	●
Anwendung	A8: einfache Anwendung	●
	A9: Verfügbarkeit benötigter Software	●
	A10: frühzeitige Verfügbarkeit benötigter Informationen	●
	A11: generische Anwendbarkeit	●
	A12: akzeptabler Anwendungsaufwand	○
	A13: Integrierbarkeit in den Entwicklungsprozess	●
Ergebnis	A14: Wiederverwendbarkeit der Datenbasis	●
	A15: hinreichende Genauigkeit	●

Legende: ● = vollständig erfüllt ○ = teilweise erfüllt

## Beiträge der ProMaRC-Methodik für Wissenschaft und Praxis

**Forschungsfrage F1:** Wie lassen sich in der industriellen Praxis Unsicherheiten in der Anforderungsbeschreibung reduzieren?

Die Methode zur Identifikation von Änderungsursachen (vgl. Kapitel 6.1) bietet erstmals einen Überblick über spezifische Unsicherheitsarten im Kontext von Anforderungsänderungen sowie konkrete Maßnahmen zur Identifikation und Behebung potenzieller Änderungsursachen. In Kombination mit der automatisierten Qualitätsprüfung wird durch die Methode sowohl die Erkennung als auch die Reduzierung von Unsicherheiten in der industriellen Praxis vereinfacht. So können Anforderungsänderungen präventiv gehandhabt und ein wichtiger Beitrag zur effizienten Produktentwicklung geleistet werden.

**Forschungsfragen F2 und F3:** Wie lässt sich die Änderungsauswirkung von Anforderungen ganzheitlich abschätzen? Wie lässt sich die endogene und exogene Änderungswahrscheinlichkeit von Anforderungen abschätzen?

Erstmals ist eine Methode verfügbar, die das proaktive Management von Anforderungsänderungen vollumfänglich unterstützt und nicht auf einzelne Aspekte (z. B. Bewertung von Propagationseffekten) fokussiert ist (vgl. Kapitel 6.2). Das ist durch die Kombination der Abhängigkeitsanalyse mit der ganzheitlichen Identifikation von Einflussfaktoren des Änderungsrisikos und deren systematischer Bewertung gelungen. Die Auswirkungsanalyse bezieht initiale und konsekutive Effekte ebenso wie lokale Auswirkungen ein und ermöglicht damit die ganzheitliche Abschätzung der Änderungsauswirkungen (Forschungsfrage 3). Auch bei der Wahrscheinlichkeitsanalyse ist es gelungen, die endogene und exogene Änderungswahrscheinlichkeit in einem übergreifenden Erwartungswert zusammenzuführen (Forschungsfrage 4).

Die Validierung hat gezeigt, dass die Realisierung einer vollautomatisierten Abhängigkeitsanalyse mit minimalen Erfordernissen hinsichtlich Eingangsdaten ebenfalls ein wichtiger Beitrag für die Praxis darstellt. Durch die Verwendung von künstlicher Intelligenz (BERT) wird die Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen im Vergleich zu bisherigen Ansätzen deutlich leistungsfähiger. An Stelle von semantischen Ähnlichkeiten werden inhaltliche Ähnlichkeiten erkannt (vgl. Kapitel 4.4). Das führt zu einer vollständigeren und differenzierteren Abhängigkeitsanalyse. Zudem bietet BERT eine vollautomatisierte Analyse, die ausschließlich Anforderungsbeschreibungen als Eingangsdaten benötigt, was erstmals eine industrielle Anwendbarkeit der Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen in frühen Entwicklungsphasen komplexer Systeme ermöglicht. Damit werden bisher ungenutzte Handlungsspielräume des Änderungsmanagements in der Projektanbahnungsphase und -initierungsphase eröffnet.

**Forschungsfrage F4:** Wie kann die Zuordnung von proaktiven Maßnahmen zur Handhabung der Änderungsrisiken von Anforderungen unterstützt werden?

Das Alleinstellungsmerkmal der ProMaRC-Methodik hinsichtlich vollumfänglicher Risikoanalyse wird durch die Verknüpfung mit der Methode zur Zuordnung von Maßnahmen bekräftigt (vgl. Kapitel 6.3). Die Methode bietet erstmals eine Übersicht kontextspezifischer Maßnahmen und deren direkte Zuordnung auf Grundlage der Ergebnisse der Risikoanalyse. Damit werden alle Schritte des proaktiven Änderungsmanagements unterstützt und eine Schnittstelle zu übergeordneten Prozessen des Änderungs- und Risikomanagements geschaffen.

**Forschungsfrage F5:** Wie lässt sich das proaktive Management von Anforderungsänderungen komplexer technischer Systeme in die Produktentwicklung einordnen?

Durch den Referenzprozess zur Einführung und Anwendung der Methodik (vgl. Kapitel 6.5) wird erstmals die Einordnung des proaktiven Managements von Anforderungsänderungen unterstützt. Mithilfe des Prozesses können konkrete Anwendungspotenziale des proaktiven Änderungsmanagements erkannt und mit der ProMaRC-Methodik oder anderen wissenschaftlichen Ansätzen systematisch realisiert werden. Darüber hinaus wird durch die Referenzmodelle und Tailoring-Leitfragen eine Handlungsgrundlage geboten, die Praktiker:innen bei der bedarfsgerechten Anpassung und Etablierung des proaktiven Änderungsmanagements auf Organisations- und Projektebene unterstützt.

Das Software-Werkzeug (vgl. Kapitel 6.4) leistet ebenfalls einen Beitrag zur Einführung und Anwendung des proaktiven Änderungsmanagements. Die Rückmeldungen der Industrieanwender:innen zeigen, dass der Reifegrad deutlich über einen rudimentären Prototypen hinausgeht und eine operative Anwendung der ProMaRC-Methodik im industriellen Kontext ermöglicht. Damit wird ein Hilfsmittel verfügbar, das Entwickler:innen einen aufwandsarmen und damit niederschwelligen Einstieg in das proaktive Änderungsmanagement ermöglicht. Durch die modellbasierte Entwicklung des Software-Werkzeugs und die nachvollziehbare Strukturierung des Programmcodes wird darüber hinaus eine individuelle Anpassbarkeit der Funktionalitäten gewährleistet, sodass auch Forscher:innen unmittelbar auf den bisherigen Ergebnissen aufbauen können.

### **Verbesserungspotenziale der ProMaRC-Methodik**

Die Validierung hat neben den Stärken einige Verbesserungspotenziale offen gelegt. Um die Rechenzeit der **Abhängigkeitsanalyse** zu begrenzen, ist mit zunehmender Anzahl an Anforderungen auch eine ebenso zunehmende Rechenleistung erforderlich. Die Validierung hat gezeigt, dass ab ca. 100 Anforderungen die Verwendung von Hochleistungsrechnern sinnvoll ist. Hochleistungsrechner sind als internetbasiertes Dienstleistungsangebot niederschwellig verfügbar, können bei manchen Unternehmen jedoch aufgrund datenschutzrechtlicher Aspekte problematisch sein (z. B. Herausgabe von Anforderungs-

listen des Kunden an Dienstleister). In solchen Fällen ist es zur Verarbeitung umfangreicher Anforderungssets erforderlich, die Anforderungssätze in kleinere Einheiten aufzuteilen oder bestehende Rechenkapazitäten (z. B. für Simulationszwecke) anzubinden.

Ebenso bietet die aufwändige Erzeugung von Trainingsdaten für die Abhängigkeitsanalyse Verbesserungspotenziale. Auch, wenn das erforderliche Expertenwissen verfügbar ist und bereits eine künstliche Anreicherung der Trainingsdaten vorgenommen wird, hat sich die Bereitschaft, manuell Trainingsdaten zu erzeugen, als begrenzt herausgestellt. Da die Genauigkeit und Robustheit der Abhängigkeitsanalyse mit dem Umfang der Trainingsdaten korreliert, besteht die Gefahr einer unzureichenden Ergebnisgüte. Neue Ansätze zur Erzeugung der Trainingsdaten (z. B. synthetische Datenerzeugung [PDH21]) sind daher zu erforschen.

Die **Auswirkungs- und Wahrscheinlichkeitsanalyse** beruht in Teilen auf Experteneinschätzungen. An dieser Stelle ist eine Weiterentwicklung möglich. Die Methodik erhöht gegenüber der Ausgangslage die Genauigkeit, Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, hängt jedoch weiterhin vom Kompetenz- und Erfahrungsprofil der Anwender:innen ab. Diesbezüglich sollte beispielsweise die Erhebung von historischen Daten geprüft werden, um die bisher fehlende Datengrundlage für die Anwendung von KI-Ansätzen zu erzeugen.

### **Limitationen der Validierungsergebnisse**

Die Aussagekraft der Validierungsergebnisse ist in den zwei Aspekten Diversität der Anwendungsfelder und Verfügbarkeit empirischer Belege für die Genauigkeit der Ergebnisse sowie den Erfolg der Methodik begrenzt.

Die **Diversität der Anwendungsfelder**, die im Rahmen der Validierung betrachtet wurde, ist auf die Automobilindustrie limitiert. Die Automobilindustrie bietet jedoch repräsentative Rahmenbedingungen für die Entwicklung komplexer technischer Systeme und lässt daher die Gültigkeit der Bewertung für vergleichbare Branchen (z. B. Luft- und Raumfahrt, Maschinen- und Anlagenbau oder Medizintechnik) erwarten. Hinweise auf eine generische Anwendbarkeit wurden im Rahmen der Validierung gesammelt (vgl. Anforderung 11), eine branchenübergreifende Erprobung steht aber noch aus.

Die Aussagekraft der Validierungsergebnisse zur Genauigkeit der Ergebnisse und dem Erfolg der Methodik-Anwendung unterliegt ebenfalls Limitationen. Grund dafür ist die fehlende **empirische Datengrundlage**. Die Experteneinschätzungen lassen eine hinreichende Genauigkeit annehmen (vgl. Anforderung 15). Diese Annahme muss zukünftig in Untersuchungen zur Häufigkeit von Anforderungsänderungen und deren Auswirkungen überprüft werden. Da bisher die Einflussfaktoren auf das Änderungsrisiko nicht ausreichend bekannt waren, fehlte die dafür erforderliche Datengrundlage.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Anforderungsänderungen sind unvermeidbar in der Entwicklung komplexer technischer Systeme. Deren ineffizientes Management ist eine der bedeutendsten Ursachen für Projektfehlschläge. Das proaktive Management von Anforderungsänderungen eröffnet neuen Handlungsspielraum und kann die Effizienz in der Produktentwicklung steigern, bisher fehlten jedoch Hilfsmittel für die industrielle Praxis. Mit dem Ziel, die Potenziale des proaktiven Managements von Anforderungsänderungen für die industrielle Praxis zu erschließen, wird die ProMaRC-Methodik entwickelt.

Das wissenschaftliche Vorgehen beruht auf dem Forschungsprozess zur angewandten Wissenschaft nach ULRICH und zeichnet sich durch die intensive Einbeziehung von Industrieanwender:innen aus. Zunächst wurde im Rahmen einer Feldstudie mit vier Unternehmen der Anwendungszusammenhang untersucht. Dafür wurde ein initiales Lösungskonzept erprobt und Rahmenbedingungen für das proaktive Änderungsmanagement abgeleitet. Anschließend wurden relevante Forschungsansätze untersucht, Forschungsbedarfe ermittelt und fünf Forschungsfragen (F1-5) definiert. Die Forschungsfragen wurden unter Einbindung von Industrieanwender:innen in ein 15 Anforderungen umfassendes Zielsystem für die Entwicklung der ProMaRC-Methodik übersetzt. Zur Erfüllung der Anforderungen wurden drei Methoden, ein Software-Werkzeug und ein Referenzprozess für die Einführung und Anwendung der ProMaRC-Methodik erarbeitet. Im letzten Schritt erfolgte anhand von fünf Fallstudien, neun Workshops und einer Befragung von Industrieanwender:innen die Validierung der Methodik.

Die Validierung zeigt, dass 13 von 15 Anforderungen vollständig und 2 von 15 Anforderungen teilweise erfüllt werden. Damit bietet die ProMaRC-Methodik für jede der fünf Forschungsfragen eine praxistaugliche Lösung. Potenzielle Änderungsursachen können mittels automatisierter Qualitätsprüfung und einer kontextspezifischen Übersicht von Maßnahmen identifiziert und reduziert werden (F1). Anforderungsabhängigkeiten lassen sich unter Anwendung des BERT-Ansatzes automatisiert erkennen und anhand des Propagationsverhaltens differenzieren. Diese Abhängigkeiten werden im Rahmen der Auswirkungsanalyse anhand eines modifizierten PageRank-Algorithmus zur Abschätzung der konsekutiven Effekte einer Anforderungsänderung verwendet (Active-Rank). Gleichzeitig werden erstmals auch die lokalen Effekte abgeschätzt, sodass kritische Anforderungen identifiziert und deren kollektive Änderungsauswirkungen bewertet werden können. Damit wird die ganzheitliche Abschätzung der Änderungsauswirkungen ermöglicht (F2). Für die Wahrscheinlichkeitsanalyse wird auf Basis von Anforderungsabhängigkeiten eine Kennzahl für die endogene Änderungswahrscheinlichkeit (Passive-Rank) ermittelt. Begleitend wird aus historischen Änderungsdaten oder empirischen Studien eine Kennzahl für die exogene Änderungswahrscheinlichkeit bestimmt. Auf Basis dieser beiden Wahrscheinlichkeitskennzahlen kann für jede Anforderung ein Erwartungswert über die Anzahl der Änderungen im Entwicklungsverlauf berechnet werden (F3). Mit der Abschätzung von Änderungsauswirkung und -wahrscheinlichkeit wird die Informationsgrundlage zur Auswahl proaktiver Maßnahmen geschaffen. Diese Auswahl wird durch

eine Übersicht kontextspezifischer Maßnahmen und einen Empfehlungsmechanismus unterstützt (F4). Die Einordnung des proaktiven Änderungsmanagements in die Entwicklung komplexer technischer Systeme (F5) wird anhand von Referenzmodellen auf Organisationsebene (Entwicklungsprozesse und sachlogisches Entwicklungsvorgehen) und Projektebene (Projektmanagement und Rollenmodell) vorgenommen. Zusätzlich werden Anwender:innen bei der Abschätzung und Realisierung von Verbesserungspotenzialen des proaktiven Änderungsmanagements unterstützt.

Die ProMaRC-Methodik führt die Forschungsergebnisse in einem kohärenten Vorgehen zum proaktiven Management von Anforderungsänderungen zusammen. Damit wird die Zielsetzung dieser Arbeit erfüllt, die Potenziale des proaktiven Managements für die Entwicklung komplexer technischer Systeme in der industriellen Praxis zu erschließen. Insbesondere die kontextspezifischen Maßnahmen, die ganzheitliche Bewertung des Änderungsrisikos, die leistungsfähige Abhängigkeitsanalyse und die konkrete Einordnung des proaktiven Änderungsmanagements in die Produktentwicklung gehen über den bisherigen Stand der Forschung hinaus.

Zukünftige Forschung sollte die einzelnen Bestandteile der ProMaRC-Methodik erweitern und mit vor- und nachgelagerten Entwicklungsaktivitäten (z. B. Szenario-Technik [GPS17; GSP17]) verknüpfen. Bei der Abhängigkeitsanalyse sind neue Ansätze zur künstlichen Erzeugung von Trainingsdaten zu untersuchen, um den initialen Anwendungsaufwand für das Training zu reduzieren. Eine Weiterentwicklung der Auswirkungsanalyse zur quantitativen Kostenabschätzung ist als zukünftiges Forschungsfeld vielversprechend. Damit können die Ineffizienzen eines reaktiven Änderungsmanagements ebenso wie Effizienzpotenziale des proaktiven Änderungsmanagements transparent gemacht werden. Bei der Wahrscheinlichkeitsanalyse kann die Berücksichtigung des Entwicklungszeitpunkts zu einer höheren Genauigkeit der Ergebnisse führen. Bisherige Studien zeigen Schwankungen der Änderungswahrscheinlichkeit im Entwicklungsverlauf, sodass die Einbeziehung des Entwicklungszeitpunkts eine situativ angepasste Handhabung von Änderungsrisiken erleichtern könnte.

Ein übergreifendes Forschungspotenzial ist die Verknüpfung der Methodik mit Ansätzen zur modellbasierten Entwicklung. Anforderungen sind ein elementarer Bestandteil der modellbasierten Entwicklung. Durch die ProMaRC-Abhängigkeitsanalyse wird die Anforderungsmodellierung effizienter. Eine Integration der Abhängigkeitsanalyse in Ansätze zur modellbasierten Entwicklung ist daher vielversprechend und bietet über das proaktive Änderungsmanagement hinaus Anwendungspotenziale (z. B. für die zertifizierungsgerechte Entwicklung auf Basis von Wirkkettenmodellierung [GWK22]). Erste Schritte dahingehend werden in den Forschungsprojekten ImPaKT (<https://www.impakt-projekt.de/>) und BIKINI (<https://bikini-projekt.de/>) bereits unternommen. Dort wird die ProMaRC-Methodik mit 15 Industriepartnern und drei Forschungspartnern beispielsweise für die Entwicklung eines Raupenlaufwerks für Mähdrescher, einer Auswuchtmaschine oder einer generativ entwickelten Autotür verwendet.



## Literaturverzeichnis

- [AB93] ARNOLD, R. S.; BOHNER, S. A.: Impact analysis – towards a framework for comparison. In: Card, D. (Hrsg.): 1993 Conference on Software Maintenance. IEEE, Piscataway, NJ, USA, 1993; S. 292–301.
- [ABN06] ALMEFELT, L.; BERGLUND, F.; NILSSON, P.; MALMQVIST, J.: Requirements management in practice – Findings from an empirical study in the automotive industry. In: Research in Engineering Design, 17 (2006) 3; S. 113–134.
- [ACC00] ANTONIOL, G.; CANFORA, G.; CASAZZA, G.; LUCIA, A. de: Identifying the starting impact set of a maintenance request: A case study. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the Fourth European Conference on Software Maintenance and Reengineering. IEEE, Piscataway, NJ, USA, 2000; S. 227–230.
- [AHH18] ALBERS, A.; HEIMICKE, J.; HIRSCHTER, T.; RICHTER, T.; REIB, N.; MAIER, A.; BURSAC, N.: Managing Systems of Objectives in the agile Development of Mechatronic Systems by ASD – Agile Systems Design. In: Design Society (Hrsg.): Proceedings of NordDesign 2018 – Design in the era of digitalization. Design Society, Glasgow, UK, 2018; S. 1–11.
- [AK07] AHMED-KRISTENSEN, S.; KANIKE, Y.: Engineering change during a product's lifecycle. In: Design Society (Hrsg.): Proceedings of the Design Society – 16<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007; S. 633–634.
- [AKE07] ARIYO, O. O.; KELLER, R.; ECKERT, C. M.; CLARKSON, P. J.; others: Predicting change propagation on different levels of granularity: an algorithmic view. In: Design Society (Hrsg.): Proceedings of the Design Society – 16<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007; S. 655–656.
- [Alp19] ALPAYDIN, E.: *Maschinelles Lernen*. De Gruyter, Oldenbourg, 2019.
- [Bac99] BACCARINI, D.: The logical framework method for defining project success. In: Project management journal, 30 (1999) 4; S. 25–32.
- [BC09] BLESSING, L. T. M.; CHAKRABARTI, A.: *DRM, a Design Research Methodology*. Springer International Publishing. Dordrecht Heidelberg London New York, 2009.
- [BCN16] BCN3D: BCN3D Moveo – A fully Open Source 3D printed robot arm. Unter: <https://www.bcn3d.com/bcn3d-moveo-the-future-of-learning-robotic-arm/>, 15.02.2022.
- [BG21] BENDER, B.; GERICKE, K.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. Springer Vieweg. Berlin Heidelberg, 2021.
- [BII12] BANO, M.; IMTIAZ, S.; IKRAM, N.; NIAZI, M.; USMAN, M.: Causes of requirement change – A systematic literature review. In: Piattini, M. (Hrsg.): 16<sup>th</sup> International Conference on Evaluation & Assessment in Software Engineering. IEEE, Piscataway, NJ, USA, 2012; S. 22–31.
- [BKM09] BANGOR, A.; KORTUM, P.; MILLER, J.: Determining what individual SUS scores mean: Adding an adjective rating scale. In: Journal of usability studies, 4 (2009) 3; S. 114–123.
- [Boc96] BOCHTLER, W.: *Modellbasierte Methodik für eine integrierte Konstruktion und Arbeitsplanung*. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss. Shaker. Aachen, 1996.
- [Böh21] BÖHM, T.: Erarbeitung einer Methode zur Auswirkungsanalyse von Anforderungsänderungen in der Entwicklung interdisziplinärer Systeme. Studienarbeit, Heinz Nixdorf Institut - Lehrstuhl für Produktentstehung, Universität Paderborn. Paderborn, 2021. [vgl. Zitation aus studentischen Arbeiten]
- [Bot21] BOTHE, S.: Methode zur Beurteilung der Änderungswahrscheinlichkeit von Anforderungen durch exogene Änderungsimpulse in der interdisziplinären Produktentwicklung. Masterarbeit, Heinz Nixdorf Institut - Lehrstuhl für Produktentstehung, Universität Paderborn. Paderborn, 2021. [vgl. Zitation aus studentischen Arbeiten]
- [Bou12] BOURIER, G.: *Statistik-Übungen – Beschreibende Statistik Wahrscheinlichkeitsrechnung Schließende Statistik*. Gabler Verlag. Wiesbaden, 2012.

- [Bou19] BOURAFFA, A.: Improving The Quality of Requirement Specifications Using Automatic Ambiguity Detection Tools. Dissertation, Institute for Software Systems, Technische Universität Hamburg-Harburg. Hamburg, 2019.
- [BP98] BRIN, S.; PAGE, L.: The anatomy of a large-scale hypertextual Web search engine. In: Computer Networks and ISDN Systems, 30 (1998) 1-7; S. 107–117.
- [Bro96] BROOKE, J.: SUS-A quick and dirty usability scale. In: Jordan, P. W. et al. (Hrsg.): Usability Evaluation In Industry. CRC Press, London, IK, 1996; S. 94–100.
- [Bro99] BROWNING, T. R.: Modeling and analyzing cost, schedule, and performance in complex system product development. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, University of Cambridge. Cambridge, MA, USA, 1999.
- [CMMI-DEV] Carnegie Mellon Software Engineering Institute: CMMI for Development, Version 1.2. Carnegie Mellon University. Pittsburgh, 2018.
- [CC12] CHENG, H.; CHU, X.: A network-based assessment approach for change impacts on complex product. In: Journal of Intelligent Manufacturing, 23 (2012) 4; S. 1419–1431.
- [CDK07] CONRAD, J.; DEUBEL, T.; KÖHLER, C.; WANKE, S.; WEBER, C.: Change impact and risk analysis (CIRA) – Combining the CPM/PDD theory and FMEA-methodology for an improved engineering change management. In: Design Society (Hrsg.): Proceedings of the Design Society – 16<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007; S. 9–10.
- [CSE04] CLARKSON, P. J.; SIMONS, C.; ECKERT, C.: Predicting Change Propagation in Complex Design. In: Journal of Mechanical Design, 126 (2004) 5; S. 788–797.
- [CSL01] CARLSHAMRE, P.; SANDAHL, K.; LINDVALL, M.; REGNELL, B.; NATT OCH DAG, J.: An industrial survey of requirements interdependencies in software product release planning. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings Fifth IEEE International Symposium on Requirements Engineering. IEEE, Piscataway, NJ, USA, 2001; S. 84–91.
- [Dah01] DAHLSTEDT, Å.: Requirements Interdependencies - a Research Framework. Unter: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.198.8973&rep=rep1&type=pdf>, 20.01.2022.
- [Dah02] DAHMEN, J.: Prozeßorientiertes Risikomanagement zur Handhabung von Produktrisiken. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss. Shaker Verlag. Aachen, 2002.
- [Dal82] DALE, B. G.: The management of engineering change procedure. In: Engineering Management International, 1 (1982) 3; S. 201–208.
- [DCL19] DEVLIN, J.; CHANG, M.-W.; LEE, K.; TOUTANOVA, K.: BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. Unter: <https://arxiv.org/pdf/1810.04805v2.pdf>, 06.12.2021.
- [Die12] DIEDERICHS, M.: Risikomanagement und Risikocontrolling. Verlag Franz Vahlen. München, 2012.
- [DIN9001] DIN EN ISO: Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen (ISO\_9001:2015). Beuth Verlag GmbH. Berlin, 2015.
- [DIN21500-02] DIN ISO: Leitlinien Projektmanagement. Beuth Verlag GmbH. Berlin, 2016.
- [DIN31000] DIN ISO: Risikomanagement- Leitlinien (ISO 31000:2018). Beuth Verlag GmbH. Berlin, 2018.
- [DP03] DAHLSTEDT, Å. G.; PERSSON, A.: Requirements Interdependencies - Moulding the State of Research into a Research Agenda. In: Salinesi, C.; Regnall, B.; Kamsties, E. (Hrsg.): Ninth International Workshop on Requirements Engineering: Foundation for Software Quality. Universitätsbibliothek Essen, Essen, 2003; S. 71–80.
- [Dud18] Dudenredaktion: „proaktiv“ auf Duden online. Unter: <https://www.duden.de/node/156914/revision/156950>, 14.02.2022.

- [EB12] EPPINGER, S. D.; BROWNING, T. R.: *Design structure matrix methods and applications*. MIT Press. Cambridge, Mass., London, 2012.
- [Ebe14] EBERT, C.: *Systematisches Requirements Engineering – Anforderungen ermitteln, spezifizieren, analysieren und verwalten*. dpunkt-Verlag. Heidelberg, 2014.
- [Ebe19] EBERT, C.: *Systematisches Requirements Engineering – Anforderungen ermitteln, dokumentieren, analysieren und verwalten*. dpunkt-Verlag. Heidelberg, 2019.
- [ECS03] ECKERT, C. M.; CLARKSON, P. J.; STACEY, M. K.: The spiral of applied research – A methodological view on integrated design research. In: Design Society (Hrsg.): *Proceedings of the Design Society – 14<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2003; S. 245–255.
- [ECZ04] ECKERT, C.; CLARKSON, P. J.; ZANKER, W.: Change and customisation in complex engineering domains. In: *Research in Engineering Design*, 15 (2004) 1; S. 1–21.
- [EDF96] ECKLUND, E.; DELCAMBRE, L. M. L.; FREILING, M. J.: Change cases: use cases that identify future requirements. In: Anderson, L.; Coplien, J. (Hrsg.): *Proceedings of the 11<sup>th</sup> ACM SIGPLAN conference on Object-oriented programming, systems, languages, and applications*. Association for Computing Machinery, New York, N.Y., USA, 1996; S. 342–358.
- [EDG98] EVERSHAM, W.; DEUSE, J.; GRÄSSLER, R.; SCHULTEN, I.: Information based Optimization of Workflow in Design and Process Planning. In: Krause, F. L. (Hrsg.): *New tools and workflows for product development*. Fraunhofer-IRB, Stuttgart, 1998; S. 696–706.
- [EDL10] EBEN, K. G. M.; DANIILIS, C.; LINDEMANN, U.: Interrelating and Prioritising Requirements on Multiple Hierarchy Levels. In: Marjanovic D., Storga M., Pavkovic N., Bojetic N. (Hrsg.): *Proceedings of the Design – 11<sup>th</sup> International Design Conference*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2010; S. 1055–1064.
- [EGZ12] EIGNER, M.; GILZ, T.; ZAFIROV, R.: Proposal for functional product description as part of a PLM solution in interdisciplinary product development. In: Marjanovic D., Storga M., Pavkovic N., Bojetic N. (Hrsg.): *Proceedings of DESIGN – 12<sup>th</sup> International Design Conference*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2012; S. 1667–1676.
- [EKM10] ENGELHARDT, R.; KLOBERDANZ, H.; MATHIAS, J.; BIRKHOFER, H.; others: An approach of a model to describe uncertainty in technical systems. In: Marjanovic D., Storga M., Pavkovic N., Bojetic N. (Hrsg.): *Proceedings of the Design – 11<sup>th</sup> International Design Conference*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2010; S. 213–222.
- [EL10] EBEN, K. G. M.; LINDEMANN, U.: Structural Analysis of Requirements – Interpretation of structural criterions. In: Wynn, D. C. et al. (Hrsg.): *Managing Complexity by Modelling Dependencies – Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Dependency and Structure Modelling Conference*. Hanser, München, 2010; S. 249–261.
- [Eng13] ENGELHARDT, R. A.: *Uncertainty Mode and Effects Analysis - heuristische Methodik zur Analyse und Beurteilung von Unsicherheiten in technischen Systemen des Maschinenbaus*. Zugl.: Darmstadt, TU, Diss. VDI-Verlag. Darmstadt, 2013.
- [FGN00] FRICKE, E.; GEBHARD, B.; NEGELE, H.; IGENBERGS, E.: Coping with changes – Causes, findings, and strategies. In: *Systems Engineering*, 3 (2000) 4; S. 169–179.
- [FHS15] FERNANDES, J.; HENRIQUES, E.; SILVA, A.; MOSS, M. A.: Requirements change in complex technical systems – An empirical study of root causes. In: *Research in Engineering Design*, 26 (2015) 1; S. 37–55.
- [FMC05] FORSBERG, K.; MOOZ, H.; COTTERMAN, H.: *Visualizing Project Management – Models and Frameworks for Mastering Complex Systems*. Wiley. Hoboken, NJ, USA, 2005.
- [Fra09] FRANKE, H.-J.: Methodische Hilfen für den Umgang mit komplexen Produkten. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): *Design for X – Beiträge zum 20. DfX Symposium*. Design Society, Glasgow, UK, 2009; S. 27–30.

- [FSF17] FELFERNIG, A.; STETTINGER, M.; FALKNER, A.; ATAS, M.; FRANCH, X.; PALOMARES, C.: Open-Req: Recommender Systems in Requirements Engineering. In: CEUR-WS.org (Hrsg.): CEUR Workshop Proceedings. CEUR-WS, Online Publisher, 2017; S. 1–4.
- [GB11] GERICKE, K.; BLESSING, L.: Enhancing Project Robustness – A Risk Management Perspective. Zugl.: Berlin, TU, Diss. Universitätsbibliothek der Technischen Universität Berlin. Berlin, 2011.
- [GDB18] GRÄBLER, I.; DATTNER, M.; BOTHEN, M.: Main Feature List as core success criteria of organizing Requirements Elicitation. In: RADMA (Hrsg.): R&D Management Conference 2018 – R&Designing Innovation: Transformational Challenges for Organizations and Society, 2018; S. 1–16.
- [GG20] GONZÁLEZ-CARVAJAL, S.; GARRIDO-MERCHÁN, E. C.: Comparing BERT against traditional machine learning text classification. Unter: <https://arxiv.org/pdf/2005.13012.pdf>, 06.12.2021.
- [GH20] GRAESSLER, I.; HENTZE, J.: The new V-Model of VDI 2206 and its validation. In: at - Automatisierungstechnik, 68 (2020) 5; S. 312–324.
- [GHO18] GRAESSLER, I.; HENTZE, J.; OLEFF, C.: Systems Engineering competencies in academic education – An industrial survey about skills in Systems Engineering. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the 13<sup>th</sup> System of Systems Engineering Conference (SoSE). IEEE, Piscataway, NJ, 2018; S. 501–506.
- [GHS12] GRÄBLER, I.; HAAS, V.; SUCHOWERSKYJ, W.: Innovation Based on Applying Design Methodology. In: Horvath, I. et al. (Hrsg.): Proceedings of TMCE, 2012; S. 37–43.
- [GKK16] GEBHARDT, N.; KRUSE, M.; KRAUSE, D.: Gleichteile- Modul- und Plattformstrategie. In: Lindemann, U. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. Hanser, München, 2016; S. 111–149.
- [GKv14] GOKNIL, A.; KURTEV, I.; VAN DEN BERG, K.; SPIJKERMAN, W.: Change impact analysis for requirements: A metamodeling approach. In: Information and Software Technology, 56 (2014) 8; S. 950–972.
- [Gle11] GLEIBNER, W.: Grundlagen des Risikomanagements im Unternehmen – Controlling, Unternehmensstrategie und wertorientiertes Management. Verlag Franz Vahlen. München, 2011.
- [GMD21] GADZO, E.; MEHLSTÄUBL, J.; DENK, M.; PAETZOLD, K.: Modellbasierte Umsetzung des Anforderungsmanagements zur Unterstützung der Entwicklung eines Experimentalssatelliten. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Design for X – Beiträge zum 32. DfX Symposium. TuTech Verlag, Hamburg, 2021; S. 1–10.
- [GMP13] GERICKE, K.; MEßNER, M.; PAETZOLD, K.: Understanding the context of product development. In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design (ICED13) – Design for harmonies. Design Society, Somerset, UK, 2013; S. 191–200.
- [GMT16] GLEICH, R.; MUNCK, J. C.; TKOTZ, A.: Entwicklungscontrolling – Ausgestaltung in einem ganzheitlichen Innovationscontrolling-Ansatz. In: Lindemann, U. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. Hanser, München, 2016; S. 349–398.
- [GO19] GRÄBLER, I.; OLEFF, C.: Risikoorientierte Analyse und Handhabung von Anforderungsänderungen. In: Krause, D.; Kristin Paetzold; Wartzack, S. (Hrsg.): Design for X – Beiträge zum 30. DfX-Symposium. TuTech Verlag, Hamburg, 2019; S. 49–60.
- [GO22] GRÄBLER, I.; OLEFF, C.: Systems Engineering – Verstehen und industriell umsetzen. Springer Vieweg. Berlin, 2022 (Manuskripteinreichung)
- [GOH19] GRÄBLER, I.; OLEFF, C.; HENTZE, J.: Role Model for Systems Engineering Application. In: Design Society (Hrsg.): Proceedings of the Design Society – 22<sup>nd</sup> International Conference on Engineering Design. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2019; S. 1265–1274.
- [GOH22] GRÄBLER, I.; OLEFF, C.; HIEB, M.; PREUß, D.: Automated requirement dependency analysis for complex technical systems. In: Design Society (Hrsg.): Proceedings of the Design Society – 17<sup>th</sup> International Design Conference. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2022.

- [GOP21] GRÄBLER, I.; OLEFF, C.; PREUß, D.: Holistic change propagation and impact analysis in requirements management. In: RADMA (Hrsg.): Proceedings of R&D Management Conference 2021 – Innovation in an Era of Disruption, 2021.
- [GOP22] GRÄBLER, I.; OLEFF, C.; PREUß, D.: Proactive Management of Requirement Changes in the Development of Complex Technical Systems. In: Applied Sciences, 12 (2022) 4; S. 1874.
- [GOS18] GRÄBLER, I.; OLEFF, C.; SCHOLLE, P.: Methode zur Bewertung von Anforderungsänderungen additiv gefertigter Produkte. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Design for X – Beiträge zum 29. DfX-Symposium. TuTech Innovation, Hamburg, 2018; S. 333–344.
- [GOS19] GRÄBLER, I.; OLEFF, C.; SCHOLLE, P.: Priorisierung von Anforderungen für die Entwicklung mechatronischer Systeme. In: Bertram, T. et al. (Hrsg.): Fachtagung Mechatronik 2019. Universität Paderborn, Paderborn, 2019; S. 1–6.
- [GOS20] GRAESSLER, I.; OLEFF, C.; SCHOLLE, P.: Method for Systematic Assessment of Requirement Change Risk in Industrial Practice. In: Applied Sciences, 10 (2020) 23; S. 8697.
- [GOS21] GRÄBLER, I.; OLEFF, C.; SCHOLLE, P.: Strategisch-technische Anforderungsanalyse. In: Koch, R. et al. (Hrsg.): Mehrzieloptimierte und durchgängig automatisierte Bauteilentwicklung für Additive Fertigungsverfahren im Produktentstehungsprozess – Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojektes OptiAMix. Shaker Verlag, Düren, 2021; S. 31–49.
- [GOT19] GRÄBLER, I.; OLEFF, C.; TAPLICK, P.: Augmented Reality für die Vermittlung von Systems Engineering. In: Bertram, T. et al. (Hrsg.): Fachtagung Mechatronik 2019. Universität Paderborn, Paderborn, 2019; S. 180–185.
- [GP20] GRÄBLER, I.; PÖHLER, A.: Produktentstehung im Zeitalter von Industrie 4.0. In: Maier, G.; Engels, G.; Eckhard, S. (Hrsg.): Handbuch Gestaltung digitaler und vernetzter Arbeitswelten. Springer-Verlag, Berlin, 2021, S.383-403.
- [GP21] GRÄBLER, I.; POTTEBAUM, J.: Generic Product Lifecycle Model: A Holistic and Adaptable Approach for Multi-Disciplinary Product–Service Systems. In: Applied Sciences, 11 (2021) 10; S. 4516.
- [GP22] GRÄBLER, I.; POTTEBAUM, J.: From Agile Strategic Foresight to Sustainable Mechatronic and Cyber-Physical Systems in Circular Economies. In: Krause, D.; Heyden, E. (Hrsg.): Design Methodology for Future Products – Data Driven, Agile and Flexible. Springer International Publishing, Cham, 2022; S. 3–26.
- [GPO20] GRÄBLER, I.; PREUß, D.; OLEFF, C.: Automatisierte Identifikation und Charakterisierung von Anforderungsabhängigkeiten – Literaturstudie zum Vergleich von Lösungsansätzen. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Design fox X – Beiträge zum 30. DfX-Symposium. TuTech Verlag, Hamburg, 2020; S. 199–208.
- [GPO21] GRÄBLER, I.; POTTEBAUM, J.; OLEFF, C.; PREUß, D.: Handling of explicit uncertainty in requirements change management. In: Design Society (Hrsg.): Proceedings of the Design Society – 23<sup>rd</sup> International Conference in Engineering Design. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2021; S. 1687–1696.
- [GPS17] GRÄBLER, I.; POTTEBAUM, J.; SCHOLLE, P.: Integrated Process and Data Model for Agile Strategic Planning. In: Vajna, S. (Hrsg.): 11th International Workshop on Integrated Design Engineering, 2017.
- [Gra03] GRAESSLER, I.: Impacts of information management on customized vehicles and after-sales services. In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 16 (2003) 7-8; S. 566–570.
- [Grä99] GRÄBLER, I.: Informations- und zeitbasiertes Controlling einer integrierten Konstruktion und Arbeitsplanung. Dissertation, Werkzeugmaschinenlabor (WZL), Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen, 1999.
- [Grä04] GRÄBLER, I.: Kundenindividuelle Massenproduktion – Entwicklung, Vorbereitung der Herstellung, Veränderungsmanagement. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg New York, 2004.

- [Grä15] GRÄBLER, I.: Umsetzungsorientierte Synthese mechatronischer Referenzmodelle – Implementation-oriented synthesis of mechatronic reference models. In: Bertram, T.; Corves, B.; Janschek, K. (Hrsg.): Fachtagung Mechatronik 2015. Technische Universität Dresden, Dresden, 2015; S. 167–172.
- [Grä17] GRÄBLER, I.: A new V-Model for interdisciplinary product engineering. In: 59th IWK. Ilmenau Scientific Colloquium. Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, 2017; S.1-6.
- [GRJ13] GHOSH, S.; RAMASWAMY, S.; JETLEY, R. P.: Towards Requirements Change Decision Support. In: Muenchaisri, P.; Rothermel, G. (Hrsg.): 20<sup>th</sup> Asia-Pacific Software Engineering Conference. IEEE, Piscataway, NJ, USA, 2013; S. 148–155.
- [GRS08] GÄRTNER, T.; ROHLEDER, N.; SCHLICK, C. M.: Simulation of Product Change Effects on the Duration of Development Processes based on the DSM. In: Kreimeyer, M.; Lindemann, U.; Danilovic, M. (Hrsg.): Proceedings of the 10<sup>th</sup> International DSM Conference. Hanser, München, 2008; S. 199–208.
- [Gru08] GRUNDMANN, T.: Ein anwendungsorientiertes System für das Management von Produkt- und Prozessrisiken. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss. Apprimus-Verl. Aachen, 2008.
- [GSH18] GRÄBLER, I.; SCHOLLE, P.; HENTZE, J.; OLEFF, C.: Semi-Automatized Assessment of Requirement Interrelations. In: Design Society (Hrsg.): Proceedings of the Design Conference – 15<sup>th</sup> International Design Conference. Cambridge University Press, Cambridge, MA, USA, 2018; S. 325–334.
- [GSP17] GRÄBLER, I.; SCHOLLE, P.; POTTEBAUM, J.: Integrated process and data model for applying scenario-technique in requirements engineering. In: Design Society (Hrsg.): Proceedings of the Design Society – 21<sup>nd</sup> International Conference on Engineering Design. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2017; S.261-270.
- [GTO19] GRÄBLER, I.; THIELE, H.; OLEFF, C.; SCHOLLE, P.; SCHULZE, V.: Method for Analysing Requirement Change Propagation Based on a Modified Pagerank Algorithm. In: Design Society (Hrsg.): Proceedings of the Design Society – 22<sup>nd</sup> International Conference on Engineering Design. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2019; S. 3681–3690.
- [GW21] GRÄBLER, I.; WIECHEL, D.: Systematische Bewertung von Auswirkungsanalysen des Engineering Change Managements. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Design for X – Beiträge zum 32. DfX Symposium. TuTech Verlag, Hamburg, 2021; S. 1–10.
- [GWB09] GIFFIN, M.; WECK, O. de; BOUNOVA, G.; KELLER, R.; ECKERT, C.; CLARKSON, P. J.: Change Propagation Analysis in Complex Technical Systems. In: Journal of Mechanical Design, 131 (2009) 8; S. 81001.
- [GWK22] GRÄBLER, I.; WIECHEL, D.; KOCH, A.-S.; PREUB, D.; OLEFF, C.: Model-based effect-chain analysis for complex systems. In: Design Society (Hrsg.): Proceedings of the Design Society – 17<sup>th</sup> International Design Conference. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2022.
- [GY16] GRÄBLER, I.; YANG, X.: Interdisciplinary Development of Production Systems Using Systems Engineering. In: Procedia CIRP, 50 (2016), S. 653-658.
- [GYX17] GUODONG, Y.; YU, Y.; XUEFENG, Z.; CHI, L.: Network-Based Analysis of Requirement Change in Customized Complex Product Development. In: International Journal of Information Technology & Decision Making, 16 (2017) 04; S. 1125–1149.
- [Ham13] HAMRAZ, B.: Engineering change modelling using a function-behaviour-structure scheme. Dissertation, Department of Engineering, University of Cambridge. Cambridge, UK, 2013.
- [HC10] HEVNER, A.; CHATTERJEE, S.: Design Research in Information Systems – Theory and Practice. Springer Science+Business Media LLC. Boston, MA, USA, 2010.
- [HCC13] HAMRAZ, B.; CALDWELL, N. H. M.; CLARKSON, P. J.: A Holistic Categorization Framework for Literature on Engineering Change Management. In: Systems Engineering, 16 (2013) 4; S. 473–505.

- [HCW13] HAMRAZ, B.; CALDWELL, N. H.; WYNN, D. C.; CLARKSON, P. J.: Requirements-based development of an improved engineering change management method. In: *Journal of Engineering Design*, 24 (2013) 11; S. 765–793.
- [Hey99] HEYN, M.: Methodik zur schnittstellenorientierten Gestaltung von Entwicklungskooperationen. Shaker Verlag. Aachen, 1999.
- [HHL10] HELLENBRAND, D.; HELTEN, K.; LINDEMANN, U.: Approach for development cost estimation in early design phases. In: Marjanovic D., Storga M., Pavkovic N., Bojetic N. (Hrsg.): *Proceedings of the Design – 11<sup>th</sup> International Design Conference*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2010; S. 779–788.
- [Hie21] HIEB, M.: Extracting Dependencies from Requirement Sets: An Explorative Approach to Develop an Automated Text Mining Dependency Engine to Proceed Requirements of Complex Systems. Masterarbeit, Heinz Nixdorf Institut - Lehrstuhl für Produktentstehung, Universität Paderborn. Paderborn, 2021. [vgl. Zitation aus studentischen Arbeiten]
- [HKC21] HEIN, P. H.; KAMES, E.; CHEN, C.; MORKOS, B.: Employing machine learning techniques to assess requirement change volatility. In: *Research in Engineering Design*, 32 (2021) 2; S. 245–269.
- [HR05] HEWITT, J.; RILLING, J.: A light-weight proactive software change impact analysis using use case maps. In: IEEE (Hrsg.): *International Workshop on Software Evolvability*. IEEE, Piscataway, NJ, USA, 2005; S. 41–46.
- [HRH05] HASSINE, J.; RILLING, J.; HEWITT, J.; DSSOULI, R.: Change impact analysis for requirement evolution using use case maps. In: IEEE (Hrsg.): *Eighth International Workshop on Principles of Software Evolution*. IEEE, Piscataway, NJ, USA, 2005; S. 81–90.
- [HSW21] HORBER, D.; SCHLEICH, B.; WARTZACK, S.: Procedure Model for structured relational modeling of requirements to support requirements-oriented decision making. In: *Proceedings of the Design Society*, 1 (2021); S. 2439–2448.
- [Hug18] Huggingface: bert-base-cased. Unter: <https://huggingface.co/bert-base-cased>, 06.12.2021.
- [Hug20] Huggingface: BERT Tokenizer. Unter: [https://huggingface.co/transformers/main\\_classes/tokenizer.html](https://huggingface.co/transformers/main_classes/tokenizer.html), 06.12.2021.
- [HVM18] HEIN, H.; VORIS, N.; MORKOS, B.: Predicting requirement change propagation through investigation of physical and functional domains. In: *Research in Engineering Design*, 29 (2018) 2; S. 309–328.
- [IEEE610.12] IEEE: Standard Glossary of Software Engineering Terminology. IEEE. Piscataway, NJ, USA, 1990.
- [ISO/IEC25010] ISO/IEC: Software-Engineering - Qualitätskriterien und Bewertung von Softwareprodukten (SQuaRE) – Qualitätsmodell und Leitlinien, 2011.
- [ISO15288] ISO/IEC/IEEE: Systems and software engineering-System life cycle processes, 2015.
- [ISO29148] ISO/IEC/IEEE: Systems and software engineering - Life cycle processes - Requirements engineering, 2018.
- [JEC11] JARRATT, T. A. W.; ECKERT, C. M.; CALDWELL, N. H. M.; CLARKSON, P. J.: Engineering change – An overview and perspective on the literature. In: *Research in Engineering Design*, 22 (2011) 2; S. 103–124.
- [JL05] JÖNSSON, P.; LINDVALL, M.: Impact Analysis. In: Aurum, A.; Wohlin, C. (Hrsg.): *Engineering and Managing Software Requirements*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2005; S. 117–142.
- [JL18] JAYATILLEKE, S.; LAI, R.: A systematic review of requirements change management. In: *Information and Software Technology*, 93 (2018) 1; S. 163–185.
- [JP14] JOHANNESSON, P.; PERJONS, E.: *An Introduction to Design Science*. Springer International Publishing. Dordrecht Heidelberg London New York, 2014.

- [KA10] KOCAR, V.; AKGUNDUZ, A.: ADVICE – A virtual environment for Engineering Change Management. In: Computers in Industry, 61 (2010) 1; S. 15–28.
- [KCC12] KOH, Y.; CALDWELL, M.; CLARKSON, J.: A method to assess the effects of engineering change propagation. In: Research in Engineering Design, 23 (2012) 4; S. 329–351.
- [KG18] KRAUSE, D.; GEBHARDT, N.: Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien – Hohe Produktvielfalt beherrschbar entwickeln. Springer Vieweg. Berlin, 2018.
- [KGZ21] Koch, R. et al. (Hrsg.): Mehrzieloptimierte und durchgängig automatisierte Bauteilentwicklung für Additive Fertigungsverfahren im Produktentstehungsprozess – Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojektes OptiAMix. Shaker Verlag. Düren, 2021.
- [Kif21] KIFFMEIER, L.: Beurteilung der endogenen Änderungswahrscheinlichkeit von Anforderungen und den Auswirkungen von Änderungen aufgrund von Anforderungsabhängigkeiten. Masterarbeit, Heinz Nixdorf Institut - Lehrstuhl für Produktentstehung, Universität Paderborn. Paderborn, 2021. [vgl. Zitation aus studentischen Arbeiten]
- [KOR97] KARLSSON, J.; OLSSON, S.; RYAN, K.: Improved practical support for large-scale requirements prioritising. In: Requirements Engineering, 2 (1997) 1; S. 51–60.
- [KPK02] KNETHEN, A.; PAECH, B.; KIEDAISCH, F.; HOUDEK, F.: Systematic requirements recycling through abstraction and traceability. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings IEEE Joint International Conference on Requirements Engineering. IEEE, Piscataway, NJ, USA, 2002; S. 273–281.
- [Kur18] KURRLE, A.: Durchgängige Dokumentation von verteilten Zielsystemen in der Produktentwicklung durch Verwendung semantischer Metainformationen am Beispiel Connected Car. Dissertation, Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe, 2018.
- [Lau95] LAUFENBERG, L.: Methodik zur integrierten Projektgestaltung für die situative Umsetzung des Simultaneous Engineering. Dissertation, Werkzeugmaschinenlabor (WZL), Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen, 1995.
- [Lau02] LAUESEN, S.: Software requirements – Styles and techniques. Addison-Wesley. London, UK, 2002.
- [LGR07] LEMMENS, Y.; GUENOV, M.; RUTKA, A.; COLEMAN, P.; SCHMIDT-SCHÄFFER, T.: Methods to analyse the impact of changes in complex engineering systems. In: Hunt, P. (Hrsg.): Advanced Airship Technologies and Design Approaches. American Institute of Aeronautics & Astronautics, Reston, VA, USA, 2007; S. 7822–7837.
- [LHS08] LAUGWITZ, B.; HELD, T.; SCHREPP, M.: Construction and evaluation of a user experience questionnaire. In: Holzinger, A. (Hrsg.): 4<sup>th</sup> Symposium of the Workgroup Human-Computer Interaction and Usability Engineering. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008; S. 63–76.
- [Lik32] LIKERT, R.: A Technique for the Measurement of Attitudes. In: Archives of Psychology (1932) 140; S. 1–55.
- [Lin09] LINDEMANN, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte – Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Springer-Verlag. Berlin, 2009.
- [Lin97] LINDVALL, M.: An empirical study of requirements-driven impact analysis in object-oriented software evolution. Dissertation, Department of Computer and Information Science, Linköping University. Linköping, 1997.
- [Lin98] LINDEMANN, U.: Integriertes Änderungsmanagement. Springer-Verlag. Berlin, 1998.
- [LSS10] LEE, H.; SEOL, H.; SUNG, N.; HONG, Y. S.; PARK, Y.: An analytic network process approach to measuring design change impacts in modular products. In: Journal of Engineering Design, 21 (2010) 1; S. 75–91.
- [Lüh06] LÜHRIG, T.: Risikomanagement in der Produktentwicklung der deutschen Automobilindustrie – Von der Konzeptentwicklung bis zum Produktionsanlauf. Zugl.: Darmstadt, TU, Diss. Shaker Verlag. Aachen, 2006.

- [LWO20] LEY, P.-P.; WIRTHS, L.; OLEFF, C.; JUNGREITMAYR, F.; VAJNA, S.; PAETZOLD, K.; BORG, J. C.: A methodical approach to integrated product development in total hip arthroplasty. In: Marjanovic, D. et al. (Hrsg.): Proceedings of the Design – 16<sup>th</sup> International Design Conference. Cambridge University Press, Cambridge, MA, USA, 2020; S. 2009–2018.
- [LZL08] LI, J.; ZHANG, D.; LI, S.: Engineering change management based on weighted complex networks. In: IEEE (Hrsg.): International Seminar on Future Information Technology and Management Engineering. IEEE, Piscataway, NJ, USA, 2008; S. 304–308.
- [MD12] MCGEE, S.; Des Greer: Towards an understanding of the causes and effects of software requirements change – Two case studies. In: Requirements Engineering, 17 (2012) 2; S. 133–155.
- [MG09] MCGEE, S.; GREER, D.: A Software Requirements Change Source Taxonomy. In: Boness, K. et al. (Hrsg.): Proceedings of the Fourth International Conference on Software Engineering Advances. IEEE, Los Alamitos, CA, USA, 2009; S. 51–58.
- [MH06] McMANUS, H.; HASTINGS, D.: A framework for understanding uncertainty and its mitigation and exploitation in complex systems. In: IEEE Engineering Management Review, 34 (2006) 3; S. 81–101.
- [MK11] MOOSBRUGGER, H.; KELAVA, A.: Testtheorie und Fragebogenkonstruktion. Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg, 2011.
- [Mor12] MORKOS, B.: Computational Representation And Reasoning Support For Requirements Change Management In Complex System Design. Dissertation, Mechanical Engineering, Clemson University. Clemson, 2012.
- [MS12] MORKOS, B.; SUMMERS, J. D.: A survey of requirement change types. In: ASME (Hrsg.): Proceedings of the International Design Engineering Technical Conference. ASME, New York, N.Y., USA, 2012; S. 1–8.
- [MSS12] MORKOS, B.; SHANKAR, P.; SUMMERS, J. D.: Predicting requirement change propagation, using higher order design structure matrices – An industry case study. In: Journal of Engineering Design, 23 (2012) 12; S. 905–926.
- [Neu16] NEUMANN, M.: Ein modellbasiertes Ansatz zur risikoorientierten Entwicklung innovativer Produkte. Dissertation, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Ruhr-Universität Bochum. Bochum, 2016.
- [NWC11] NAVEED, A., WYNN, D. C.; CLARKSON, J. P.: Information Models used to manage Engineering Change – A review of the literature 2005-2010. In: Anja Maier, Krestine Mougaard, Thomas J. Howard, Tim C. McAlone (Hrsg.): Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design, ICED 2011 – Impacting Society through Engineering Design. Design Society, Glasgow, UK, 2011; S. 1–12.
- [Oeh16] OEHMEN, J.: Risiko- und Chancenmanagement in der Produktentwicklung. In: Lindemann, U. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. Hanser, München, 2016; S. 59–98.
- [Pat82] PATZAK, G.: Systemtechnik — Planung komplexer innovativer Systeme – Grundlagen, Methoden, Techniken. Shaker Verlag. Berlin, Heidelberg, 1982.
- [PBF07] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung - Methoden und Anwendung. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, 2007.
- [PDH21] PETROLL, C.; DENK, M.; HOLTMANNSPÖTTER, J.; PAETZOLD, K.; HÖFER, P.: Synthetic Data Generation for Deep Learning Models. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Design for X – Beiträge zum 32. DfX Symposium. TuTech Verlag, Hamburg, 2021; S. 1–10.
- [PG20] POTTEBAUM, J.; GRÄSSLER, I.: Informationsqualität in der Produktentwicklung – Modellbasiertes Systems Engineering mit expliziter Berücksichtigung von Unsicherheit. In: Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe (2020) 7; S. 76–83.
- [Poh07] POHL, K.: Requirements engineering – Grundlagen, Prinzipien, Techniken. dpunkt-Verlag. Heidelberg, 2007.

- [Poh96] POHL, K.: *Process-centered requirements engineering*. Wiley. New York, N.Y., USA, 1996.
- [Por14] PORST, R.: *Fragebogen – Ein Arbeitsbuch*. Springer Vieweg. Wiesbaden, 2014.
- [PR15] POHL, K.; RUPP, C.: *Basiswissen Requirements Engineering – Aus- und Weiterbildung nach IREB-Standard zum Certified Professional for Requirements Engineering foundation level nach IREB-Standard*. dpunkt-Verlag. Heidelberg, 2015.
- [PR21] POHL, K.; RUPP, C.: *Basiswissen Requirements Engineering – Aus- und Weiterbildung nach IREB-Standard zum Certified Professional for Requirements Engineering Foundation Level*. dpunkt-Verlag. Heidelberg, 2021.
- [Pre20] Presseportal.de: Meistgenutzte Office-Software von Büromitarbeitern in Unternehmen in Deutschland im Jahr 2020. Unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/77226/umfrage/internetnutzer---verbreitung-von-office-software-in-deutschland/>, 26.11.2021.
- [PTR07] PEFFERS, K.; TUUNANEN, T.; ROTHENBERGER, M. A.; CHATTERJEE, S.: A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. In: *Journal of Management Information Systems*, 24 (2007) 3; S. 45–77.
- [PVG11] PEDREGOSA, F.; VAROQUAUX, G.; GRAMFORT, A.; MICHEL, V.; THIRION, B.; GRISEL, O.; BLONDEL, M.; PRETTENHOFER, P.; WEISS, R.; DUBOURG, V.; VANDERPLAS, J.; PASSOS, A.; COURNAPEAU, D.; BRUCHER, M.; PERROT, M.; DUCHESNAY, E.: Scikit-learn: Machine Learning in Python. In: *Journal of Machine Learning Research* (2011) 12; S. 2825–2830.
- [PW12] PASQUAL, M. C.; WECK, O. L. de: Multilayer network model for analysis and management of change propagation. In: *Research in Engineering Design*, 23 (2012) 4; S. 305–328.
- [RDT03] RIVIERE, A.; DACUNHA, C.; TOLLENAERE, M.: Performances in Engineering Changes Management. In: Gogu, G. et al. (Hrsg.): *Recent Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*. Springer Netherlands, Dordrecht, NL, 2003; S. 369–378.
- [RGL06] RUTKA, A.; GUENOV, M. D.; LEMMENS, Y.; SCHMIDT-SCHÄFFER, T.; COLEMAN, P.; RIVIERE, A.: Methods for engineering change propagation analysis. In: International Council of the Aeronautical Sciences (Hrsg.): *25<sup>th</sup> Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*. ICAS, Edinburgh, UK, 2006; S. 1–8.
- [Riv21] Riverbank Computing: PyQt. Unter: <https://riverbankcomputing.com/software/pyqt/intro>, 07.12.2021.
- [RJ01] RAMESH, B.; JARKE, M.: Toward reference models for requirements traceability. In: *IEEE Transactions on Software Engineering*, 27 (2001) 27; S. 58–93.
- [RM20] RAO, D.; MCMAHAN, B.: *Natural Language Processing mit PyTorch – Intelligente Sprachanwendungen mit Deep Learning erstellen*. O'Reilly Verlag. Heidelberg, 2020.
- [RPV03] ROBINSON, W. N.; PAWLOWSKI, S. D.; VOLKOV, V.: Requirements interaction management. In: *ACM Computing Surveys*, 35 (2003) 2; S. 132–190.
- [RS14] RUPP, C.; SOPHISTen: Requirements-Engineering und -Management – Aus der Praxis von klassisch bis agil. Hanser. München, 2014.
- [SAT20] STARK, R.; ANDERL, R.; THOBEN, K.-D.; WARTZACK, S.: WiGeP-Positionspapier: „Digitaler Zwilling“. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 115 (2020) special; S. 47–50.
- [SBM96] SAUERWEIN, E.; BAILOM, F.; MATZLER, K.; HINTERHUBER, H.: The KANO-Model – How to delight your customers. In: *International working seminar on production economics*, 1 (1996) 4; S. 313–327.
- [Sch02] SCHIENMANN, B.: *Kontinuierliches Anforderungsmanagement – Prozesse, Techniken, Werkzeuge*. Addison-Wesley. München, 2002.
- [Sch21] SCHÄWE, L.: Entwicklung der Systemarchitektur einer Softwareunterstützung zur ganzheitlichen Risikoabschätzung und -handhabung von Anforderungsänderungen. Studienarbeit, Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn. Paderborn, 2021. [vgl. Zitation aus studentischen Arbeiten]

- [Sen92] SENGE, P. M.: *The fifth discipline – The art and practice of the learning organization*. Doubleday. New York, N.Y, USA, 1992.
- [SHB19] SONG, Y.-W.; HERZOG, M.; BENDER, B.: Understanding the Initial Requirements Definition in Early Design Phases. In: Design Society (Hrsg.): *Proceedings of the Design Society – 22<sup>nd</sup> International Conference on Engineering Design*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2019; S. 3751–3760.
- [SKK10] STARK, R.; KRAUSE, F.-L.; KIND, C.; ROTHENBURG, U.; MÜLLER, P.; HAYKA, H.; STÖCKERT, H.: Competing in engineering design—The role of Virtual Product Creation. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 3 (2010) 3; S. 175–184.
- [SM02] SMITH, P. G.; MERRITT, G. M.: *Proactive risk management – Controlling uncertainty in product development*. Productivity Press. New York, NY, USA, 2002.
- [SRB18] SCHUH, G.; RIESENER, M.; BREUNIG, S.: *Produktkomplexität managen – Strategien - Methoden - Tools*. Hanser. München, 2018.
- [Sta11] Standish Group: *Chaos Manifesto 2011*. West Yarmouth, MA, USA, 2011.
- [Sta17] Standish Group: *Chaos Manifesto 2018*. West Yarmouth, MA, USA, 2017.
- [Sta22] STARK, R.: *Virtual product creation in industry – The difficult transformation from IT enabler technology to core engineering competence*. Springer. Berlin, Heidelberg, 2022.
- [Sta95] Standish Group: *The CHAOS report*. West Yarmouth, MA, USA, 1995.
- [STG20] STARK, R.; THOBEN, K.-D.; GERHARD, D.; HICK, H.; KIRCHNER, E.; ANDERL, R.; WARTZACK, S.; KRAUSE, F.-L.; GRÄSSLER, I.; POTTEBAUM, J.; SCHLEICH, B.; STELZER, R.; HICK, H. u. K.; KLEIN, P. u. K.; SASKE, B. u. K.; CZWICK, C.; GOGINENI, S.; KLIMMECK, L.; BAJZEK, M.; JACOBS, G.; BERROTH, J.; ZIMMERMANN, T.; KRANABITL, P.; GÖCKEL, N.: *WiGeP Positionspapier - Digitaler Zwilling*. Unter: [http://www.wigep.de/fileadmin/Positions-\\_und\\_Impulspapiere/Positionsrapier\\_Digitaler\\_Zwilling.pdf](http://www.wigep.de/fileadmin/Positions-_und_Impulspapiere/Positionsrapier_Digitaler_Zwilling.pdf), 10.04.2022.
- [Sti20] STICHT, M.: *Mehrzieloptimierte Bauteilentwicklung einer Steuerkurve für additive Fertigungsverfahren*. Studienarbeit, Heinz Nixdorf Institut - Lehrstuhl für Produktentstehung, Universität Paderborn. Paderborn, 2020. [vgl. Zitation aus studentischen Arbeiten]
- [Ulr81] ULRICH, H.: *Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft*. In: Geist, M.; Köhler, R. (Hrsg.): *Die Führung des Betriebes – Curt Sandig zu seinem 80. Geburtstag gewidmet*. Poeschel, Stuttgart, 1981; S. 1–27.
- [UNECE156] UNECE: *UN Regulation No. 156 – Software update and software update management system (ECE/TRANS/WP.29/2020/80)*. UNITED NATIONS. New York, N.Y, USA, 2021.
- [Vaj22] Vajna, S. (Hrsg.): *Integrated Design Engineering – Interdisziplinäre und ganzheitliche Produktentwicklung*. Springer Vieweg. Wiesbaden, 2022.
- [Van12] VANINI, U.: *Risikomanagement – Grundlagen, Instrumente, Unternehmenspraxis*. Schäffer-Poeschel. Stuttgart, 2012.
- [van22] VAN ROSSUM, G.: *Python license*. Unter: <https://docs.python.org/3/license.html>, 30.11.2021.
- [VDA QMC3.1] VDA QMC Working Group 13 / Automotive SIG: *Automotive SPICE – Process Assessment / Reference Model*, 2017.
- [VDI2221] VDI: *Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung (Blatt 1)*. Beuth Verlag GmbH. Düsseldorf, 2019.
- [VDI/VDE2206] VDI/VDE: *Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme*. Beuth Verlag GmbH. Berlin, 2021.
- [Wan15] WANNER, R.: *Risikomanagement für Projekte – Die wichtigsten Methoden und Werkzeuge für erfolgreiche Projekte*. Amazon Distribution GmbH. Leipzig, 2015.

- [WB85] WEISS, D. M.; BASILI, V. R.: Evaluating Software Development by Analysis of Changes: Some Data from the Software Engineering Laboratory. In: *IEEE Transactions on Software Engineering*, SE-11 (1985) 2; S. 157–168.
- [Wei14] WEILKENS, T.: *Systems Engineering mit SysML/UML – Anforderungen, Analyse, Architektur*. dpunkt.verlag, Ciando, Heidelberg, München, 2014.
- [Wic17] WICKEL, M. C.: Änderungen besser managen. Dissertation, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Technische Universität München, München, 2017.
- [WIC19] WILMS, R.; INKERMANN, D.; CEMMASSON, V. F.; REIK, M.; VIETOR, T.: Distinction of Domain-Specific and Cross-Domain Linkage Types for Engineering Change Management. In: *Design Society* (Hrsg.): *Proceedings of the Design Society – 22<sup>nd</sup> International Conference on Engineering Design*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2019; S. 1125–1134.
- [Wiß06] WIßLER, F. E.: Ein Verfahren zur Bewertung technischer Risiken in der Phase der Entwicklung komplexer Serienprodukte. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss. Jost-Jetter Verlag, Heimsheim, 2006.
- [WRF15] WALDEN, D. D.; ROEDLER, G. J.; FORSBERG, K.; HAMELIN, R. D.; SHORTELL, T. M.: *Systems engineering handbook – A guide for system life cycle processes and activities*. Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2015.
- [WSW20] WILKING, F.; SCHLEICH, B.; WARTZACK, S.: MBSE along the Value Chain – An Approach for the Compensation of additional Effort. In: *IEEE* (Hrsg.): *15<sup>th</sup> International Conference of System of Systems Engineering (SoSE)*. IEEE, Piscataway, NJ, USA, 2020; S. 61–66.
- [XG04] Xing W.; Ghorbani A.: Weighted PageRank algorithm. In: *IEEE* (Hrsg.): *Second Annual Conference on Communication Networks and Services Research*. IEEE, Piscataway, NJ, USA, 2004; S. 305–314.
- [ZLZ14] ZHANG, H.; LI, J.; ZHU, L.; JEFFERY, R.; LIU, Y.; WANG, Q.; LI, M.: Investigating dependencies in software requirements for change propagation analysis. In: *Information and Software Technology*, 56 (2014) 1; S. 40–53.
- [ZYZ20] ZHENG, Y.; YANG, Y.; ZHANG, N.: A model for assessment of the impact of configuration changes in complex products. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* (2020) 2; S. 1–27.

## Zitation aus studentischen Arbeiten

Die nachstehend aufgeführten studentischen Arbeiten wurden im Kontext der vorliegenden Dissertation am Lehrstuhl für Produktentstehung der Universität Paderborn angefertigt. Die Definition der Zielsetzung, die Bearbeitung sowie die Auswertung, Interpretation und Visualisierung von Ergebnissen erfolgten unter wissenschaftlicher Anleitung der Betreuenden Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler und Christian Oleff. Die erzielten Ergebnisse sind zum Teil in die Dissertation eingeflossen.

- [Böh21] BÖHM, T. (Betreuer\_in: Gräßler, I.; Oleff, C.): Erarbeitung einer Methode zur Auswirkungsanalyse von Anforderungsänderungen in der Entwicklung interdisziplinärer Systeme. Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut – Lehrstuhl für Produktentstehung, unveröffentlichte Studienarbeit, 2021.
- [Bot21] BOTHE, S. (Betreuer\_in: Gräßler, I.; Oleff, C.): Methode zur Beurteilung der Änderungswahrscheinlichkeit von Anforderungen durch exogene Änderungsimpulse in der interdisziplinären Produktentwicklung. Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut – Lehrstuhl für Produktentstehung, unveröffentlichte Masterarbeit, 2021.
- [Hie21] HIEB, M. (Betreuer\_in: Müller, O.; Gräßler, I.; Oleff, C.): Extracting Dependencies from Requirement Sets: An Explorative Approach to Develop an Automated Text Mining Dependency Engine to Proceed Requirements of Complex Systems. Universität Paderborn, Wirtschaftsinformatik, insb. Data Analytics, unveröffentlichte Masterarbeit, 2021.
- [Kif21] KIFFMEIER, L. (Betreuer\_in: Gräßler, I.; Pottebaum, J.; Preuß, D.; Oleff, C.): Beurteilung der endogenen Änderungswahrscheinlichkeit von Anforderungen und den Auswirkungen von Änderungen aufgrund von Anforderungsabhängigkeiten. Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut – Lehrstuhl für Produktentstehung, unveröffentlichte Masterarbeit, 2021.
- [Sch21] SCHawe, L. (Betreuer\_in: Gräßler, I.; Oleff, C.): Entwicklung der Systemarchitektur einer Softwareunterstützung zur ganzheitlichen Risikoabschätzung und -handhabung von Anforderungsänderungen. Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut – Lehrstuhl für Produktentstehung, unveröffentlichte Studienarbeit, 2021.
- [Sti20] STICHT, M. (Betreuer\_in: Gräßler, I.; Scholle, P.; Oleff, C.): Mehrzieloptimierte Bauteilentwicklung einer Steuerkurve für additive Fertigungsverfahren. Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut – Lehrstuhl für Produktentstehung, unveröffentlichte Studienarbeit, 2020.



## Anhang

### Inhaltsverzeichnis Seite

<b>A1</b>	<b>Grundlagen und Begriffsdefinitionen .....</b>	<b>A-157</b>
A1.1	Forschungsprozess nach Ulrich .....	A-157
A1.2	Systems Engineering-Kernelemente .....	A-158
A1.3	Qualitätskriterien für Anforderungen .....	A-159
A1.4	Abhängigkeitsarten zwischen Anforderungen.....	A-160
<b>A2</b>	<b>Aktivitäten zur Einbindung von Industrieanwender:innen .....</b>	<b>A-163</b>
A2.1	Weiterführende Unterlagen – Fragebögen .....	A-166
A2.2	Weiterführende Unterlagen – Workshops.....	A-180
<b>A3</b>	<b>Untersuchung des Anwendungszusammenhangs.....</b>	<b>A-197</b>
<b>A4</b>	<b>Methode zur Identifikation von Unsicherheiten .....</b>	<b>A-199</b>
<b>A5</b>	<b>Methode zur Bewertung der Änderungswahrscheinlichkeit.....</b>	<b>A-201</b>
A5.1	Übersicht der Änderungsinitiatoren und exemplarischer Änderungsimpulse .....	A-201
A5.2	Literaturbasierte Ausgangswerte für die Berechnung der exogenen Änderungswahrscheinlichkeit .....	A-202
A5.3	Übersicht der Projektcharakteristika zur Auswahl von Vergleichsprojekten .....	A-203
<b>A6</b>	<b>Methode zur Auswahl von proaktiven Maßnahmen.....</b>	<b>A-205</b>
<b>A7</b>	<b>Software-Werkzeug zur teilautomatisierten Anwendung der Methodik.....</b>	<b>A-207</b>
A7.1	Mock-Up .....	A-207

A7.2	UML und SysML Diagramme.....	A-210
A7.3	Benutzerhandbuch .....	A-228
<b>A8</b>	<b>Referenzprozess .....</b>	<b>A-277</b>
A8.1	Leitfragen für das unternehmensspezifische Tailoring .....	A-277
A8.2	Referenzmodelle zur Potenzialanalyse.....	A-278
A8.2.1	Repräsentative Anwendungsszenarien.....	A-278
A8.2.2	Exemplarische Leistungskennwerte.....	A-286
A8.2.3	Regulatorische Einordnung.....	A-288
A8.3	Referenzmodelle zur inhaltlichen Einordnung .....	A-290
A8.3.1	Primäre Anwendungspotenziale in der Systems Engineering- Prozesslandschaft.....	A-290
A8.3.2	Sekundäre Anwendungspotenziale in der Systems Engineering- Prozesslandschaft.....	A291
A8.4	Referenzmodelle zur projektspezifischen Einordnung .....	A-292
A8.4.1	Einordnung in die Aufgabenbereiche des Projektmanagements...	A-292
A8.4.2	Einordnung in das Systems Engineering-Rollenmodell.....	A-293
<b>A9</b>	<b>Validierung – Fallstudie 4 (Knickarmroboter) .....</b>	<b>A-295</b>

## A1 Grundlagen und Begriffsdefinitionen

## A1.1 Forschungsprozess nach Ulrich

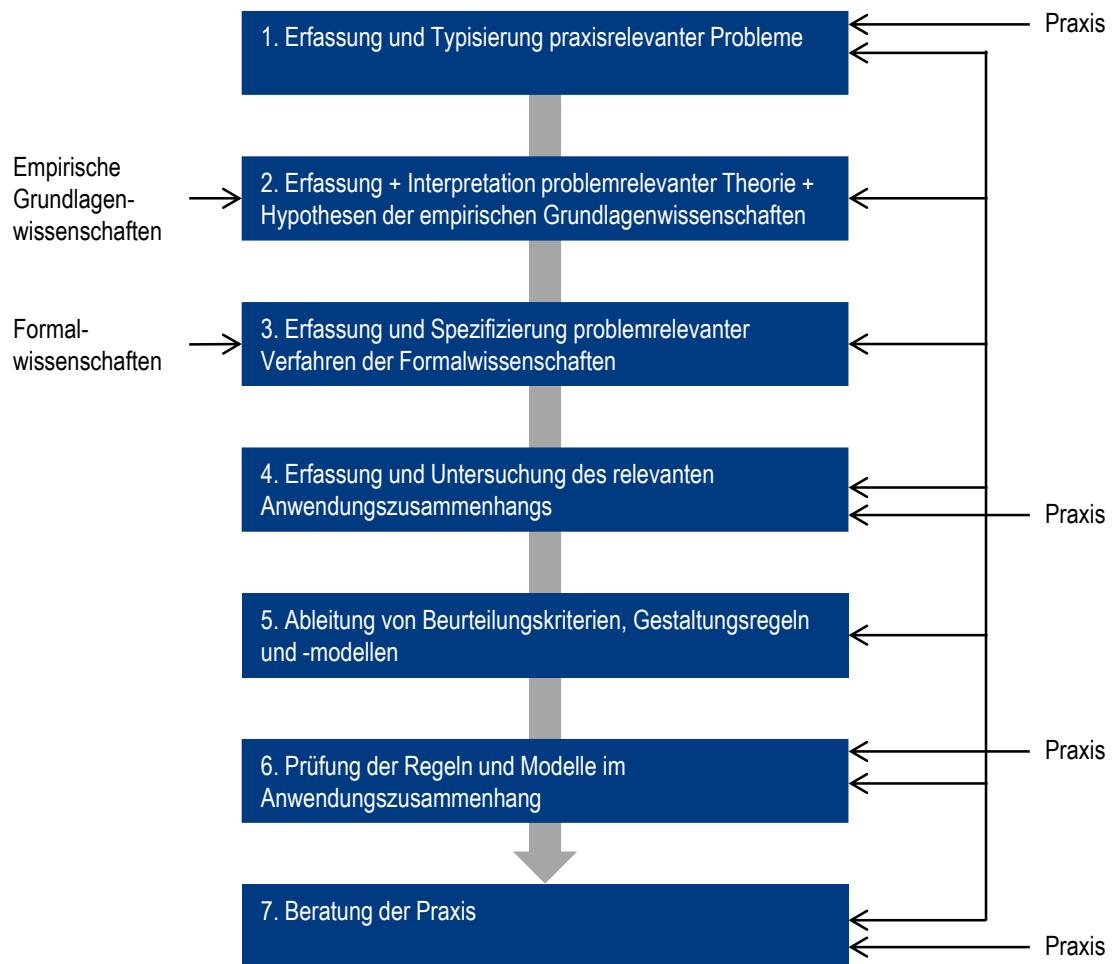


Abbildung A 8-1: Angewandte Wissenschaft in Theorie- und Praxisbezug [Ulr81, S. 20]

## A1.2 Systems Engineering-Kernelemente

*Tabelle A 8-1: Systems Engineering-Prozesse nach INCOSE [ISO15288; WRF15]*

Systems Engineering-Prozesslandschaft	
Technische Prozesse	
Geschäfts- oder Vorhabensanalyse	Integration
Definition von Stakeholderbedürfnissen und -anforderungen	Verifikation
Definition der Systemanforderungen	Übergabe
Definition der Architektur	Validierung
Definition des Designs	Nutzung
Systemanalyse	Wartung
Implementierung	Außenbetriebnahme
Technische Management Prozesse	
Projektplanung	Konfigurationsmanagement
Projektbewertung und -kontrolle	Informationsmanagement
Entscheidungsmanagement	Messungen
Risikomanagement	Qualitätssicherung
Einigungsprozesse	
Akquisition	Beschaffung
Organisatorische Projektunterstützungsprozesse	
Lebenszyklusmodellmanagement	Personalmanagement
Infrastrukturmanagement	Qualitätsmanagement
Portfoliomanagement	Wissensmanagement

*Tabelle A 8-2: Systems Engineering Rollen nach [GOH19]*

Systems Engineering-Rollenmodell	
Anforderungsmanager:innen	Technische Manager:innen
Systemarchitekt:innen	Systemsicherheitsingenieur:innen
Systems Engineering Prozessmanager:innen	Implementierungsingenieur:innen
Modellierungsingenieur:innen	Verifizierungs- & Validierungsingenieur:innen
Projektleiter:innen	Lebenszyklusmanager:innen
Konfigurationsmanager:innen	Schnittstellenmanager:innen
Informationsmanager:innen	Stakeholderinteraktionsmanager:innen
Entrepreneur:innen	

### A1.3 Qualitätskriterien für Anforderungen

Tabelle A 8-3: Übersicht Qualitätskriterien für Anforderungen

Qualitätskriterium	Quelle					
	GRÄSSLER ET AL. [GHS12]	POHL [Poh07]	SCHIEMANN [Sch02]	ISO 2018 [ISO29148]	IREB [PR15]	EBERT [Ebe14]
Vollständigkeit	x	x	x	x	x	x
Korrektheit	x	x	x			x
Konsistenz	x	x	x	x	x	x
Bewertbarkeit		x	x			x
Prüfbarkeit		x	x	x	x	x
Eindeutigkeit / Widerspruchsfreiheit	x	x	x	x	x	x
Modifizierbarkeit						x
Verfolgbarkeit		x	x	x	x	x
Verständlichkeit		x	x		x	x
Notwendigkeit				x	x	x
Realisierbarkeit			x	x	x	x
Abgestimmtheit			x			x
Aktualität		x				
Atomarität		x		x		
technisch lösungsneutral				x		
Wertorientierung						x

## A1.4 Abhängigkeitsarten zwischen Anforderungen

*Tabelle A 8-4: Übersicht von Abhängigkeitsarten zwischen Anforderungen*

Nr.	Bezeichnung	Beschreibung	Gleichzusetzen mit
1	funktionale Beschränkung	Zwischen den Anforderungen gibt es Beschränkungen und Restriktionen, die sich auf die Anforderungsfunktion beziehen.	Constraints [Poh96]; Condition [Dah01]; Constrain [ZLZ14]; Randbedingung [RS14]; Realisierungsvorgabe [RS14]
2	erfordert	Eine Anforderung kann nicht ohne eine zweite Anforderung funktionieren. Dies gilt nur in eine Richtung.	Requires [Dah01]; Must-Exist [KOR97]; Requires [CSL01]; Fachliche Abhängigkeit [RS14]; And [Dah01]; And [CSL01]
3	oder	Lediglich eine der beiden Anforderungen kann implementiert werden und nicht beide.	Or [Dah01]; Cannot-Exist [KOR97]; Or [CSL01]
4	Vorbedingung	Bei der Implementierung muss eine Reihenfolge berücksichtigt werden. Eine der Anforderungen muss daher zeitlich vor der anderen eingeführt werden.	Precondition [Poh96]; Temporal [Dah01]; Temporal [CSL01]; Temporal [RPV03]; Precede [ZLZ14]
5	Inhalt	Die Anforderungen haben eine Abhängigkeit auf inhaltlicher Ebene.	Content [Poh96]; Content [Dah01]
6	Übereinstimmung	Die Anforderungen sind identisch oder haben große Ähnlichkeiten.	Similar [Poh96]; Similar [Dah01]; Structure [RPV03]; Be_similar_to [ZLZ14]
7	Aufgabe	Eine Anforderung beschreibt eine Aufgabe, die von einer anderen Anforderung abhängt.	Task [Dah01]; Task [RPV03]
8	Widerspruch	Zwischen den Anforderungen gibt es Inkonsistenzen.	Contradicts [Poh96]; Contradicts [Dah01]
9	Konsequenz	Eine Anforderung beschreibt die Konsequenz einer anderen Anforderung.	Causality [Dah01]; Causality [RPV03]
10	Ausnahme	Eine Anforderung beschreibt einen Ausnahmefall für Störungen des Funktionsablaufs einer anderen Anforderung.	Ausnahme-Abhängigkeit [RS14]; Be_exemption_of [ZLZ14]
11	Weiterentwicklung	Die Anforderung hat sich in Teilen oder als Ganzes weiterentwickelt.	Evolutionary [Poh96]; Evolutionary [Dah01]; Evolve_into [ZLZ14]
12	Formulierung	Der Inhalt der ursprünglichen Anforderung wird in dieser Anforderung neu formuliert.	Elaborates [Poh96]; Elaborates [Dah01]; Elaborate [RJ01]; Formalizes [Poh96]; Formalizes [Dah01]
13	basiert_auf	Der Inhalt einer Anforderung wird aufgrund einer anderen Anforderung geändert.	Based_on [Poh96]; Based_on [Dah01]
14	ersetzt	Die Anforderung wurde durch eine andere Anforderung ersetzt.	Replaces [Poh96]; Replaces [Dah01]
15	Abhängigkeit	Eine Anforderung ist abhängig von einer anderen Anforderung.	Condition [Poh96]; Depend_on [RJ01]; Dependency [KPK02]
16	Verfeinerung	Eine Anforderung wurde detaillierter in anderen Anforderungen definiert.	Refines [Poh96]; Refines [Dah01]; Derive [RJ01]; Eltern/Kind-Verbindung [RS14]; Refine [ZLZ14]; Refinement [KPK02]; Part_of [Dah01];

			Part_of [RJ01]; Abstraction [Poh96]; Abstraction [Dah01]; Generalizes [Poh96]; Generalizes [Dah01]
17	Kosten / Wert	Die Relation zwischen Implementierungskosten und dem Kundenwert dieser Anforderung für den Kunden wird durch eine andere Anforderung beeinflusst.	Value-related [Dah01]
18	Kostensteigerung	Eine Anforderung erhöht die Implementierungskosten einer anderen Anforderung.	ICost [Dah01]; Negative Cost [KOR97]; ICost [CSL01]; Increase/Decrease_cost_of [ZLZ14]
19	Kostensenkung	Eine Anforderung verringert die Implementierungskosten einer anderen Anforderung.	ICost [Dah01]; Positive Cost [KOR97]; ICost [CSL01]; Increase / Decrease_cost_of [ZLZ14]
20	Wertsteigerung	Eine Anforderung steigert den Kundenwert einer anderen Anforderung.	CValue [Dah01]; Positive Value [KOR97]; CValue [CSL01]; Increase / Decrease_value_of [ZLZ14]
21	Wertminderung	Eine Anforderung mindert den Kundenwert einer anderen Anforderung.	CValue [Dah01]; Negative Value [KOR97]; CValue [CSL01]; Increase / Decrease_value_of [ZLZ14]
22	Korrelation	Eine Anforderung beeinflusst eine andere Anforderung.	Correlation [Dah01]
23	positive Korrelation	Ein verbesserter Erfüllungsgrad der einen Anforderung erhöht auch den Erfüllungsgrad der anderen Anforderung.	Positive Correlation [RPV03]; Satisfies [Poh96]; Satisfies [Dah01]
24	negative Korrelation	Ein verbesserter Erfüllungsgrad der einen Anforderung vermindert den Erfüllungsgrad der anderen Anforderung.	Negative Correlation [RPV03]; Conflicts [Poh96]; Conflicts [Dah01]; Conflict [ZLZ14]
25	Unbekannte Korrelation	Ein veränderter Erfüllungsgrad der einen Anforderung hat einen unbekannten Effekt auf den Erfüllungsgrad der anderen Anforderung.	Unspecified Correlation [RPV03]



## A2 Aktivitäten zur Einbindung von Industrieanwender:innen

Die Übersicht entwicklungsbegleitender Aktivitäten zur Einbindung von Industrievertreter:innen listet alle explizit durchgeführten Aktivitäten zur Einbindung von Industrievertreter:innen auf, die zur Untersuchung des Anwendungszusammenhangs, der Anforderungserhebung sowie der Entwicklung und Validierung der Methodik durchgeführt wurden.

*Tabelle A 8-5: Aktivitäten zur Einbindung von Industrievertreter:innen in die Untersuchung des Anwendungszusammenhangs*

ID	Rahmendaten
F-W1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Art</u>: Industrieworkshop</li> <li>• <u>Beschreibung</u>: Zwischenvalidierung zur Anforderungserhebung</li> <li>• <u>Teilnehmer:innen</u>: ein Geschäftsführer, zwei Leiter der Entwicklung, zwei Projektleiter und drei Entwickler:innen (Summe: 8 Teilnehmer:innen)</li> <li>• <u>Dauer</u>: 90 Minuten</li> <li>• <u>Zeitpunkt</u>: 06.2018</li> </ul>
F-KA1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Art</u>: Regelaustausch (monatlich)</li> <li>• <u>Beschreibung</u>: Austausch mit Beteiligten des entwicklungsbegleitend testenden Industrieunternehmens (Entwicklungsdiensleister)</li> <li>• <u>Teilnehmer:innen</u>: Projektleiter und wechselnde Anwender (Summe: 2-3 Teilnehmer:innen)</li> <li>• <u>Dauer</u>: ca. 60 Minuten</li> <li>• <u>Zeitpunkt</u>: 10.2018 bis 05.2019</li> </ul>
F-F1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Art</u>: Fragebogen</li> <li>• <u>Beschreibung</u>: Validierung der prototypischen Lösung</li> <li>• <u>Teilnehmer:innen</u>: drei Anwender, ein Geschäftsführer, ein Leiter der Entwicklung und ein Projektleiter (Summe: 6 Teilnehmer:innen)</li> <li>• <u>Dauer</u>: ca. 30 Minuten</li> <li>• <u>Zeitpunkt</u>: 12.2019 bis 04.2020</li> </ul>
F-I1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Art</u>: semi-strukturierte Experteninterviews je Industriepartner (3 Stück)</li> <li>• <u>Beschreibung</u>: Detaillierung und Anreicherung der Fragebogenergebnisse</li> <li>• <u>Teilnehmer:innen</u>: siehe F-F1</li> <li>• <u>Dauer</u>: 60 Minuten</li> <li>• <u>Zeitpunkt</u>: 01.2020 bis 04.2020</li> </ul>

*Tabelle A 8-6: Aktivitäten zur Einbindung von Industrievertreter:innen in die Entwicklung und Validierung der Methodik*

ID	Rahmendaten
H-W1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Art:</u> Workshop</li> <li>• <u>Beschreibung:</u> initiale Anforderungserhebung (unter Berücksichtigung der Feldstudien-Ergebnisse)</li> <li>• <u>Teilnehmer:innen:</u> Abteilungsleiter, Projektleiter, Teamleiter, Prozess- / Tool-Verantwortliche, Anforderungsmanager:innen, Entwickler und Fachreferent (Summe: 8 Teilnehmer:innen)</li> <li>• <u>Dauer:</u> 180 Minuten</li> <li>• <u>Zeitpunkt:</u> 02.2020</li> </ul>
H-W2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Art:</u> Workshop</li> <li>• <u>Beschreibung:</u> Spezifizierung und Priorisierung der Anforderungen; Definition von Use-Cases</li> <li>• <u>Teilnehmer:innen:</u> siehe H-W1</li> <li>• <u>Dauer:</u> ca. 120 Minuten</li> <li>• <u>Zeitpunkt:</u> 04.2020</li> </ul>
H-KA1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Art:</u> Regelaustausch (ca. monatlich)</li> <li>• <u>Beschreibung:</u> insbesondere Diskussion von Zwischenergebnissen hinsichtlich Eignung und Praxistauglichkeit und Charakterisierung der zu berücksichtigenden Rahmenbedingungen</li> <li>• <u>Teilnehmer:innen:</u> in der Regel Abteilungsleiter, Anforderungsmanagerin, Prozessverantwortlicher und ein bis drei wechselnde Anwender:innen (Summe: 2 bis 6 Teilnehmer:innen)</li> <li>• <u>Dauer:</u> 30-60 Minuten</li> <li>• <u>Zeitpunkt:</u> 01.2020 bis 12.2021</li> </ul>
H-W3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Art:</u> Workshop</li> <li>• <u>Beschreibung:</u> Finalisierung Use-Cases</li> <li>• <u>Teilnehmer:innen:</u> Anforderungsmanagerin und Prozessverantwortlicher (Summe: 2 Teilnehmer:innen)</li> <li>• <u>Dauer:</u> 120 Minuten</li> <li>• <u>Zeitpunkt:</u> 04.2020</li> </ul>
H-W4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Art:</u> Workshop</li> <li>• <u>Beschreibung:</u> Diskussion der Praxistauglichkeit des Risikoportfolios</li> <li>• <u>Teilnehmer:innen:</u> Anforderungsmanagerin und Prozessverantwortlicher (Summe: 2 Teilnehmer:innen)</li> <li>• <u>Dauer:</u> 120 Minuten</li> <li>• <u>Zeitpunkt:</u> 09.2020</li> </ul>
H-W5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Art:</u> Workshop</li> <li>• <u>Beschreibung:</u> Diskussion und Anreicherung der Liste mit Risikosteuerungsmaßnahmen und Maßnahmen zur Identifikation von Unsicherheiten</li> <li>• <u>Teilnehmer:</u> Anforderungsmanagerin und Prozessverantwortlicher (Summe: 2 Teilnehmer:innen)</li> <li>• <u>Dauer:</u> 120 Minuten</li> <li>• <u>Zeitpunkt:</u> 11.2020</li> </ul>
H-W6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Art:</u> Workshop</li> <li>• <u>Beschreibung:</u> Erfassung der Ist-Prozesse und Definition der Soll-Prozesse bei Anwendung der Methodik (Änderungs- und Risikomanagement), Erfassung von Software-Landschaft und Definition erforderlicher Schnittstellen</li> <li>• <u>Teilnehmer:innen:</u> Abteilungsleiter, Anforderungsmanagerin, Prozessverantwortlicher, Fachreferent und Anwenderin (Summe: 5 Teilnehmer:innen)</li> <li>• <u>Dauer:</u> 120 Minuten</li> <li>• <u>Zeitpunkt:</u> 12.2020</li> </ul>

H-W7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Art:</u> Besprechung</li> <li>• <u>Beschreibung:</u> Validierungsplanung (Anforderungen, verfügbare Daten, Rahmenbedingungen)</li> <li>• <u>Teilnehmer:innen:</u> zwei Abteilungsleiter, Anforderungsmanagerin, Prozessverantwortlicher, Fachreferent und Anwenderin (Summe: 6 Teilnehmer:innen)</li> <li>• <u>Dauer:</u> 120 Minuten</li> <li>• <u>Zeitpunkt:</u> 01.2021</li> </ul>
H-W8	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Art:</u> Workshop</li> <li>• <u>Beschreibung:</u> Validierung der Methode zur Bewertung der Änderungsauswirkungen und prototypische Umsetzung</li> <li>• <u>Teilnehmer:</u> Anforderungsmanagerin, Prozessverantwortlicher und Anwenderin (Summe: 3 Teilnehmer:innen)</li> <li>• <u>Dauer:</u> 120 Minuten</li> <li>• <u>Zeitpunkt:</u> 03.2021</li> </ul>
H-W9	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Art:</u> Workshop</li> <li>• <u>Beschreibung:</u> Validierung der Methode zur Bewertung der Änderungswahrscheinlichkeit und prototypische Umsetzung</li> <li>• <u>Teilnehmer:innen:</u> Abteilungsleiter, Anforderungsmanagerin, Prozessverantwortlicher, Fachreferent und Anwenderin (Summe: 5 Teilnehmer:innen)</li> <li>• <u>Dauer:</u> 120 Minuten</li> <li>• <u>Zeitpunkt:</u> 04.2021</li> </ul>
H-W10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Art:</u> Workshop</li> <li>• <u>Beschreibung:</u> Validierung der Methode zur Analyse von Anforderungsabhängigkeiten und dessen prototypische Umsetzung</li> <li>• <u>Teilnehmer:innen:</u> Anforderungsmanagerin und Prozessverantwortlicher (Summe: 2 Teilnehmer:innen)</li> <li>• <u>Dauer:</u> 120 Minuten</li> <li>• <u>Zeitpunkt:</u> 05.2021</li> </ul>
H-W11	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Art:</u> Workshop</li> <li>• <u>Beschreibung:</u> Validierung der Methode zur Risikosteuerung und prototypische Umsetzung sowie der vorgesehenen Lernmechanismen</li> <li>• <u>Teilnehmer:innen:</u> Abteilungsleiter, Anforderungsmanagerin und Prozessverantwortlicher (Summe: 3 Teilnehmer:innen)</li> <li>• <u>Dauer:</u> 120 Minuten</li> <li>• <u>Zeitpunkt:</u> 06.2021</li> </ul>
H-W12	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Art:</u> Workshop</li> <li>• <u>Beschreibung:</u> Validierung des Referenzprozesses zur Einführung und Anwendung der Methodik</li> <li>• <u>Teilnehmer:</u> Abteilungsleiter, Anforderungsmanagerin und Prozessverantwortlicher (Summe: 3 Teilnehmer:innen)</li> <li>• <u>Dauer:</u> 90 Minuten</li> <li>• <u>Zeitpunkt:</u> 11.2021</li> </ul>
H-F1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Art:</u> Fragebogen</li> <li>• <u>Beschreibung:</u> Validierung der prototypischen Lösung</li> <li>• <u>Teilnehmer:innen:</u> Anforderungsmanagerin, Prozessverantwortlicher, Teamleiter und Entwicklerin (Summe: 4 Teilnehmer:innen)</li> <li>• <u>Dauer:</u> ca. 30 Minuten</li> <li>• <u>Zeitpunkt:</u> 11.2021 bis 12.2021</li> </ul>
H-I1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Art:</u> semi-strukturierte Experteninterviews je Industriepartner (3 Stück)</li> <li>• <u>Beschreibung:</u> Detaillierung und Anreicherung der Fragebogenergebnisse</li> <li>• <u>Teilnehmer:innen:</u> siehe H-F1</li> <li>• <u>Dauer:</u> 30-45 Minuten</li> <li>• <u>Zeitpunkt:</u> 12.2021</li> </ul>

## A2.1 Weiterführende Unterlagen – Fragebögen

### F-F1

Auswertung des Fragebogens und der darauf aufbauenden Interviews siehe [GOS20].

**OptiAMix AP2 – Fragebogen zur Validierung**

**Liebe(r) Teilnehmer(innen),**

im Rahmen des Projekts OptiAMix Arbeitspaket 2 „Entwicklung einer Methode zur strategisch-technischen Anforderungsanalyse“ möchten wir eine Validierung der erarbeiteten Methode sowie des darauf aufbauenden Softwareprototypen durchführen. Die Validierung ist in die folgenden fünf Bereiche unterteilt:

1. Angaben zur Person
2. Thesen zu Anforderungsänderungen
3. Thesen zur Methode zur strategisch-technischen Anforderungsanalyse
4. Thesen zum Software-Prototypen
5. Thesen zu weiteren Forschungspotenzialen

Nachdem Sie die Angaben zu Ihrer Person ausgefüllt haben, bewerten Sie die Thesen in den darauffolgenden Blöcken bitte nach der folgenden Skala:

2: stimme zu  
1: stimme eher zu  
0: teils / teils  
- 1: stimme eher nicht zu  
- 2: stimme nicht zu

Bei Fragen oder Unklarheiten können Sie sich jederzeit an mich wenden:

Christian Oleff  
Telefon: +49 (0) 52 51 / 60 62 56  
E-Mail: [christian.oleff@hni.upb.de](mailto:christian.oleff@hni.upb.de)

*Ich möchte mich bereits im Vorfeld herzlich für die Mitarbeit bedanken!*

*Christian Oleff*



**Angaben zur Person**

- 1) Was ist Ihr Aufgabenbereich in der Demonstratorenentwicklung des Forschungsprojekts OptiAMix?

---

---

- 2) Welchen fachlichen Hintergrund haben Sie bezüglich Ausbildung und derzeitiger Anstellung? (z.B. Maschinenbau, Elektrotechnik, Informatik o.ä.)

---

---

- 3) Wie viele Personen waren an der Demonstratorenentwicklung beteiligt?

---

---

- 4) Wie viele Jahre Berufserfahrung haben Sie?

<input type="checkbox"/> < 3 Jahre	<input type="checkbox"/> 3-10 Jahre	<input type="checkbox"/> > 10 Jahre
------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------

- 5) Wie alt sind Sie?

<input type="checkbox"/> < 30	<input type="checkbox"/> 30-45	<input type="checkbox"/> 45-60	<input type="checkbox"/> > 60
-------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	-------------------------------



Bitte beurteilen Sie die folgenden Thesen anhand der vorgegeben Skala.

**Thesen zu Anforderungsänderungen**

6) Anforderungsänderungen gefährden den Projekterfolg

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

7) Es ist schwierig, die Auswirkungen von Anforderungsänderungen realistisch zu beurteilen

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

8) Vor dem OptiAMix-Projekt wurden Anforderungsänderungen bereits ihrer Bedeutung angemessen in der Entwicklung berücksichtigt

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

9) Vor dem OptiAMix-Projekt wurden Anforderungsänderungen bereits systematisch gehandhabt

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

10) Vor dem OptiAMix-Projekt wurden Anforderungsänderungen bereits präventiv behandelt

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------



**Thesen zur Methode zur strategisch-technischen Anforderungsanalyse**

11) Die Methode unterstützt bei der Identifikation von Einflussbereichen auf Anforderungsänderungen

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

12) Die drei Faktoren Unsicherheit, Dynamik und Relevanz ermöglichen eine aussagekräftige Priorisierung der Einflussbereiche

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

13) Der Aufwand für die projektspezifische, manuelle Zuordnung von Hauptmerkmalen zu Anforderungen für die Vernetzungsanalyse ist angemessen

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

14) Der Einmalaufwand für die Ausarbeitung bzw. projektspezifische Anpassung der Abhängigkeitsmatrix zwischen Hauptmerkmalen ist bei langfristiger Methodenanwendung akzeptabel

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

15) Anhand der Methode werden alle existierenden Abhängigkeiten zwischen Anforderungen identifiziert

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

16) Das anhand der Methode ermittelte Änderungsrisiko einer Anforderung ist realistisch

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

17) Die Methodenanwendung sensibilisiert das Entwicklungsteam hinsichtlich der fachbereichsübergreifenden Änderungseffekte

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

18) Die Methodenanwendung führt dazu, dass fachbereichsübergreifende Änderungsrisiken erkannt wurden, die ansonsten unerkannt geblieben wären

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

19) Die Einordnung der Anforderungen in ein Risikoportfolio unterstützt die fachbereichsübergreifende Kommunikation im Entwicklungsteam

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------



20) Auf Grundlage der Informationen zum Änderungsrisikos können effizienzsteigernde Präventionsmaßnahmen eingeleitet werden

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

21) Auf Grundlage der Informationen zum Änderungsrisikos können effektivere Entscheidungen über die Änderungsimplementierung getroffen werden

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

22) Auf Grundlage der Informationen zu Anforderungsabhängigkeiten können eintretende Änderungen effizienter integriert werden

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

23) Das Risiko eines Projektfehlschlags wird durch die Anwendung der Methode reduziert

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

24) Ja/Nein Frage: Bei welchen der folgenden Elementen ist durch Forschung/Weiterentwicklung eine Verbesserung der Ergebnisgüte erforderlich:

		ja	nein
a)	Identifikation der Einflussbereiche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b)	Priorisierung der Einflussbereiche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c)	Zuordnung eines repräsentativen Einflussbereichs je Anforderung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d)	Identifikation und Gewichtung der Abhängigkeiten zw. Hauptmerkmalen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e)	Zuordnung eines repräsentativen Hauptmerkmals je Anforderung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
f)	Berechnung des Änderungsrisikos auf Basis von Priorität und Vernetzung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

25) Offene Frage: Welche Aspekte sind vor einer Anwendung im unternehmerischen Entwicklungsalltag zu ergänzen?

---



---



---



**Thesen zum Software-Prototypen**

26) Eine Schnittstelle zum Einlesen der Anforderungsliste mit Microsoft Excel ist ausreichend

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

27) Die Software umfasst alle erforderlichen Funktionalitäten für die Methodenanwendung

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

28) Die Darstellung der Methodenergebnisse im Software-Prototypen ist verständlich und ausreichend

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

29) Ja/Nein Frage: Bei welchen der folgenden Funktionalitäten des Software-Prototypen ist durch Automatisierung eine Verbesserung der praktischen Anwendbarkeit erforderlich:

		ja	nein
a)	Einlesen der Anforderungsliste	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b)	Einlesen der initialen Datengrundlage (priorisierte Einflussbereiche und vernetzte Hauptmerkmale)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c)	Zuordnung eines repräsentativen Einflussbereichs je Anforderung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d)	Zuordnung eines repräsentativen Hauptmerkmals je Anforderung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

30) Offene Frage: Welche Funktionalitäten sind vor einer Anwendung im unternehmerischen Entwicklungsaltag zu ergänzen?

---

---

---

---



***Thesen zu weiteren Forschungspotenzialen***

31) Die Methode kann auch für Entwicklungsvorhaben abseits der Additiven Fertigung angewandt werden

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

32) Die Methode hat auch für die Entwicklung interdisziplinärer Systeme ein Nutzenpotenzial

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

33) Der Nutzen der Methode steigt mit der Komplexität des zu entwickelnden Systems

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

34) Die präventive Handhabung änderungskritischer Anforderungen schöpft bisher ungenutzte Effizienz- und Effektivitätspotenziale in der Entwicklung aus

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

**Vielen Dank für die Bearbeitung!**

**H-F1**

Auswertung des Fragebogens und der darauf aufbauenden Interviews siehe Kapitel 7.4 bis 7.6



**HEINZ NIXDORF INSTITUT**  
UNIVERSITÄT PADERBORN

## ARCA – Fragebogen zur Validierung

**Liebe(r) Teilnehmer(innen),**

im Rahmen des Forschungsprojekts ARCA „Automated Requirement Change Analysis for complex technical systems“ möchten wir eine Validierung der erarbeiteten Methodik und des dazugehörigen Softwareprototyps durchführen. Die Validierung ist in die folgenden sechs Bereiche unterteilt:

1. Angaben zum Entwicklungsprojekt und zur Person
2. Thesen zur Ist-Situation
3. Thesen zur Anwendbarkeit des Software-Prototyps
4. Thesen zum Anwendungsaufwand
5. Thesen zur Genauigkeit der Ergebnisse
6. Thesen zum Mehrwert der Methodik-Anwendung

Nachdem Sie die Angaben zu Ihrer Person ausgefüllt haben, bewerten Sie die Thesen in den darauffolgenden Blöcken bitte nach der folgenden Skala:

2: stimme zu

1: stimme eher zu

0: teils / teils

- 1: stimme eher nicht zu

- 2: stimme nicht zu

Bei Fragen oder Unklarheiten können Sie sich jederzeit an mich wenden:

Christian Oleff

Telefon: +49 (0) 52 51 / 60 62 56

E-Mail: [christian.oleff@hni.upb.de](mailto:christian.oleff@hni.upb.de)

*Ich möchte mich bereits im Vorfeld herzlich für die Mitarbeit bedanken!*

*Christian Oleff*



**Angaben zum Entwicklungsprojekt und zur Person**

- 1) Was ist das Ziel des für die Pilotanwendung betrachteten Entwicklungsprojekts?  
(z.B. Senkung Produktionskosten, Machbarkeitsstudie ...)  
(Nehmen Sie bei Bedarf eine Anonymisierung vor)

---

---

- 2) Was ist das zu entwickelnde Produkt? (Nehmen Sie bei Bedarf eine Anonymisierung vor)

---

---

- 3) Was ist Ihr Aufgabenbereich in dem Entwicklungsprojekt?

---

---

- 4) Wie viele Personen sind an dem Entwicklungsprojekt beteiligt gewesen?

---

---

Bitte beurteilen Sie die folgenden Thesen anhand der vorgegeben Skala.

**Thesen zur Ist-Situation**

- 5) Unabhängig vom ARCA-Projekt werden Anforderungsänderungen bereits systematisch gehandhabt.

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

- 6) Unabhängig vom ARCA-Projekt werden Anforderungsänderungen bereits präventiv behandelt.

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------



**Thesen zur Anwendbarkeit des Software-Prototyps**

7) *Ich kann mir sehr gut vorstellen, das System regelmäßig zu nutzen.*

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

8) *Ich empfinde das System als unnötig komplex.*

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

9) *Ich empfinde das System als einfach zu nutzen.*

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

10) *Ich denke, dass ich technischen Support brauchen würde, um das System zu nutzen.*

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

11) *Ich finde, dass die verschiedenen Funktionen des Systems gut integriert sind.*

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

12) *Ich finde, dass es im System zu viele Inkonsistenzen gibt.*

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

13) *Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Leute das System schnell zu beherrschen lernen.*

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

14) *Ich empfinde die Bedienung als sehr umständlich.*

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

15) *Ich habe mich bei der Nutzung des Systems sehr sicher gefühlt.*

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

16) *Ich musste eine Menge Dinge lernen, bevor ich mit dem System arbeiten konnte.*

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

17) *Die Informationen zur Anwendung des Tools sind in der Praxis bereits frühzeitig (in der Regel ab der Projektinitiierungsphase) in Form von Daten oder Expertenwissen verfügbar:*

	<i>a)</i>	<i>Natürliche-sprachliche Anforderungsspezifikation /-beschreibung [Import]</i>	<i>ja</i>	<i>nein</i>
			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



b)	Priorität von Anforderungen [Import]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c)	Initiatoren, die eine Änderung auslösen können [Wahrscheinlichkeitsanalyse]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d)	Anzahl der von einem Initiator ausgelösten Änderungen in einem laufenden Projekt [Lerneffekt – Wahrscheinlichkeitsanalyse]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e)	Anzahl der von einem Initiator ausgelösten Änderungen in <u>vergangenen</u> Projekten [Lerneffekt – Wahrscheinlichkeitsanalyse]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
f)	Korrektheit der Abhängigkeiten zwischen Anforderungen (i.d.R. Experteneinschätzung) [Abhängigkeitsanalyse]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g)	Existenz von Auswirkungen in einer der vorgegebenen Dimensionen [manuelle Auswirkungsanalyse]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
h)	Eignung der vorgeschlagenen Risikosteuerungsmaßnahmen (i.d.R. Experteneinschätzung) [Auswahl proaktiver Handlungsmaßnahmen]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### Thesen zum Anwendungsaufwand

18) Den einmaligen Vorbereitungsaufwand, bevor die Anwendung möglich ist, empfinde ich als angemessen: Training eines Abhängigkeitsmodells

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

19) Den wiederkehrenden Vorbereitungsaufwand, bevor die Anwendung möglich ist, empfinde ich als angemessen: Anforderungsdaten in Excel-Template überführen

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

20) Den Durchführungsaufwand empfinde ich als angemessen: Import, Analysen,  
Dokumentation der Anzahl der Änderungen je Initiator, Auswahl  
Risikosteuerungsmaßnahme, Export/Auswertung

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

21) Die Durchlaufzeit der Durchführung empfinde ich als angemessen.

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

22) Den Nachbereitungsaufwand empfinde ich als angemessen: Erfassung der Anzahl an  
Änderungen je Initiator für die Projektdatenbank, Prüfen der automatisch ermittelten  
Abhängigkeiten.

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------



### Thesen zur Genauigkeit der Ergebnisse

Die nachfolgenden Fragen zur Genauigkeit bitte vor dem Hintergrund der Pilotanwendung einschätzen. Jede Frage adressiert einen Use-Case (vgl. Referenzprozess).

23) Ergebnisse sind hinreichend genau für die Identifikation von Unsicherheiten im Anforderungsset.

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

24) Ergebnisse sind hinreichend genau für die Verhandlung des Entwicklungsauftrags (Risikoanalyse).

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

25) Ergebnisse sind hinreichend genau für die Definition des Projektplans (Risikoanalyse).

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

26) Ergebnisse sind hinreichend genau für das Herstellen und Verwalten der Nachverfolgbarkeit zwischen Anforderungen (Abhängigkeiten).

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

27) Ergebnisse sind hinreichend genau für die Risikoanalyse von Anforderungen und Anforderungssets (anforderungsspezifisches Risiko und Detailinfos).

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

28) Ergebnisse sind hinreichend genau für die risikospezifische Auswahl von Steuerungsmaßnahmen.

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------



Thesen zum Mehrwert der Methodik-Anwendung für das proaktive Änderungsmanagement von Anforderungsänderungen.

*Falls unabhängig vom ARCA-Projekt kein explizites Risikomanagement oder proaktives Änderungsmanagement von Anforderungsänderungen vorgenommen wird, nutzen Sie als Vergleichsgröße bitte die Berücksichtigung von Anforderungsänderungen im Rahmen des allgemeinen Risikomanagements in Entwicklungsprojekten.*

29) Auf Grundlage der Informationen zu Maßnahmen der Unsicherheitsidentifikation und des Q-Checkers können Unsicherheiten effizienter identifiziert werden als zuvor.

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

30) Auf Grundlage der Informationen zu Maßnahmen der Unsicherheitsidentifikation und des Q-Checkers können Unsicherheiten vollständiger identifiziert werden als zuvor.

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

31) Auf Grundlage der Informationen zum Änderungsrisiko von Anforderungen können Risiken effizienter identifiziert werden als zuvor.

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

32) Auf Grundlage der Informationen zum Änderungsrisiko von Anforderungen können Risiken realistischer abgeschätzt werden als zuvor.

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

33) Anhand der teilautomatisierten Risikoanalyse kann ein höherer Anteil an Anforderungen eines Anforderungssets auf Änderungsrisiken untersucht werden.

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

34) Auf Grundlage der Informationen und Vorschläge zu Risikosteuerungsmaßnahmen können wirksamere Handlungsoptionen ausgewählt werden.

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

35) Auf Grundlage des Änderungsrisikos und der darauf aufbauenden Vorschläge zu Risikosteuerungsmaßnahmen können effizienter Maßnahmen definiert werden.

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------



**HEINZ NIXDORF INSTITUT**  
UNIVERSITÄT PADERBORN

36) Die Anwendung des Software-Prototyps trägt zur Effizienzsteigerung in der Entwicklung komplexer technischer Systeme bei.

<input type="checkbox"/> -2	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

*Sonstige Anmerkungen:*

---

---

---

**Vielen Dank für die Bearbeitung!**

## A2.2 Weiterführende Unterlagen – Workshops

### F-W1

Ablauf:

- Vorstellung des Lösungskonzepts anhand des Software-Werkzeugs
- World-Café für inhaltliche Diskussion zu Nutzerfreundlichkeit, Nutzen und Funktionsumfang

Optimierungspotentiale – Nutzerfreundlichkeit: Auf Standardwerte zurücksetzen, Tracking von manuellen Anpassungen, Konsistenzcheck der Nutzerdaten, selbstlernendes Programm (Statistik, Gütemaß), neuronales Netz zur Reduktion von Auswahloptionen, „Welche Informationen sind für Anwender:innen relevant?“ → Reduktion auf das Wesentliche, Abkürzungen erklären (Mouse Over?), Historie im Projektverlauf, KO-Kriterien mit aufnehmen, Gewichtung, Klassifizierung (RPZ), Anwendungsfälle unterscheiden, Sync mit .xls, Änderungen tracken, Stand verfolgen, separate Datei mit RPZ → Nutzerprofile, Kundengruppenprofile verwenden/zuordnen, Portfolio Darstellung (Vernetzung ↔ Risiko), Übersicht? (→ Gesamtprojektübersicht), Templates einlesen (→ bauteilspezifisch / kundenspezifisch), Wert für die Farbskala (Vernetzung?) ausgeben, Detailansicht vs. Überblick

Optimierungspotentiale – Nutzen / Funktionsumfang: Fokus auf Bauteile (nicht Systeme), Validierung der Vernetzung, Kontinuierlicher Lernprozess (→ Daten nicht überschreiben, sondern Durchschnitt o. ä. bilden), Textanalyse Prosatext (→ Anforderungen in Excel ausgeben), Klassifizierungswert ggf. ausgeben (→ Farbverlauf), Grenzwerte (zwischen zwei Klassen) hervorheben, Anforderungsliste auf das Wesentliche „kürzen“, Portfoliodarstellung, Veränderung → Autoaktualisierung, Vernetzungsscore anzeigen, Info-Knopf (als PDF o.ä.)

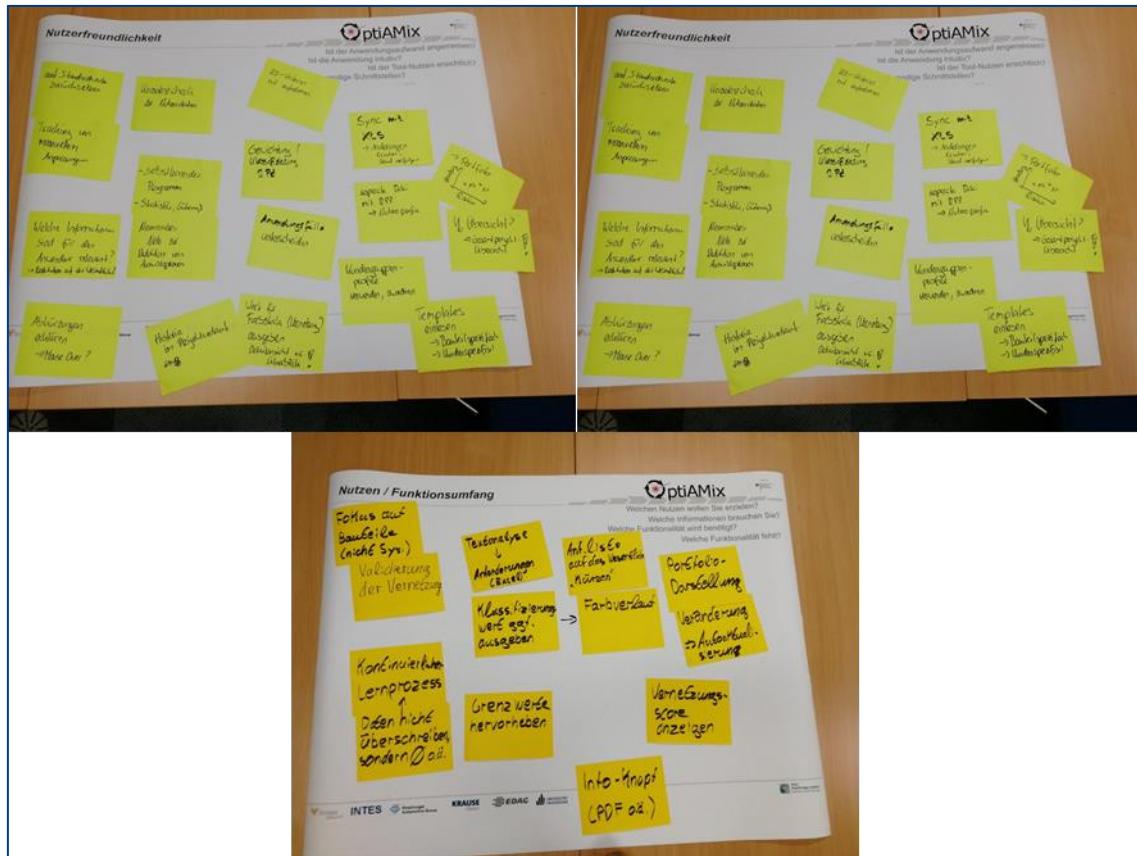


Abbildung A 8-2: Ergebnisse des World-Cafés zur Nutzerfreundlichkeit und zum Nutzen/Funktionsumfang

H-W1

Fragestellung: Wie kann das ARCA Projekt für Sie einen Mehrwert bringen?

- Bei welchen Problemen aus meinem Arbeitsalltag könnte mir das Projekt helfen? (rot – vgl. nachfolgende Tabellen)
  - Welche Anforderungen sind zu beachten, damit die Ergebnisse für mich nützlich sind? (grün – vgl. nachfolgende Tabellen)
  - Ist das Projekt interessant für mich? Auf welche Art und Weise könnte ich mir vorstellen an dem Projekt mitzuwirken? (orange – vgl. nachfolgende Tabellen)

Tabelle A 8-7: Workshopergebnisse Teil 1

Position	Abteilungsleiter	Anforderungsmanagerin, Product Ownerin	Teamleiter, Anforderungsmanager	Fachreferent „Software“ Architektur
Name, Vorname	Anonymisiert 1	Anonymisiert 2	Anonymisiert 3	Anonymisiert 4
grüne Karte	offene Schnittstellen (in-export), adaptive Algorithmen die „mitlernen“, anschauliche Darstellungen der Ergebnisse	Prognose für Änderungswahrscheinlichkeit der Anforderungen, Änderungsauswirkungen erfahren (Referenzen grafisch aufarbeiten)	modulare und automatisierbare Schnittstellen, Möglichkeit zur Protokollierung und Reporting des Prozesses	Schnittstelle zu gängigen Anforderungstools, Anwendbarkeit in typischen Projekten
orange Karte	beratend Management- bzw. Unternehmensperspektive „Öl-Kännchen“	Review der Anforderungen an das Tool, bestgehende unterstützende bei der Methode, Interesse für Interviews und Fragebögen zur Verfügung stehen	Stakeholder / Endanwender Knowhow zu Software Agilität Anforderungsmanagement	Austausch zu Normen und Unternehmens-Vorgaben
rote Karte	Abhängigkeitsanalyse, Handlungsempfehlungen		Systematik bei Evaluierung von Anforderungen und Änderungen	Umsetzung Standardprozesse in der Praxis (Risikobewertung, Anforderungen)

Tabelle A 8-8: Workshopergebnisse Teil 2

Position	funktionale Sicherheit	Toolkette	anforderungsba siertes Testen	Projektleiter, Product Owner
Name, Vorname	Anonymisiert 5	Anonymisiert 6	Anonymisiert 7	Anonymisiert 8
grüne Karte	Abhängigkeitsanalyse für Mechatronik / Elektronik wie auch Funktion / Software	gute Dokumentation auch des Entscheidungs- / Entwicklungsprozesses, modularisierte Software, bei der wir ggf. später Module erweitern / austauschen könnten, liefert „richtige“ Ergebnisse	-	Einbindung in etablierte ALM-TOOLS (Azure, Jira, ...) möglich
orange Karte	Methoden / Toolgestützte Entscheidungsoptionen Fachliche / Kaufmännische Mechanik / Elektronik	technische Grundlage aus Sicht „Informatik für mich interessant, Schnittstelle interessant, semantische Auswertung durch IT lässt sich auf andere Probleme übertragen	-	Anforderungen an die Anwendungen erheben Testnutzer
rote Karte	Risikoeinschätzung für Anforderungsabhängigkeit von der Entwicklungsphase	Grundlage für Aufgabenstellung durch Vorgesetzte verbessern (aus Sicht als Implementierer)	Herausfiltern von „schlechten“ Anforderungen (nicht testbar, unvollständig)	Anforderungspflege in laufenden Projekten vereinfachen, #Lebende Dokumentation, Risiko- und Change-management in sehr kleinen Projekten ohne Projektleiter oder gestützt ohne „viel“ Ausbildung der MA

## H-W2

**Anforderungen an das Projektergebnis**

**Priorisierung**



- Priorisierung nach Balzert, H.: *Lehrbuch der Softwaretechnik: Basiskonzepte und Requirements Engineering*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2009
- Priorisierung nach dem Kriterium **Notwendigkeit** mit den folgenden Ausprägungen:
  - **Essenziell (essential):** Die Software wird nicht akzeptiert, wenn die Anforderung nicht in der geforderten Weise realisiert wird. (*Prio. 1*)
  - **Bedingt notwendig (conditional):** Die Anforderung wertet die Software auf. Wird sie nicht realisiert, dann wird die Software aber nicht unakzeptabel. (*Prio. 2*)
  - **Optional (optional):** Die Realisierung der Anforderung kann wertvoll sein, muss es aber nicht. Die Anforderung gibt dem Auftragnehmer die Möglichkeit, über die vorhandenen Anforderungen hinauszugehen. (*Prio. 3*)

2 Lehrstuhl für Produktentstehung      Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Graßler      HEINZ NIXDORF INSTITUT  
UNIVERSITÄT PADERBORN

Abbildung A 8-3: Priorisierungskonzept für die Anforderungen

**Anforderungen an das Projektergebnis**

**Stakeholder-Anforderungen**



**Funktionale Anforderungen – Eingaben**

**A<sub>1</sub>:** Der Support soll für den Anwender eine Funktion bereitstellen, um die Beweggründe für eine Anforderungsänderung für eine Anforderung zu notieren. (*Prio. 3 - SdF*)

**A<sub>2</sub>:** Anforderungen aller Granularitätsstufen/Hierarchieebenen sollen mit dem Support verarbeitet werden können (ggf. sind bestimmte Vorinformationen zur Hierarchieebene der Anforderung erforderlich). (*Prio. 2 – Neu & SdF*)

**A<sub>3</sub>:** Die Datengrundlage des Supports für die Risikoberechnung soll projektspezifisch vom Anwender angepasst werden können. (*Prio. 2 - Neu*)

Support = Projektergebnis      SdF = Stand der Forschung/Technik

3 Lehrstuhl für Produktentstehung      Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Graßler      HEINZ NIXDORF INSTITUT  
UNIVERSITÄT PADERBORN

Abbildung A 8-4: Funktionale Anforderungen an die Eingaben

**Anforderungen an das Projektergebnis**

**Stakeholder-Anforderungen**

**Funktionale Anforderungen – Verarbeitungsschritte**

**A<sub>4</sub>:** Der Support soll unternehmensspezifisches Expertenwissen (tbc) mit einbeziehen. **(Prio. 2 – Neu & SdF)**

**A<sub>5</sub>:** Verfügbare Daten und Informationen aus existierenden Datenbanken (tbc – z. B. Änderungsdaten) sollen genutzt werden. **(Prio. 3 – Neu & SdF)**

**A<sub>6</sub>:** Das Expertenwissen der Anwender soll in der Datengrundlage abgebildet werden. **(Prio. 2 – Neu & SdF)**

**A<sub>7</sub>:** Als unsicher eingeschätzte Ergebnisse sollen dem Anwender nicht für die Entscheidungsfindung bereitgestellt werden. **(Prio. 2 - Neu)**

**A<sub>8</sub>:** Das Änderungsrisiko soll automatisiert vom Support berechnet werden. **(Prio. 1 - Neu)**

**A<sub>9</sub>:** Die Änderungswahrscheinlichkeiten von Anforderungen sollen abgeschätzt werden. **(Prio. 1 - Neu)**

4 Lehrstuhl für Produktentstehung Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Graßler HEINZ NIXDORF INSTITUT  
UNIVERSITÄT PADERBORN

Abbildung A 8-5: Funktionale Anforderungen an die Verarbeitung (I / II)

**Anforderungen an das Projektergebnis**

**Stakeholder-Anforderungen**

**Funktionale Anforderungen – Verarbeitungsschritte**

**A<sub>10</sub>:** Die Auswirkungen (tbc) von Anforderungsänderungen sollen abgeschätzt werden. **(Prio. 1 – Neu & SdF)**

**A<sub>11</sub>:** Der Support soll auf aktuellen wissenschaftlichen Methoden aufbauen. **(Prio. 1)**

**A<sub>12</sub>:** Der Support soll die Qualität (tbc) von Anforderungen bewerten. **(Prio. 3 - SdF)**

5 Lehrstuhl für Produktentstehung Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Graßler HEINZ NIXDORF INSTITUT  
UNIVERSITÄT PADERBORN

Abbildung A 8-6: Funktionale Anforderungen an die Verarbeitung (II / II)

**Anforderungen an das Projektergebnis**

**Stakeholder-Anforderungen**

**Funktionale Anforderungen – Ausgaben**

**A<sub>13</sub>:** Es sollen Risikosteuerungsmaßnahmen vorgeschlagen werden. **(Prio. 1 - SdF)**

**A<sub>14</sub>:** Der Anwender soll durch den Support bei der Auswahl von Risikosteuerungsmaßnahmen unterstützt werden (z.B. Leitfaden). **(Prio. 2 – Neu)**

**A<sub>15</sub>:** Die Unterstützung bei der Auswahl von Risikosteuerungsmaßnahmen soll zunehmend genauer werden (Lerneffekt). **(Prio. 3 - Neu)**

**A<sub>16</sub>:** Es soll pro ausgegebenes Ergebnis (tbc) angegeben werden, wie verlässlich/genau das Ergebnis vom Support prognostiziert wird. **(Prio. 3 - Neu)**

6 Lehrstuhl für Produktentstehung Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Graßler HEINZ NIXDORF INSTITUT UNIVERSITÄT PADERBORN

Abbildung A 8-7: Funktionale Anforderungen an die Ausgabe (I / II)

**Anforderungen an das Projektergebnis**

**Stakeholder-Anforderungen**

**Funktionale Anforderungen – Ausgaben**

**A<sub>17</sub>:** Umgesetzte Risikosteuerungsmaßnahmen sollen in Relation zu den betroffenen Anforderungen/Änderungen im Support angezeigt werden können. **(Prio. 3 - SdF)**

**A<sub>18</sub>:** Im Support soll angezeigt werden, welche Person eine Anforderungsänderung vorgenommen hat. **(Prio. 2 - SdF)**

**A<sub>19</sub>:** Im Support soll angezeigt werden, welche Person welche Risikosteuerungsmaßnahme für eine Anforderung ausgewählt hat. **(Prio. 3 - SdF)**

**A<sub>20</sub>:** Im Support soll eine Änderungshistorie (tbc) für jede Anforderung dokumentiert werden. **(Prio. 2 - SdF)**

**A<sub>21</sub>:** Die vom Support bereitgestellte Informationsgrundlage soll bei einer Entscheidung dokumentiert werden. **(Prio. 2 - SdF)**

7 Lehrstuhl für Produktentstehung Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Graßler HEINZ NIXDORF INSTITUT UNIVERSITÄT PADERBORN

Abbildung A 8-8: Funktionale Anforderungen an die Ausgabe (II / II)

**Anforderungen an das Projektergebnis**

**Stakeholder-Anforderungen**

**Nicht-Funktionale Anforderungen – Benutzbarkeit**

**A<sub>22</sub>:** Das Nutzerinterface soll intuitiv bedienbar sein. **(Prio. 2)**

**A<sub>23</sub>:** Möglichkeit zur eigenständigen Einarbeitung in den Support soll vorhanden sein. **(Prio. 2)**

**A<sub>24</sub>:** Die Ergebnisse des Supports und deren Herleitungen müssen für den Anwender nachvollziehbar dargestellt werden. **(Prio. 1 - Neu)**

8 Lehrstuhl für Produktentstehung Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Graßler HEINZ NIXDORF INSTITUT  
UNIVERSITÄT PADERBORN

Abbildung A 8-9: Nicht-Funktionale Anforderungen an die Benutzbarkeit

**Anforderungen an das Projektergebnis**

**Stakeholder-Anforderungen**

**Nicht-Funktionale Anforderungen – Realisierung**

**A<sub>25</sub>:** Datenaustausch zwischen dem Support und den Tools der Anwender (tbc) soll ohne manuellen Aufwand möglich sein. **(Prio. 2 - Neu)**

**A<sub>26</sub>:** Der Support soll projektübergreifend anwendbar sein. **(Prio. 1 - Neu)**

**A<sub>27</sub>:** Die Funktionalität des Supports soll unabhängig von Software-Produkten sein (Stand-Alone Lösung). **(Prio. 1)**

9 Lehrstuhl für Produktentstehung Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Graßler HEINZ NIXDORF INSTITUT  
UNIVERSITÄT PADERBORN

Abbildung A 8-10: Nicht-Funktionale Anforderungen an die Realisierung

## H-W3

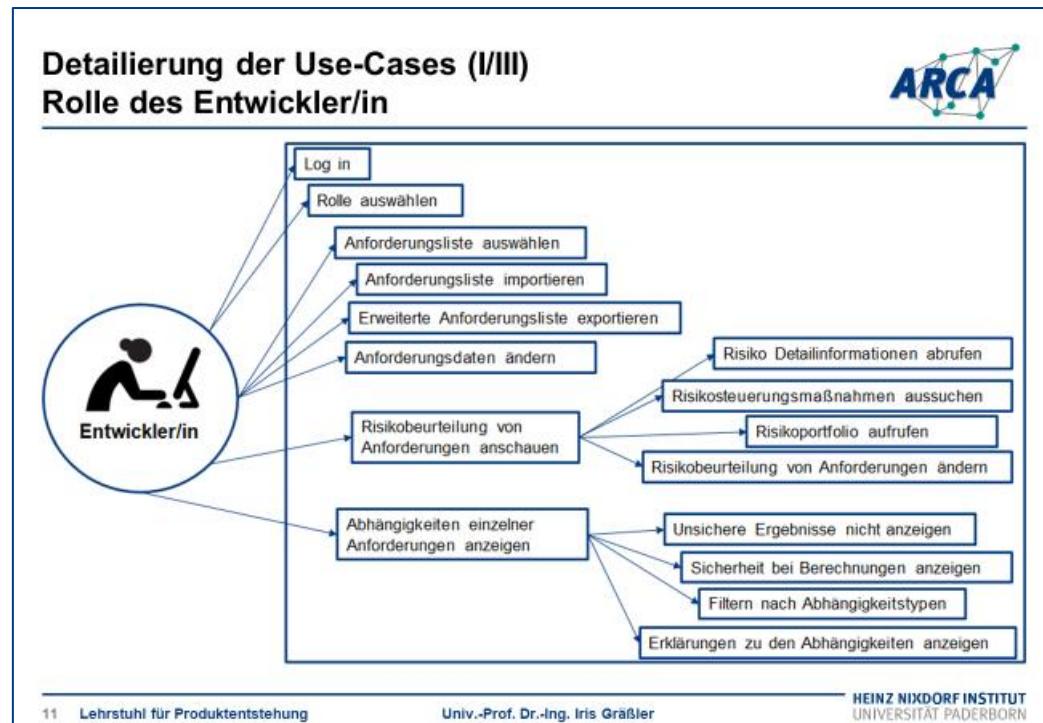


Abbildung A 8-11: Abgestimmter Use Case „Entwickler/in“

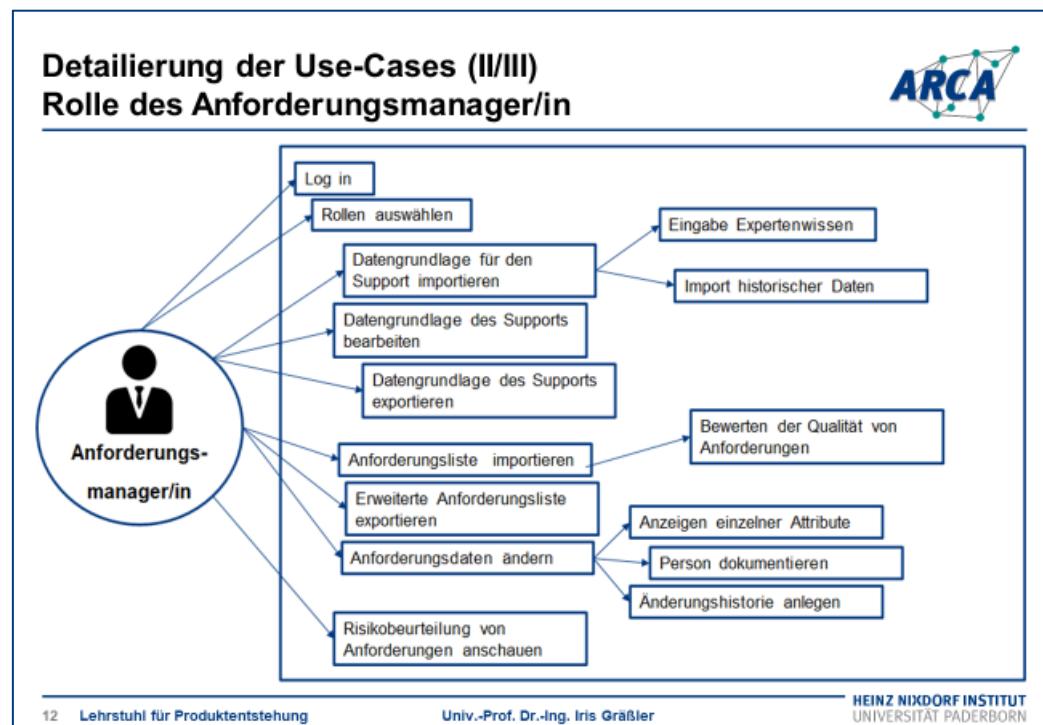


Abbildung A 8-12: Abgestimmter Use Case „Anforderungsmanager/in“

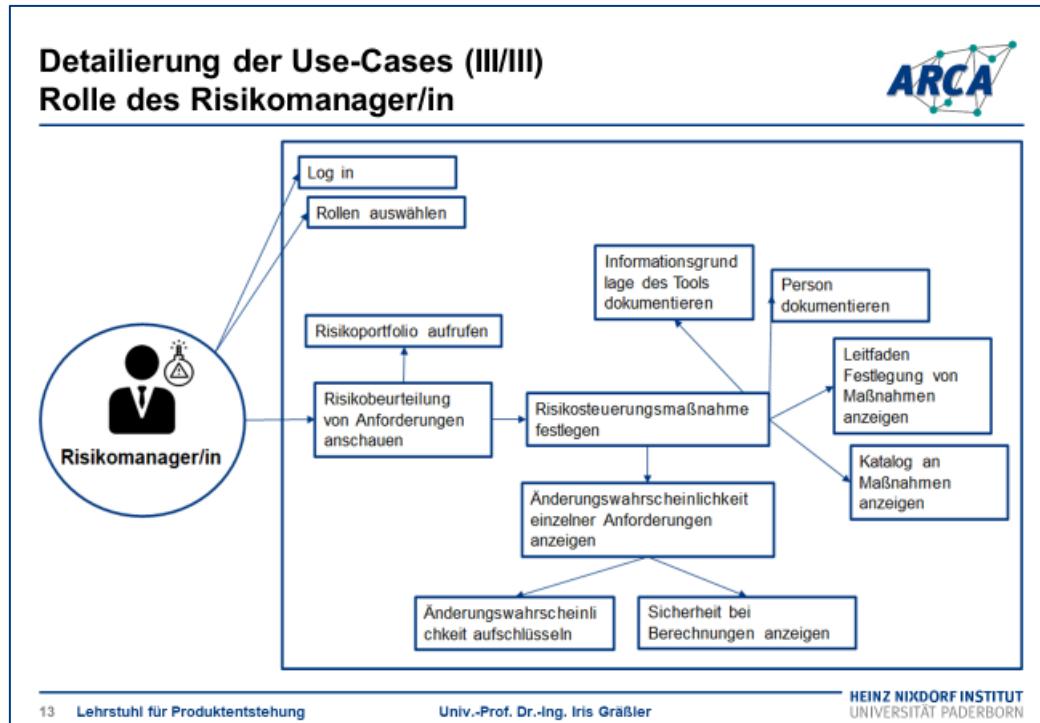


Abbildung A 8-13: Abgestimmter Use Case „Risikomanager/in“

#### H-W4

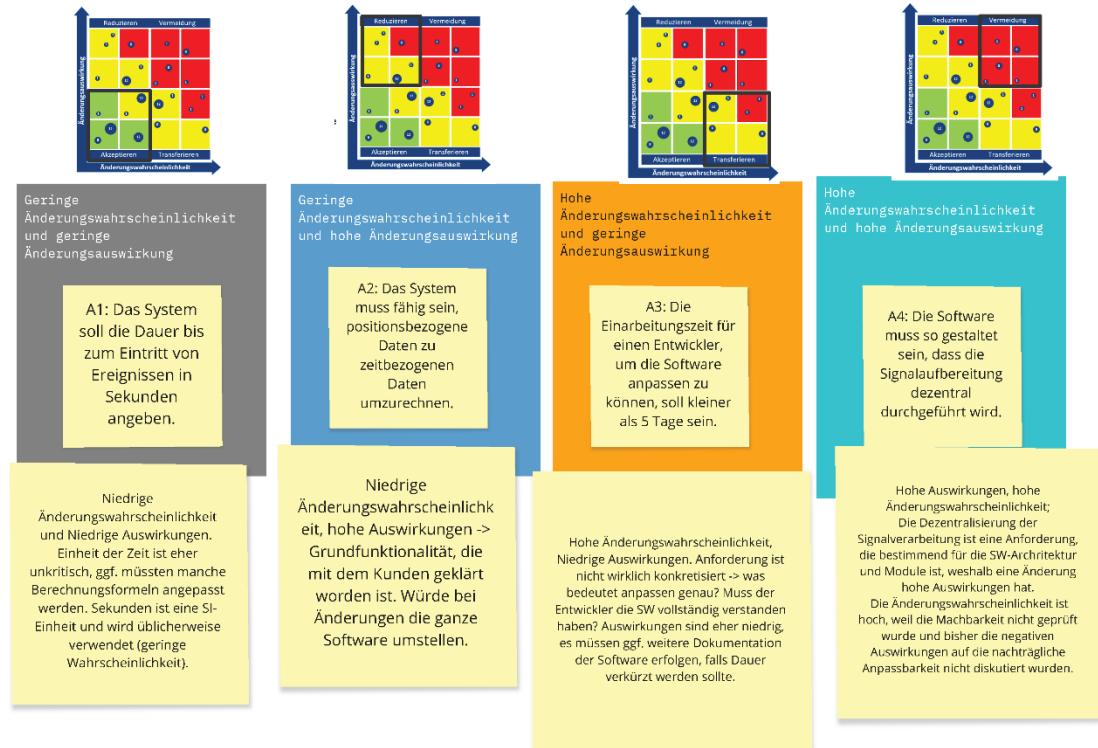


Abbildung A 8-14: Auszug aus digitalen Workshop-Unterlagen zum Risikoportfolio (Miro-Board)

**H-W5**

Siehe Kapitel 7.2

**H-W6**

Aufgrund von Geheimhaltungsvereinbarungen sind diese Unterlagen nicht öffentlich.

**H-W7**

Aufgrund von Geheimhaltungsvereinbarungen sind diese Unterlagen nicht öffentlich.

**H-W8**

Auszug aus digitalen Workshop-Unterlagen (Miro-Board)

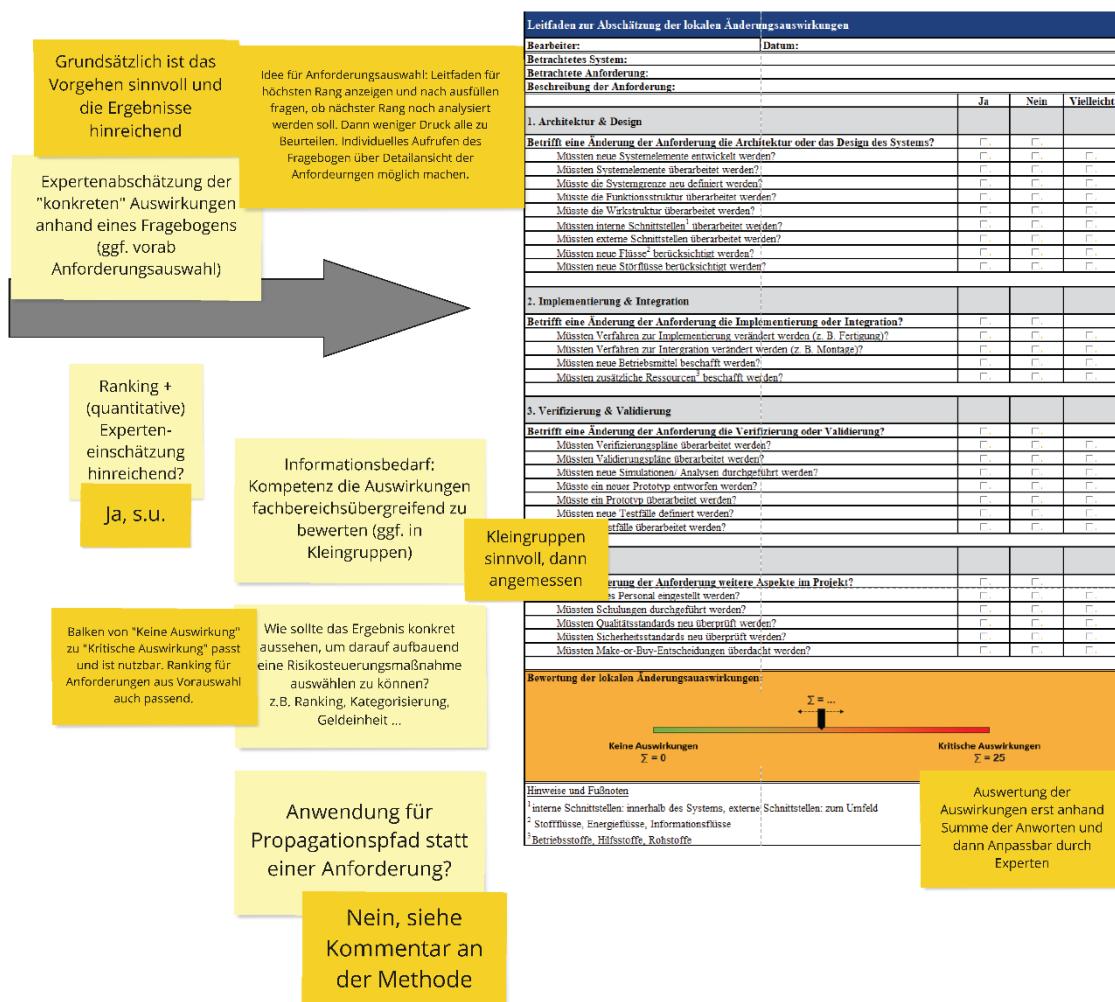


Abbildung A 8-15: Leitfaden zur Bewertung der kollektiven Auswirkungen einer Anforderung

## H-W9

## Auszug aus digitalen Workshop-Unterlagen (Miro-Board)

**Problemstellung und Zielsetzung**

Um die Wahrscheinlichkeit einer Anforderungsänderung abzuschätzen, werden Informationen benötigt, um ...

1. ... die Einflüsse durch exogene Änderungsimpulse zu bestimmen. Diese Änderungsimpulse werden durch Initiatoren wie Politik, Lieferant oder Markt verursacht. **Benötigte Informationen:** Ein Maß, welches die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Anforderung durch einen Änderungsimpuls aufgrund eines bestimmten Initiators ändert, abbildet.
2. ... den Einfluss endogener Ursachen zu bestimmen. Endogene Anforderungsänderungen entstehen aufgrund von Propagationseffekten. **Benötigte Informationen:** Ein Maß, welches die Konnektivität des Anforderungssets abbildet, sodass die Wahrscheinlichkeit einer Änderung aufgrund von Propagationseffekten abgeschätzt werden kann.

■ Zur Berechnung der Änderungswahrscheinlichkeit müssen diese Informationen (1.: Exogene Änderungswahrscheinlichkeit, 2.: Endogene Änderungswahrscheinlichkeit / Konnektivität) zu einer Gesamt-Berechnung zusammengeführt werden.

7 Lehrstuhl für Produktentstehung Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler HEINZ NODDORF INSTITUT UNI VERDIE PADERBORN

**„Matching“ von Anforderungen und Initiatoren**

■ Es muss ermittelt werden, welche Initiatoren für welche Anforderung relevant sind

■ Hierzu wird eine Expertenbewertung durchgeführt:

- Es werden die Kapitel-Überschriften in der Anforderungsliste betrachtet und pro Kapitel die relevanten Initiatoren manuell festgelegt
- Als Hilfestellung kann die Tabelle mit Änderungsimpulsen und Initiatoren herangezogen werden: „Welche Änderungsimpulse werden für Anforderungen in diesem Kapitel erwartet?“
- Den untergeordneten Anforderungen werden automatisiert die Initiatoren, die für die Kapitel-Überschrift ausgewählt wurden, zugeordnet

8 Lehrstuhl für Produktentstehung Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler HEINZ NODDORF INSTITUT UNI VERDIE PADERBORN

**Berechnung: Maß für die exogene Änderungswahrscheinlichkeit**

■ Um die exogene Änderungswahrscheinlichkeit abzuschätzen, werden historische Daten von **Referenzprojekten** verwendet.

- Referenzprojekte sind Projekte, die ähnliche Charakteristika wie das aktuelle Projekt besitzen und ähnlich von den Initiatoren einer Änderung beeinflusst werden.
- Die Identifikation von Referenzprojekten wird durch das Ausfüllen eines Fragebogens unterstützt. Zusätzlich kann manuell eine Auswahl getroffen werden.

■ **Die historischen Daten** bestehen aus:

- Anzahl Anforderungen
- Anzahl der gesamten Änderungen (aufgeteilt in endogen und exogen)
- Die exogenen Änderungen werden nach der Ursache der Änderung (bezogen auf den Initiator) unterteilt

7 Lehrstuhl für Produktentstehung Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler HEINZ NODDORF INSTITUT UNI VERDIE PADERBORN

**Berechnung: Maß für die exogene Änderungswahrscheinlichkeit**

■ Aus den Referenzprojekten wird eine **projektspezifische Datengrundlage** gebildet, indem die Werte der Änderungsdaten der relevanten Referenzprojekte summiert werden

■ Pro Anforderung werden die Änderungen für die relevanten Initiatoren summiert

- Relevanz der Initiatoren wird aufgrund der Zuordnung der Anforderung zum Initiator festgelegt

■ Diese Summe wird durch die Anzahl der gesamten Änderungen dividiert

■ Zusammenfassung in einer Formel:

- $P_{exogen}(r_i) = \frac{\text{Anzahl der Änderungen durch die für Anforderung } i \text{ relevanten Initiatoren}}{\text{Gesamte Anzahl der Änderungen}}$
- $*:$  dieser Wert ist ein Indikator für die exogene Änderungswahrscheinlichkeit und keine absolute exogene Änderungswahrscheinlichkeit
- $0 \leq P_{exogen}(r_i) \leq \frac{\text{Gesamte Anzahl exogener Änderungen}}{\text{Gesamte Anzahl der Änderungen}} \leq 1$

8 Lehrstuhl für Produktentstehung Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler HEINZ NODDORF INSTITUT UNI VERDIE PADERBORN

**Berechnung: Maß für die endogene Änderungswahrscheinlichkeit**

■ Es wird ein Maß benötigt, um die **Konnektivität der Anforderungen** widerzuspiegeln, sodass der Einfluss durch Propagationseffekte deutlich wird

■ Hierfür wird, analog zur Auswirkungsanalyse, der PageRank verwendet:

- $PR(r_i) = \frac{1-d}{n} + d \sum_{r_j \in E_i} \frac{PR(r_j)}{v_j}$

■ Beispiel aus dem ARCA Workshop vom 23.03.:

1. Iteration	2. Iteration	3. Iteration	Rank
5,3777778	15,399485	84,3775642	1
0,1777778	4,945337	15,26062691	2
0,1777778	4,945337	15,26062691	2
0,1777778	0,785337	6,897308395	3
0,1777778	0,785337	6,897308395	3
0,1777778	0,785337	6,897308395	3
0,1777778	0,785337	3,569308395	5
0,2108889	0,8559741	5,545348978	4
0,1777778	0,785337	6,897308395	3

7 Lehrstuhl für Produktentstehung Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler HEINZ NODDORF INSTITUT UNI VERDIE PADERBORN

**Berechnung: Maß für die endogene Änderungswahrscheinlichkeit**

■ Gemäß dem „Zufallsurfermodell“ wird der PageRank normiert, um eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die einzelnen Anforderungen zu generieren

- Es wird der PageRank sämtlicher Anforderungen durch den höchsten PageRank dividiert. Zusammenfassung als Formel:
- $PR^*(r_i) = \frac{PR(r_i)}{\max(PR)}$

■ Um den Indikator für die endogene Änderungswahrscheinlichkeit zu berechnen und in ein geeignetes Verhältnis zu  $P_{exogen,i}^*$  zu setzen, wird der normierte PageRank mit dem Anteil der endogenen Änderungen im Verhältnis zu der Gesamtzahl der Änderungen multipliziert:

- $P_{exogen}(r_i) = PR^*(r_i) \cdot \frac{\text{Gesamte Anzahl endogener Änderungen}}{\text{Gesamte Anzahl der Änderungen}}$
- $*:$  dieser Wert ist ein Indikator für die endogene Änderungswahrscheinlichkeit und keine absolute endogene Änderungswahrscheinlichkeit
- $0 \leq P_{exogen}(r_i) \leq \frac{\text{Gesamte Anzahl endogener Änderungen}}{\text{Gesamte Anzahl der Änderungen}} \leq 1$

10 Lehrstuhl für Produktentstehung Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler HEINZ NODDORF INSTITUT UNI VERDIE PADERBORN

Abbildung A 8-16: Vorstellung der Methode zur Wahrscheinlichkeitsanalyse

### Berechnung der gesamten Änderungs-wahrscheinlichkeit



- Die beiden Indikatoren für die exogene und endogene Änderungswahrscheinlichkeit,  $P_{\text{exogen}}(r_i)$  und  $P_{\text{endogen}}(r_i)$ , werden zusammengeführt und genutzt, um die gesamte Änderungswahrscheinlichkeit abzuschätzen
- Wertebereich der beiden Indikatoren:
  - $0 \leq P_{\text{exogen}}(r_i) + P_{\text{endogen}}(r_i) \leq 1$
- Um die gesamte Änderungswahrscheinlichkeit zu repräsentieren, wird aus den historischen Anforderungsdaten der **Erwartungswert der Anzahl der Änderungen pro Anforderung  $E_{\text{Änderungen}}(r_i)$**  berechnet:
  - $\mu_{\text{Änderungen}} = \frac{\text{Gesamte Anzahl der Änderungen}}{\text{Gesamte Anzahl der Anforderungen}}$
  - Wertebereich:  $0 \leq \mu_{\text{Änderungen}} < \infty$  (realistisch sind eher Werte von  $\mu_{\text{Änderungen}} < 1$ )



### Berechnung der gesamten Änderungs-wahrscheinlichkeit

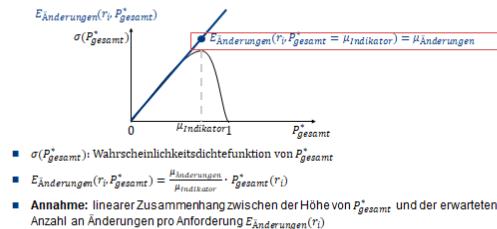


- Annahme:** Die Werte der Indikatoren für die Änderungswahrscheinlichkeit und die Anzahl der erwarteten Änderungen pro Anforderung  $E_{\text{Änderungen}}(r_i)$  sind proportional zueinander
  - Umso höher  $P_{\text{gesamt}}^*(r_i) = P_{\text{exogen}}^*(r_i) + P_{\text{endogen}}^*(r_i)$  ist, umso höher ist  $E_{\text{Änderungen}}(r_i)$
  - Wenn  $P_{\text{gesamt}}^*(r_i)$  den Erwartungswert  $\mu_{\text{Indikator}}$  annimmt, dann nimmt  $E_{\text{Änderungen}}(r_i)$  ebenfalls den Erwartungswert  $\mu_{\text{Änderungen}}$  an
  - $\mu_{\text{Indikator}} = \frac{\sum P_{\text{exogen}}^*(r_i) + P_{\text{endogen}}^*(r_i)}{\text{Anzahl der Anforderungen im aktuellen Projekt}}$

11 Lehrstuhl für Produktentstehung Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler

HEINZ NORDORF INSTITUT  
UNIVERSITÄT PADERBORN

### Berechnung der gesamten Änderungs-wahrscheinlichkeit



12 Lehrstuhl für Produktentstehung Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler

HEINZ NORDORF INSTITUT  
UNIVERSITÄT PADERBORN

### Berechnung der gesamten Änderungs-wahrscheinlichkeit



- Aufgrund der Höhe des Wertes der erwarteten Anzahl an Änderungen pro Anforderung wird ein Rückschluss auf die Änderungswahrscheinlichkeit der Anforderung gezogen:
  - Für  $E_{\text{Änderungen}}(r_i) \leq 0,25$ : die **Änderungswahrscheinlichkeit ist niedrig** („es werden weniger als 0,25 Änderungen für diese Anforderung erwartet“)
  - Für  $0,25 < E_{\text{Änderungen}}(r_i) \leq 0,75$ : die **Änderungswahrscheinlichkeit ist mittel** („es werden mehr als 0,25 bis 0,75 Änderungen für diese Anforderung erwartet“)
  - Für  $0,75 < E_{\text{Änderungen}}(r_i) \leq 1$ : die **Änderungswahrscheinlichkeit ist hoch** („es werden mehr als 0,75 bis eine Änderung für diese Anforderung erwartet“)
  - Für  $1 < E_{\text{Änderungen}}(r_i)$ : die **Änderungswahrscheinlichkeit ist sehr hoch** („es werden mehr als eine Änderung für diese Anforderung erwartet“)

13 Lehrstuhl für Produktentstehung Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler

HEINZ NORDORF INSTITUT  
UNIVERSITÄT PADERBORN

### Anforderungsbewertung



- A<sub>1</sub>:** Verarbeitbarkeit von komplexen Anforderungssets
- A<sub>2</sub>:** Einfache Anwendung
- A<sub>3</sub>:** Akzeptabler Anwendungsaufwand ●
- A<sub>4</sub>:** Integration in Systems Engineering Ansatz
- A<sub>5</sub>:** Verfügbarkeit der benötigten Software
- A<sub>6</sub>:** Verfügbarkeit der benötigten Informationen ●
- A<sub>7</sub>:** Industrielle Anwendbarkeit
- A<sub>8</sub>:** Flexibilität
- A<sub>9</sub>:** Wiederverwendbarkeit in ähnlichen Produktentwicklungsprojekten
- A<sub>10</sub>:** Qualität der Ergebnisse (nachvollziehbar und hinreichend genau) ●
- A<sub>11</sub>:** Unberücksichtigte Fehlerquellen und Einflussgrößen

Bewertung der Anforderungserfüllung (Ampelsystem)

- erfüllt
- teilweise erfüllt
- nicht erfüllt

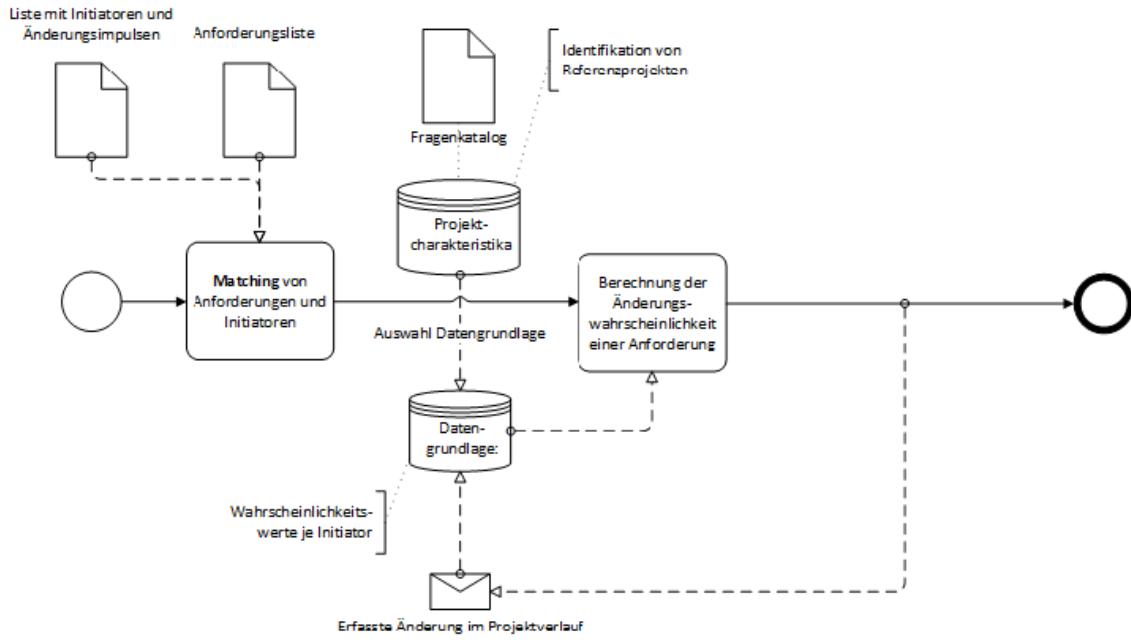


Anleitung

15 Lehrstuhl für Produktentstehung Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler

HEINZ NORDORF INSTITUT  
UNIVERSITÄT PADERBORN

**Abbildung A 8-17: Vorstellung des Konzepts zur Ermittlung des Erwartungswerts und Validierung der Anforderungserfüllung (I/II)**



Änderungsspezifische Projektbewertung			
Quellbereich	Initiator	Wahrscheinlichkeit der Initiierung einer Änderung	Exemplarische Änderungsimpulse
<b>Extern</b>			
Externer Markt	Politik	Vordefinierte Auswahlmöglichkeiten: Viele, Einige, Wenige/Kleine	Inkrafttreten neuer oder veränderter Gesetze Änderungen relevanter Normen und Richtlinien (z.B. Sicherheit, Schadstoffe, Recycling)
	Lieferanten		Probleme in der Herstellbarkeit/Realisierbarkeit Wechsel des Lieferanten (z.B. aufgrund von Preisannahmen, Lieferschwierigkeiten oder Qualitätsdefiziten)
	Markt		Veränderungen der Nachfrage (z.B. angepasste Absatzprognosen) oder des Angebots (z.B. Ressourcenverfügbarkeit) Veränderung der Wettbewerbssituation (z.B. Konkurrenzprodukt, Patente oder Ausscheiden von Wettbewerbern)
Kunde	Kundenbedürfnis		Änderung/Weiterentwicklung der Kundenbedürfnisse (z.B. Leistung, Gestaltung oder Funktionsumfang) Korrektur von Missverständnissen in der Kommunikation mit dem Kunden
	Kundenorganisation		Veränderte Organisationsstruktur (z.B. Ansprechpartner, strategische Ausrichtung oder Verantwortlichkeiten) Wandel in den Rahmenbedingungen (z.B. Geschäftsumfeld oder verwendete Hardware/Software)
<b>Intern</b>			
Projektkontext	Wirtschaftlichkeit		Drohende Kosten- oder Zeitüberschreitung Ausschöpfen von wirtschaftlichen Optimierungspotenzialen
	Technologie		Besseres Verständnis der technologischen Erforderisse (z.B. durch hohen Neuheitsgrad der Entwicklungsaufgabe) Erkenntnisgewinn (z.B. Chancen und Risiken) beim Einsatz neuer/unbekannter Technologien
	Wissen		Besseres Verständnis über das erforderliche System oder den Anwendungsbereich (aus Kundensicht) Volatilität bei den beteiligten Mitarbeiter*innen
Anforderungsspezifikation	Anforderungsmanagement		Korrektur fehlerhafter Anforderungen oder Identifikation fehlerhafter Anforderungen Besseres Verständnis des Kundenbedürfnisses (aus Entwicklungsperspektive)
	Projektleitung		Erkennen von Misverständnissen/Fehlkomunikation (z.B. zwischen Fachabteilungen) Inkonsistenzen oder Fehler durch die Verwendung von fehlerhaften Daten/Dokumenten (z.B. veraltet oder unvollständig)
	Software-Entwicklung		Wechsel des Lösungsansatzes (z.B. bedingt durch geringe Vorerfahrung oder Soll/Ist-Abweichung) Reaktion auf bisher unbekannte/unberücksichtigte Rahmenbedingungen aus anderen Fachabteilungen
Lösung	Hardware-Entwicklung		Wechsel des Lösungsansatzes (z.B. bedingt durch geringe Vorerfahrung oder Soll/Ist-Abweichung) Reaktion auf bisher unbekannte/unberücksichtigte Rahmenbedingungen aus anderen Fachabteilungen
	Produktion, Wartung, Entsorgung		Korrekturen zur Gewährleistung der Produzierbarkeit Realisierung von Kosteneinsparungspotenzialen bei Wartung oder Entsorgung

*Abbildung A 8-18: Vorstellung des Konzepts zur Ermittlung des Erwartungswerts und Validierung der Anforderungserfüllung (II/II)*

**H-W10**

## Auszug aus digitalen Workshop-Unterlagen (Miro-Board)

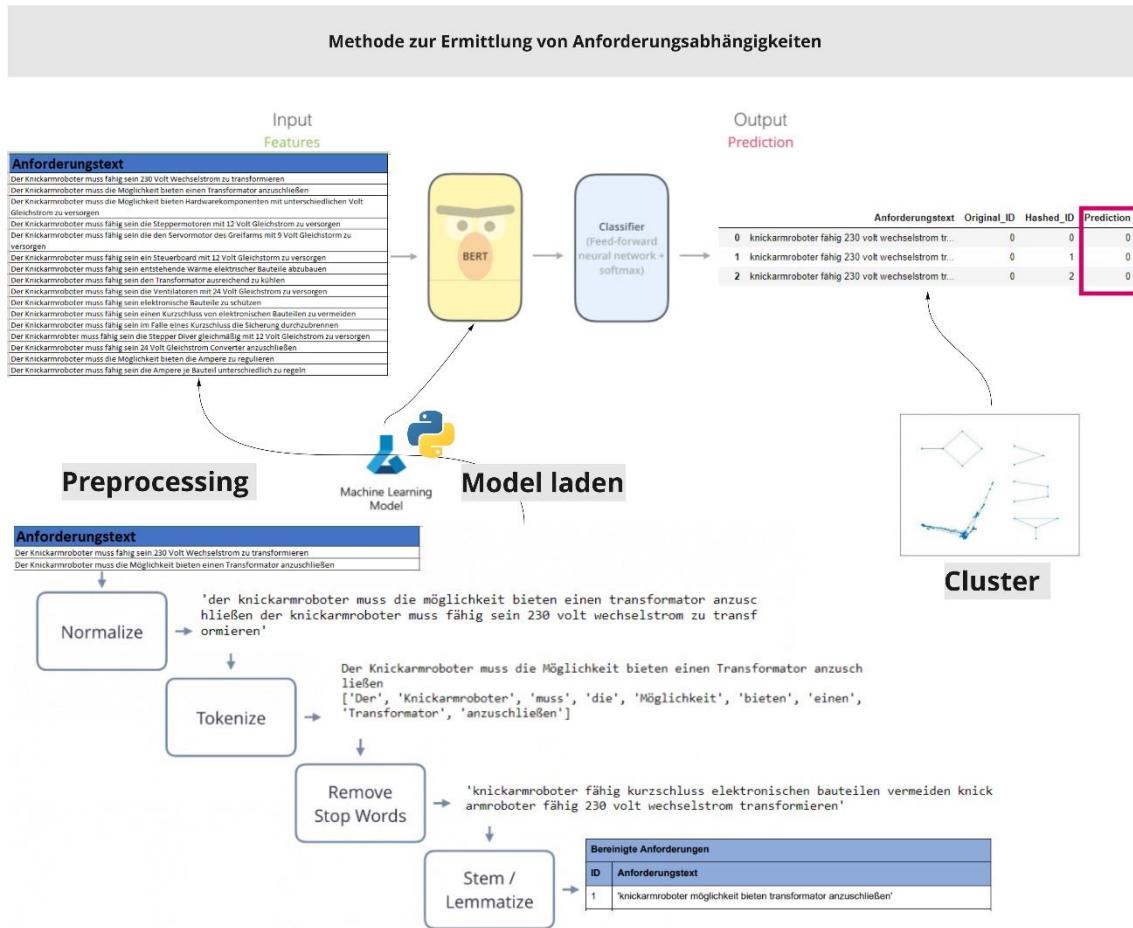


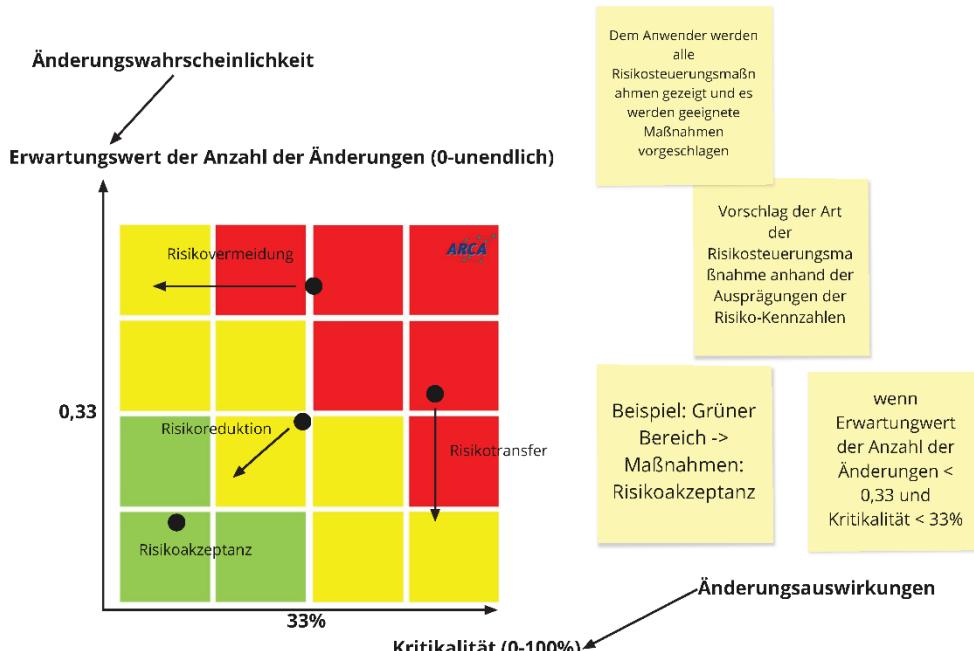
Abbildung A 8-19: Vorstellung des Konzepts zur Abhängigkeitsanalyse

Typ	Titel	Ursache	Anwendungsbereich	Zeitpunkt	Beschreibung
Risiko-Reduzierung	Meilenstein vorverlegen	Endogen	Gesamtes Anforderungsset Interaktion mit Entwicklungs-Team und Stakeholdern	Präventiv	Meilenstein vorverlegen (z.B. Prototyp soll früher entwickelt werden).
Risiko-Reduzierung	Anforderung entfernen	Endogen	Einzelne Anforderung	Proaktiv	Anforderung entfernen, da diese den Kundennutzen voraussichtlich nicht erhöhen wird.
Risiko-Reduzierung	Anforderung ändern	Endogen	Einzelne Anforderung	Proaktiv	Anforderung muss geändert werden.
Risiko-Reduzierung	Kundengespräch durchführen	Exogen	Gesamtes Anforderungsset Interaktion mit Stakeholdern	Präventiv	Gespräch mit Kunden durchführen.
Risiko-Reduzierung	Workshop durchführen	Exogen	Einzelne Anforderung / Gesamtes Anforderungsset Interaktion mit Stakeholdern	Proaktiv	Workshop zu Lösungsvorschlägen durchführen. Kritisches Hinterfragen von Änderungen: Änderungswünsche mit Kunden besprechen.
Risiko-Reduzierung	Änderungsbedarf klären	Endogen und Exogen	Interaktion mit Stakeholdern	Proaktiv	Regelmäßige Risikosichtung der Anforderungen.
Risiko-Reduzierung	Anforderungen prüfen	Endogen und Exogen	Gesamtes Anforderungsset	Proaktiv	Das Risiko der Anforderung ist bekannt, bleibt jedoch unverändert.
Risiko-Akzeptanz	Risiko akzeptieren	Endogen und Exogen	Einzelne Anforderung	Proaktiv	Entfernen der Anforderung, da diese unnötig ist.
Risiko-Akzeptanz	Anforderung entfernen	Endogen	Einzelne Anforderung	Präventiv	Das Risiko ist bekannt und wird akzeptiert.
Risiko-Akzeptanz	Risiko akzeptieren	Endogen und Exogen	Einzelne Anforderung	Präventiv	Anforderung kann nach einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr verändert werden.
Risiko-Transfer	Anforderung festhalten	Exogen	Interaktion mit Stakeholdern	Präventiv	Kosten, die mit der Änderung der Anforderung verbunden sind, werden durch den Auftraggeber gedeckt
Risiko-Transfer	Änderungskosten übertragen	Exogen	Einzelne Anforderung Interaktion mit Stakeholdern	Präventiv	Es soll ein Budget für mögliche Änderungen angelegt werden.
Risiko-Transfer	Änderungsbudget anlegen	Exogen	Einzelne Anforderung Interaktion mit Stakeholdern	Präventiv	Meilenstein-Treffen zur Bewertung von Risiken durchführen.
Risiko-Transfer	Risiken bewerten	Endogen und Exogen	Gesamtes Anforderungsset Interaktion mit Stakeholdern	Proaktiv	Anforderung kann nach einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr verändert werden.
Risiko-Vermeidung	Anforderung festhalten	Endogen und Exogen	Einzelne Anforderung Interaktion mit Stakeholdern	Präventiv	Mögliche Änderungen ermitteln.
Risiko-Vermeidung	Änderungen präventiv ermitteln	Endogen	Einzelne Anforderung Interaktion mit Stakeholdern und Entwicklungs-Team	Präventiv	Das Risiko wird durch das Löschen der Anforderung vermieden.
Risiko-Vermeidung	Anforderung entfernen	Endogen	Einzelne Anforderung	Präventiv	Bei Veränderung dieser Anforderung soll ein Aktionsplan entwickelt werden.
Risiko-Vermeidung	Aktionsplan entwickeln	Exogen	Einzelne Anforderung	Proaktiv	Wird diese Anforderung verändert, so muss der Kunde für die Mehrkosten aufkommen.
Risiko-Vermeidung	Änderungskosten übertragen	Exogen	Einzelne Anforderung Interaktion mit Stakeholdern	Präventiv	Diese Anforderung wird bei nicht-Durchführbarkeit durch eine andere Anforderung ersetzt.
Risiko-Vermeidung	Anforderung ersetzen	Endogen	Einzelne Anforderung	Proaktiv	

Abbildung A 8-20: Validierung der Maßnahmen

## H-W11

## Auszug aus digitalen Workshop-Unterlagen (Miro-Board)



Hilfe zu Risikosteuerungsmaßnahmen - ARCA Tool 2.1						
Risikosteuerungsmaßnahme	Typ	Beschreibung	Zeitpunkt	Anwendungsbereich	Ursache	
0 Meilenstein vorverlegen	Risiko-Reduzierung	Meilenstein vorverlegen (z.B. Prototyp soll früher entwickelt werden)	Präventiv	Gesamtes Anforderungsset...	Endogen	
1 Anforderung entfernen	Risiko-Reduzierung	Anforderung entfernen, da diese den Kundennutzen voraussichtlich nicht erhöhen wird.	Präventiv	Einzelne Anforderung	Endogen	
2 Anforderung ändern	Risiko-Reduzierung	Anforderung muss geziert werden.	Präventiv	Einzelne Anforderung	Endogen	
3 Kundengepräch durchführen	Risiko-Reduzierung	Gespräch mit Kunden durchführen.	Präventiv	Gesamtes Anforderungsset...	Exogen	
4 Workshop durchführen	Risiko-Reduzierung	Workshop zu Lösungswahlmöglichkeiten durchführen.	Präventiv	Einzelne Anforderung /Gesamtes Anforderungsset...	Exogen	
5 Änderungsbedarf klein	Risiko-Reduzierung	Kritisches Hinterfragen von Änderungen: Änderungswünsche mit Kunden besprechen.	Präventiv	Einzelne Anforderung ...	Endogen und Exogen	
6 Anforderungen prüfen	Risiko-Reduzierung	Regelmäßige Risikoprüfung der Anforderungen.	Präventiv	Gesamtes Anforderungsset	Endogen und Exogen	
7 Risiko akzeptieren	Risiko-Akzeptanz	Das Risiko der Anforderung ist bekannt, bleibt jedoch unverändert.	Präventiv	Einzelne Anforderung	Endogen und Exogen	
8 Anforderung entfernen	Risiko-Akzeptanz	Entfernen der Anforderung, da diese unnötig ist.	Präventiv	Einzelne Anforderung	Endogen	
9 Risiko akzeptieren	Risiko-Akzeptanz	Das Risiko ist bekannt und wird akzeptiert.	Präventiv	Einzelne Anforderung	Endogen und Exogen	
10 Anforderung festhalten	Risiko-Transfer	Anforderung kann nach einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr verändert werden.	Präventiv	Einzelne Anforderung ...	Exogen	
11 Änderungskosten übertragen	Risiko-Transfer	Kosten, die mit der Änderung der Anforderung verbunden sind, werden durch den Auftraggeber gedeckt.	Präventiv	Einzelne Anforderung ...	Exogen	

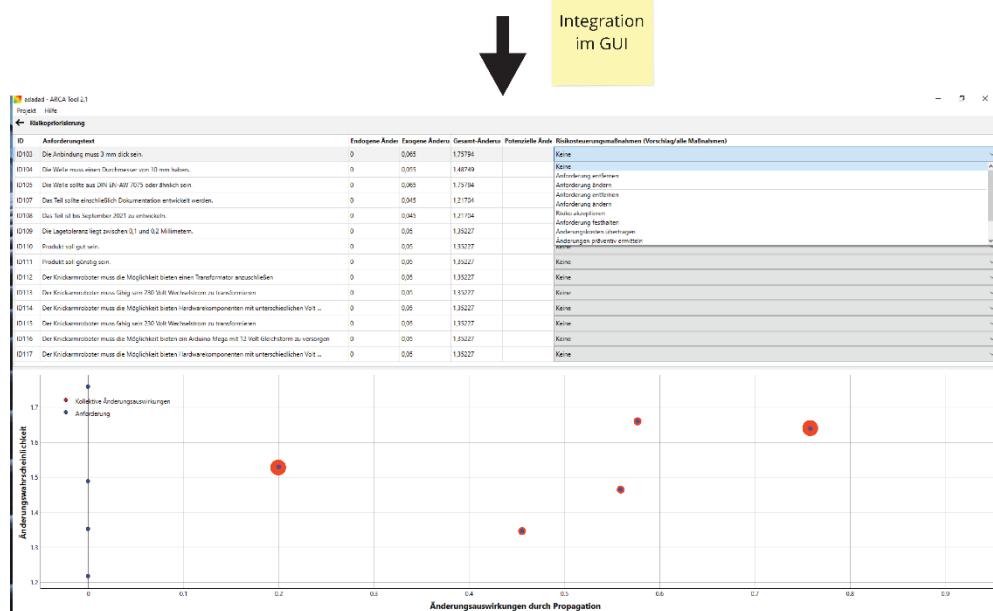


Abbildung A 8-21: Ausgestaltung des Risikoportfolios

**Übergreifendes – Application Evaluation****„Was muss validiert werden?“**

- A1: Verarbeitbarkeit von komplexen (interdisz. + umfangreich) Anforderungssets
- A2: Einfache Anwendung (Anleitung) 
- A3: Akzeptabler Anwendungsaufwand 
- A4: Integration in Systems Engineering Ansatz
- A5: Verfügbarkeit der benötigten Software 
- A6: Verfügbarkeit der benötigten Informationen (insb. Datengrundlage) 
- A7: Industrielle Anwendbarkeit (reale Anwendungsumgebung und Problemstellung)
- A8: Flexibilität (Anpassbarkeit von Methodik und Datengrundlage)
- A9: Wiederverwendbarkeit in ähnlichen Produktentwicklungsprojekten
- A10: Qualität der Ergebnisse (nachvollziehbar, korrekt und hinreichend genau) 
- A11: Sekundärfunktionalitäten: Q-Checker
- A12: Unberücksichtigte Fehlerquellen und Einflussgrößen 

 Zu prüfen für jede  
Funktionalität

HEINZ NIXDORF INSTITUT

UNIVERSITÄT PADERBORN

*Abbildung A 8-22: Validierung der Anforderungserfüllung des Risikoportfolios*

**H-W12**

Foliensatz bestand aus Auszügen des Referenzprozesses (vgl. Kapitel 6.5)

## A3 Untersuchung des Anwendungszusammenhangs

### Dynamischer Kfz-Heckflügelhalter (Automobilbranche / Entwicklungsdienstleister)

Der Heckflügelhalter dient zur Befestigung und stufenlosen Verstellung des Anstellwinkels eines Heckflügels von Sportfahrzeugen (vgl. Abbildung A 8-23). Das System vereint Leichtbau, aktive Aerodynamik, Funktionsintegration (Verstellung und Bremsleuchten) und ein optisch ansprechendes Design mithilfe der additiven Fertigung [KGZ21, S. 141 ff.]. Die Fallstudie umfasst 30 Anforderungen.

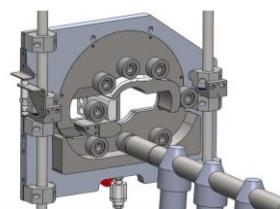


Fallbeispiel: Heckflügelhalter  
Branche: Automobilindustrie  
Unternehmen: Entwicklungsdienstleister  
Unternehmensgröße: Großunternehmen  
Anforderungsset: 30 interdisziplinäre Anforderungen

Abbildung A 8-23: Steckbrief Fallstudie Heckflügelhalter (Bild: [KGZ21])

### Steuerkurve in einer Lebensmittelverarbeitungsmaschine (Maschinenbau / Erstausrüster)

Die Steuerkurve ist eine Bauteilkomponente einer Teigteil- und Wirkmaschine in der Lebensmittelindustrie (Brötchenproduktion) (vgl. Abbildung A 8-24). Die Anpassungsentwicklung zielt auf eine robustere Gestaltung bei unzureichender Einhaltung von Reinigungsintervallen ab. Die Fallstudie umfasst 40 Anforderungen. Der Anwendungskontext hat zwei Besonderheiten: zum einen ist das Unternehmen mit ca. 150 Mitarbeitenden ein mittelständisches Unternehmen und bietet damit die Möglichkeit einer Validierung im Kontext entsprechender Organisations- und Prozessstrukturen. Zum anderen sind durch den Bezug zur Lebensmittelsicherheit Regularien von besonderer Bedeutung. [Sti20]

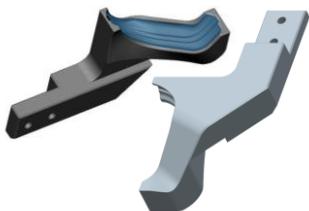


Fallbeispiel: Steuerkurve für Teigteilmaschine  
Branche: Lebensmittelindustrie  
Unternehmen: Maschinenbauer  
Unternehmensgröße: Mittelständler  
Anforderungsset: 40 mechanische Anforderungen

Abbildung A 8-24: Steckbrief Fallstudie Steuerkurve für Teigteilmaschine (Bild: [Sti20])

**Greifer für Bauteiltransport im Umformprozess (Produktionstechnik / Automobilzulieferer)**

Der Greifer wird in der Massivumformung für den Transport von Bauteilen in automatisierten Umformanlagen genutzt (vgl. Abbildung A 8-25). Ziel der Greifer-Entwicklung ist eine verschleißärmere und gewichtsoptimierte Gestaltung. Die Fallstudie hat 15 Anforderungen. [KGZ21, S. 144 ff.]



Fallbeispiel: Greifer für Umformprozess  
Branche: Maschinenbau  
Unternehmen: Automobilzulieferer  
Unternehmensgröße: Mittelständler  
Anforderungsset: 15 mechanische Anforderungen

Abbildung A 8-25: Steckbrief Fallstudie Greifer für Umformprozess (Bild: [KGZ21])

## A4 Methode zur Identifikation von Unsicherheiten

### Übersicht der Kriterien zur Qualitätsprüfung von Anforderungen

Die Qualitätsdefizite werden durch eine lexikalische Analyse erkannt. Es wird geprüft, ob bestimmte Wörter im Text der Anforderung enthalten sind. Die Auswahl wurde überetzt aus [Bou19]. Die jeweiligen Qualitätsdefizite und deren zugehörige Wörter sind die Folgenden:

- **Die Bedeutung hängt stark von der Position ab:** nur, auch, sogar
- **Mehrdeutige Wörter:** enthält, nach, vor, nächste, vorige, Minimum, Maximum
- **Fortsetzungen verweisen auf Mehrdeutigkeiten:** wie folgt, unter, außerdem, insbesondere, aufgeführt, inzwischen, unterdessen, einerseits, andererseits
- **Gefährlicher Plural:** alle, jeder, jede, wenige, wenig, viele, viel, mehrere, einige
- **Unpräzise Begrifflichkeiten:** könnte, sollte
- **Subjektive Sprache:** bis, durch, bei
- **Fehlender Inhalt:** tbd, etc, tba, tbe, tbs, tbr, mindestens, wie definiert, wie spezifiziert, zusätzlich, ist, definiert, keine praktische, Grenze, nicht definiert, nicht bestimmt, aber nicht beschränkt auf, zu beraten, zu definieren, zu vervollständigen, zu bestimmen, zu beschließen, zu spezifizieren
- **Verneinung:** nicht, nicht weil
- **Möglichkeiten:** wie gewünscht, endlich, entweder, eventuell, falls angebracht, wenn gewünscht, im Falle von, falls notwendig, falls benötigt, weder, noch, optional, sonst, möglicherweise, wahrscheinlich, ob
- **Vage Pronomen:** er, sie, es, irgendjemand, irgendetwas, alles, ihr, sich, sich selbst, ich, die meisten, mein, mich selbst, keiner, niemand, nichts, unser, uns selbst, jemand, etwas, das, ihre, diese, dies, jene, wir, was, was auch immer, welches, welches auch immer, wer, wer auch immer, wen, wen auch immer, wessen, wessen auch immer, du, dein, selbst
- **Spekulationen:** normalerweise, eigentlich
- **Subjektive Sprache:** wenn nicht
- **Schwach subjektive Sprache:** kann, darf, bevorzugt, wird, würde
- **Wunschdenken:** 100 Prozent, alle Fehler
- **Vage Satzzeichen und Worte:** √, <>, (,), [ ], ;, ?, !, Anpassungsfähigkeit, adäquat, aggregiert, beliebig, angemessen, verfügbar, soweit, so wenig wie möglich, so viele

wie möglich, so viel wie möglich, nach Bedarf, sowohl als auch, schlecht, sowohl, aber, aber auch, aber nicht nur, fähig zu, Fähigkeit von, Fähigkeit, gemeinsame, korrekt, konsequent, zeitgemäß, bequem, glaubwürdig, gebräuchlich, üblich, Standard, leicht, einfach, effektiv, effizient, episodisch, gerecht, gleichberechtigt, existieren, existiert, zügig, schnell, fair, ziemlich, final, häufig, voll, allgemein, generisch, gut, hochrangig, unparteiisch, selten, unbedeutend, mittel, interaktiv, in Bezug auf, weniger, logisch, niedrig, maximal, minimal, mehr, einvernehmlich, sich gegenseitig ausschließend, sich gegenseitig einschließend, nahe, notwendig, neutral, nicht nur, auf der Ebene, besonders, physisch, stark, praktisch, prompt, bereitgestellt, zufällig, kürzlich, ungeachtet, relevant, jeweilig, robust, routiniert, suffizient, sequentiell, signifikant, spezifisch, dort, es gibt, vorübergehend, transparent, rechtzeitig, undefinierbar, verständlich, es sei denn, unnötig, nützlich, verschieden, variierend

- **Unklarer Einschluss:** bis [...] zu [...] einschließlich / ausschließlich
- **Passive Sprachmehrdeutigkeit:** [...] sein / werden [...]
- **Vergleich und Superlativ:** [...] vergleichen / unterscheiden / kontrastieren / übertreffen / überrunden / überbieten / überlegen / überschatten / ausgleichen / besten / übertrumpfen / überholen / vergleichen / entsprechen / ausgleichen / konkurrieren [...]
- **Zweideutiger Plural:** [...] jede / jeder / jemand / sie [...] ihr / ihre [...]
- **Andere bzw. Sonstige:** beides
- **Gefährliche Referenz Plural:** [...] alle / jeder / jede [...] seine / ihre [...]
- **Unklarer Bezug:** [...] und [...] oder [...] / [...] oder [...] und [...]

## A5 Methode zur Bewertung der Änderungswahrscheinlichkeit

### A5.1 Übersicht der Änderungsinitiatoren und exemplarischer Änderungsimpulse

*Tabelle A 8-9: Änderungsinitiatoren und exemplarischer Änderungsimpulse je Quellbereich*

Quellbereich	Änderungsinitiator	exemplarische Änderungsimpulse
externer Markt	Politik	Inkrafttreten neuer oder veränderter Gesetze
		Änderungen relevanter Standards und Richtlinien (z. B. Sicherheit, Schadstoffe, Recycling)
	Lieferanten	Probleme in der Herstellbarkeit / Realisierbarkeit
		Wechsel des Lieferanten (z. B. aufgrund von Preisanpassungen, Liefer-schwierigkeiten oder Qualitätsdefiziten)
	Markt	Veränderungen der Nachfrage (z. B. angepasste Absatzprognosen) oder des Angebots (z. B. Ressourcenverfügbarkeit)
		Veränderung der Wettbewerbssituation (z. B. Konkurrenzprodukt, Patente oder Ausscheiden von Wettbewerbern)
Kundenorganisation	Kundenbedürfnis	Änderung / Weiterentwicklung der Kundenbedürfnisse (z. B. Leistung, Gestaltung oder Funktionsumfang)
		Korrektur von Missverständnissen in der Kommunikation mit dem Kunden
	Kundenorganisationsstruktur	Veränderte Organisationsstruktur (z. B. Ansprechpartner, strategische Ausrichtung oder Verantwortlichkeiten)
		Wandel in den Rahmenbedingungen (z. B. Geschäftsumfeld oder ver-wendete Hardware / Software)
Projektvision	Wirtschaftlichkeit	drohende Zeit- oder Kostenüberschreitung
		Ausschöpfen von wirtschaftlichen Optimierungspotenzialen
	Technologie	besseres Verständnis der technologischen Erfordernisse (z. B. durch ho-hen Neuheitsgrad der Entwicklungsaufgabe)
		Erkenntnisgewinn (z. B. Chancen und Risiken) beim Einsatz neuer / un-bekannter Technologien
	Wissen	besseres Verständnis über das erforderliche System oder den Anwen-dungsbereich (aus Kundenperspektive)
		Volatilität bei den beteiligten Mitarbeiter:innen
Anforderungs-spezifikation	Anforderungsma-nagement	Korrektur fehlerhafter Anforderungen oder Identifikation fehlender Anfor-derungen
		Besseres Verständnis des Kundenbedürfnisses (aus Entwicklungs-perspektive)
	Projektleitung	Erkennen von Missverständnissen / Fehlkommunikation (z. B. zwischen Fachabteilungen)
		Inkonsistenzen oder Fehler durch die Verwendung von fehlerhaften Daten / Dokumenten (z. B. veraltet oder unvollständig)
Lösung	Software-Entwick-lung	Wechsel des Lösungsansatzes (z. B. bedingt durch geringe Vorerfah-rung oder Soll / Ist-Abweichung)

		Reaktion auf bisher unbekannte / unberücksichtigte Rahmenbedingungen aus anderen Fachabteilungen
Hardware-Entwicklung		Wechsel des Lösungsansatzes (z. B. bedingt durch geringe Vorerfahrung oder Soll / Ist-Abweichung)
		Reaktion auf bisher unbekannte / unberücksichtigte Rahmenbedingungen aus anderen Fachabteilungen
Produktion, Wartung, Entsorgung		Korrekturen zur Gewährleistung der Produzierbarkeit
		Realisierung von Kosteneinsparungspotenzialen bei Wartung oder Entsorgung

## A5.2 Literaturbasierte Ausgangswerte für die Berechnung der exogenen Änderungswahrscheinlichkeit

Anhand der folgenden Literaturstudien wurden die Ausgangswerte für die Berechnung der exogenen Änderungswahrscheinlichkeit ermittelt: [MD12; FHS15; AK07]

Da die Studien zum Teil eine andere Kategorisierung der Änderungsinitiatoren verwenden oder sich auf bestimmte Phasen im Entwicklungsverlauf fokussieren, mussten Durchschnittswerte gebildet werden. Fehlende Kenngrößen auf Ebene der Änderungsinitiatoren wurden unter Einbindung der Industrieexpert:innen geschätzt [H-KA1]. Das Ergebnis ist in Tabelle A 8-10 dargestellt und wurde im Rahmen von [Bot21] erarbeitet.

*Tabelle A 8-10: Aus Literaturstudien abgeleitete Wahrscheinlichkeitswerte je Änderungsinitiator*

Quellbereich	Änderungsinitiator	relative Änderungswahrscheinlichkeit
externer Markt	Politik	9,7%
	Lieferanten	6,2%
	Markt	10,7%
Kundenorganisation(en)	Kundenbedürfnis	13,9%
	Kundenorganisationsstruktur	2,4%
Projektvision	Wirtschaftlichkeit	2,8%
	Technologie	4,2%
	Wissen	2,1%
Anforderungsspezifikation	Anforderungsmanagement	6,2%
	Projektleitung	9,7%
Lösung	Software-Entwicklung	5,5%
	Hardware-Entwicklung	10,4%
	Produktion, Wartung, Entsorgung	16,2%

### A5.3 Übersicht der Projektcharakteristika zur Auswahl von Vergleichsprojekten

*Tabelle A 8-11: Projektcharakteristika zur Auswahl von Vergleichsprojekten*

Frage	Antwortmöglichkeit
Wie hoch ist der Innovationsgrad des zu entwickelnden Systems?	niedrig / mittel / hoch
Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit von Änderungswünschen durch den Kunden?	niedrig / mittel / hoch
Wie hoch ist die Sicherheit politischer Verhältnisse, die Einfluss auf das Entwicklungsprojekt haben?	niedrig / mittel / hoch
Wie hoch ist die Komplexität des Projekts?	niedrig / mittel / hoch
Wie hoch ist die Liefertreue des Lieferanten?	niedrig / mittel / hoch
Wie gut sind wir im Vergleich zu unserer Konkurrenz positioniert?	schlechter / gleichwertig / besser
Sind strukturelle Änderungen beim Kunden zu erwarten?	ja / nein
Sind interne strukturelle Änderungen zu erwarten?	ja / nein
Werden Zu- oder Abgänge von Mitarbeitern im Projekt mit technischem "Know-How" erwartet?	ja / nein
Wenden wir strukturiert Anforderungsmanagement-Methoden im Projekt an?	ja / nein
Findet ein disziplinübergreifender Austausch statt?	ja / nein
Sind Kundenanforderungen eindeutig formuliert?	ja / nein



## A6 Methode zur Auswahl von proaktiven Maßnahmen

Der Liste mit proaktiven Maßnahmen (vgl. Tabelle 6-5) liegen die folgenden Überlegungen zugrunde:

Eine Unterscheidung zwischen Maßnahmen zur **Vermeidung** (Eintrittswahrscheinlichkeit wird eliminiert) und Maßnahmen zur **Reduktion der Eintrittswahrscheinlichkeit** ist nicht sinnvoll, da Vermeidungsmaßnahmen in der Entwicklungspraxis zum Teil ausgesetzt werden. Eine vollständige Sicherheit, die Eintrittswahrscheinlichkeit zu eliminieren, ist daher nicht gewährleistet. Beispielsweise schließt die Festsetzung („Freeze“) des Anforderungssets grundsätzlich Änderungen aus. Wenn jedoch eine zertifizierungsrelevante Anforderung unzureichend definiert ist und dies im Rahmen einer Prüfung erkannt wird oder regulatorische Neuerungen das Geschäftsmodell bedrohen, können solche Vorgaben ausgesetzt und Änderungen genehmigt werden. Die vollständige Elimination der Eintrittswahrscheinlichkeit wird daher als unsicherheitsbehaftet erachtet und mit der Reduktion gleichgesetzt.

Eine unmittelbare **Reduktion der endogenen Änderungswahrscheinlichkeit** ist nicht durch anforderungsbezogene Maßnahmen möglich. Ausschließlich Entwicklungentscheidungen (z. B. Realisierung eines Änderungsbedarfs durch Alternative A oder B) oder Modularisierung der Systemelemente sind denkbar, weil der Abhängigkeitstyp und damit das Propagationsverhalten zwischen zwei Anforderungen konstant ist. Als weiterer Ansatzpunkt ist die Reduktion der exogenen Änderungswahrscheinlichkeit beeinflussender Anforderungen möglich, was sich indirekt auf die endogene Änderungswahrscheinlichkeit der betrachteten Anforderung auswirkt.

Eine Unterscheidung der Maßnahmen hinsichtlich **lokaler, konsekutiver und kollektiver Auswirkungen** ist nicht sinnvoll, da alle Maßnahmen die kollektiven Auswirkungen beeinflussen. Beispielsweise führt die Vorverlagerung einer Anforderungsänderung zu lokal reduzierten Auswirkungen. Zugleich werden jedoch auch die Folgeänderungen (konsekutive Effekte) vorverlagert, sodass die kollektiven Auswirkungen ebenfalls reduziert werden. Gleiches gilt für die Nachverhandlung mit Stakeholdern oder die Ausarbeitung einer Rückfallebene / Alternative.



## A7 Software-Werkzeug zur teilautomatisierten Anwendung der Methodik

### A7.1 Mock-Up

Exemplarische Auszüge aus dem Mock-Up mit insgesamt 56 Schritten / Screens

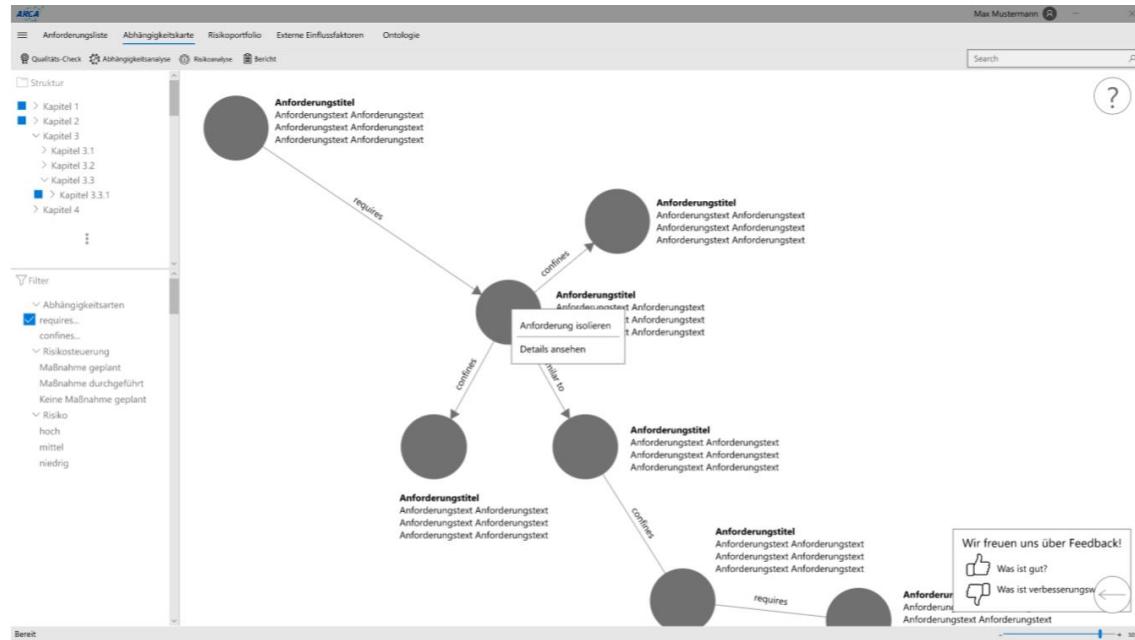
#### Projektbrowser zur Anmeldung

The screenshot shows a web-based application interface. At the top, there is a header with the ARCA logo and a navigation bar with links like 'Projektübersicht', 'Qualitäts-Check', 'Abhängigkeitsanalyse', 'Risikoportfolio', 'Externe Einflussfaktoren', and 'Ontologie'. Below the header, a table lists projects: 'IAV Fallbeispiel' (30.06.2020, Anforderungsmanager) and 'Projekt 2' (01.01.2001, Projektmanager, Anforderungsmanager). On the right, there are buttons for 'Projekt öffnen' (open project). At the bottom right, a feedback box says 'Wir freuen uns über Feedback!' with two options: 'Was ist gut?' (good) and 'Was ist verbessерungswürdig?' (improvement needed).

#### Hauptfenster mit Anforderungsübersicht

The screenshot shows the main application window with a title bar 'Max Mustermann'. The navigation bar includes 'Anforderungsliste', 'Abhängigkeitsanalyse', 'Risikoportfolio', 'Externe Einflussfaktoren', 'Ontologie', and a user icon. On the left, a tree view shows requirement structures: 'Kapitel 1', 'Kapitel 2', 'Kapitel 3' (with sub-items 'Kapitel 3.1', 'Kapitel 3.2', 'Kapitel 3.3' (with sub-item 'Kapitel 3.3.1')), and 'Kapitel 4'. Below the tree is a 'Filter' section with checkboxes for 'Abhängigkeitsarten' (requires..., confines...), 'Risikosteuerung' (Maßnahme geplant, Maßnahme durchgeführt, Keine Maßnahme geplant), and 'Risiko' (hoch, mittel, niedrig). The main area displays a table of requirements with columns: 'Beschreibung', 'Max. Anforderungen', 'Aktiv. Anforderungen', 'Hilfe', and 'Kommentar'. The table contains rows 1 through 5.1.1, with some rows having sub-rows. At the bottom right, a feedback box says 'Wir freuen uns über Feedback!'.

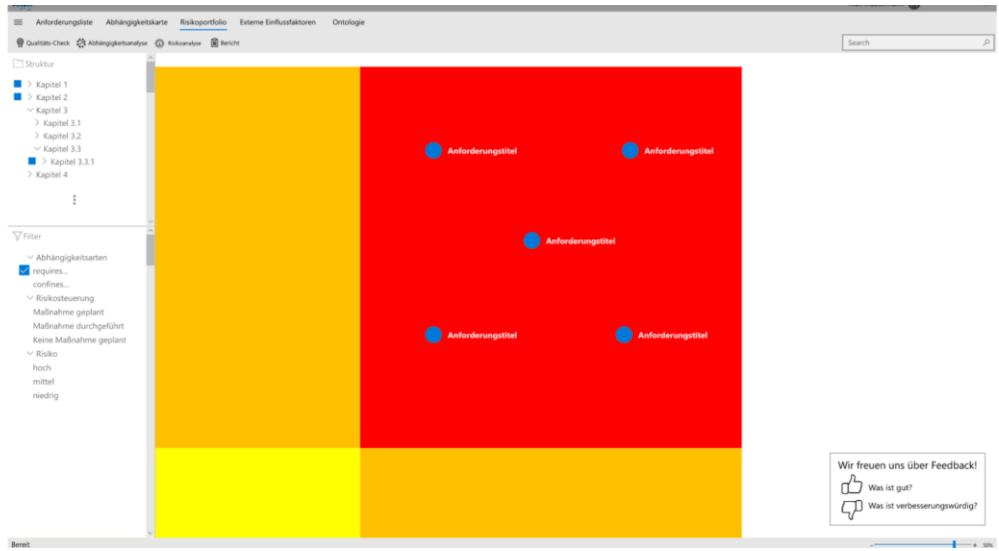
## Interaktive Ergebnisdarstellung der Abhängigkeitsanalyse



## Ergebnisdarstellung der Qualitätsprüfung

The screenshot shows a quality review results visualization. The interface shows a list of findings and a 'Qualitätschecker' section. The 'Qualitätschecker' section contains several sub-sections with examples and explanations. A feedback section on the right asks for feedback on the quality review.

## **Auszug aus dem Risikoportfolio**



## **Übersicht und Beschreibung von Risikosteuerungsmaßnahmen**

9 Risiko Einflossfaktoren

Wendlichkeit Finanzielles Ausmaß Zeitliches Ausmaß Rücksteuerungsmaßnahme

Wählen Sie eine Maßnahme

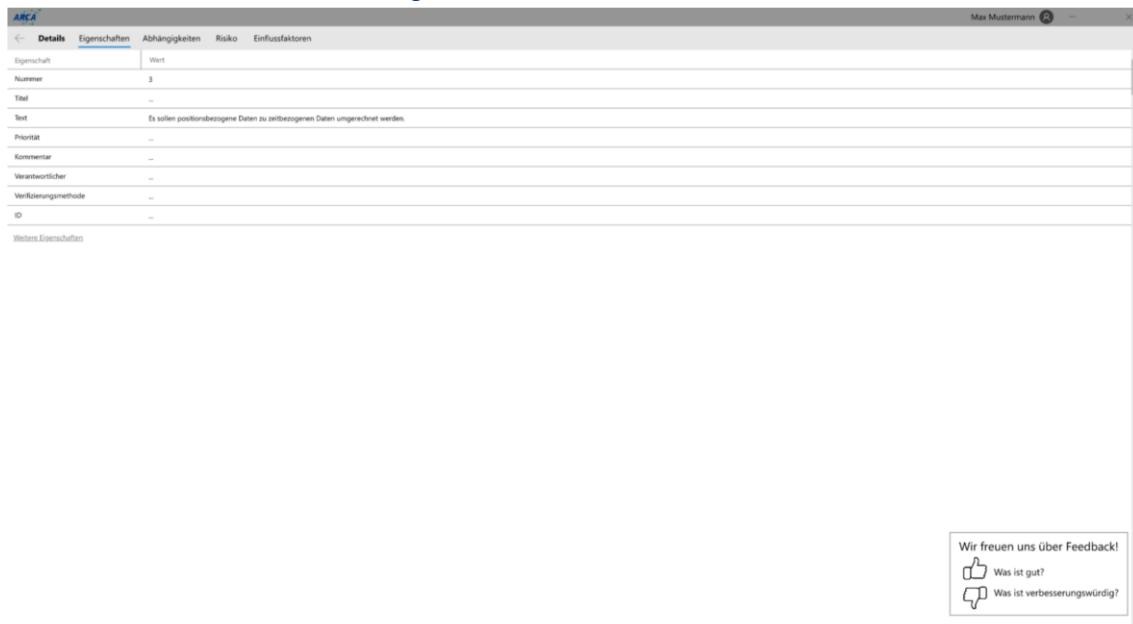
① Risikosteuerungsmaßnahmen auswählen

Wähle Risikosteuerungsmaßnahme(n) ②

<input type="checkbox"/> Maßnahme 1	<p>Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Aliquam non accumsan magna. Pellentesque eget turpis non urna porta vestibulum. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia curae; Nam viverra rhoncus egestas. Mauris sodales ipsum eu neque pellentesque, sed convallis neque feugiat. Quisque eu libero vitae lorem semper placerat vel vitae odio.</p>
<input type="checkbox"/> Maßnahme 1	<p>Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Aliquam non accumsan magna. Pellentesque eget turpis non urna porta vestibulum. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia curae; Nam viverra rhoncus egestas. Mauris sodales ipsum eu neque pellentesque, sed convallis neque feugiat. Quisque eu libero vitae lorem semper placerat vel vitae odio.</p>
<input type="checkbox"/> Maßnahme 1	<p>Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Aliquam non accumsan magna. Pellentesque eget turpis non urna porta vestibulum. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia curae; Nam viverra rhoncus egestas. Mauris sodales ipsum eu neque pellentesque, sed convallis neque feugiat. Quisque eu libero vitae lorem semper placerat vel vitae odio.</p>
<input type="checkbox"/> Maßnahme 1	<p>Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Aliquam non accumsan magna. Pellentesque eget turpis non urna porta vestibulum. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia curae; Nam viverra rhoncus egestas. Mauris sodales ipsum eu neque pellentesque, sed convallis neque feugiat. Quisque eu libero vitae lorem semper placerat vel vitae odio.</p>

Hinzufügen Abbrechen

### Detailansicht einer Anforderung



## A7.2 UML und SysML Diagramme

Die nachfolgenden Diagramme wurden kollaborativ im Rahmen von [Sch21] erarbeitet.

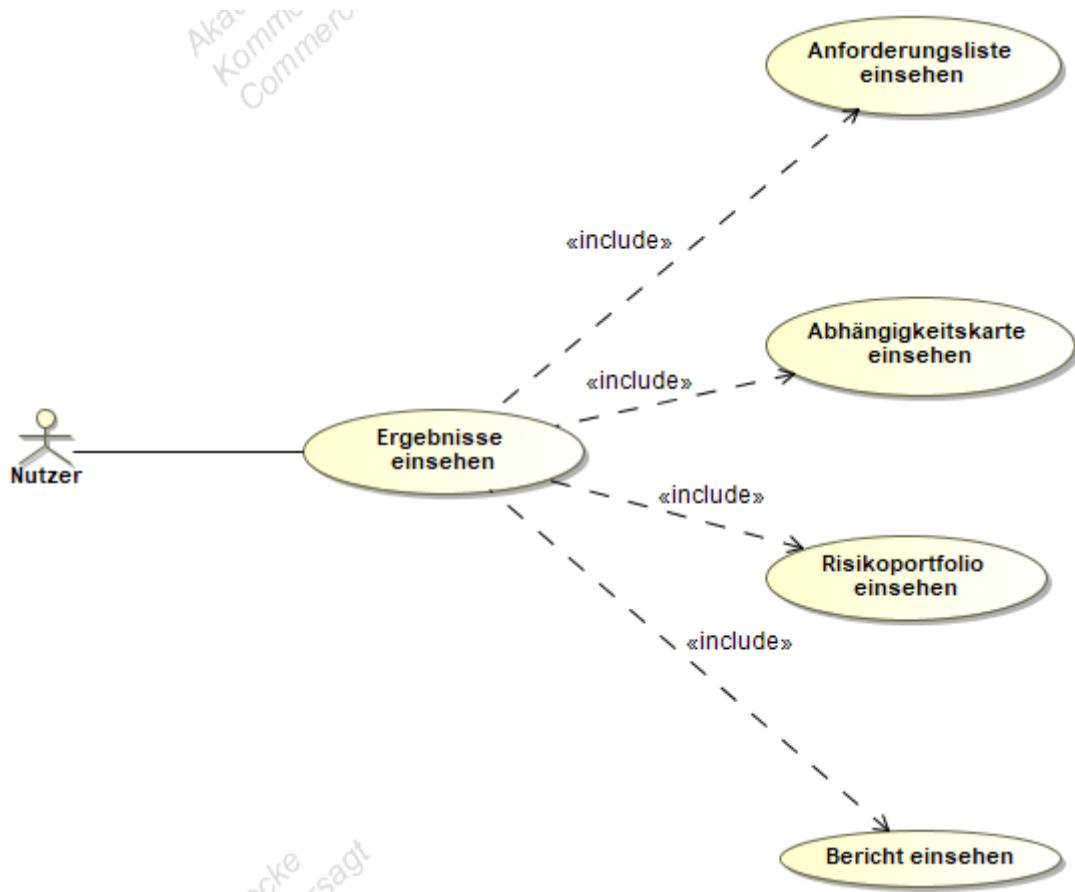


Abbildung A 8-26: Anwendungsfalldiagramm „Ergebnisse einsehen“

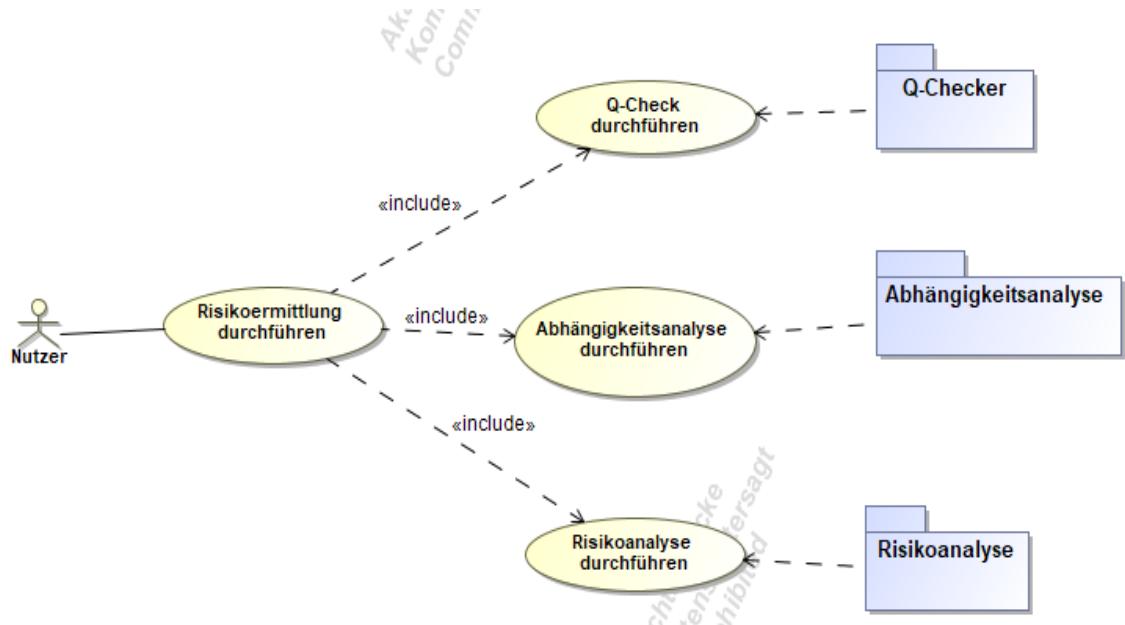


Abbildung A 8-27: Anwendungsfalldiagramm „Risikoermitzung durchführen“

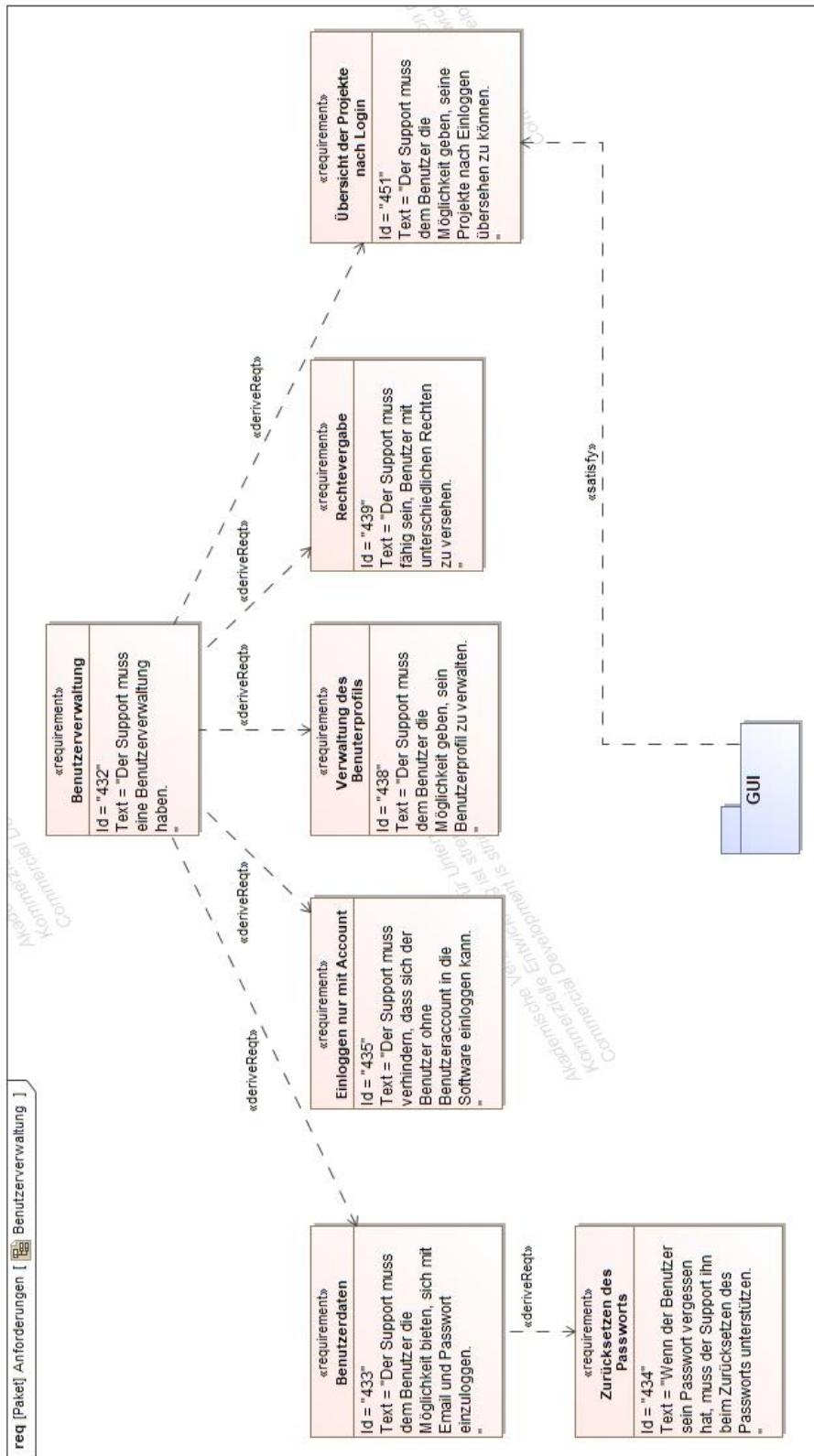


Abbildung A 8-28: Anforderungsdiagramm der Benutzerverwaltung

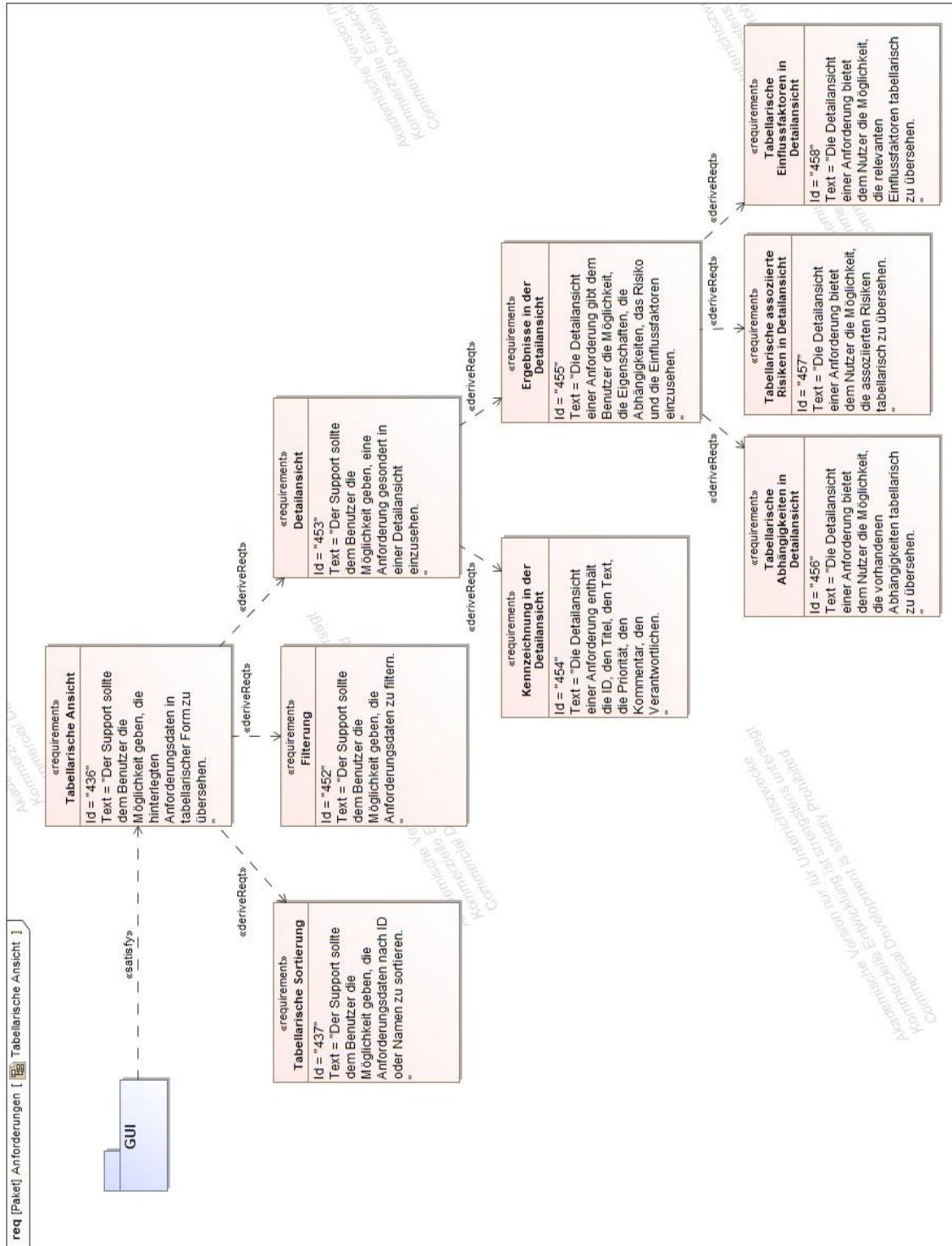


Abbildung A 8-29: Anforderungsdiagramm der tabellarischen Ansicht

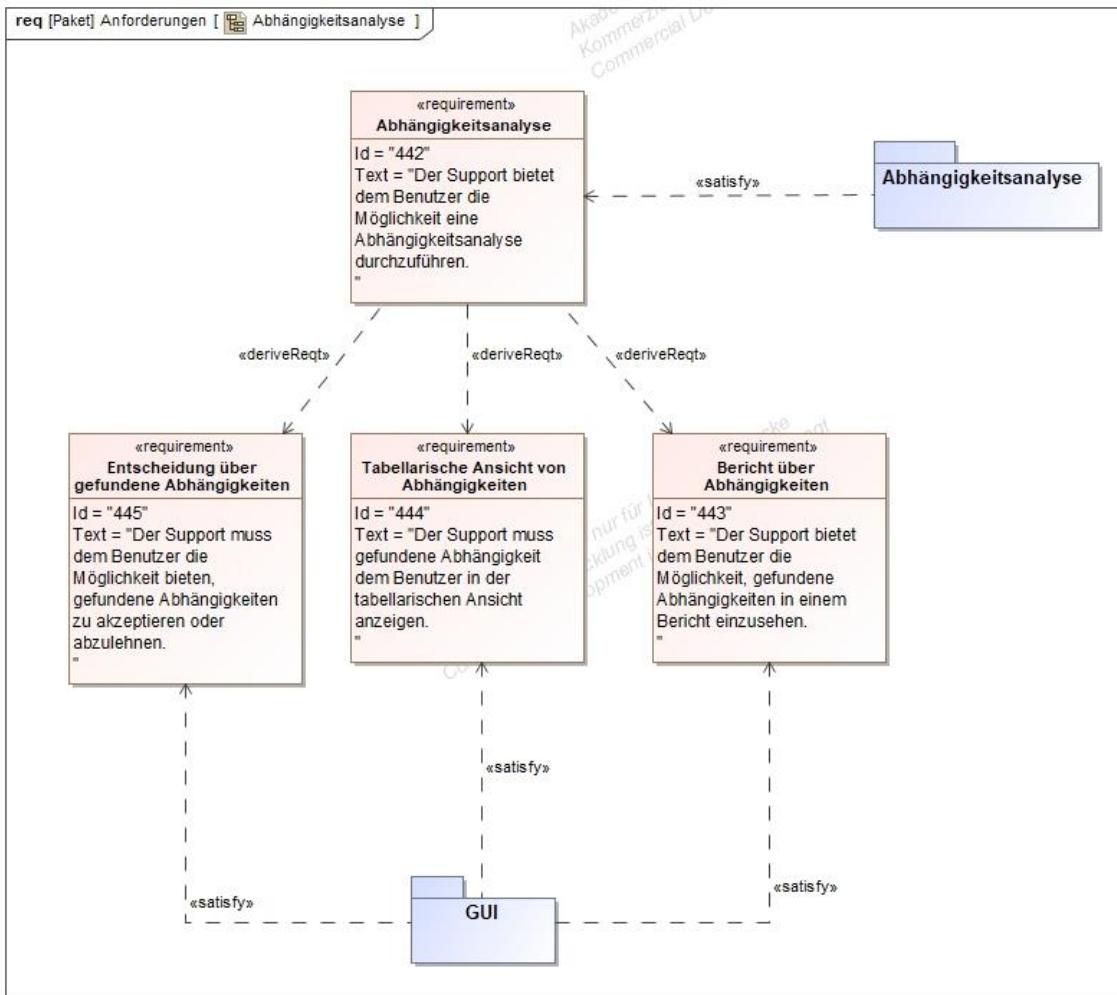


Abbildung A 8-30: Anforderungsdiagramm der Abhängigkeitsanalyse

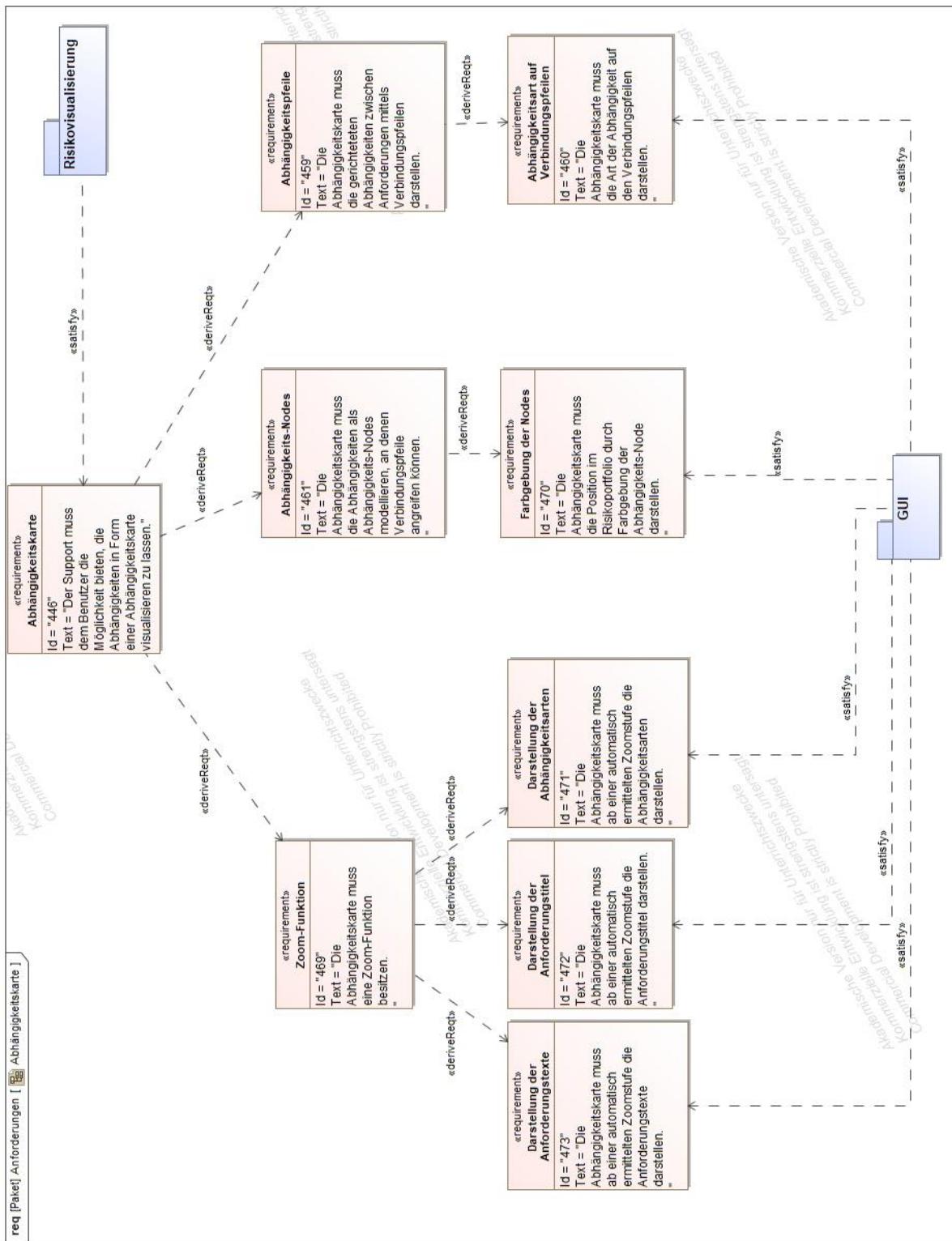


Abbildung A 8-31: Anforderungsdiagramm der Abhängigkeitskarte

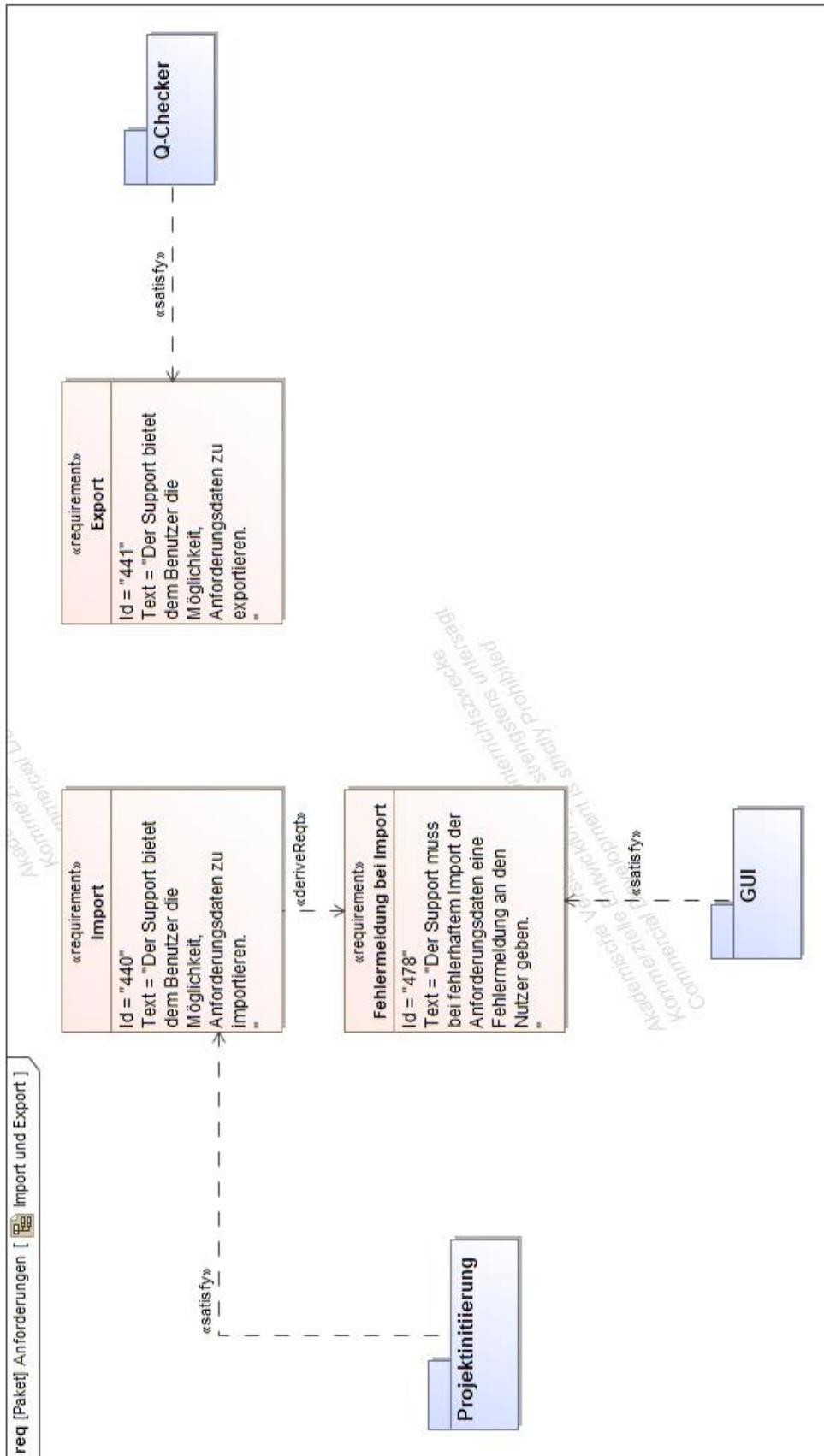


Abbildung A 8-32: Anforderungsdiagramm des Imports und Exports

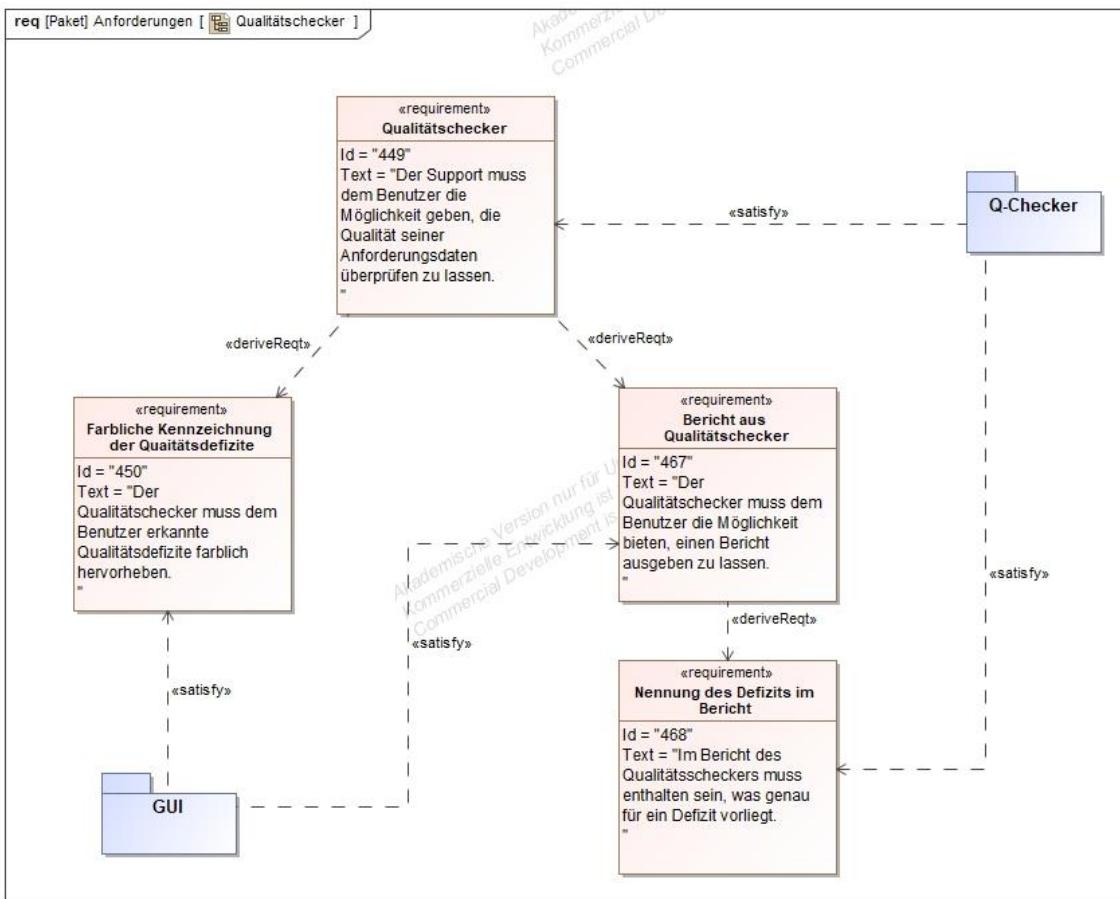


Abbildung A 8-33: Anforderungsdiagramm des Qualitätscheckers

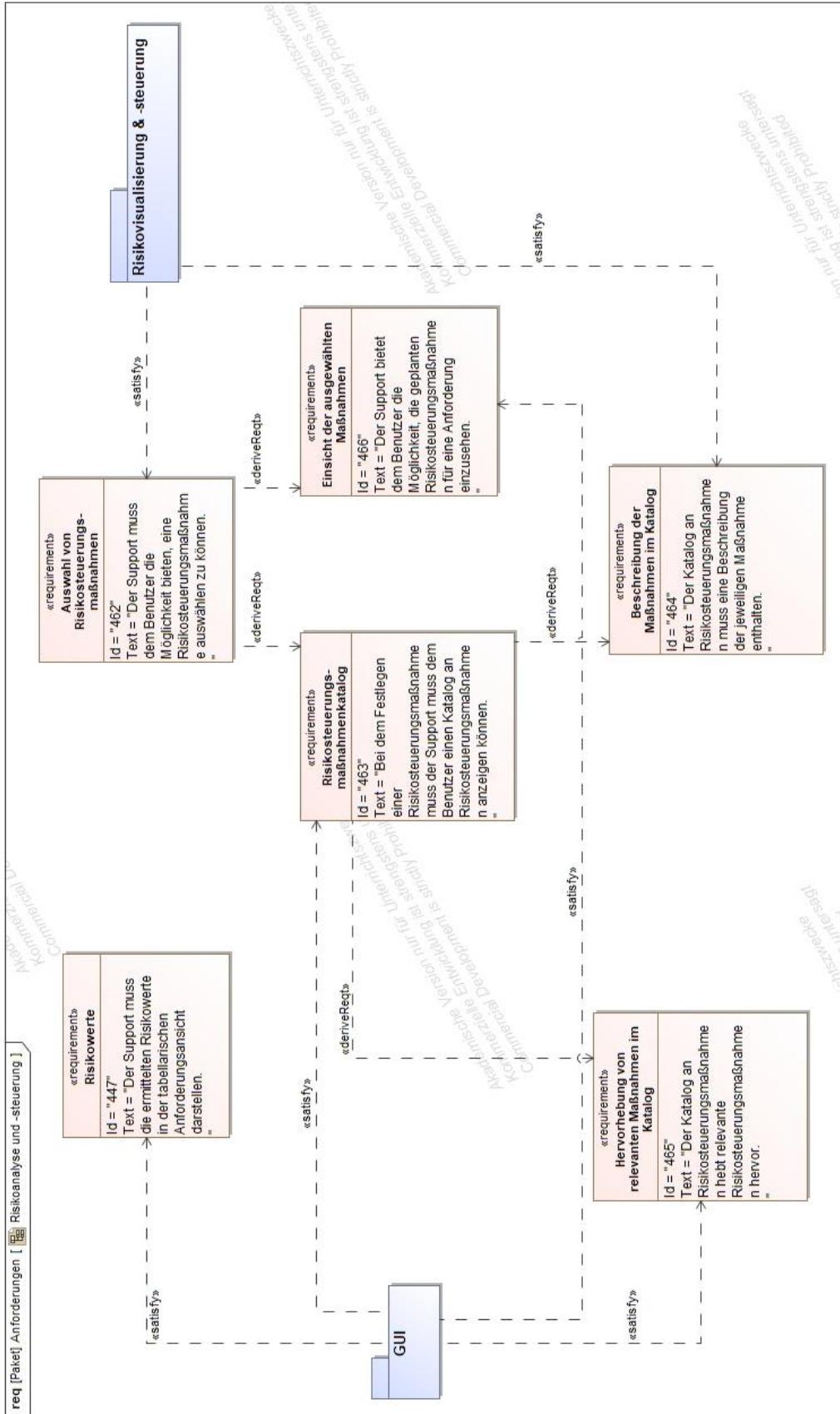


Abbildung A 8-34: Anforderungsdiagramm der Risikoanalyse und Risikosteuerung

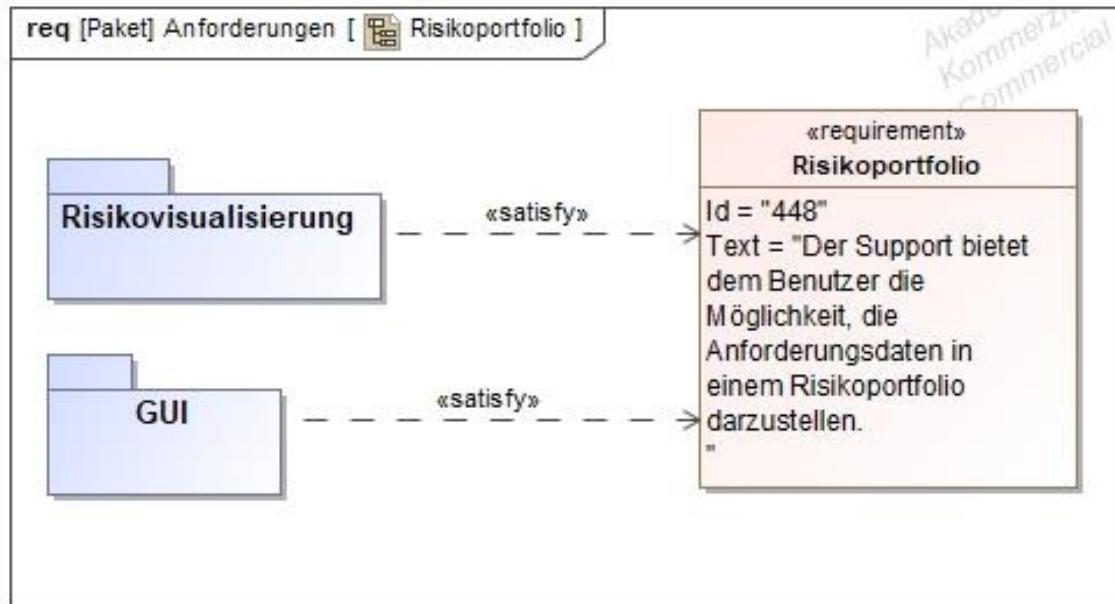


Abbildung A 8-35: Anforderungsdiagramm des Risikoportfolios

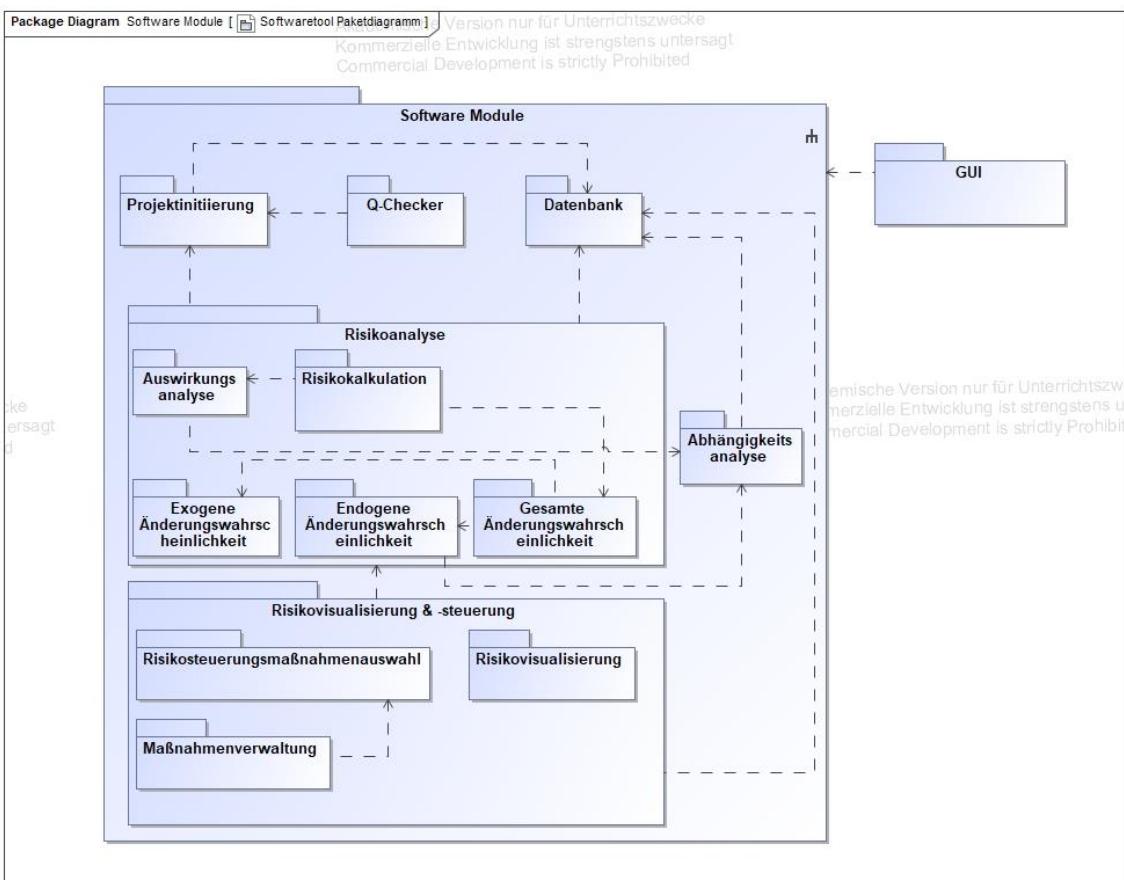


Abbildung A 8-36: Paketdiagramm des ARCA Softwaretools

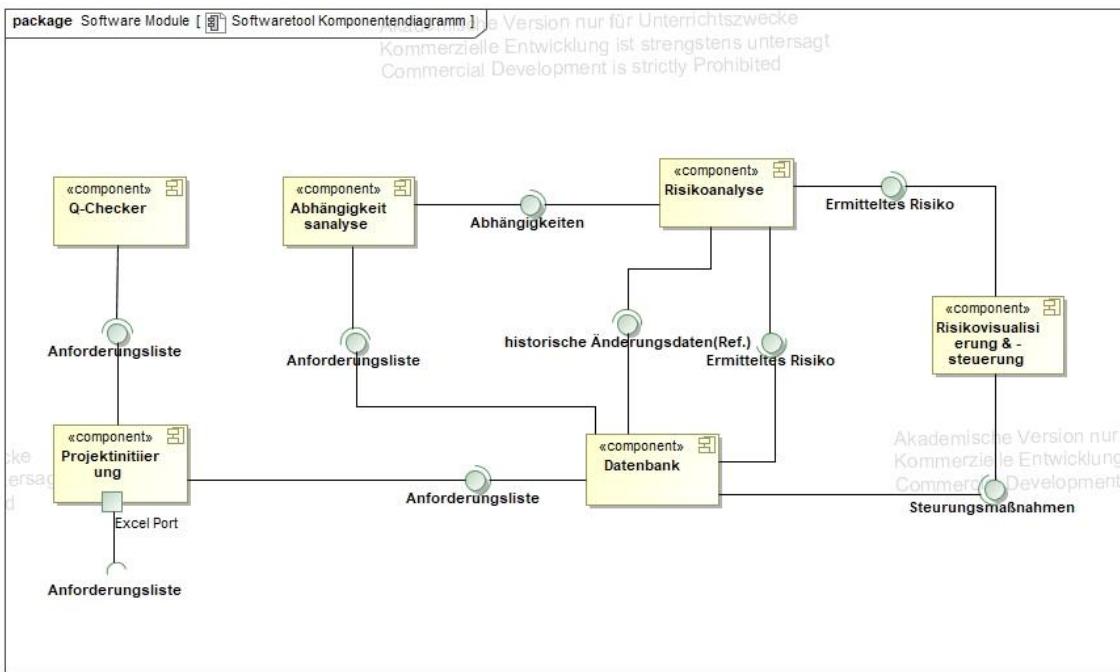


Abbildung A 8-37: Komponentendiagramm des Softwaretools

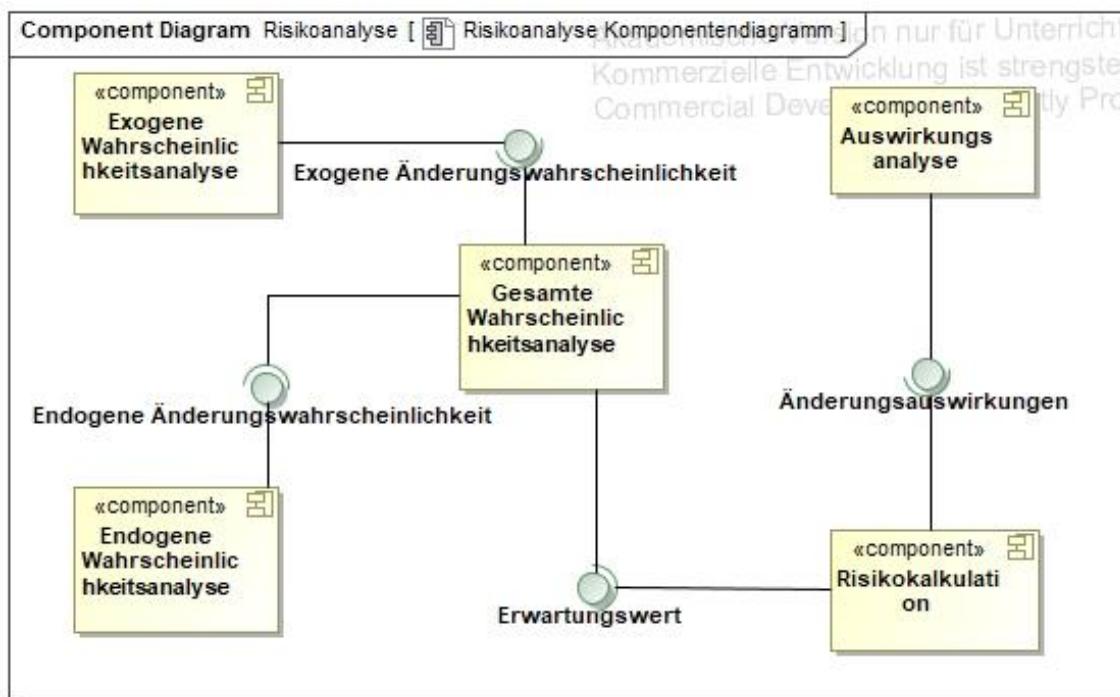


Abbildung A 8-38: Komponentendiagramm der Risikoanalyse

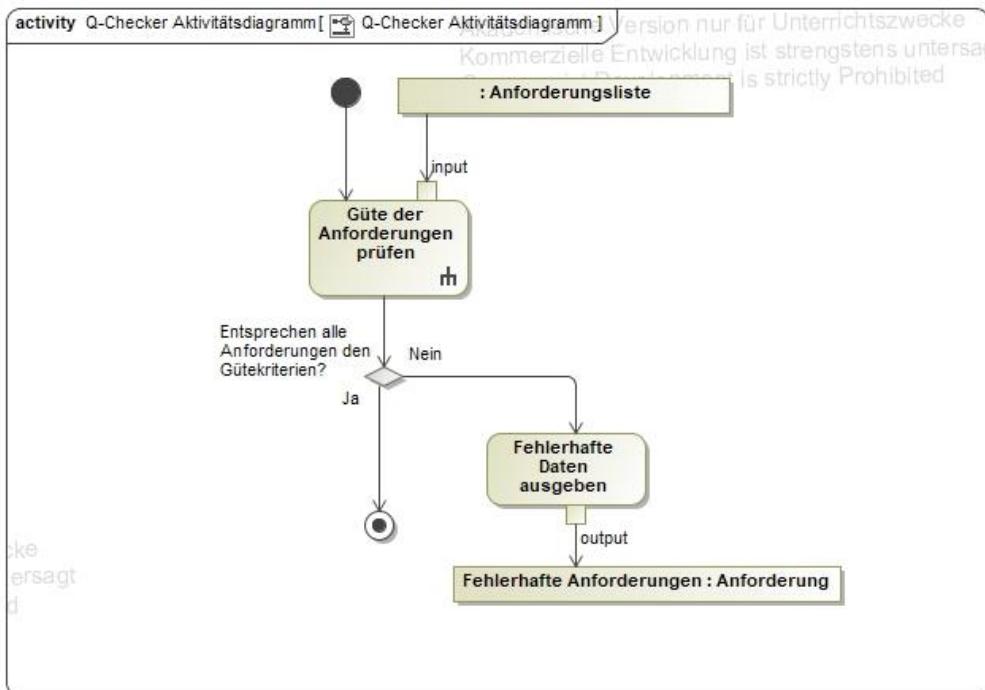


Abbildung A 8-39: Aktivitätsdiagramm des Q-Checkers

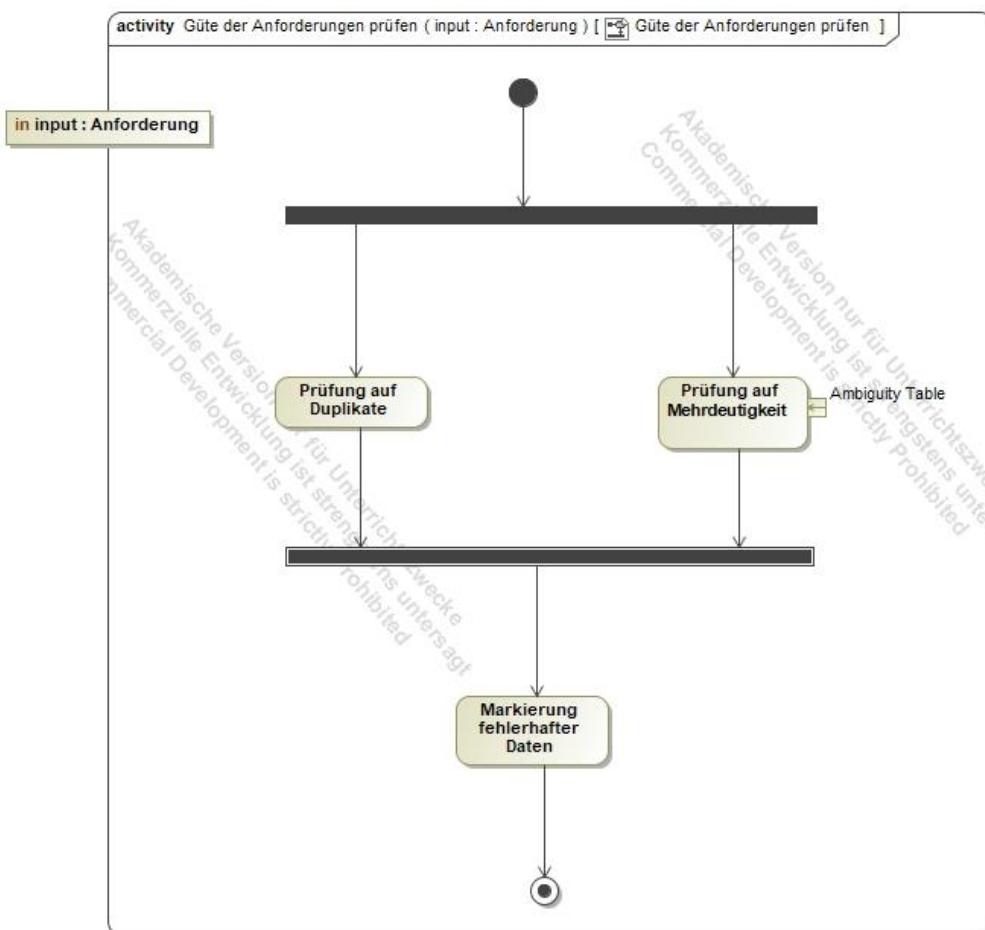


Abbildung A 8-40: Aktivitätsdiagramm der Aktion „Güte der Anforderungen prüfen“

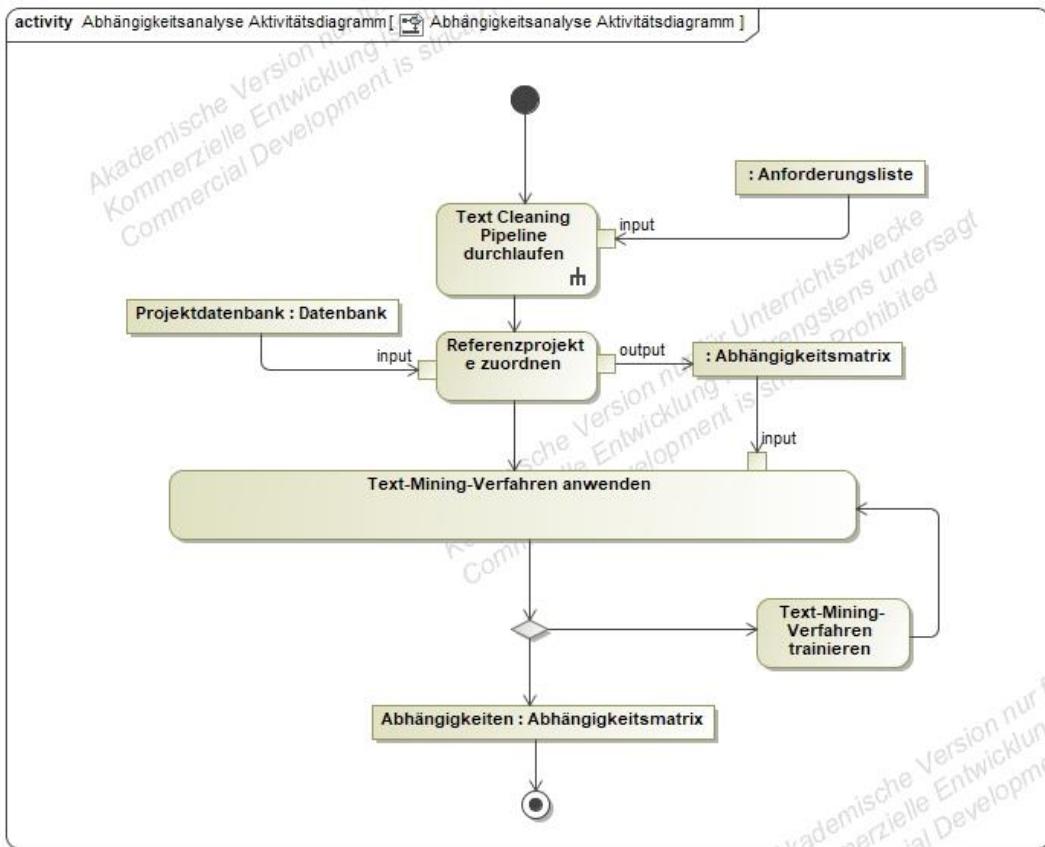


Abbildung A 8-41: Aktivitätsdiagramm der Abhängigkeitsanalyse

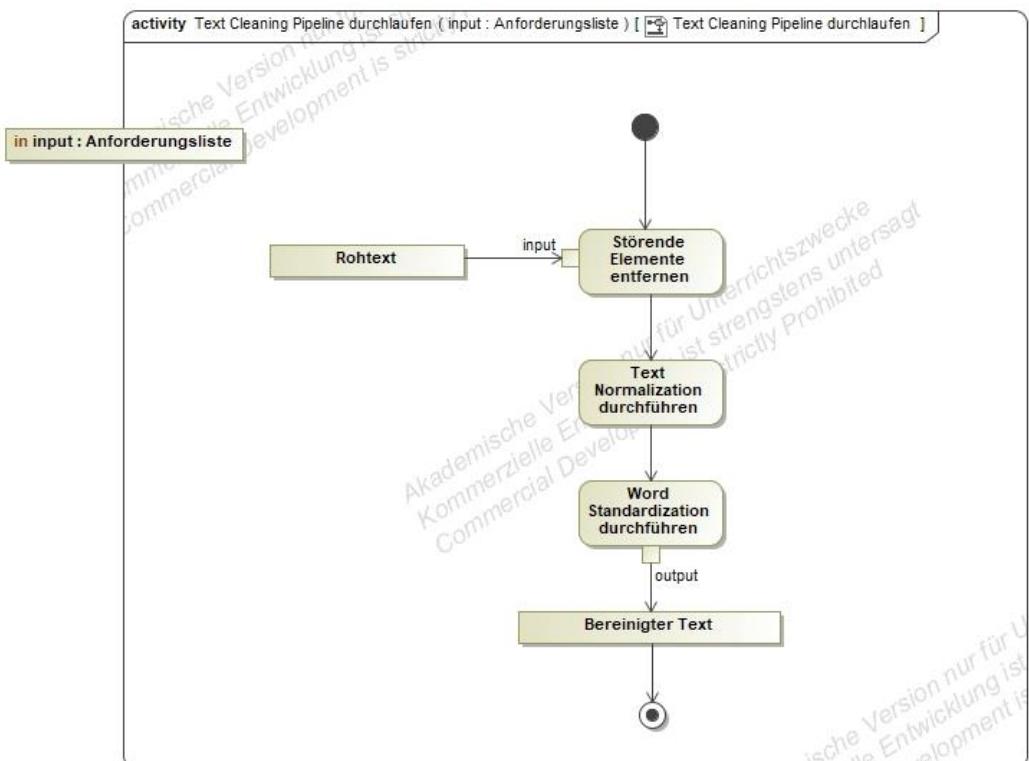


Abbildung A 8-42: Aktivitätsdiagramm der Text-Cleaning-Pipeline

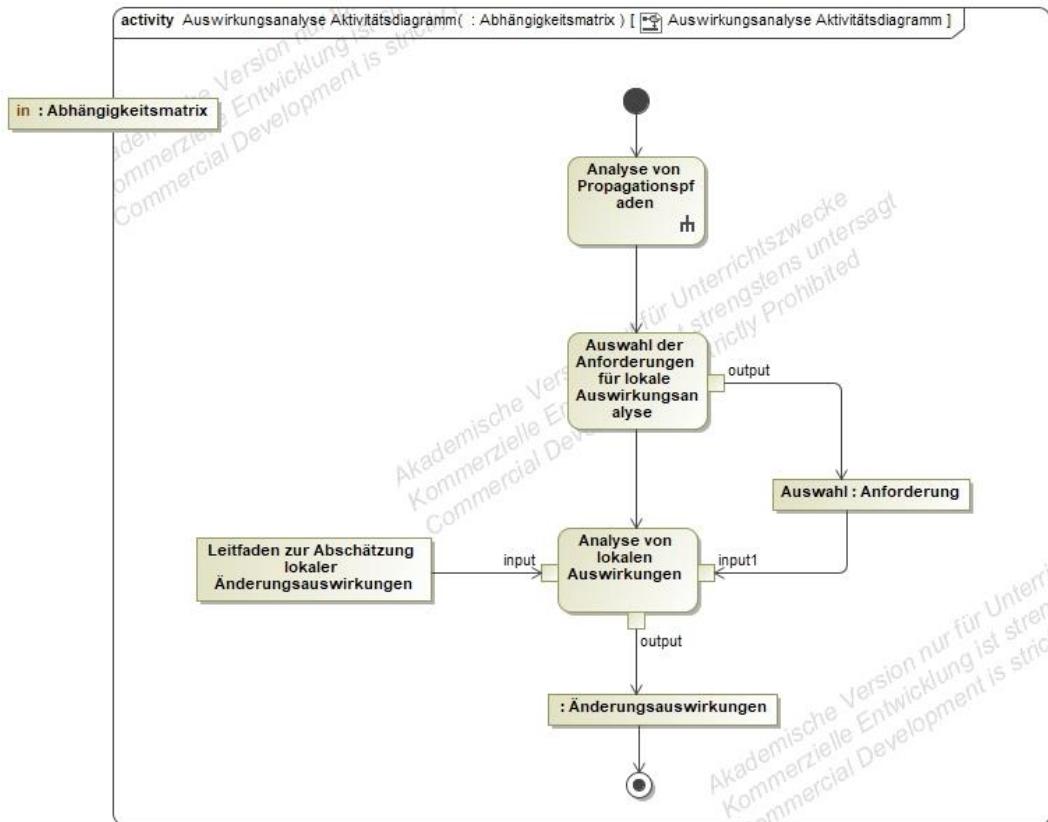


Abbildung A 8-43: Aktivitätsdiagramm der Auswirkungsanalyse

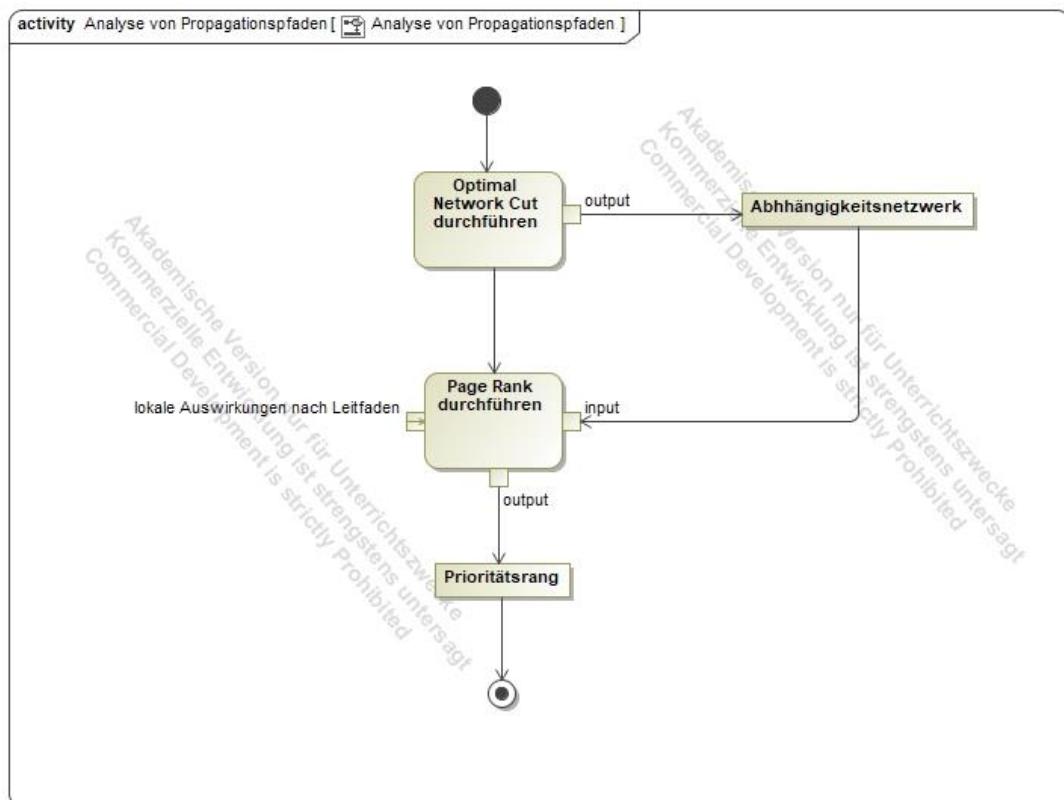


Abbildung A 8-44: Aktivitätsdiagramm zur Analyse von Propagationspfaden

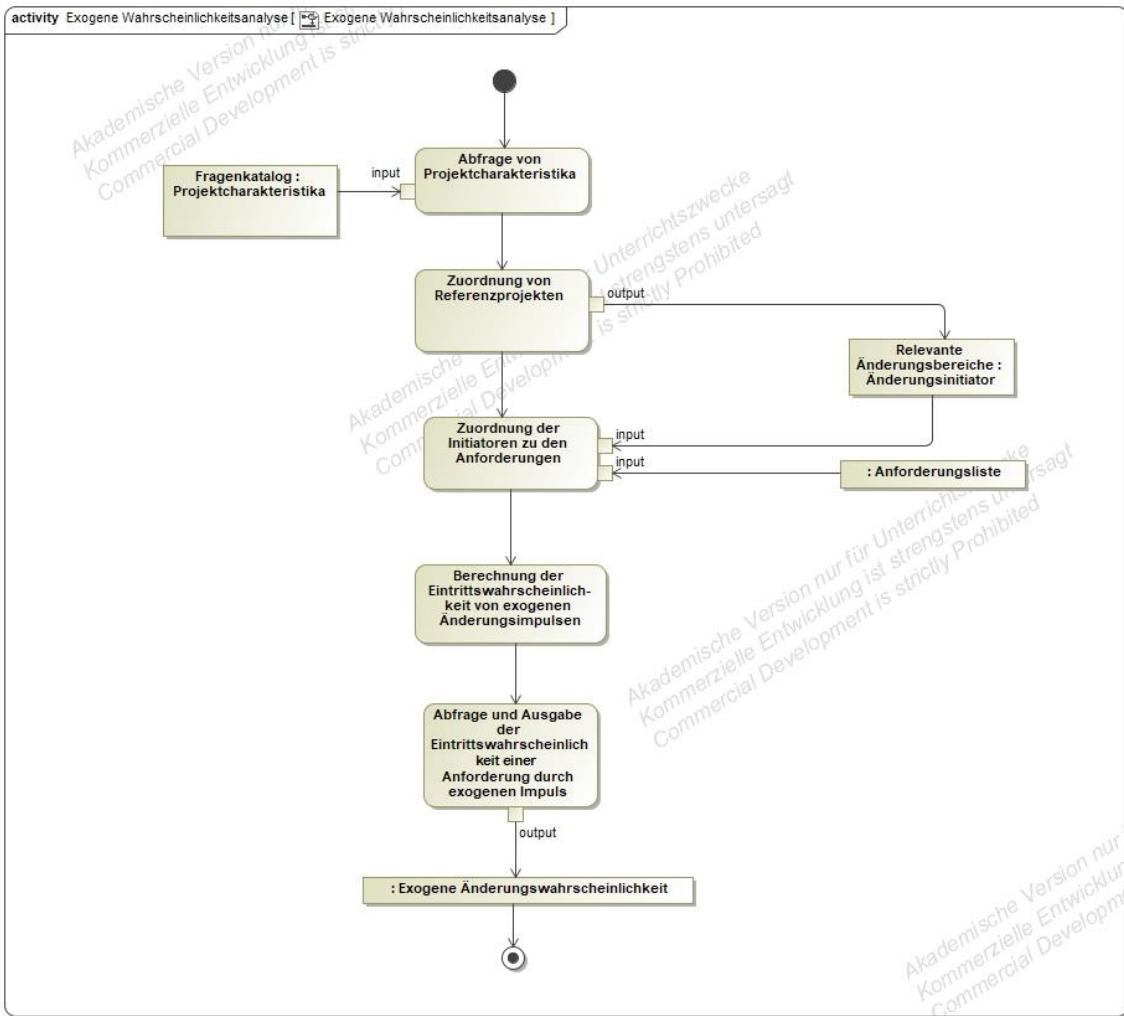


Abbildung A 8-45: Aktivitätsdiagramm zur Analyse der exogenen Änderungswahrscheinlichkeit

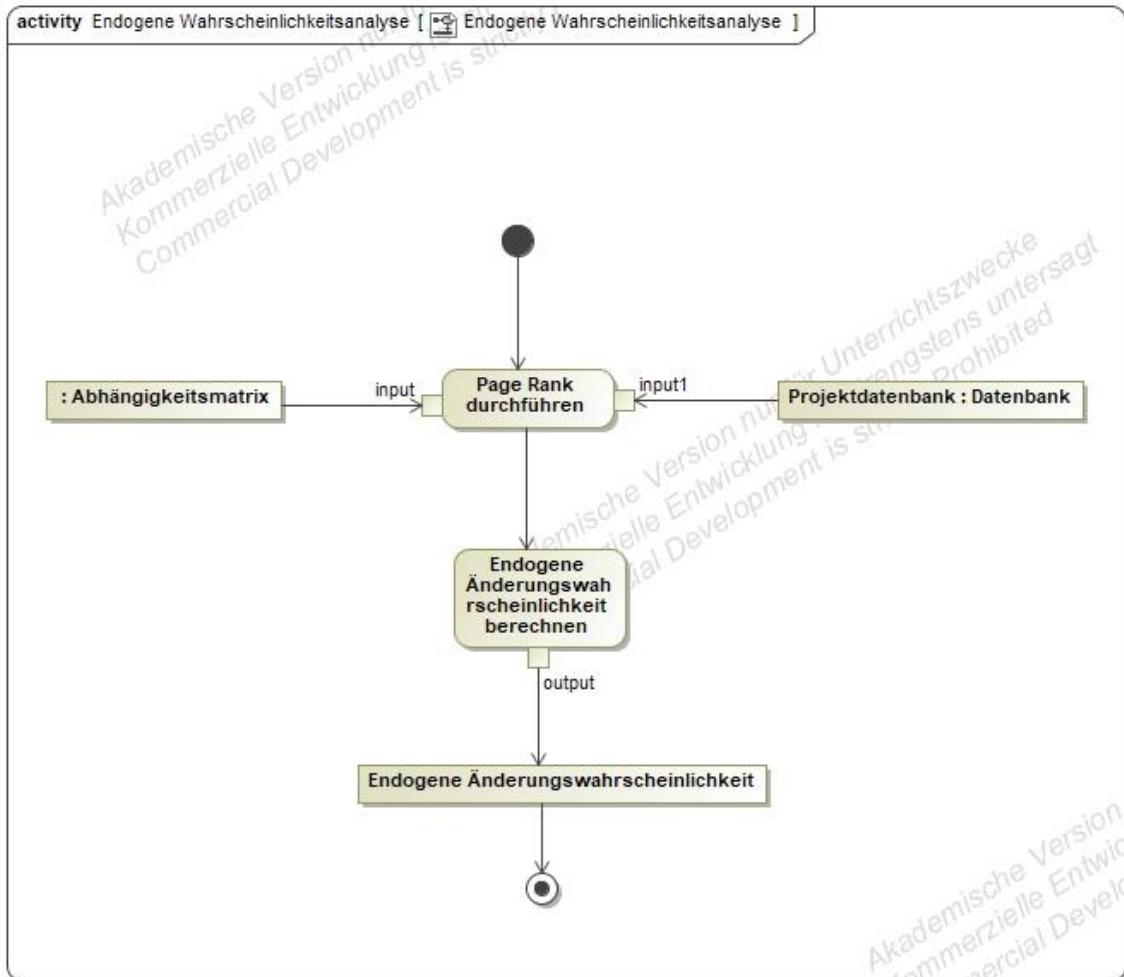


Abbildung A 8-46: Aktivit\u00e4tsdiagramm zur Analyse der endogenen \u00c4nderungswahrscheinlichkeit

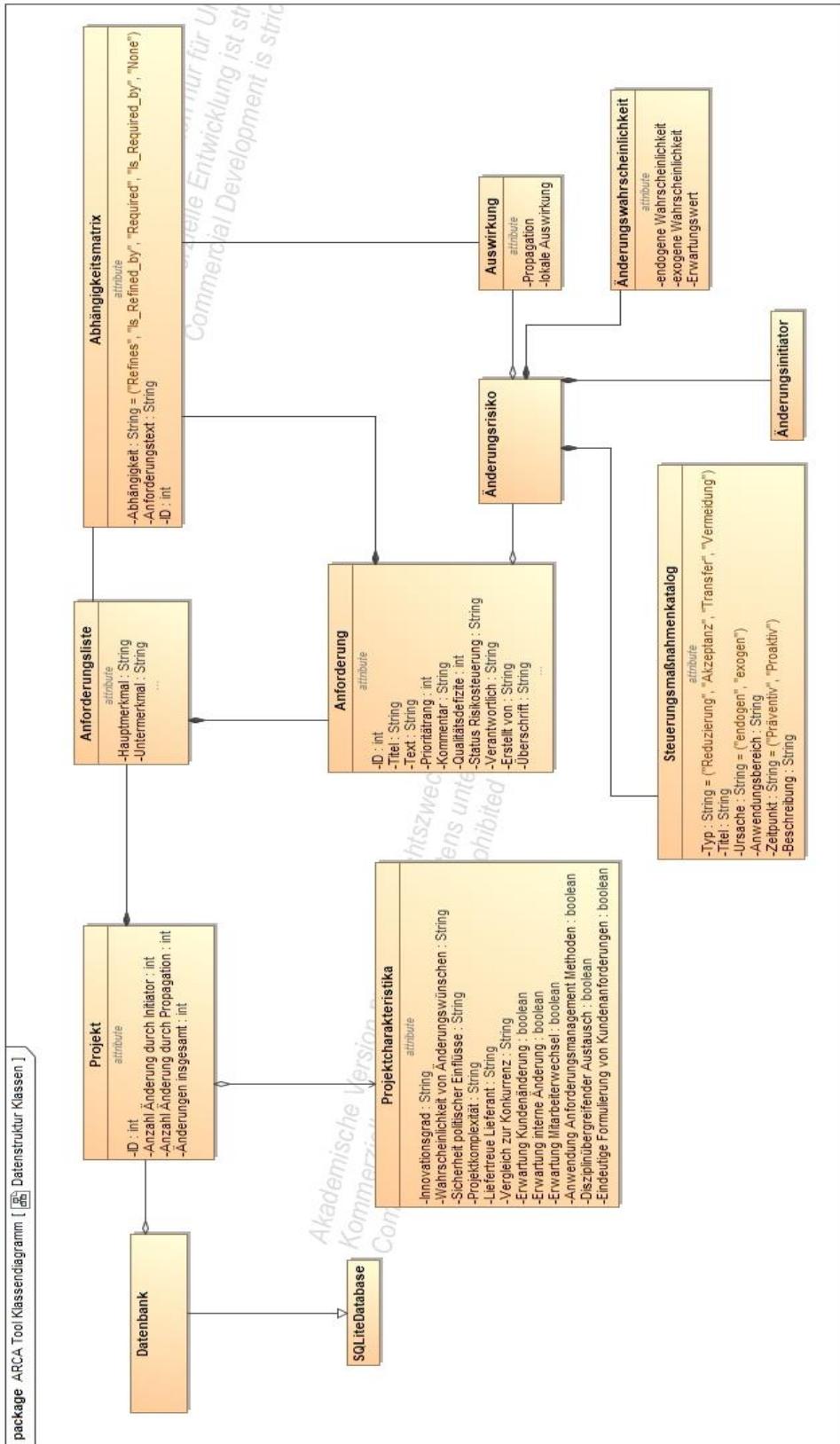


Abbildung A 8-47: Klassendiagramm zur Datenstruktur

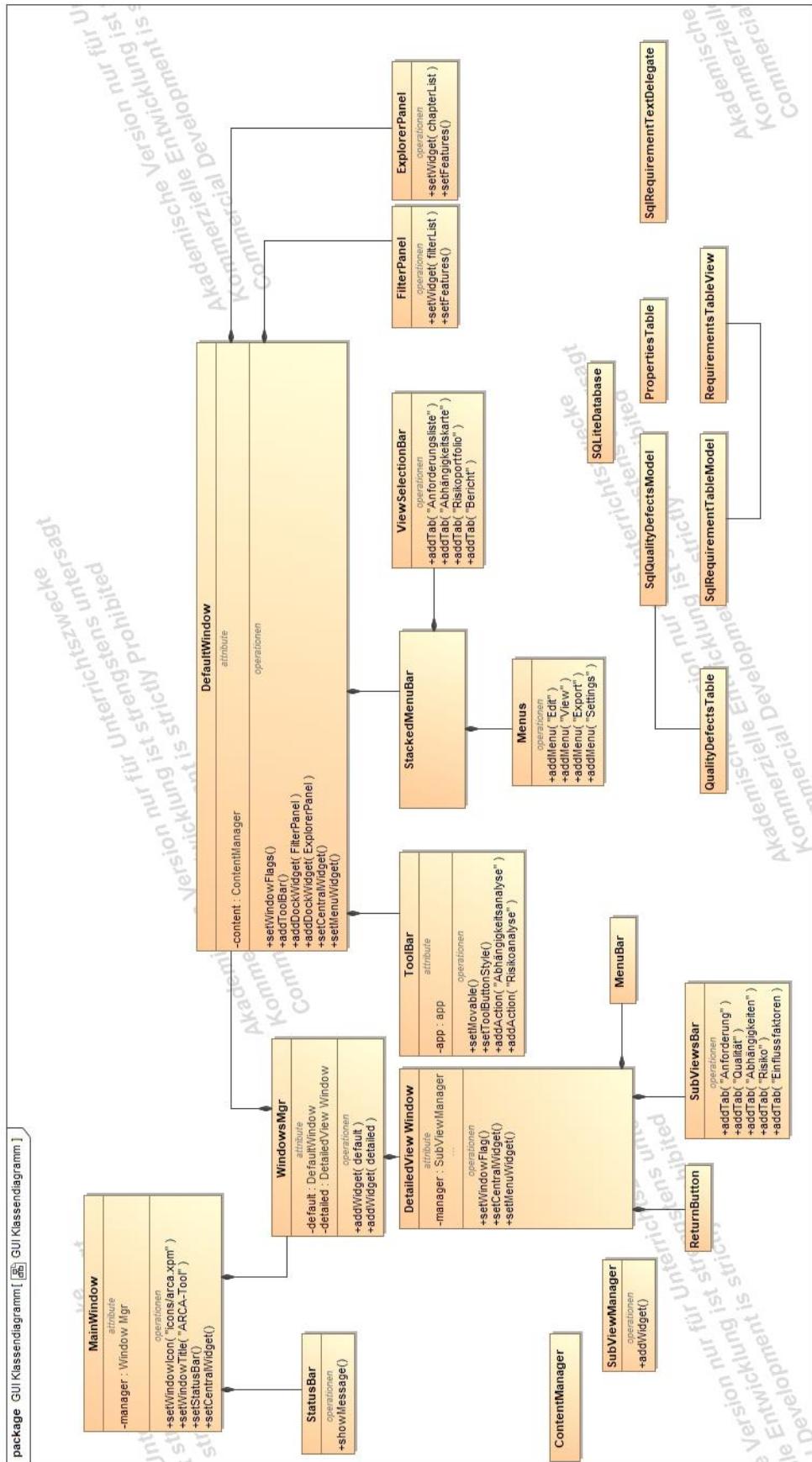


Abbildung A 8-48: Klassendiagramm der GUI

### A7.3 Benutzerhandbuch

# Automated Requirement Change Analysis for Complex Technical Systems (ARCA)

## Anleitung des Software-Werkzeugs

**Projektleitung**  
Christian Oleff

**Projekt-Team**  
Daniel Preuß  
Michael Hieb  
Tom Teasdale

Paderborn, 31.08.2021

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Vorwort.....	3
1.1 ARCA Projektmotivation und Ergebnisüberblick.....	3
2 Primär-Workflow: Handhabung des Änderungsrisikos von Anforderungen....	5
2.1 Projekt erstellen und verwalten.....	6
2.2 Anforderungsliste importieren.....	9
2.3 Q-Checker durchführen .....	11
2.3.1 Workflow im Software-Werkzeug.....	11
2.3.2 Qualitätsdefizite .....	13
2.4 Abhängigkeitsanalyse durchführen.....	14
2.4.1 Workflow im Software-Werkzeug.....	14
2.4.2 Abhängigkeitskarte .....	16
2.4.3 Arten von Anforderungsabhängigkeiten .....	17
2.4.4 Detektion der Abhängigkeiten mit BERT .....	17
2.5 Wahrscheinlichkeitsberechnung durchführen.....	18
2.5.1 Workflow im Software-Werkzeug.....	18
2.5.2 Referenzprojekte importieren und verwalten .....	20
2.5.3 Berechnung der Wahrscheinlichkeits-Kennzahlen .....	23
2.6 Auswirkungsanalyse durchführen.....	26
2.6.1 Workflow im Software-Werkzeug.....	26
2.6.2 Berechnung des Active Ranks.....	28
2.7 Risikosteuerungsmaßnahmen auswählen.....	29
2.7.1 Workflow im Software-Werkzeug.....	29
2.7.2 Auswahl von Risikosteuerungsmaßnahmen.....	30
2.8 Bericht exportieren .....	33
2.9 Lerneffekte.....	34
3 Fallspezifische Workflows .....	37
4 Installation.....	39
5 Informationsbeschaffung .....	40
5.1 Anforderungsliste des Entwicklungsprojekts .....	40
5.2 Abhängigkeitsmodell .....	41
5.3 Änderungshistorie von Referenzprojekten.....	41

6 Fehlersuche .....	44
7 Glossar.....	45

## 1 Vorwort

In dieser Bedienungsanleitung wird die operative Anwendung des ARCA Software-Werkzeugs erläutert. Weitere Unterlagen, die Sie bei Bedarf sichten können sind:

- Ergänzendes Einführungsvideo zur exemplarischen Anwendung des Software-Werkzeugs
- Einmalig je Abteilung und Projekt: „Referenzprozess zur Einführung und Anwendung der ARCA-Methodik“

### 1.1 ARCA Projektmotivation und Ergebnisüberblick

Die Entwicklung komplexer technischer Systeme ist geprägt von Unsicherheiten. Diese Unsicherheiten sind unvermeidbar und können sowohl aus internen Ursachen, wie einem unvollständigem Systemverständnis des Entwicklungsteams, als auch aus externen Ursachen wie volatilen Kundenbedürfnissen oder Regularien resultieren [Neu17, PG20]. Beides kann Änderungen des Anforderungssets erforderlich machen.

Jede dieser Änderungen kann zu Korrekturkosten und zusätzlichem Zeitbedarf führen, insbesondere, wenn durch die Anforderungsänderung eine Anpassung im Lösungsraum (Engineering Change) erforderlich ist. Zudem können sich die Auswirkungen einer Änderung durch Fortpflanzungseffekte vervielfachen (Änderungspropagation). Anforderungen sind, ähnlich wie Lösungselemente, eng miteinander verknüpft. Die Änderung einer Anforderung führt daher häufig zu einer Reihe nachfolgender Anforderungsänderungen [GWB+09, KCC12], deren Umsetzung wiederum Kosten- und Zeitaufwände verursacht.

Die effiziente Handhabung solcher Anforderungsänderungen ist eine zentrale Herausforderung in der Entwicklung komplexer Systeme [Kur18, HVM18, FHS+15, Sch16]. Nichtsdestotrotz werden Anforderungsänderungen in der industriellen Praxis bisher nicht auf der Grundlage objektiver Daten, sondern reaktiv, unsystematisch und auf Basis von subjektiven Einschätzungen gehandhabt [SHB19, JLR18, GO19, GOS18]. In der Konsequenz zeigen Studien seit vielen Jahren, dass die ineffiziente Handhabung von Anforderungsänderungen zu den bedeutendsten Ursachen dafür zählt, dass Projekte die vorgegebenen Projektziele (Qualität, Kosten und Zeit) verfehlten [The95, The11, The17, DKL06, ED07, Wic17, HVM18].

Trotz dieser Erkenntnisse existiert wenig Forschung zum effizienten Umgang mit Anforderungsänderungen [JLR18, HVM18, HCC13]. Insbesondere im Kontext des Risikomanagements von Anforderungsänderungen sind nur vereinzelt Vorgehensmodelle oder Software-Werkzeuge verfügbar und ermöglichen weder eine systematische Bewertung des Änderungsrisikos noch die darauf aufbauende Risikohandhabung für komplexe technische Systeme [GO19, HVM18, Neu17]. Kommerzielle Softwareprodukte zum Requirements Engineering adressieren dieses Themenfeld nicht.

Systematisches Risikomanagement ermöglicht jedoch, den Handlungsspielraum im Umgang mit Anforderungsänderungen zu vergrößern [Lin98] (z.B. durch Änderungsprävention oder die Reduzierung von Änderungsauswirkungen) und birgt dadurch bisher unge nutzte Effizienzpotenziale. Deren Erschließung kann helfen, die negativen Auswirkungen von Anforderungsänderungen bei der Entwicklung komplexer technischer Systeme zu reduzieren.

Die Zielsetzung des ARCA-Projekts ist daher:

***Entwicklung einer Methodik zur systematischen Bewertung und Handhabung des Änderungsrisikos von technischen Anforderungen.***

Die Methodik setzt sich aus **drei Grundelementen** zusammen: dem Referenzprozess zur Einführung und Anwendung der Methodik, den Methoden zur systematischen Bewertung und Handhabung des Änderungsrisikos sowie dem Software-Werkzeug als Hilfsmittel zur industriellen Anwendung (vgl. Abbildung 1).

Der **Referenzprozess** bietet anhand von Modellen eine Leitstruktur zur Einführung und Anwendung der Methodik. Aus der Methodik-Anwendung in Entwicklungsprojekten resultieren Informationsbedarfe zur Umsetzung des Risikomanagements von Anforderungsänderungen ebenso wie die erforderlichen Eingangsdaten (z.B. Anforderungsbeschreibungen). Die **Methoden zur systematischen Bewertung und Handhabung des Änderungsrisikos** von technischen Anforderungen bilden den Kern der Methodik. Die Methoden ermöglichen die Generierung und Bereitstellung der erforderlichen Informationen. Definiert werden drei aufeinander aufbauende Methoden zur kontextspezifischen Identifikation von Unsicherheiten, ganzheitlichen Risikoanalyse sowie effektiven Risikosteuerung. Die Schnittstelle zwischen den situativen Informationsbedarfen aus dem Referenzprozess und der Methodenanwendung bildet das **Software-Werkzeug**. Es ist das Hilfsmittel zur Aufbereitung von Eingangsdaten (z.B. Anforderungsbeschreibungen oder Nutzereingaben) und teilautomatisierten Anwendung der Methoden.



Abbildung 1: Zusammenspiel der drei Grundelemente der Methodik zur systematischen Bewertung und Handhabung des Änderungsrisikos von Anforderungen

Primär-Workflow: Handhabung des Änderungsrisikos von Anforderungen

Seite 5

## 2 Primär-Workflow: Handhabung des Änderungsrisikos von Anforderungen

Die Handhabung des Änderungsrisikos von Anforderungen ist in Abbildung 2 visualisiert. Es sind die Schritte sowie die benötigten (Anforderungsliste, Abhängigkeitsmodell und Änderungshistorie) und ausgegebenen Dateien (Risikobericht) dargestellt.

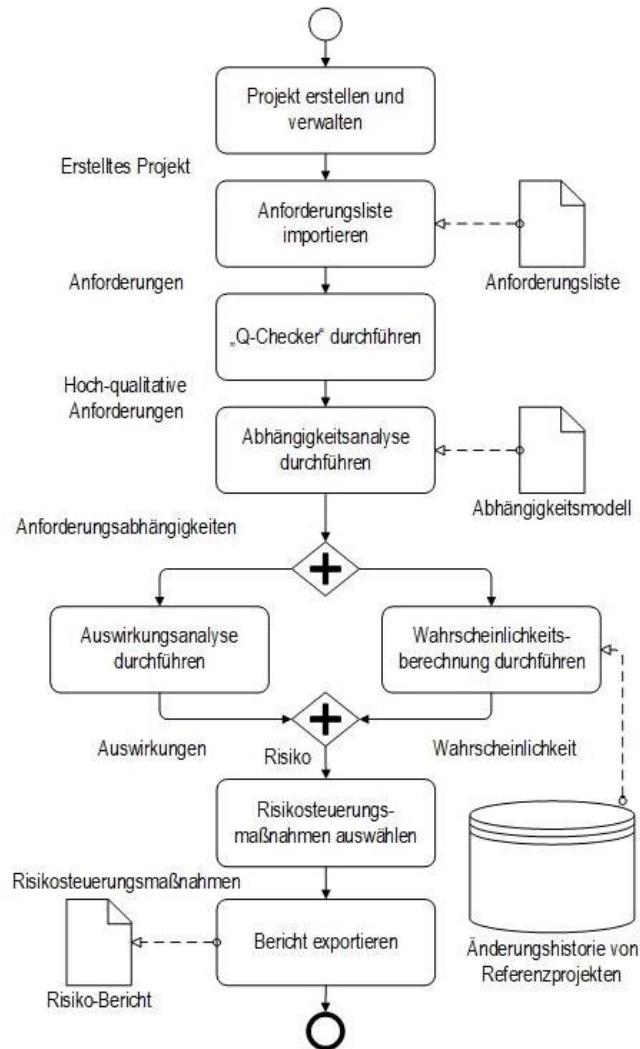


Abbildung 2: Workflow zur Handhabung des Änderungsrisikos von Anforderungen

Zunächst muss das Projekt erstellt werden (Abschnitt 2.1). Ein Projekt wird als Container für eine Anforderungsliste verwendet und reichert diese um Metadaten und Kontext-Charakteristika an. Für das jeweilige Projekt muss die Anforderungsliste importiert werden (Abschnitt 2.2). Zur Prüfung der Qualität der Anforderungen kann ein Qualitäts-Check („Q-Checker“) durchgeführt werden (Abschnitt 2.3). Für eine hohe Ergebnisgüte in der Berechnung des Änderungsrisikos ist es notwendig, dass die Anforderungen frei von Qualitätsdefiziten sind. Erkannte Defizite sollten im Autorensystem (z.B. IBM Doors) behoben und eine korrigierte Anforderungsliste neu ins Projekt importiert werden. Zur Berechnung des Risikos von Anforderungsänderungen müssen Anforderungsabhängigkeiten bekannt sein (Abschnitt 2.4). Dafür wird ein wiederverwendbares und für den Kontext vortrainiertes Abhängigkeitsmodell zugrunde gelegt. Das Änderungsrisiko von Anforderungen setzt sich aus den Dimensionen Wahrscheinlichkeit und Auswirkungen einer Anforderungsänderung zusammen. Für die Berechnung der Wahrscheinlichkeit einer Anforderungsänderung (Abschnitt 2.5) wird die Änderungshistorie von Referenzprojekten sowie die Abhängigkeiten zwischen Anforderungen ausgewertet. Die Analyse der Auswirkungen einer Anforderungsänderung (Abschnitt 2.6) erfolgt anhand der Abhängigkeiten und eines Experten-Leitfadens. Nach diesen Zwischenschritten kann das Änderungsrisiko von Anforderungen ermittelt und visualisiert werden. Zudem können anhand der Analyseergebnisse spezifische Risikosteuerungsmaßnahmen vorgeschlagen und von Experten ausgewählt werden (Abschnitt 2.7). Die Ergebnisse der Risikoberechnung und der Auswahl von Risikosteuerungsmaßnahmen werden in einem Risikobericht dokumentiert und aus dem Software-Werkzeug exportiert (siehe Abschnitt 2.8).

## 2.1 Projekt erstellen und verwalten

Nach dem Starten des Software-Werkzeugs öffnet sich eine Maske, in welcher dem Benutzer zuletzt geöffnete Projekte angezeigt werden (siehe Abbildung 3). Außerdem kann ein neues Projekt erstellt werden (**B<sub>1</sub>**), ein Projekt auf dem Laufwerk geöffnet werden (**B<sub>2</sub>**) und ein zuletzt geöffnetes Projekt geöffnet werden (**B<sub>3</sub>**).

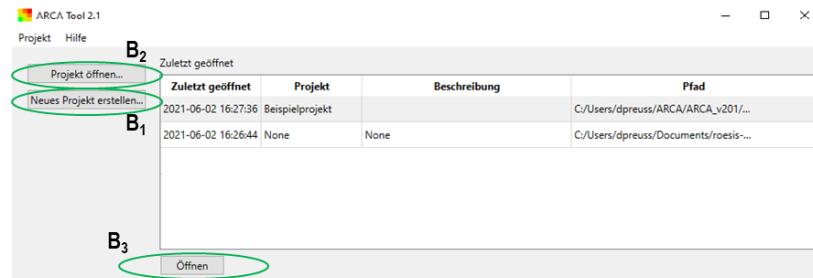
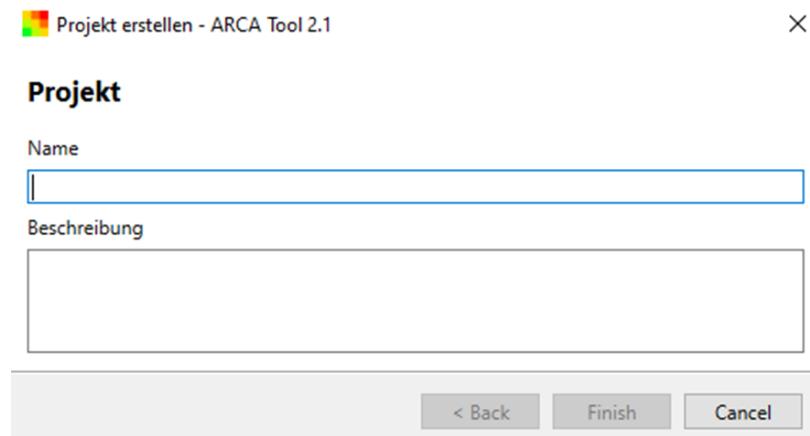


Abbildung 3: Zuletzt geöffnete Projekte

**Neues Projekt erstellen (B<sub>1</sub>)**

Es wird ein neues Projekt erstellt (siehe Abbildung 4). Für jedes Entwicklungsprojekt muss ein neues Projekt erstellt werden. Im Feld „Name“ wird der Name des Entwicklungsprojekts eingetragen. Im Feld „Beschreibung“ kann eine Beschreibung des Entwicklungsprojekts eingetragen werden. Es sollen zusätzliche Informationen eingetragen werden, die dem Benutzer bei der Navigation durch die Projekte sowie für die Auswahl von Referenzprojekten (siehe Abschnitt 2.5) unterstützen.



Projekt erstellen - ARCA Tool 2.1

**Projekt**

Name

Beschreibung

< Back    Finish    Cancel

Abbildung 4: Projekt erstellen

**Projekt öffnen (B<sub>2</sub>)**

Es kann ein Projekt, welches mit diesem Software-Werkzeug erstellt wurde, geöffnet werden.

**Öffnen (B<sub>3</sub>)**

Es kann ein Projekt, welches ausgewählt wurde, geöffnet werden.

**Projektcharakteristika bearbeiten**

Nachdem das Projekt erstellt worden ist, öffnet sich eine Maske zur Bewertung der Charakteristika des betrachteten Entwicklungsprojekts (siehe Abbildung 5). Auf Basis der Projekt-Charakteristika können Referenzprojekte identifiziert werden, die für die Durchführung der Wahrscheinlichkeitsberechnung benötigt werden. Die Bewertung der Projekt-Charakteristika ist manuell durch einen Experten vorzunehmen. Die oberen sechs Charakteristika können durch die Auswahl einer Ausprägung – „niedrig“, „mittel“ und „hoch“ – in einem Drop-Down Menü festgelegt werden. Die unteren sechs Charakteristika können durch das Anklicken einer Check-Box bewertet werden. Markierte Checkboxen werden als „ja“, leere Checkboxen werden als „nein“ interpretiert.

Seite 8 Kapitel 2

Projektcharakteristika bearbeiten - ARCA Tool 2.1 X

**Charakteristika**

Wie hoch ist der Innovationsgrad des zu entwickelnden Systems?

Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit von Änderungswünschen durch den Kunden?

Wie hoch ist die Sicherheit politischer Verhältnisse, die Einfluss auf das Entwicklungsprojekt haben?

Wie hoch ist die Komplexität des Projekts?

Wie hoch ist die Liefertreue des Lieferanten?

Wie gut sind wir im Vergleich zu unserer Konkurrenz positioniert?

Sind strukturelle Änderungen beim Kunden zu erwarten?

Sind interne strukturelle Änderungen zu erwarten?

Werden Zu/Abgänge von Mitarbeitern im Projekt mit technischem 'Know-How' erwartet?

Werden wir strukturiert Anforderungsmanagement-Methoden im Projekt an?

Findet ein disziplinübergreifender Austausch statt?

Sind Kundenanforderungen eindeutig formuliert?

< Back Finish Cancel

*Abbildung 5: Projektcharakteristika bearbeiten*

**Projekt verwalten**

Im Software-Werkzeug kann über die Schaltfläche „Projekt“ in der oberen Reihe verschiedene Funktionen zur Verwaltung des Projekts aufgerufen werden (siehe Abbildung 6).

ARCA - ARCA Tool 2.1

Projekt Hilfe

Neues Projekt  
Projekt öffnen  
Projekt schließen  
Projekt speichern  
Projekt speichern unter...  
  
Metadaten bearbeiten...  
Charakteristika bearbeiten...  
Anforderungsänderungen dokumentieren...  
  
Anforderungsdaten löschen  
Anforderungsliste importieren  
Abhängigkeitsmodell auswählen...  
Bericht erstellen

Portfolio Bericht Qualitätsdefizite Projektdatenbank  
Wahrscheinlichkeitsanalyse Auswirkungsanalyse  
Anforderung löschen  
  
Priorität

*Abbildung 6: Projekt-Verwaltung*

- „Projekt“ → „Neues Projekt“: Erstellen eines neuen Projekts.
- „Projekt“ → „Projekt öffnen“: Öffnen eines Projekts.
- „Projekt“ → „Projekt schließen“: Aktuelles Projekt schließen.
- „Projekt“ → „Metadaten bearbeiten“: Bearbeitung der Metadaten (siehe Abbildung 4).
- „Projekt“ → „Charakteristika bearbeiten“: Bearbeitung der Projekt-Charakteristika (siehe Abbildung 5).
- „Projekt“ → „Anforderungsänderungen dokumentieren“: Dokumentieren der Anforderungsänderungen, die nach Abschluss des Projekts in dem betrachteten Entwicklungsprojekt aufgetreten sind (siehe Kapitel 5)
- „Projekt“ → „Anforderungsdaten löschen“: Löschen der Anforderungsdaten (siehe Abschnitt 2.2).
- „Projekt“ → „Anforderungsliste importieren“: Importieren der Anforderungsliste (siehe Abschnitt 2.2).
- „Projekt“ → „Abhängigkeitsmodell auswählen“: Auswahl des Abhängigkeitsmodell für die Durchführung der Abhängigkeitsanalyse (siehe Abschnitt 2.4).
- „Projekt“ → „Bericht erstellen“: Erstellen des Risiko-Berichts (siehe Abschnitt 2.8).

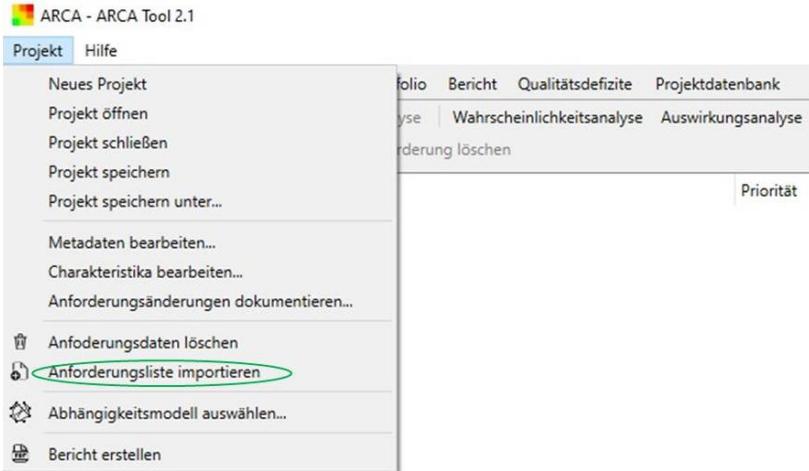
## 2.2 Anforderungsliste importieren

### Voraussetzungen:

- Projekt erstellt (siehe Abschnitt 2.1)

Nachdem das Projekt erstellt wurde, muss die Anforderungsliste des zugehörigen Entwicklungsprojekts importiert werden über „Projekt“ → „Anforderungsliste importieren“ (siehe Abbildung 7).

Seite 10
Kapitel 2



**Abbildung 7: Anforderungsliste importieren**

**Anforderungsliste importieren**

Die importierten Anforderungen werden in Abbildung 8 dargestellt. Die Informationen im Software-Werkzeug entsprechen den Informationen in der Excel-Anforderungsliste. Die „leeren“ Felder im Software-Werkzeug (z. B. Priorität, Endogene Änderungswahrscheinlichkeit etc.) werden durch die Ausführung der weiteren Schritte in der Risikoberechnung mit Informationen gefüllt.

ID	Anforderungstitel	Anforderungstext	Priorität	Kommentar	Endogene Änder.	Exogene Änderur.
ID103		Die Anbindung muss 3 mm dick sein.		Kommentar		
ID104		Die Welle muss einen Durchmesser von 10 mm haben.		Kommentar		
ID105		Die Welle sollte aus DIN EN-AW 7075 oder ähnlich sein.		Kommentar		
ID107		Das Teil sollte einschließlich Dokumentation entwickelt werden.		Kommentar		
ID108		Das Teil ist bis September 2021 zu entwickeln.		Kommentar		
ID109		Die Lagetoleranz liegt zwischen 0,1 und 0,2 Millimetern.		Kommentar		
ID110		Produkt soll gut sein.		Kommentar		
ID111		Produkt soll günstig sein.		Kommentar		
ID112		Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten einen Transistor ...		Kommentar		
ID113		Der Knickarmroboter muss fähig sein 230 Volt Wechselstrom zu ...		Kommentar		
ID114		Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten Hardwarekomponent...		Kommentar		
ID115		Der Knickarmroboter muss fähig sein 230 Volt Wechselstrom zu ...		Kommentar		
ID116		Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten ein Arduino Mega mit...		Kommentar		
ID117		Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten Hardwarekomponent...		Kommentar		

**Abbildung 8: Importierte Anforderungen**

## 2.3 Q-Checker durchführen

### Voraussetzungen:

- Projekt erstellt (siehe Abschnitt 2.1)
- Anforderungsliste importiert (siehe Abschnitt 2.2)

#### 2.3.1 Workflow im Software-Werkzeug

Zur automatisierten Qualitätsprüfung der Anforderungen muss der Button „Q-Check“ (siehe Abbildung 9 oben) betätigt werden. Die Anzahl der identifizierten Qualitätsdefizite pro Anforderung werden in der markierten Spalte rechts (siehe Abbildung 9) dargestellt.

ID	Anforderungstitel	Anforderungstext	Priorität	Kommentar	Endogene Ä
ID103		Die Anbindung muss 3 mm dick sein.		Kommentar	0
ID104		Die Welle muss einen Durchmesser von 10 mm haben.		Kommentar	0
ID105		Die Welle sollte aus DIN EN-AW 7075 oder ähnlich sein.		Kommentar	2
ID107		Das Teil sollte einschließlich Dokumentation entwickelt werden.		Kommentar	3
ID108		Das Teil ist bis September 2021 zu entwickeln.		Kommentar	2
ID109		Die Lagetoleranz liegt zwischen 0,1 und 0,2 Millimetern.		Kommentar	0
ID110		Produkt soll gut sein.		Kommentar	1
ID111		Produkt soll günstig sein.		Kommentar	0
ID112		Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten einen Transformator ...		Kommentar	0
ID113		Der Knickarmroboter muss fähig sein 230 Volt Wechselstrom zu ...		Kommentar	0
ID114		Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten Hardwarekomponent...		Kommentar	0
ID115		Der Knickarmroboter muss fähig sein 230 Volt Wechselstrom zu ...		Kommentar	0
ID116		Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten ein Arduino Mega mit...		Kommentar	0
ID117		Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten Hardwarekomponent...		Kommentar	0

Abbildung 9: Durchführung des "Q-Checkers"

Für detailliertere Informationen zu den erkannten Qualitätsdefiziten pro Anforderung kann eine Detailansicht der Anforderungen geöffnet werden. Hierzu muss die zu untersuchende Anforderung per Linksklick markiert werden und dann per Rechtsklick ein Unter-Menü geöffnet werden, in der eine Detailansicht für die markierte Anforderung aufgerufen werden kann (siehe Abbildung 10). Nachdem die Schaltfläche „Öffne Detailansicht...“ angeklickt wurde, öffnet sich die Detailansicht der Anforderung zur Untersuchung der Qualitätsdefizite.

Seite 12
Kapitel 2

ARCA - ARCA Tool 2.1

Projekt Hilfe

**Anforderungsliste** Abhängigkeitscarte Risikoportfolio Bericht Qualitätsdefizite Projektdatenbank

Speichern Q-Check Abhängigkeitsanalyse Wahrscheinlichkeitsanalyse Auswirkungsanalyse Risikopriorisierung Risikosteuerung

Suchen Anforderung hinzufügen Anforderung löschen

ID	Anforderungstitel	Anforderungstext	Priorität	Kommentar	Qualität	En
ID103		Die Anbindung muss 3 mm dick sein.		Kommentar	0	
ID104		Die Welle muss einen Durchmesser von 10 mm haben.		Kommentar	0	
ID105		Die Welle sollte aus DIN EN-AW 7075 oder ähnlich sein.		Kommentar	2	
ID107		Das Teil sollte einschließlich Dokumentation entwickelt werden.		Kommentar	3	
ID108		Das Teil ist bis September 2021 zu entwickeln.		Kommentar	2	
ID109		Die Lagetoleranz liegt zwischen 0,1 und 0,2 Millimeter.		Kommentar	0	
ID110		Produkt soll gut sein.		Kommentar	1	
ID111		Produkt soll günstig sein.		Kommentar	0	
ID112		Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten einen Transformator ...		Kommentar	0	
ID113		Der Knickarmroboter muss fähig sein 230 Volt Wechselstrom zu ...		Kommentar	0	
ID114		Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten Hardwarekomponent...		Kommentar	0	
ID115		Der Knickarmroboter muss fähig sein 230 Volt Wechselstrom zu ...		Kommentar	0	
ID116		Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten ein Arduino Mega mit...		Kommentar	0	
ID117		Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten Hardwarekomponent...		Kommentar	0	

Offne Detailansicht... Zeige Anforderung in Abhängigkeitscarte Zeige Anforderung in Risikoportfolio

Abbildung 10: Detailansicht der Anforderungen zur Untersuchung der Qualitätsdefizite

**Öffne Detailansicht...**

In der Detailansicht der Anforderung muss der Reiter Qualität geöffnet werden (siehe Abbildung 11). Die Ansicht ist aufgeteilt in die Kategorien „Qualitätsdefizit“, „Sprachkonstrukt“, „Beschreibung“ und „Text“.

- Qualitätsdefizit: Qualitätsdefizit der Anforderung
- Sprachkonstrukt: Verwendetes Sprachkonstrukt in der Anforderung, welches das Qualitätsdefizit bedingt
- Beschreibung: Beschreibung des entsprechenden Qualitätsdefizits
- Text: Der Text der Anforderung. Das Sprachkonstrukt, welches das Qualitätsdefizit bedingt, wird rot markiert

ARCA - ARCA Tool 2.1

Projekt Hilfe

Anforderung **Qualität** Abhängigkeiten Risiko Einflussfaktoren

Qualitätsdefizit ignorieren

Qualitätsdefizit	Sprachkonstrukt	Beschreibung	Text
Unpräzise	Subjektive Sprache	Diese Ausdrücke sind nicht prägnant.	Das Teil sollte einschließlich Dokumentation entwickelt werden.
Pronomen	Vage Pronomen	Möglicherweise unklarer Bezug.	Das Teil sollte einschließlich Dokumentation entwickelt werden.
Schwach	Subjektive Sprache	Diese schwachen Wörter können zu ...	Das Teil sollte einschließlich Dokumentation entwickelt werden.

Abbildung 11: Detailansicht der Qualitätsdefizite der Anforderung

### 2.3.2 Qualitätsdefizite

Die Qualitätsdefizite werden durch eine lexikalische Analyse erkannt. Es wird geprüft, ob bestimmte Wörter im Text der Anforderung enthalten sind. Die jeweiligen Qualitätsdefizite und deren zugehörige Wörter sind die Folgenden:

- **Anforderungen sollen Möglichkeiten vermeiden:** eigentlich
- **Die Bedeutung hängt stark von der Position ab:** nur, auch, sogar
- **Mehrdeutige Wörter:** enthält, nach, vor, nächste, vorige, Minimum, Maximum
- **Fortsetzungen verweisen auf Mehrdeutigkeiten:** wie folgt, unter, außerdem, insbesondere, aufgeführt, inzwischen, unterdessen, einerseits, andererseits
- **Gefährlicher Plural:** alle, jeder, jede, wenige, wenig, viele, viel, mehrere, einige
- **Unpräzise Begrifflichkeiten:** könnte, sollte
- **Subjektive Sprache:** bis, durch, bei
- **Fehlender Inhalt:** tbd, etc, tba, tbe, tbs, tbr, mindestens, wie definiert, wie spezifiziert, zusätzlich, ist, definiert, keine praktische, Grenze, nicht definiert, nicht bestimmt, aber nicht beschränkt auf, zu beraten, zu definieren, zu vervollständigen, zu bestimmen, zu beschließen, zu spezifizieren
- **Negativierung:** nicht, nicht weil
- **Optionalitäten:** wie gewünscht, endlich, entweder, eventuell, falls angebracht, wenn gewünscht, im Falle von, falls notwendig, falls benötigt, weder, noch, optional, sonst, möglicherweise, wahrscheinlich, ob
- **Vage Pronomen:** er, sie, es, irgendjemand, irgend etwas, alles, ihr, sich, sich selbst, ich, die meisten, mein, mich selbst, keiner, niemand, nichts, unser, uns selbst, jemand, etwas, das, ihre, diese, dies, jene, wir, was, was auch immer, welches, welches auch immer, wer, wer auch immer, wen, wen auch immer, wessen, wessen auch immer, du, dein, selbst
- **Spekulationen:** normalerweise
- **Subjektive Sprache:** wenn nicht
- **Schwach subjektive Sprache:** kann, darf, bevorzugt, wird, würde
- **Wunschdenken:** 100 Prozent, alle Fehler
- **Vage Satzzeichen und Worte:** \, < >, (, ), [ , ], ;, ?, !, Anpassungsfähigkeit, adäquat, aggregiert, beliebig, angemessen, verfügbar, soweit, so wenig wie möglich, so viele wie möglich, so viel wie möglich, nach Bedarf, sowohl als auch, schlecht, sowohl, aber, aber auch, aber nicht nur, fähig zu, Fähigkeit von, Fähigkeit, gemeinsame, korrekt, konsequent, zeitgemäß, bequem, glaubwürdig, gebräuchlich, üblich, Standard,

leicht, einfach, effektiv, effizient, episodisch, gerecht, gleichberechtigt, existieren, existiert, zügig, schnell, fair, ziemlich, final, häufig, voll, allgemein, generisch, gut, hochrangig, unparteiisch, selten, unbedeutend, mittel, interaktiv, in Bezug auf, weniger, logisch, niedrig, maximal, minimal, mehr, einvernehmlich, sich gegenseitig ausschließend, sich gegenseitig einschließend, nahe, notwendig, neutral, nicht nur, auf der Ebene, besonders, physisch, stark, praktisch, prompt, bereitgestellt, zufällig, kürzlich, ungeachtet, relevant, jeweilig, robust, routiniert, suffizient, sequentiell, signifikant, spezifisch, dort, es gibt, vorübergehend, transparent, rechtzeitig, undefinierbar, verständlich, es sei denn, unnötig, nützlich, verschieden, variierend

- **Unklarer Einschluss:** bis [...] zu [...] einschließlich/ausschließlich
- **Passive Sprachmehrdeutigkeit:** [...] sein/werden [...]
- **Vergleich und Superlative:** [...] vergleichen/unterscheiden/kontrastieren/übertreffen/überrunden/übertreffen/überbieten/überlegen/überschatten/ausgleichen/übertreffen/überrunden/übertreffen/besten/übertrumpfen/übertreffen/übertreffen/überholen/vergleichen/entsprechen/ausgleichen/überholen/übertreffen/konkurrieren/vergleichen/entsprechen/entsprechen/vergleichen [...]
- **Zweideutiger Plural:** [...] jede/jeder/jemand/sie [...] ihr/ihre [...]
- **Andere bzw. Sonstige:** Beides
- **Gefährliche Referenz Plural:** [...] alle/jeder/jede [...] seine/ihre [...]
- **Unklare Assoziativität:** [...] und [...] oder [...] / [...] oder [...] und [...]

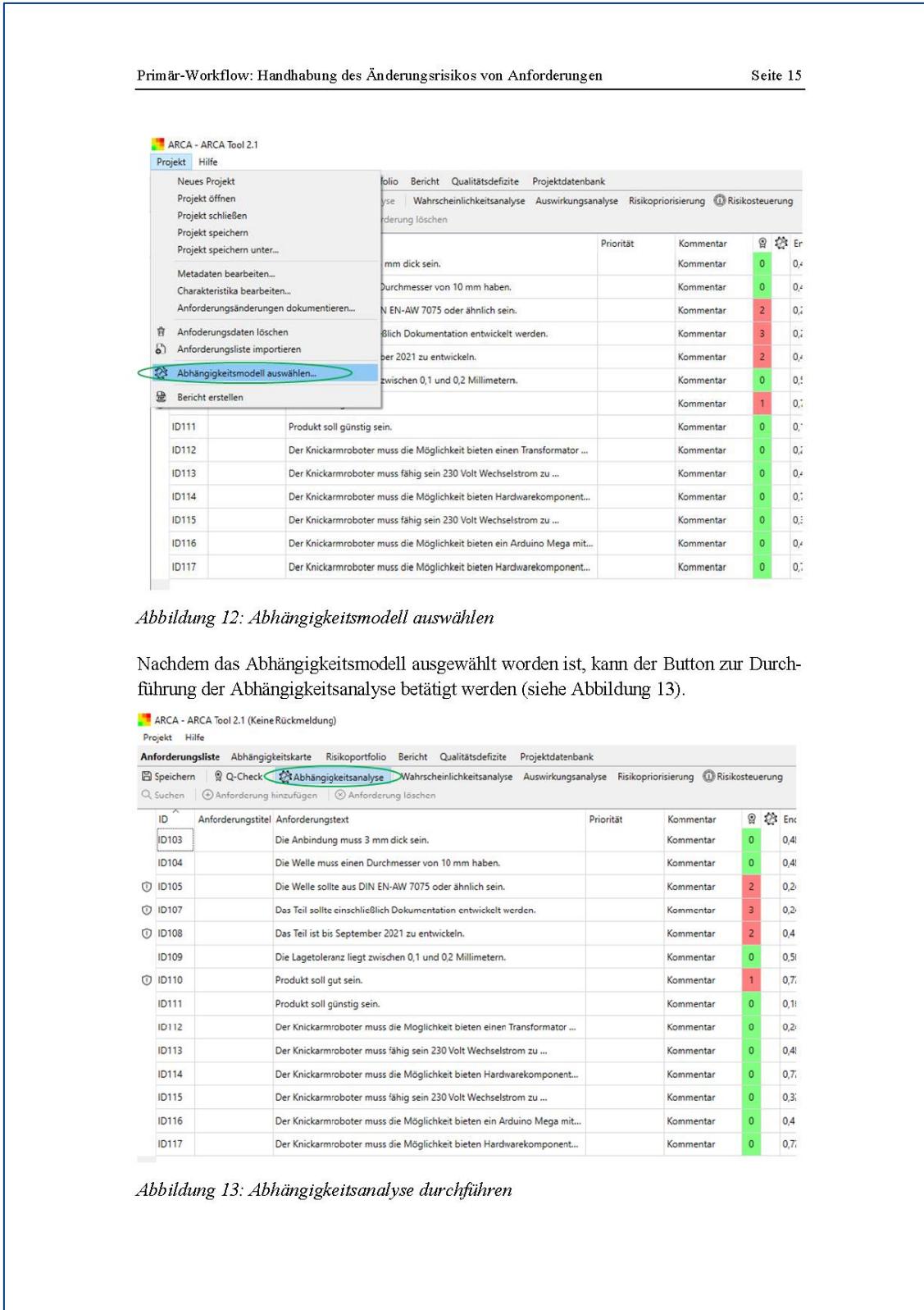
## 2.4 Abhängigkeitsanalyse durchführen

### Voraussetzungen:

- Projekt erstellt (siehe Abschnitt 2.1)
- Anforderungsliste importiert (siehe Abschnitt 2.2)

#### 2.4.1 Workflow im Software-Werkzeug

Zur Durchführung der Abhängigkeitsanalyse muss ein Abhängigkeitsmodell ausgewählt werden (siehe Abbildung 12). Das Abhängigkeitsmodell ist ein vortrainierter Klassifikator. In ARCA wird BERT als Klassifikator verwendet.



Die Berechnung der Abhängigkeiten ist sehr rechenintensiv und die Dauer der Berechnung steigt exponentiell mit der Anzahl der Anforderungen an. Die Berechnung kann mehrere Minuten dauern.

### 2.4.2 Abhängigkeitskarte

Nach der Durchführung der Abhängigkeitsanalyse (siehe Abschnitt 2.4.1) sind die Abhängigkeiten zwischen Anforderungen erkannt worden. Die Abhängigkeiten werden für die Durchführung weiterer Schritte benötigt: Wahrscheinlichkeitsanalyse (siehe Abschnitt 2.5) und Auswirkungsanalyse (siehe Abschnitt 2.6). Der Anwender kann die erkannten Abhängigkeiten in der Abhängigkeitskarte einsehen (siehe Abbildung 14).

Abhängigkeits-ID	Von-Anforderung-ID	Von-Anforderung-Text	Abhängigkeitsart	Zu-Anforderung-ID	Zu-Anforderung-Text
1	ID103	Die Anbindung muss 3 mm dick sein.	None	ID103	Die Anbindung muss 3 mm dick sein.
2	ID103	Die Anbindung muss 3 mm dick sein.	None	ID104	Die Welle muss einen Durchmesser von 10 mm haben.
3	ID103	Die Anbindung muss 3 mm dick sein.	None	ID105	Die Welle sollte aus DIN EN-AW 7075 oder ähnlich sein.
4	ID103	Die Anbindung muss 3 mm dick sein.	None	ID107	Das Teil sollte einschließlich Dokumentation entwickelt werden.
5	ID103	Die Anbindung muss 3 mm dick sein.	None	ID108	Das Teil ist bis September 2021 zu entwickeln.
6	ID103	Die Anbindung muss 3 mm dick sein.	None	ID109	Die Lagetoleranz liegt zwischen 0,1 und 0,2 Millimetern.
7	ID103	Die Anbindung muss 3 mm dick sein.	None	ID110	Produkt soll gut sein.

Abbildung 14: Abhängigkeitskarte

In der Abhängigkeitskarte werden die Attribute der Abhängigkeiten durch die Spalten abgebildet. Die Attribute sind die Folgenden:

- **Abhängigkeits-ID:** ID der Abhängigkeit – fortlaufende Nummer zur Referenzierung der Abhängigkeit zwischen zwei Anforderungen
- **Von-Anforderung-ID:** Die ID der Anforderung, von der die Abhängigkeit ausgeht, bzw. die ID der Anforderung, die eine andere Anforderung beeinflusst
- **Von-Anforderung-Text:** Text der beeinflussenden Anforderung
- **Abhängigkeitsart:** Die Art der Abhängigkeit, die zwischen den von- und zu-Anforderungen besteht. Es werden die Arten „None“ und „Dependent“ unterschieden. Die unterschiedlichen Arten erkannter Abhängigkeiten werden in Abschnitt 2.4.3 detailliert erläutert.
- **Zu-Anforderung-ID:** ID der beeinflussten Anforderung
- **Zu-Anforderung-Text:** Text der beeinflussten Anforderung

### 2.4.3 Arten von Anforderungsabhängigkeiten

In der Detektion von Anforderungsabhängigkeiten werden nur die Arten „None“ und „Dependent“ unterschieden. Die Abhängigkeitsart "Dependent" propagiert zwangsläufig. Die Abhängigkeitsart „None“ propagiert nicht. Die Abhängigkeitsarten werden im Folgenden beschrieben:

- „None“: Zwischen den Anforderungen besteht keine Abhängigkeit.
- „Dependent“: Die Anforderungen sind abhängig voneinander.

### 2.4.4 Detektion der Abhängigkeiten mit BERT

Zur Detektion von Anforderungsabhängigkeiten wird ein "Bidirectional Encoder-Decoder Representations from Transformer-Model" (BERT) herangezogen. BERT wurde 2017 von Google entwickelt und ist eine neuartige Methode der Computer Linguistik. BERT basiert auf Transformatoren, bzw. dem Encoder Teil der Transformatoren, um die kontextuelle Beziehung von Wörtern im Textkorpus zu erlernen. Transformatoren basieren auf einem Encoder-Decoder-Modell, das zwei unterschiedliche Modelle darstellt. Der Encoder liest eine Texteingabe bidirektional (hier Anforderungstext) ein und erzeugt einen Vektor, der eine mathematische Repräsentation der Texteingabe erfasst. Der Decoder greift den Vektor auf und erzeugt eine gewünschte Ausgabe/Vorhersage. Da BERT ein Sprachrepräsentationsmodell ist, wird ausschließlich der Encoder Teil benötigt. Die Besonderheit bei BERT ist, im Vergleich zu traditionellen Sprachmodellen, dass das Training durch zwei Lernverfahren durchgeführt wird. Diese lassen sich in das „**Pre-Training**“ und „**Fine-Tuning**“ unterscheiden.

Das **Pre-Training** teilt sich auf in das „maskierte“ (engl. masked) Lernen und der Vorhersage des nächsten Satzes (engl. next sentence prediction). Beim maskierten Lernen werden Teile von Sätzen durch Masked Tokens (verdeckte Satzteile) ersetzt. Anschließend ist es die Aufgabe des Modells, die maskierten Wörter basierend auf einem Wahrscheinlichkeitsmodell zu bestimmen. Im Gegensatz dazu wird bei der Next Sentence Prediction ein Satzpaar als Input in das Modell gegeben. Das geschieht damit das Modell lernt, inwiefern die Satzpaare zusammengehören oder nicht.

Beim **Fine-Tuning** wird das Pre-Trained Modell aufgegriffen und aufgabenspezifisch mittels Eingaben und Ausgaben End-to-End feinjustiert. Durch das Hinzufügen einer Klassifizierungsschicht über dem Transformer-Ausgang kann BERT für Klassifizierungsprobleme herangezogen werden. Die Detektion von Anforderungsabhängigkeiten zieht die zuvor beschriebene Klassifizierungsschicht des BERT Ansatzes heran und klassifiziert dadurch die Abhängigkeitstypen „None“ oder „Dependent“.

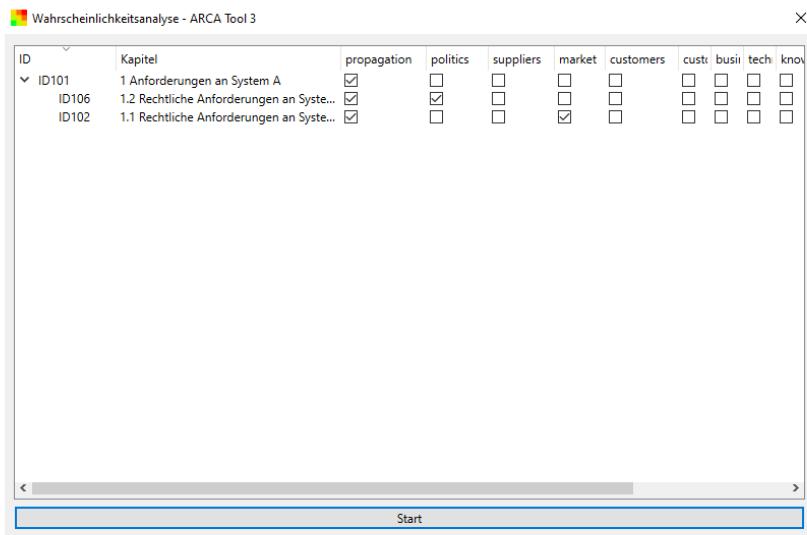
## 2.5 Wahrscheinlichkeitsberechnung durchführen

### Voraussetzungen:

- Projekt erstellt (siehe Abschnitt 2.1)
- Anforderungsliste importiert (siehe Abschnitt 2.2)
- Abhängigkeitsanalyse durchgeführt (siehe Abschnitt 2.4)
- Referenzprojekte importiert (siehe Abschnitt 2.3)

### 2.5.1 Workflow im Software-Werkzeug

Zur Durchführung der Wahrscheinlichkeitsberechnung muss der Button „Wahrscheinlichkeitsanalyse“ betätigt werden. Es öffnet sich ein Fenster, um relevante Initiatoren von Änderungen für die Überschriften, denen Anforderungen zugeordnet sind, zuzuordnen (siehe Abschnitt 0). Wenn Initiatoren für eine Überschrift auf einer höheren Ebene festgelegt werden, dann werden die Initiatoren auch für die Überschriften auf der unteren Ebene festgelegt. Für eine überschriften-spezifische Zuordnung von Initiatoren müssen die Überschriften auf der untersten Ebene verwendet werden. Die Wahrscheinlichkeitsanalyse wird durch einen Klick auf „Start“ (unten) gestartet.



The screenshot shows a software interface titled "Wahrscheinlichkeitsanalyse - ARCA Tool 3". The main area is a grid of checkboxes. The columns are labeled: ID, Kapitel, propagation, politics, suppliers, market, customers, custr, busii, tech, knov. The rows show three items: ID101 (1 Anforderungen an System A), ID106 (1.2 Rechtliche Anforderungen an System A), and ID102 (1.1 Rechtliche Anforderungen an System A). The checkboxes are checked in specific cells, indicating the selection of initiators for certain requirements across different categories. At the bottom of the window, there is a blue button labeled "Start".

ID	Kapitel	propagation	politics	suppliers	market	customers	custr	busii	tech	knov
▼ ID101	1 Anforderungen an System A	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ID106	1.2 Rechtliche Anforderungen an System A	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ID102	1.1 Rechtliche Anforderungen an System A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					

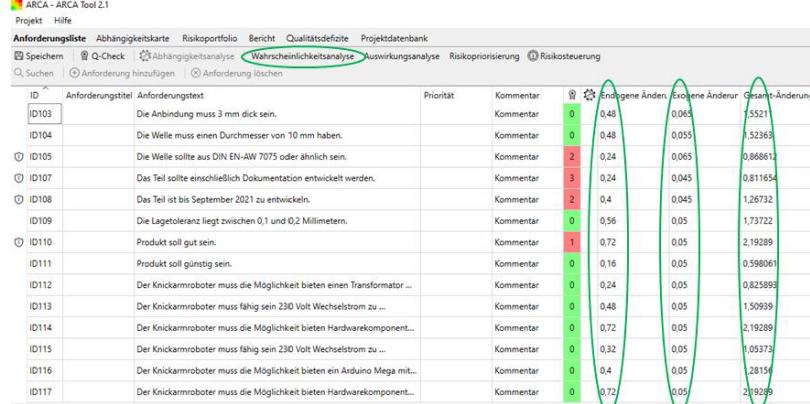
Abbildung 15: Auswahl von Initiatoren

Für die Berechnung müssen Änderungsdaten von Referenzprojekten vorhanden sein und importiert werden. Der Benutzer wird aufgefordert Referenzprojekte festzulegen, falls

**Primär-Workflow: Handhabung des Änderungsrisikos von Anforderungen**

Seite 19

dies noch nicht erfolgt ist (siehe Abbildung 16). Das Importieren und Verwalten von Referenzprojekten wird in Abschnitt 2.5.2 erläutert.



**Abbildung 16: Durchführung der Wahrscheinlichkeitsanalyse**

Das Ergebnis der Wahrscheinlichkeitsanalyse sind die Kennzahlen „Endogene Änderungswahrscheinlichkeit“, „Exogene Änderungswahrscheinlichkeit“ und „Gesamte Änderungswahrscheinlichkeit“, die für die Anforderungen berechnet wurden. Die Berechnung der Kennzahlen wird detailliert in Abschnitt 2.5.3 erläutert. Die Kennzahlen werden folgendermaßen interpretiert:

**Endogene Änderungswahrscheinlichkeit**  
Der dargestellte Wert ist ein Indikator für die exogene Änderungswahrscheinlichkeit der Anforderung. Endogene Anforderungsänderungen entstehen aufgrund von Propagationseffekten. Der Wert bildet die Konnektivität des Anforderungssets ab, sodass die Wahrscheinlichkeit einer Änderung aufgrund von Propagationseffekten abgeschätzt werden kann. Als Indikator für die Konnektivität wird der Page Rank der Anforderung ermittelt und auf eine Zahl zwischen 0 und 1 normiert. Dazu wird der Page Rank jeder Anforderung durch den höchsten Page Rank der Anforderungen dividiert. Anschließend wird dieser Wert mit einem Faktor multipliziert, der den Anteil der Änderungen durch Propagation im Verhältnis zu den gesamten Änderungen entspricht. Dieser Faktor wird aus der Änderungshistorie der Referenzprojekte gebildet. Umso höher der Wert der endogenen Änderungswahrscheinlichkeit ist, umso höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Anforderung aufgrund von Propagationseffekten ändert.

**Exogene Änderungswahrscheinlichkeit**  
Der dargestellte Wert ist ein Indikator für die exogene Änderungswahrscheinlichkeit der Anforderung. Die exogene Änderungswahrscheinlichkeit ist die Wahrscheinlichkeit mit der sich die Anforderung aufgrund von Änderungsimpulsen verschiedener Initiatoren ändert. Der Indikator wird berechnet aus der Summe der Änderungen, die durch relevante

Initiatoren verursacht wurden im Verhältnis zu den gesamten Änderungen, die in den Referenzprojekten aufgetreten sind. Umso höher der Wert der exogenen Änderungswahrscheinlichkeit ist, umso höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Anforderung aufgrund von Änderungsimpulsen von Initiatoren ändert.

#### **Gesamte Änderungswahrscheinlichkeit**

Der Wert für die gesamte Änderungswahrscheinlichkeit ist der Erwartungswert der Anzahl der Änderungen  $E_{\text{Änderungen}}$  für die jeweilige Anforderung. Bei einem Wert von 0,8 werden beispielsweise 0,8 Änderungen für diese Anforderung erwartet. Es ist also wahrscheinlicher, dass sich diese Anforderung einmal ändert als dass diese sich nicht ändert. Zur Interpretation werden folgende Gruppen gebildet:

- Für  $E_{\text{Änderungen}}(r_i) \leq 0,25$ : die **Änderungswahrscheinlichkeit ist niedrig** („es werden weniger als 0,25 Änderungen für diese Anforderung erwartet“)
- Für  $0,25 < E_{\text{Änderungen}}(r_i) \leq 0,75$ : die **Änderungswahrscheinlichkeit ist mittel** („es werden mehr als 0,25 bis 0,75 Änderungen für diese Anforderung erwartet“)
- Für  $0,75 < E_{\text{Änderungen}}(r_i) \leq 1$ : die **Änderungswahrscheinlichkeit ist hoch** („es werden mehr als 0,75 bis eine Änderung für diese Anforderung erwartet“)
- Für  $1 < E_{\text{Änderungen}}(r_i)$ : die **Änderungswahrscheinlichkeit ist sehr hoch** („es werden mehr als eine Änderung für diese Anforderung erwartet“)

#### **2.5.2 Referenzprojekte importieren und verwalten**

Referenzprojekte sind ähnlich zum betrachteten Entwicklungsprojekt. Es bestehen beispielsweise thematische Überschneidungen, z. B. Entwicklung einer ähnlichen Komponente, oder mehrere Projekt-Charakteristika stimmen überein. Für die Berechnung der Änderungswahrscheinlichkeit werden die Änderungsdaten von Referenzprojekten benötigt. In den Änderungsdaten sind die Anzahl der Anforderungsänderungen bedingt durch Initiatoren und Propagationseffekte aufgeschlüsselt.

#### **Projekt hinzufügen**

Es müssen im Reiter „Projektdatenbank“ (siehe Abbildung 17) über den Button „Projekt hinzufügen“ Referenzprojekte hinzugefügt werden. Nachdem diese Projekte hinzugefügt worden sind, können über die Checkbox „Referenz“ Projekte für die Berechnung der Änderungswahrscheinlichkeit ausgewählt werden.

Primär-Workflow: Handhabung des Änderungsrisikos von Anforderungen Seite 21

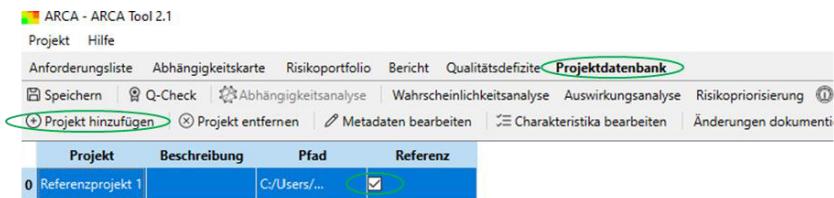


Abbildung 17: Referenzprojekt importieren

#### Projekt entfernen

Referenzprojekte werden aus dem Projekt entfernt.

#### Metadaten bearbeiten

Die Metadaten des markierten Referenzprojekts werden editiert. Das ist der Name und die Beschreibung des Referenzprojekts (siehe Abbildung 18). Die Beschreibung ist eine Kurzbeschreibung des Ziels des Referenzprojekts – beispielsweise „Entwicklung eines Steuergeräts“.

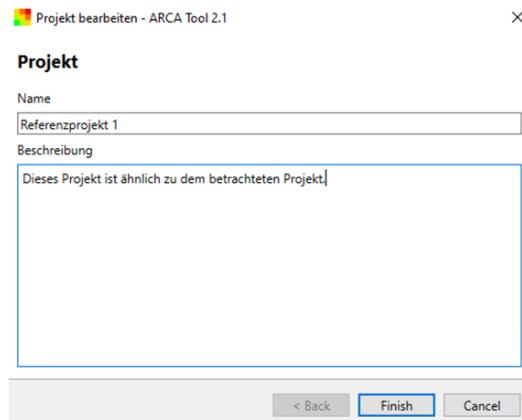


Abbildung 18: Metadaten bearbeiten

#### Charakteristika bearbeiten

Die Projekt-Charakteristika der Referenzprojekte können bearbeitet werden (siehe Abbildung 19). Diese werden für die Identifikation von geeigneten Referenzprojekten für das aktuelle Entwicklungsprojekt genutzt.

Seite 22
Kapitel 2

Projektcharakteristika bearbeiten - ARCA Tool 2.1 ×

### Charakteristika

Wie hoch ist der Innovationsgrad des zu entwickelnden Systems?

Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit von Änderungswünschen durch Kunden?

Wie hoch ist die Sicherheit politischer Verhältnisse, die Einfluss auf das Entwicklungsprojekt haben?

Wie hoch ist die Komplexität des Projekts?

Wie hoch ist die Liefertreue des Lieferanten?

Wie gut sind wir im Vergleich zu unserer Konkurrenz positioniert?

Sind strukturelle Änderungen beim Kunden zu erwarten?

Sind interne strukturelle Änderungen zu erwarten?

Werden Zu/Abgänge von Mitarbeitern im Projekt mit technischem Know-How erwartet?

Werden wir strukturiert Anforderungsmanagement-Methoden im Projekt an?

Findet ein disziplinübergreifender Austausch statt?

Sind Kundenanforderungen eindeutig formuliert?

Anforderungsänderungen dokumentieren - ARCA Tool 2.1 ×

### Metriken

Anzahl der Änderungen durch Propagation <input type="text" value="720"/>	Anzahl der Änderungen durch Initiator: Wissen <input type="text" value="20"/>
Anzahl der Änderungen durch Initiator: Politik <input type="text" value="10"/>	Anzahl der Änderungen durch Initiator: Anforderungsmanager <input type="text" value="30"/>
Anzahl der Änderungen durch Initiator: Lieferant <input type="text" value="20"/>	Anzahl der Änderungen durch Initiator: Projektleiter <input type="text" value="20"/>
Anzahl der Änderungen durch Initiator: Markt <input type="text" value="10"/>	Anzahl der Änderungen durch Initiator: Entwickler <input type="text" value="20"/>
Anzahl der Änderungen durch Initiator: Kunde <input type="text" value="35"/>	Anzahl der Änderungen durch Initiator: Software-Entwicklung <input type="text" value="10"/>
Anzahl der Änderungen durch Initiator: Kundenorganisationssstruktur <input type="text" value="10"/>	Anzahl der Änderungen durch Initiator: Hardware-Entwicklung <input type="text" value="20"/>
Anzahl der Änderungen durch Initiator: Geschäftsbereich <input type="text" value="15"/>	Anzahl der Änderungen durch Initiator: Produktion <input type="text" value="30"/>
Anzahl der Änderungen durch Initiator: Technologie <input type="text" value="30"/>	

Abbildung 19: Projektcharakteristika bearbeiten

### Anforderungsänderungen dokumentieren

Die Änderungshistorie des ausgewählten Projekts kann editiert werden (siehe Abbildung 20).

Abbildung 20: Anforderungsänderungen dokumentieren

### **Referenzprojekte finden**

Aus den importierten Referenzprojekten können geeignete Referenzprojekte für das aktuelle Entwicklungsprojekt automatisiert identifiziert werden. Hierzu werden die Charakteristika der Referenzprojekte mit den Charakteristika des aktuellen Entwicklungsprojekts verglichen. Wenn 60 % der Charakteristika übereinstimmen, dann wird das Referenzprojekt als geeignet vorgeschlagen und die Checkbox in der Spalte „Referenz“ wird markiert. Damit die Identifikation automatisiert durchgeführt werden kann, müssen vom Anwender die Charakteristika der Referenzprojekte bewertet werden (siehe Charakteristika bearbeiten).

### **2.5.3 Berechnung der Wahrscheinlichkeits-Kennzahlen**

Um die Wahrscheinlichkeit einer Anforderungsänderung abzuschätzen, werden Informationen benötigt, um...

- ...die Einflüsse durch exogene Änderungsimpulse zu bestimmen. Diese Änderungsimpulse werden durch Initiatoren wie Politik, Lieferant oder Markt verursacht. Es wird ein Maß benötigt, welches die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Anforderung durch einen Änderungsimpuls aufgrund eines bestimmten Initiatoren ändert, abbildet – endogene Änderungswahrscheinlichkeit.
- ...den Einfluss endogener Ursachen zu bestimmen. Endogene Anforderungsänderungen entstehen aufgrund von Propagationseffekten. Es wird ein Maß benötigt, welches die Konnektivität des Anforderungssets abbildet, sodass die Wahrscheinlichkeit einer Änderung aufgrund von Propagationseffekten abgeschätzt werden kann – endogene Änderungswahrscheinlichkeit.

Zur Berechnung der Änderungswahrscheinlichkeit müssen diese Informationen (exogene und endogene Änderungswahrscheinlichkeit) zu einer Gesamt-Berechnung zusammengeführt werden.

#### **Exogene Änderungswahrscheinlichkeit**

Um die exogene Änderungswahrscheinlichkeit abzuschätzen, werden historische Daten von Referenzprojekten verwendet. Die historischen Daten bestehen aus der Anzahl der Anforderungen und der Anzahl der gesamten Änderungen (aufgeteilt in endogene und exogene Ursachen). Die exogenen Änderungen werden nach der Ursache der Änderung (bezogen auf den Initiator) unterteilt. Aus den Referenzprojekten wird eine projektspezifische Datengrundlage gebildet, indem die Werte der Änderungsdaten der relevanten Referenzprojekte summiert werden. Pro Anforderung werden die Änderungen für die relevanten Initiatoren summiert. Die Relevanz der Initiatoren wird aufgrund der Zuordnung der Anforderung zum Initiator festgelegt- Diese Summe wird durch die Anzahl der gesamten Änderungen dividiert. Zusammenfassung in einer Formel:

$$P_{exogen}^*(r_i) = \frac{\sum \text{Anzahl der Änderungen durch die für Anforderung } i \text{ relevanten Initiatoren}}{\text{Gesamte Anzahl der Änderungen}}$$

Dieser Wert ist ein Indikator für die exogene Änderungswahrscheinlichkeit und keine absolute exogene Änderungswahrscheinlichkeit.

$$0 \leq P_{exogen}^*(r_i) \leq \frac{\text{Gesamte Anzahl exogener Änderungen}}{\text{Gesamte Anzahl der Änderungen}} \leq 1$$

#### **Endogene Änderungswahrscheinlichkeit**

Es wird ein Maß benötigt, um die Konnektivität der Anforderungen widerzuspiegeln, so dass der Einfluss durch Propagationseffekte deutlich wird. Hierfür wird der Page Rank verwendet:

$$PR(r_i) = \frac{1-d}{n} + d \sum_{r_j \in E_i^{in}} \frac{PR(r_j)}{v_j}$$

Gemäß dem „Zufallsurfermodell“ wird der Page Rank normiert, um eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die einzelnen Anforderungen zu generieren. Es wird der Page Rank sämtlicher Anforderungen durch den höchsten Page Rank dividiert. Zusammenfassung als Formel:

$$PR'(r_i) = \frac{PR(r_i)}{\max(PR)}$$

Um den Indikator für die endogene Änderungswahrscheinlichkeit zu berechnen und in ein geeignetes Verhältnis zu  $P_{exogen}^*(r_i)$  zu setzen, wird der normierte Page Rank mit dem Anteil der endogenen Änderungen im Verhältnis zu der Gesamtzahl der Änderungen multipliziert:

$$P_{exogen}^*(r_i) = PR'(r_i) \cdot \frac{\text{Gesamte Anzahl endogener Änderungen}}{\text{Gesamte Anzahl der Änderungen}}$$

Dieser Wert ist ein Indikator für die endogene Änderungswahrscheinlichkeit und keine absolute endogene Änderungswahrscheinlichkeit.

$$0 \leq P_{exogen}^*(r_i) \leq \frac{\text{Gesamte Anzahl endogener Änderungen}}{\text{Gesamte Anzahl der Änderungen}} \leq 1$$

#### **Gesamte Änderungswahrscheinlichkeit**

Die beiden Indikatoren für die exogene und endogene Änderungswahrscheinlichkeit,  $P_{exogen}^*(r_i)$  und  $P_{endogen}^*(r_i)$ , werden zusammengeführt und genutzt, um die gesamte Änderungswahrscheinlichkeit abzuschätzen. Wertebereich der beiden Indikatoren:

$$0 \leq P_{exogen}^*(r_i) + P_{endogen}^*(r_i) \leq 1$$

Um die gesamte Änderungswahrscheinlichkeit zu repräsentieren, wird aus den historischen Änderungsdaten der Erwartungswert der Anzahl der Änderungen pro Anforderung  $\mu_{\text{Änderungen}}$  berechnet:

$$\mu_{\text{Änderungen}} = \frac{\text{Gesamte Anzahl der Änderungen}}{\text{Gesamte Anzahl der Anforderungen}}$$

Wertebereich:  $0 \leq \mu_{\text{Änderungen}} < \infty$

**Annahme:** Die Werte der Indikatoren für die Änderungswahrscheinlichkeit und die Anzahl der erwarteten Änderungen pro Anforderung  $E_{\text{Änderungen}}(r_i)$  sind proportional zueinander: umso höher  $P_{\text{gesamt}}^*(r_i) = P_{\text{exogen}}^*(r_i) + P_{\text{endogen}}^*(r_i)$  ist, umso höher ist  $E_{\text{Änderungen}}(r_i)$ . Wenn  $P_{\text{gesamt}}^*(r_i)$  den Erwartungswert  $\mu_{\text{Indikator}}$  annimmt, dann nimmt  $E_{\text{Änderungen}}(r_i)$  ebenfalls den Erwartungswert  $\mu_{\text{Änderungen}}$  an:

$$\mu_{\text{Indikator}} = \frac{\sum P_{\text{exogen}}^*(r_i) + P_{\text{endogen}}^*(r_i)}{\text{Anzahl der Anforderungen im aktuellen Projekt}}$$

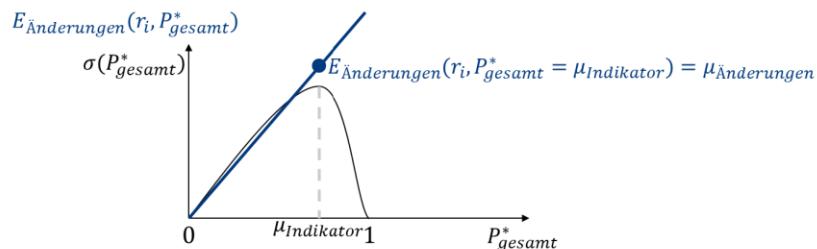


Abbildung 21: Beispielhafte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von  $P_{\text{gesamt}}^*(r_i)$  und die zugehörige lineare Funktion des Erwartungswerts der Anzahl der Änderungen pro Anforderungen  $E_{\text{Änderungen}}(r_i)$

$$E_{\text{Änderungen}}(r_i, P_{\text{gesamt}}^*) = \frac{\mu_{\text{Änderungen}}}{\mu_{\text{Indikator}}} \cdot P_{\text{gesamt}}^*(r_i)$$

**Annahme:** linearer Zusammenhang zwischen  $P_{\text{gesamt}}^*$  und der erwarteten Anzahl an Änderungen pro Anforderung  $E_{\text{Änderungen}}(r_i)$ . Aufgrund der Höhe des Wertes der erwarteten Anzahl an Änderungen pro Anforderung wird ein Rückschluss auf die Änderungswahrscheinlichkeit der Anforderung gezogen:

- Für  $E_{\text{Änderungen}}(r_i) \leq 0,25$ : die **Änderungswahrscheinlichkeit ist niedrig** („es werden weniger als 0,25 Änderungen für diese Anforderung erwartet“)
- Für  $0,25 < E_{\text{Änderungen}}(r_i) \leq 0,75$ : die **Änderungswahrscheinlichkeit ist mittel** („es werden mehr als 0,25 bis 0,75 Änderungen für diese Anforderung erwartet“)
- Für  $0,75 < E_{\text{Änderungen}}(r_i) \leq 1$ : die **Änderungswahrscheinlichkeit ist hoch** („es werden mehr als 0,75 bis eine Änderung für diese Anforderung erwartet“)
- Für  $1 < E_{\text{Änderungen}}(r_i)$ : die **Änderungswahrscheinlichkeit ist sehr hoch** („es werden mehr als eine Änderung für diese Anforderung erwartet“)

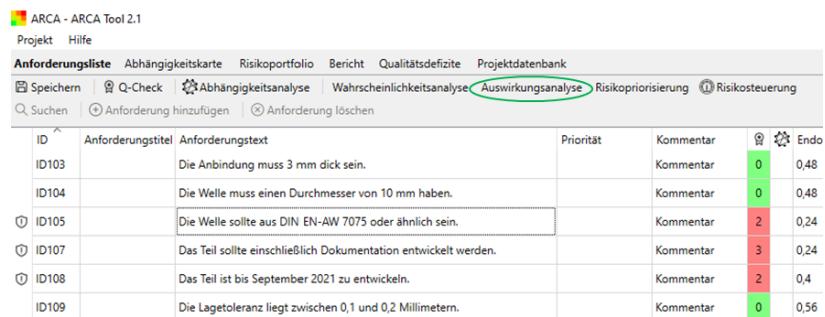
## 2.6 Auswirkungsanalyse durchführen

### Voraussetzungen:

- Projekt erstellt (siehe Abschnitt 2.1)
- Anforderungsliste importiert (siehe Abschnitt 2.2)
- Abhängigkeitsanalyse durchgeführt (siehe Abschnitt 2.4)

### 2.6.1 Workflow im Software-Werkzeug

Die Auswirkungsanalyse wird gestartet, indem der Button „Auswirkungsanalyse“ gedrückt wird (siehe Abbildung 22).



The screenshot shows a software interface for 'ARCA - ARCA Tool 2.1'. At the top, there is a navigation bar with links for 'ARCA - ARCA Tool 2.1', 'Projekt', 'Hilfe', 'Anforderungsliste', 'Abhängigkeitskarte', 'Risikoportfolio', 'Bericht', 'Qualitätsdefizite', and 'Projektdatenbank'. Below the navigation bar is a toolbar with buttons for 'Speichern', 'Q-Check', 'Abhängigkeitsanalyse', 'Wahrscheinlichkeitsanalyse', 'Auswirkungsanalyse' (which is highlighted with a green oval), 'Risikopriorisierung', and 'Risikosteuerung'. There are also search and filter buttons: 'Suchen', 'Anforderung hinzufügen', and 'Anforderung löschen'. The main area is a table with the following data:

ID	Anforderungstitel	Anforderungstext	Priorität	Kommentar	Endo
ID103		Die Anbindung muss 3 mm dick sein.		Kommentar	0 0.48
ID104		Die Welle muss einen Durchmesser von 10 mm haben.		Kommentar	0 0.48
ID105		Die Welle sollte aus DIN EN-AW 7075 oder ähnlich sein.		Kommentar	2 0.24
ID107		Das Teil sollte einschließlich Dokumentation entwickelt werden.		Kommentar	3 0.24
ID108		Das Teil ist bis September 2021 zu entwickeln.		Kommentar	2 0.4
ID109		Die Lagetoleranz liegt zwischen 0,1 und 0,2 Millimetern.		Kommentar	0 0.56

Abbildung 22: Auswirkungsanalyse durchführen

Es öffnet sich eine separate Ansicht der Anforderungen inklusive des jeweiligen Active Ranks der Anforderungen (siehe Abbildung 23). Ähnlich wie der Page Rank ist der Active Rank ein Maß für die Konnektivität des Anforderungsnetzwerks (siehe Abschnitt 2.5.3: Endogene Änderungswahrscheinlichkeit). Der Unterschied zwischen den beiden Kennzahlen ist, dass der Page Rank eingehende Abhängigkeiten für die Konnektivitätsanalyse nutzt, während der Active Rank ausgehende Abhängigkeiten für die Konnektivitätsanalyse nutzt. Der Active Rank ist ein Maß für die Beeinflussung anderer Anforderungen durch die betrachtete Anforderung. Der Wertebereich ist zwischen 0 und 1. Umso höher der Active Rank einer Anforderung ist, umso stärker werden andere Anforderungen durch diese Anforderung beeinflusst.

Um Aufwand in der Auswirkungsanalyse von Anforderungsänderungen zu reduzieren, sollen nur kritische Anforderungen betrachtet werden. Anforderungen sind kritisch, wenn sie einen hohen Active Rank haben. Es wird empfohlen, alle Anforderungen, die einen Active Rank von größer 0,8 haben, zu bewerten. Die Bewertung der Auswirkungen einer bestimmten Anforderungsänderung wird durchgeführt, indem eine Anforderung markiert wird und der Button „Manuelle Auswirkungsanalyse“ gedrückt wird (siehe Abbildung 23).

**Primär-Workflow: Handhabung des Änderungsrisikos von Anforderungen** Seite 27

ARCA - ARCA Tool 2.1

Projekt: Hilfe

← Auswirkungsanalyse

**Manuelle Auswirkungsanalyse**

ID	Anforderungstext	ActiveRank
ID117	Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten Hardwarekomponenten mit unterschiedlichen Volt ...	100%
ID116	Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten ein Arduino Mega mit 12 Volt Gleichstrom zu versorgen	
ID115	Der Knickarmroboter muss fähig sein 230 Volt Wechselstrom zu transformieren	
ID114	Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten Hardwarekomponenten mit unterschiedlichen Volt ...	
ID113	Der Knickarmroboter muss fähig sein 230 Volt Wechselstrom zu transformieren	
ID112	Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten einen Transformator anzuschließen	
ID111	Produkt soll günstig sein.	
ID110	Produkt soll gut sein.	
ID109	Die Lagetoleranz liegt zwischen 0,1 und 0,2 Millimetern.	

*Abbildung 23: Anforderungen inklusive Active Rank*

Anschließend öffnen sich zwei Fenster (siehe Abbildung 24):

- Baumstruktur des Anforderungsnetzwerks
- Leitfaden zur Auswirkungsanalyse

*Abbildung 24: Baumstruktur der vernetzten Anforderungen und Leitfaden zur Auswirkungsanalyse*

Anhand der Baumstruktur des Anforderungsnetzwerks wird aufgezeigt, welche Anforderungen von einer Änderung der ausgewählten Anforderung betroffen sind. Unter Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten wird der Leitfaden zur Auswirkungsanalyse ausgefüllt. Der Leitfaden ist in vier Kategorien unterteilt: Architektur & Design, Implementierung & Integration, Verifizierung & Validierung und Sonstiges. Pro Kategorie werden mehrere Fragen gestellt, z. B. "Müsste die funktionale Struktur überarbeitet werden?" in Architektur & Design. Jede der im Leitfaden aufgeführten Fragen kann entweder mit "Ja", "Nein" oder "Unbekannt" beantwortet werden. Der Grund für die Option "Unbekannt" ist, dass sich nicht immer eindeutig feststellen lässt, ob eine Änderung die diskutierte Auswirkung hat. In diesen Fällen sind für eine eindeutige Antwort weitere Informationen zu den Änderungsmerkmalen notwendig. Je mehr Fragen mit "Ja" beantwortet werden, desto kritischer ist die Auswirkung der Änderung. Um aus den gegebenen Antworten eine repräsentative Kennzahl zu generieren, wird den "Ja"-Antworten ein Wert von eins zugeordnet. "Nein"-Antworten wird der Wert Null zugewiesen. Durch Aufsummieren der Werte wird dann die Kennzahl zur Bewertung der Änderungsauswirkungen berechnet: der Änderungsauswirkungs-Score. Der resultierende Score wird auf den Wertebereich von null bis 100 % normiert. Der Score kann vom Anwender manuell mit einem Schieberegler angepasst werden (siehe Abbildung 25).

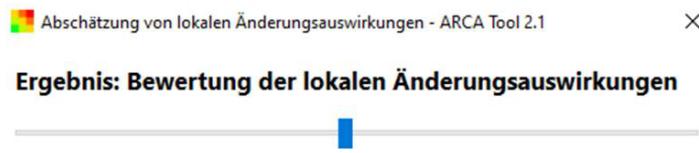


Abbildung 25: Manuelle Bewertung des Scores zur Änderungsauswirkung

### 2.6.2 Berechnung des Active Ranks

Als Datengrundlage für die Berechnung des Active Ranks wird eine Requirements Structure Matrix (RSM) benötigt. In dieser Matrix werden verschiedene Abhängigkeitstypen zwischen Anforderungen abgebildet. Diese Abhängigkeitstypen werden in Gewichte transformiert, die ihrem Propagationsgrad entsprechen. Die Abhängigkeitstypen "requires", "is required by" und "is refined by" propagieren zwangsläufig und werden daher mit einem Wert von eins gewichtet. Nicht-propagierende Abhängigkeitstypen - "none" und "refines" - werden mit dem Wert Null gewichtet.

Ein modifizierter Page Rank wird verwendet, um kritische Anforderungen an die Änderungsfortpflanzung zu identifizieren. Der Page Rank wird als Indikator für die Wahrscheinlichkeit der Änderungspropagation einer Anforderung verwendet. Für die Anwendung des Page Rank-Algorithmus muss die RSM als Graph analysiert werden. Die Anforderungen stellen Knoten dar und die gewichteten Abhängigkeiten stellen die Kanten zwischen den Knoten bzw. die Beziehungen zwischen den Anforderungen dar. Basierend

auf dem Graphen werden die Mengen  $E_i^{in}$  und  $E_i^{out}$  als die Menge der eingehenden und ausgehenden Kanten einer Anforderung  $r_i$  definiert. Eine bestimmte Abhängigkeit zwischen den Anforderungen  $r_i$  und  $r_j$  wird daher als  $v_{ij}$  festgelegt. Für die Gesamtzahl von  $n$  Anforderungen und einen Dämpfungsfaktor  $d$  wird der Requirement Page Rank  $PR(r_i)$  für die Anforderung  $r_i$  berechnet. Der Page Rank ist ein iteratives Verfahren. Es müssen Anfangswerte gewählt werden. In diesem Fall wird allen Knoten das gleiche Gewicht  $1/n$  zugewiesen. Der Wert von  $d$  wird auf 0,85 gesetzt, da er sich in diesem Zusammenhang als robuste Wahl erwiesen hat.

$$PR(r_i) = \frac{1-d}{n} + d \sum_{r_j \in E_i^{in}} \left( \sum_{r_k \in E_j^{out}} \frac{PR(r_j)}{v_{kj}} \right)$$

Neben der Auswirkung geänderter Anforderungen auf eine bestimmte Anforderung muss bei der Analyse der Änderungspropagation auch die Auswirkung einer bestimmten Anforderung auf andere Anforderungen berücksichtigt werden. Für diesen Effekt wird der Active Rank  $AR(r_i)$  einer Anforderung durch Vertauschen der Mengen  $E_i^{in}$  und  $E_i^{out}$  in der obigen Gleichung berechnet. Der Active Rank  $AR(r_i)$  berechnet die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Anforderung  $r_i$  einen Änderungsimpuls im System auslöst. Anforderungen mit einem hohen Aktiven Rank sind hinsichtlich der Änderungsfortpflanzung kritisch. Für die Einstufung als kritische Anforderung wird zunächst ein Schwellenwert von 0,8 festgelegt.

$$AR(r_i) = \frac{1-d}{n} + d \sum_{r_j \in E_i^{out}} \left( \sum_{r_k \in E_j^{in}} \frac{AR_w(r_j)}{v_{kj}} \right)$$

## 2.7 Risikosteuerungsmaßnahmen auswählen

### Voraussetzungen:

- Projekt erstellt (siehe Abschnitt 2.1)
- Anforderungsliste importiert (siehe Abschnitt 2.2)
- Abhängigkeitsanalyse durchgeführt (siehe Abschnitt 2.4)
- Wahrscheinlichkeitsberechnung durchgeführt (siehe Abschnitt 2.5)
- Auswirkungsanalyse durchgeführt (siehe Abschnitt 2.6)

### 2.7.1 Workflow im Software-Werkzeug

Die Auswahl der Risikosteuerungsmaßnahmen wird ermöglicht, wenn der Button „Risikopriorisierung“ betätigt worden ist (siehe Abbildung 26). In dieser Ansicht sind im oberen Bereich die Anforderungen tabellarisch dargestellt. Pro Anforderung sind die jeweiligen Risikokennzahlen – endogene, exogene und Gesamt-Änderungswahrscheinlichkeit

sowie potenzielle Änderungsauswirkungen (Kritikalität) – aufgeführt. Die Risikokennzahlen entsprechen den Werten, die in den vorherigen Schritten (Wahrscheinlichkeitsberechnung und Auswirkungsanalyse) berechnet wurden. Rechts sind jeweils Drop-Down Menüs zur Auswahl von Risikosteuerungsmaßnahmen visualisiert. Unten werden die Anforderungen mit ihren Kennzahlen visualisiert. Auf der X-Achse werden die Änderungsauswirkungen durch Propagation abgebildet. Das entspricht dem normierten Active Rank der Anforderungen, bzw der endogenen Änderungswahrscheinlichkeit. Auf der Y-Achse ist die Änderungswahrscheinlichkeit, bzw. die Gesamt-Änderungswahrscheinlichkeit aufgetragen. Die jeweiligen Anforderungen werden als blauer Punkt visualisiert. Die Änderungsauswirkungen, bzw. die Kritikalität wird als roter Kreis hinter den jeweiligen Anforderungen, deren Kritikalität bewertet wurde, dargestellt. Umso größer der Durchmesser des Kreises ist, umso höher ist die Kritikalität, bzw. die Auswirkungen einer Anforderungsänderung.

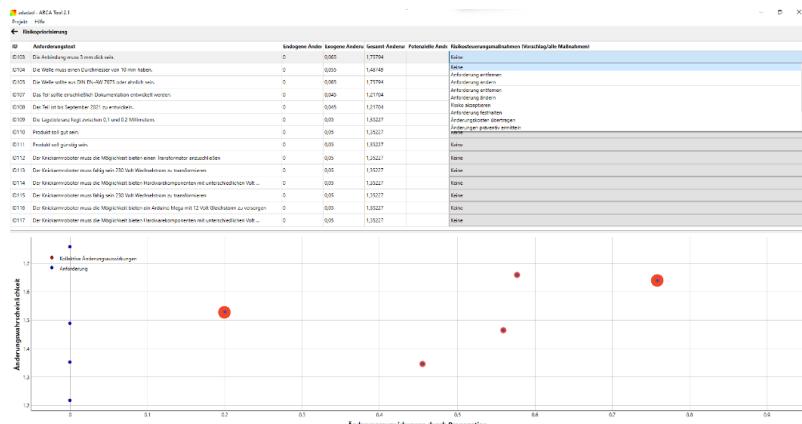


Abbildung 26: Risikoportfolio

### 2.7.2 Auswahl von Risikosteuerungsmaßnahmen

Das Änderungsrisiko einer Anforderung wird charakterisiert durch die Kennzahlen zur Änderungswahrscheinlichkeit und zu Änderungsauswirkungen. In Abhängigkeit des Änderungsrisikos müssen geeignete Risikosteuerungsmaßnahmen ausgewählt werden (siehe Abbildung 27). Je Änderungsrisiko sind verschiedene Typen von Risikosteuerungsmaßnahmen – Risikoakzeptanz, Risikoreduktion, Risikovermeidung und Risikotransfer – geeignet. Durch die Auswahl der Maßnahmen verändern sich die Risikokennzahlen – ange deutet durch die Pfeile in Abbildung 27.

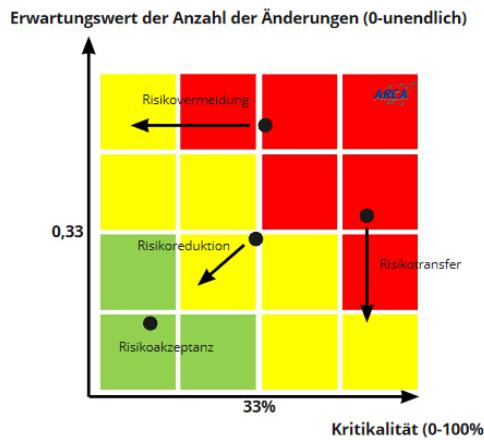


Abbildung 27: Auswahl von Risikosteuerungsmaßnahmen

- Grüner Bereich: niedriges Änderungsrisiko
  - Gesamt-Änderungswahrscheinlichkeit < 33 % und Kritikalität, bzw. endogene Änderungswahrscheinlichkeit < 33 %
- Gelber Bereich: mittleres Änderungsrisiko
  - Gesamt-Änderungswahrscheinlichkeit < 33 % und Kritikalität, bzw. endogene Änderungswahrscheinlichkeit > 33 %
  - 33 % < Gesamt-Änderungswahrscheinlichkeit < 67 % und Kritikalität, bzw. endogene Änderungswahrscheinlichkeit < 67 %
  - Gesamt-Änderungswahrscheinlichkeit > 67 % und Kritikalität, bzw. endogene Änderungswahrscheinlichkeit < 33 %
- Roter Bereich: hohes Änderungsrisiko
  - 33 % < Gesamt-Änderungswahrscheinlichkeit < 67 % und Kritikalität, bzw. endogene Änderungswahrscheinlichkeit < 33 %
  - Gesamt-Änderungswahrscheinlichkeit > 67 % und Kritikalität, bzw. endogene Änderungswahrscheinlichkeit < 33 %

Zur Bestimmung dieser Bereiche werden Schwellwerte appliziert. Beispielsweise wird der „grüne“ Bereich durch die Schwellwerte Kritikalität, bzw. endogene Änderungswahrscheinlichkeit < 33 % und Gesamt-Änderungswahrscheinlichkeit < 33 % begrenzt. Da üblicherweise nicht für alle Anforderungen die Kritikalität bestimmt wird, bzw. der Fragebogen zur Auswirkungsanalyse vom Anwender ausgefüllt wird, wird die endogene Än-

derungswahrscheinlichkeit als Indikator für die Auswirkungen einer Änderung verwendet. Die endogene Änderungswahrscheinlichkeit ist ein Maß für die Konnektivität der Anforderungen und damit wird die Änderungspropagation widergespiegelt.

#### **Auswahl Risikosteuerungsmaßnahmen im Drop-Down Menü**

Die Anforderungen können im Risikoportfolio per Linksklick markiert werden. In der Anforderungs-Tabelle oben werden diese grau hinterlegt. Anschließend können im Drop-Down-Menü Risikosteuerungsmaßnahmen ausgewählt werden (siehe Abbildung 28). Die Elemente im Drop-Down-Menü vor der Trennlinie sind Vorschläge für Risikosteuerungsmaßnahmen auf Basis der Risikokennzahlen der ausgewählten Anforderung. Die Vorschläge sind sämtliche Risikosteuerungsmaßnahmen, die zu dem Typ von Risikosteuerungsmaßnahmen gehören, die für die Charakterisierung des Risikos (siehe Risikobereiche oben) geeignet sind. Nach der Trennlinie sind sämtliche Risikosteuerungsmaßnahmen unabhängig des Typs aufgeführt.

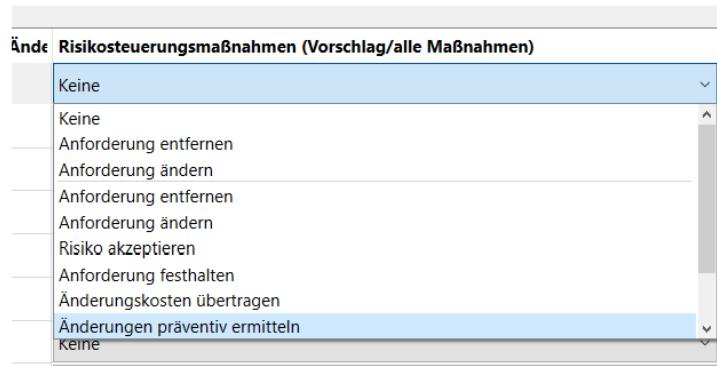


Abbildung 28: Risikosteuerungsmaßnahmen

Eine Erläuterung der Risikosteuerungsmaßnahmen, die im Drop-Down Menü aufgeführt sind, wird unter „Hilfe“ → „Risikosteuerungsmaßnahmen“ dargestellt (siehe Abbildung 29).



Abbildung 29: Erläuterung zu Risikosteuerungsmaßnahmen

## 2.8 Bericht exportieren

**Voraussetzungen:** abhängig davon, welche Informationen im Bericht angezeigt werden sollen. Wenn der Bericht vollständig sein soll, dann müssen sämtliche Schritte des Primär-Workflows durchlaufen werden.

Über die Schaltfläche „Risikobericht exportieren“, wird eine Word-Datei erzeugt, in der die Ergebnisse der Risikoanalyse dargestellt werden (siehe Abbildung 30).

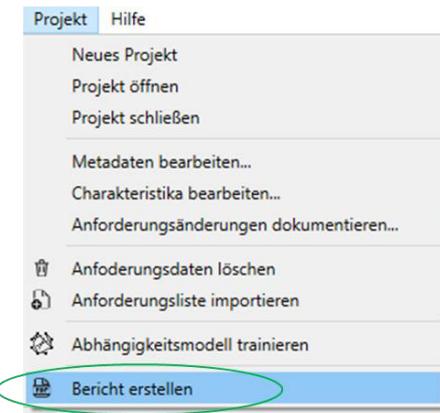


Abbildung 30: Risikobericht erstellen

Der Risikobericht ist tabellarisch aufgebaut und enthält die folgenden Informationen:

- „ID“ der Anforderungen
- „Überschriften“ in der Anforderungsliste
- „Text“ der Anforderungen
- QD: „Anzahl der Q-Defizite“, die mit dem Q-Checker erkannt worden
- AR: „Active Rank“ der Anforderungen (Indikator für Auswirkungen Änderung dieser Anforderung)
- AÄ-EW: „Erwartete Anzahl an Anforderungsänderungen“ der Anforderungen (als Maß für die Änderungswahrscheinlichkeit)
- AÄ-AW: „Kritikalität“ der Anforderungen (wurde in der manuellen Auswirkungsanalyse bestimmt)

- Risiko: farbliche Darstellung, um anzudeuten, welche Anforderungen ein besonders hohes Änderungsrisiko besitzen. Die Kategorien werden analog zu Abschnitt 2.7.2 bestimmt:
  - Grün: niedriges Änderungsrisiko
  - Gelb: mittleres Änderungsrisiko
  - Rot: hohes Änderungsrisiko
- Risiko-SM: Risikosteuerungsmaßnahme, die für diese Anforderung ausgewählt worden ist

## Projekt: Hauptprojekt2

### Beschreibung

#### Exportierte Anforderungsliste

- QD = Anzahl Qualitätsdefizite
- AR = Active-Rank (Abhängigkeitsanalyse)
- AA = Anforderungsänderung
- EW = Eintrittswahrscheinlichkeit einer AA
- AW = Auswirkung einer AA
- SM = Steuerungsmaßnahme

ID	Überschrift	Text	QD	AR	AA-EW	AA-AW	Risiko	Risiko-SM
ID103	1.1 Kapitel	Der Knickarmroboter muss fähig sein 230 Volt Wechselstrom zu transformieren	0	0,0	71,5	0,0	mittel	
ID104	1.1 Kapitel	Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten einen Transformatoren anzuschließen	1	0,64	397,7	50,0	hoch	Anforderung festhalten
ID105	1.1 Kapitel	Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten Hardwarekomponenten mit unterschiedlichen Volt Gleichstrom zu versorgen	1	0,41	316,2	50,0	hoch	Keine

Abbildung 31: Risikobericht

## 2.9 Lerneffekte

### BERT-Klassifikationsmodelle

BERT-Klassifikationsmodelle können durch das ARCA-Tool feinjustiert bzw. anwendungsspezifisch optimiert werden. Durch die Korrektur von Abhängigkeiten innerhalb eines Projektes bzw. in ähnlich gelagerten Projekten werden sogenannte Ground-Truth Daten abgespeichert. Diese Daten repräsentieren manuell korrigierte Anforderungsabhängigkeiten, die in einer Änderungsdatenbank nachhaltig gespeichert werden. Für das

Primär-Workflow: Handhabung des Änderungsrisikos von Anforderungen Seite 35

manuelle Festlegen von Anforderungsabhängigkeiten muss in der Ansicht „Abhängigkeitskarte“ in der Spalte „Abhängigkeitsart“ die entweder auf None oder Dependent gesetzt werden. Nachdem die Auswahl getroffen worden ist, gilt die Abhängigkeitsart als „Ground-Truth“ und wird grün hinterlegt (siehe Abbildung 32).

**Ausgewählte Abhängigkeiten validieren**

Die „Ground-Truth“ Anforderungsabhängigkeiten werden verwendet, um ein neues Abhängigkeitsmodell zu trainieren. Wichtig ist, dass eine möglichst große Anzahl an „Ground-Truth“ Abhängigkeiten vorliegen, um ein Abhängigkeitsmodell mit einer hohen Ergebnisgüte zu trainieren. Es sollten mindestens 100 „Ground-Truth“ Abhängigkeiten festgelegt worden sein.

**Validierung ausgewählter Abhängigkeiten aufheben**

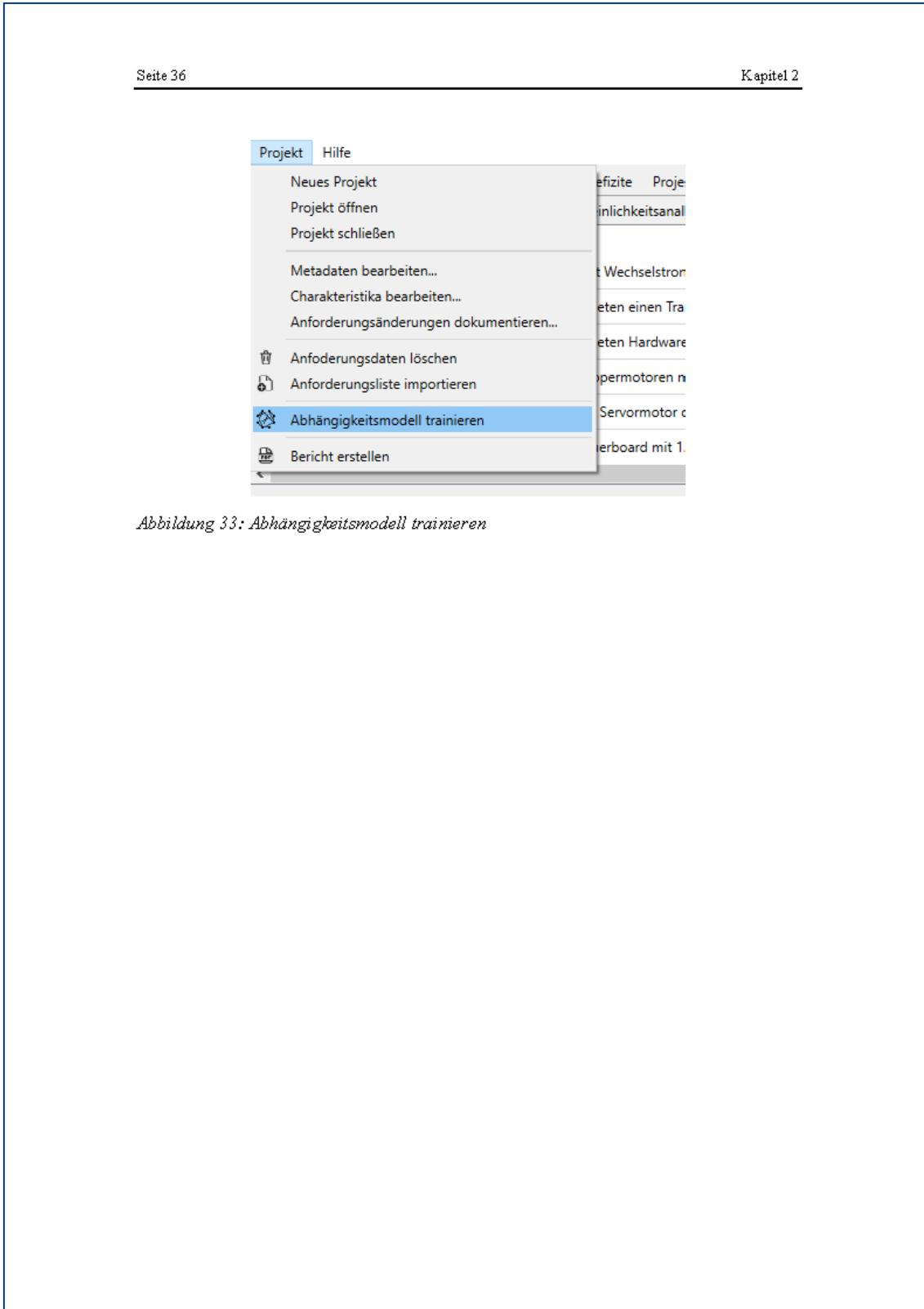
Die Auswahl von „Ground-Truth“ Abhängigkeiten wird aufgehoben. Falls Abhängigkeiten fälschlicherweise als „Ground-Truth“ klassifiziert worden sind, kann die Auswahl aufgehoben werden.

Anforderungsliste	Abhängigkeitskarte	Qualitätsdefizite	Projektdatenbank
<input type="checkbox"/> Q-Check	<input type="checkbox"/> Abhängigkeitsanalyse	<input type="checkbox"/> Wahrscheinlichkeitsanalyse	<input type="checkbox"/> Auswirkungsanalyse
<input type="checkbox"/> Risiken	<input checked="" type="checkbox"/> Ausgewählte Abhängigkeiten validieren	<input type="checkbox"/> Validierung ausgewählter Abhängigkeiten aufheben	
Von-ID (Anforderung)	Von-Text (Anforderung)	Abhängigkeitsart	Zu-ID (Anforderung)
ID104	Der ...	Dependent	ID103
ID103	Der ...	None	ID104
ID103	Der ...	Dependent	ID105
ID103	Der ...	Dependent	ID106
ID104	Der ...	Dependent	ID105
ID104	Der ...	None	ID106
ID105	Der ...	None	ID103

Abbildung 32: Manuelles Festlegen von Abhängigkeiten und Training eines neuen Abhängigkeitsmodells

**Abhängigkeitsmodell trainieren**

Nachdem „Ground-Truth“ Abhängigkeiten definiert worden sind, kann ein neues optimiertes Abhängigkeitsmodell trainiert werden. Hierzu muss der Button „Abhängigkeitsmodell trainieren“ betätigt werden (siehe Abbildung 33).



### 3 Fallspezifische Workflows

In diesem Kapitel werden sekundäre Anwendungsfälle für das ARCA Software-Werkzeug betrachtet (siehe Abbildung 34). Es wird pro Anwendungsfall der Workflow im Software-Werkzeug beschrieben. Hierzu wird auf die einzelnen Schritte des Haupt-Workflows referenziert.

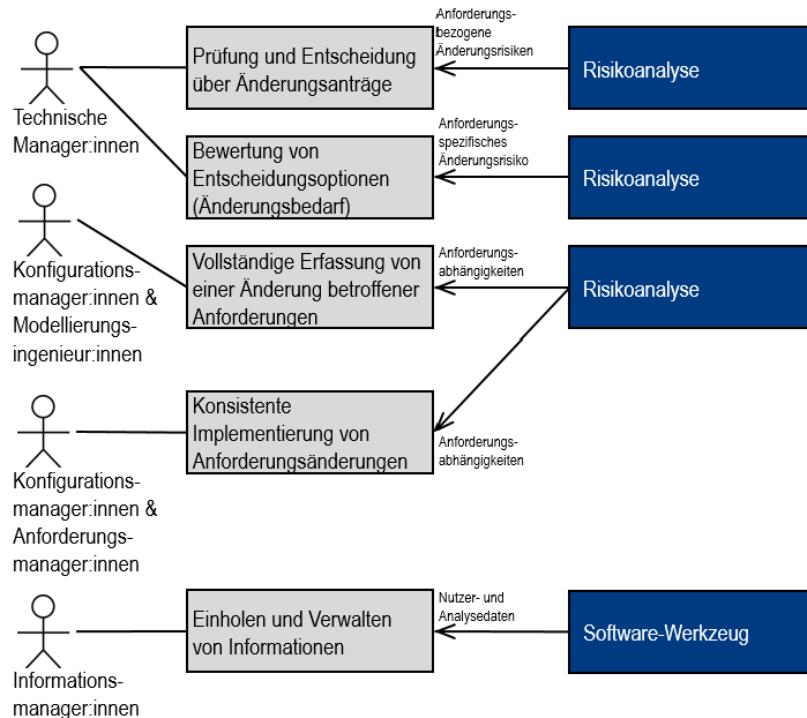


Abbildung 34: Sekundäre Anwendungsfälle für das ARCA Software-Werkzeug

#### Technische Manager:innen: Prüfung und Entscheidung über Änderungsanträge

Ausführen der Schritte von 2.1 bis 2.6

Im Risikoportfolio werden anforderungsbezogene Änderungsrisiken dargestellt; auf dieser Basis kann eine Prüfung und informierte Entscheidung über Änderungsanträge getroffen werden.

**Technische Manager:innen: Bewertung von Entscheidungsoptionen (Änderungsbedarf)***Ausführen der Schritte von 2.1 bis 2.6*

Im Risikoportfolio wird das anforderungsspezifische Änderungsrisiko dargestellt; auf dieser Basis können Entscheidungsoptionen bei einem vorliegenden Änderungsbedarf bewertet werden.

**Konfigurationsmanager:innen & Modellierungsingenieur:innen: Vollständige Erfassung von einer Änderung betroffener Anforderungen***Ausführen der Schritte von 2.1 bis 2.4*

Für eine vollständige Erfassung von einer Änderung betroffener Anforderungen wird eine Kenntnis über Anforderungsabhängigkeiten benötigt. Anforderungsabhängigkeiten werden mit dem Software-Werkzeug detektiert und in der Abhängigkeitskarte dargestellt. Zusätzlich werden in der Auswirkungsanalyse die Anforderungsabhängigkeiten in einer Baumstruktur dargestellt und so die von einer Änderung betroffenen Anforderungen visualisiert.

**Konfigurationsmanager:innen & Anforderungsmanager:innen: Konsistente Implementierung von Anforderungsänderungen***Ausführen der Schritte von 2.1 bis 2.4*

Für eine konsistente Implementierung von Anforderungsänderungen wird eine Kenntnis über Anforderungsabhängigkeiten benötigt. Über die Abhängigkeiten wird möglicher Änderungsbedarf aufgezeigt. Anforderungsabhängigkeiten werden mit dem Software-Werkzeug detektiert und in der Abhängigkeitskarte dargestellt. Zusätzlich werden in der Auswirkungsanalyse die Anforderungsabhängigkeiten in einer Baumstruktur dargestellt und so die von einer Änderung betroffenen Anforderungen visualisiert.

**Informationsmanager:innen: Einholen und Verwalten von Informationen***Ausführen des gesamten Haupt-Workflows*

Relevante Informationen (Nutzer- und Analysedaten) sind beispielsweise:

- Abhängigkeiten zwischen Anforderungen, die in anderen Projekten wiederverwendet werden („Re-Use“)
- Kennzahlen zu Anforderungsänderungen (Anzahl der Anforderungsänderungen etc.)
- Häufigkeit der ausgewählten Risikosteuerungsmaßnahmen (im Verhältnis zu allen Risikosteuerungsmaßnahmen)

## 4 Installation

Unabhängig vom Betriebssystem ist es notwendig, dass Python 3.9 installiert ist.

### Windows 10

Für die Erläuterung der Installation wird angenommen, dass die Version des Tools v400 ist. Die Benennungen ändern sich entsprechend der Versionsnummer.

1. Entpacken der .zip-Datei des ARCA Software-Werkzeugs („ARCA\_v400.zip“).
2. Starten der Anwendung unter "...\\ARCA\_v400\\ARCA.exe"

## 5 Informationsbeschaffung

Um die Risikoberechnung von Anforderungsänderungen mit dem Software-Werkzeug durchführen zu können, müssen verschiedene Daten und Informationen vorliegen. Dazu zählen:

- Anforderungsliste des Entwicklungsprojekts (siehe Abschnitt 2.2)
- Abhängigkeitsmodell (siehe Abschnitt 2.4)
- Änderungshistorie von Referenzprojekten (siehe Abschnitt 2.5)

### 5.1 Anforderungsliste des Entwicklungsprojekts

Damit die Anforderungsliste des Entwicklungsprojekts in das Software-Werkzeug importiert werden kann, muss diese im Excel-Format erstellt sein und gemäß dem ARCA-Excel-Template formatiert werden (siehe Abbildung 35). Das ARCA-Excel-Template befindet sich im Ordner des Software-Werkzeugs unter: "...\\ARCA\_v400\\v2\_Beispielanforderungen\_Deutsch.xlsx"

ID	Text	Status	Kommentar	Testebene	Typ	Initiator
ID101	1 Anforderungen an System A	Freigegeben	Kommentar		Überschrift	4, 5
ID102	1.1 Rechtliche Anforderungen an System A	Freigegeben	Kommentar		Überschrift	4, 6
ID103	Die Anbindung muss 3 mm dick sein.	In Klärung	Kommentar		Anforderung	4, 7
ID104	Die Welle muss einen Durchmesser von 10 mm haben.	In Klärung	Kommentar		Anforderung	4, 8
ID105	Die Welle sollte aus DIN EN-AW 7075 oder ähnlich sein.	In Klärung	Kommentar		Anforderung	4, 9
ID106	1.2 Rechtliche Anforderungen an System A	Freigegeben	Kommentar		Überschrift	4, 10
ID107	Das Teil sollte einschließlich Dokumentation entwickelt werden.	In Klärung	Kommentar		Anforderung	4, 5
ID108	Das Teil ist bis September 2021 zu entwickeln.	In Klärung	Kommentar		Anforderung	4, 5
ID109	Die Lagetoleranz liegt zwischen 0,1 und 0,2 Millimetern.	In Klärung	Kommentar		Anforderung	1, 5, 14
ID110	Produkt soll gut sein.	In Klärung	Kommentar		Anforderung	1, 5, 14
ID111	Produkt soll günstig sein.	In Klärung	Kommentar		Anforderung	1, 5, 14
ID112	Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten einen Transforma	In Klärung	Kommentar		Anforderung	1, 5, 14
ID113	Der Knickarmroboter muss fähig sein 230 Volt Wechselstrom zu trennen:	In Klärung	Kommentar		Anforderung	1, 5, 14
ID114	Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten Hardwarekomponenten zu trennen:	In Klärung	Kommentar		Anforderung	1, 5, 14
ID115	Der Knickarmroboter muss fähig sein 230 Volt Wechselstrom zu trennen:	In Klärung	Kommentar		Anforderung	1, 5, 14
ID116	Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten einen Arduino Mega	In Klärung	Kommentar		Anforderung	1, 5, 14
ID117	Der Knickarmroboter muss die Möglichkeit bieten Hardwarekomponenten zu trennen:	In Klärung	Kommentar		Anforderung	1, 5, 14

Abbildung 35: ARCA-Excel-Template

Im Folgenden werden die Spalten der Excel-Tabelle erläutert:

- Spalte „ID“: ID der Anforderung
- Spalte „Text“: Textuelle Beschreibung der Anforderung
- Spalte „Status“: Status der Anforderung – „Freigegeben“ oder „In Klärung“
- Spalte „Kommentar“: Kommentar zur Anforderung
- Spalte „Testebene“

- Spalte „Typ“: Angabe, ob das Element unter dieser ID eine Anforderung oder eine Überschrift ist. **Es ist wichtig, dass diese Wörter korrekt geschrieben sind, damit die automatisierte Verarbeitung korrekt ausgeführt wird!**
- Spalte „Initiator“: Es muss für jede Überschrift ausgewählt werden, welche Initiatoren für die Änderung der Anforderungen unter dieser Überschrift relevant sind. Die Initiatoren sind für die Berechnung der exogenen Änderungswahrscheinlichkeit relevant (siehe Abschnitt 2.5).

## 5.2 Abhängigkeitsmodell

Für die Durchführung der Abhängigkeitsanalyse (siehe Abschnitt 2.4) wird ein Abhängigkeitsmodell benötigt. Das Abhängigkeitsmodell ist ein trainiertes BERT Klassifikationsmodell. Im Rahmen des ARCA-Projekts wurde ein BERT Klassifikationsmodell erstellt. Dies befindet sich im Ordner des Software-Werkzeugs unter: "...\\ARCA\_v400\\BERT\_ONE.model".

BERT-Klassifikationsmodelle können durch das ARCA-Tool feinjustiert bzw. anwendungsspezifisch optimiert werden. Durch die Korrektur von Abhängigkeiten innerhalb eines Projektes bzw. in ähnlich gelagerten Projekten werden sogenannte Ground Truth Daten abgespeichert. Diese Daten repräsentieren manuell korrigierte Anforderungsabhängigkeiten, die in einer Änderungsdatenbank nachhaltig gespeichert werden. Erreicht die Anzahl an Änderungen die kritische Menge von 100 manuellen Änderungen (Ground Truth), erscheint eine Meldung im Tool und die Funktionalität zum Feinjustieren des Modells wird freigeschaltet. Durch Klicken des Buttons "BERT feinjustieren" wird ein neues Modell trainiert und eine neue Version abgespeichert. Dieses Modell kann nun herangezogen werden und für die Klassifikation genutzt werden.

## 5.3 Änderungshistorie von Referenzprojekten

Zur Durchführung der Wahrscheinlichkeitsanalyse von Anforderungsänderungen (siehe Abschnitt 2.5) werden Änderungsdaten von Referenzprojekten benötigt. Die Änderungsdaten enthalten die Anzahl der Änderungen durch verschiedene Initiatoren sowie Propagationseffekte. Diese Ursachen von Anforderungsänderungen müssen bei der Bearbeitung von Projekten erfasst werden, um eine Datengrundlage für die Wahrscheinlichkeitsanalyse erstellen zu können. Initiatoren verursachen Änderungsimpulse, die zu Anforderungsänderungen führen. Die Initiatoren und deren mögliche Änderungsimpulse sind in Abbildung 36 dargestellt. Diese Abbildung kann genutzt werden, um Ursachen von Anforderungsänderungen nach dem jeweiligen Initiator zu klassifizieren. Beispielsweise sind Anforderungsänderungen, die durch das Inkrafttreten eines neuen Gesetzes verursacht worden sind, durch den Initiator Politik bedingt (siehe Zeile 1 in Abbildung 36). Für Entwicklungsprojekte muss die Anzahl der Änderungen, die durch die jeweiligen Initiatoren verursacht worden sind, dokumentiert werden.

		Quellbereich	Initiator	Änderungsimpuls
Exogen	Intern	Externer Markt	Politik	neues Gesetz tritt in Kraft Änderungen der Normen: Abgas, Schadstoffe, Recycling, etc. u.w.
			Lieferant	Softwareänderungen beim Lieferanten Lieferant ist nicht mehr lieferfähig u.w.
			Mart (+ weitere Stakeholder)	Schwankungen der Marktanforderungen Änderung der Marktnachfrage Reaktion auf Wettbewerber u.w.
		Kunden-organisation	Kunde	Kunde ändert die Funktionalität Kunde entscheidet sich gegen das Produkt u.w.
			Kunden-organisations-struktur	Strategischer Wandel in der Organisationsstruktur Ansprechpartner beim Kunden ändert sich u.w.
	Extern	Projektvision	Geschäfts-bereich	Strategische Veränderungen innerhalb der Organisationsstruktur Budgetengpässe oder -überschreitungen u.w.
			Technologie	hoher Innovationsgrad des Entwicklungsprojektes Einsatz neuer Technologien u.w.
			Wissen	Weiterbildungen der Mitarbeiter kritisches Know-How wandert ab
		Anforderungs-spezifikation	Anforderungs-manager	besseres Verständnis der Stakeholder Identifizierung einer fehlerhaften Anforderung u.w.
			Projektleiter	schlechte Kommunikation zwischen den Disziplinen fehlerhafte Daten/Dokumente zwischen den Disziplinen u.w.
			Entwickler	besseres Verständnis der Kundenanforderungen zur Lösungsfindung Erfahrung der Entwickler u.w.
	Lösung	Software-Entwicklung		Erfahrung der Entwickler Fehlerhafte Datenumvermittlung aus anderen Disziplinen u.w.
			Hardware-Entwicklung	Erfahrung der Entwickler Fehlerhafte Datenumvermittlung aus anderen Disziplinen u.w.
		Produktion		Veränderung / Optimierung der Prozesse Neue Werkzeugtechnik / Technologien u.w.

Abbildung 36: Initiatoren und mögliche Änderungsimpulse

Neben exogenen Änderungsursachen – Änderungsimpulse durch Initiatoren – müssen endogene Änderungsursachen erfasst werden. Das sind Änderungen, die aufgrund von Propagationseffekten einer Anforderungsänderung verursacht worden sind. Wenn sich beispielsweise eine Anforderung aufgrund exogener Ursachen ändert und aufgrund der Vernetzung der Anforderungen (Anforderungsabhängigkeiten) diese Änderung propagiert und weitere Änderungen nach sich zieht. Die Gesamtheit der zu erfassenden Änderungsdaten sind in Abbildung 37 dargestellt.

Informationsbeschaffung Seite 43

 Anforderungsänderungen dokumentieren - ARCA Tool 2.1 X

**Metriken**

Anzahl der Änderungen durch Propagation <input type="text" value="720"/>	Anzahl der Änderungen durch Initiator: Wissen <input type="text" value="20"/>
Anzahl der Änderungen durch Initiator: Politik <input type="text" value="10"/>	Anzahl der Änderungen durch Initiator: Anforderungsmanager <input type="text" value="30"/>
Anzahl der Änderungen durch Initiator: Lieferant <input type="text" value="20"/>	Anzahl der Änderungen durch Initiator: Projektleiter <input type="text" value="20"/>
Anzahl der Änderungen durch Initiator: Markt <input type="text" value="10"/>	Anzahl der Änderungen durch Initiator: Entwickler <input type="text" value="20"/>
Anzahl der Änderungen durch Initiator: Kunde <input type="text" value="35"/>	Anzahl der Änderungen durch Initiator: Software-Entwicklung <input type="text" value="10"/>
Anzahl der Änderungen durch Initiator: Kundenorganisationsstruktur <input type="text" value="10"/>	Anzahl der Änderungen durch Initiator: Hardware-Entwicklung <input type="text" value="20"/>
Anzahl der Änderungen durch Initiator: Geschäftsbereich <input type="text" value="15"/>	Anzahl der Änderungen durch Initiator: Produktion <input type="text" value="30"/>
Anzahl der Änderungen durch Initiator: Technologie <input type="text" value="30"/>	

*Abbildung 37: Zu erfassende Änderungsdaten*

Für die Entwicklung komplexer technischer Systeme existieren in Einzelfällen in der Literatur dokumentierte Änderungshistorien. Auf Basis dieser Änderungshistorien wurde ein Referenzprojekt für das ARCA-Software-Werkzeug erstellt. Dieses kann als Default-Referenzprojekt verwendet werden, siehe: "...\\ARCA\_v400\\beispiel-referenzprojekt-1.db".

## 6 Fehlersuche

In diesem Abschnitt werden typische Probleme und deren Lösungen abgebildet.

**Frage:** „Der Button Abhängigkeitsanalyse ist ausgegraut. Wieso kann diese nicht ausgeführt werden?“

**Antwort:** Zur Durchführung der Abhängigkeitsanalyse muss ein Abhängigkeitsmodell importiert werden (siehe Abschnitt 2.4). Nach dem Import des Abhängigkeitsmodells kann der Button gedrückt werden.

## 7 Glossar

### Änderungsimpuls

Änderungsimpulse verursachen Anforderungsänderungen. Unterschieden werden endogene Änderungsimpulse (Ursache sind Anforderungsänderungen) und exogene Änderungsimpulse (Ursache sind Initiatoren). Beispiel: „Das Inkrafttreten neuer oder veränderter Gesetze“ ist ein exogener Änderungsimpuls.

### Erwartungswert

Der Erwartungswert einer Zufallsvariable beschreibt die Zahl, die die Zufallsvariable im Mittel annimmt. Beispiel: Nachdem (annahrend) unendlich oft gewürfelt wurde, nimmt die Häufigkeitsverteilung der Würfelergebnisse (annahrend) eine Gleichverteilung an. Der Erwartungswert beträgt in diesem Fall  $E_{Würfel} = \frac{1+2+3+4+5+6}{6} = 3,5$ .

### Initiator

Initiatoren verursachen exogene Änderungsimpulse. Beispielsweise kann der exogene Änderungsimpuls „Das Inkrafttreten neuer oder veränderter Gesetze“ durch den Initiator „Politik“ verursacht werden.

### Page Rank

Der PageRank-Algorithmus ist eine spezielle Methode, die Linkpopularität einer Seite bzw. eines Dokumentes festzulegen. Im Kontext des ARCA-Projekts entsprechen „Seiten bzw. Dokumente“ Anforderungen und „Links“ Anforderungsabhängigkeiten.

### Projekt-Charakteristika

Merkmale, die ein Projekt charakterisieren. In diesem sind Kontext sind Beispiele für Projekt-Charakteristika der Innovationsgrad des Projekts oder die Komplexität des zu entwickelnden Systems.

### Referenzprojekt

Ein Projekt wird als Referenzprojekt des betrachteten Projekts bezeichnet, wenn die beiden Projekte eine hohe Ähnlichkeit aufweisen. Die Höhe der Ähnlichkeit wird aufgrund der Ausprägung verschiedener Projekt-Charakteristika bestimmt.

### Requirements Structure Matrix (RSM)

In einer Requirements Structure Matrix (RSM) werden Abhängigkeiten von Anforderungen in Matrix-Form dargestellt. Zeilen und Spalten entsprechen den jeweiligen Anforderungen. Elemente in den Zellen repräsentieren die Anforderungsabhängigkeit zwischen den Anforderungen in den Zeilen bzw. Spalten des Elements.

### Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion ist ein Hilfsmittel zur Beschreibung einer stetigen Wahrscheinlichkeitsverteilung.

## 8 Literaturverzeichnis

- [DKL06] Deubzer, F.; Kreimeyer, M.; Lindemann, U. (2006): Exploring Strategies in Change Management. Current Status and Activity Benchmark. In: D. Marjanovic (Hg.): Proceedings DESIGN 2006, the 9th International Design Conference. 9th International Design Conference. Dubrovnik, Croatia. Design Society (Design Conference Proceedings, 9), S. 815–822.
- [FHS+15] Fernandes, João; Henriques, Elsa; Silva, Arlindo; Moss, Michael A. (2015): Requirements change in complex technical systems. An empirical study of root causes. In: Res Eng Design 26 (1), S. 37–55. DOI: 10.1007/s00163-014-0183-7.
- [GO19] Gräßler, Iris; Oleff, Christian (2019): Risikoorientierte Analyse und Handhabung von Anforderungsänderungen. In: Dieter Krause, Kristin Paetzold und Sandro Wartzack (Hg.): Design for X. Beiträge zum 30. DFX-Symposium. DFX Symposium. Hamburg, 18./20. September 2019. 1. Aufl. Hamburg: TuTech Innovation.
- [GWB+09] Giffin, Monica; Weck, Olivier de; Bouanova, Gergana; Keller, Rene; Eckert, Claudia; Clarkson, P. John (2009): Change Propagation Analysis in Complex Technical Systems. In: J. Mech. Des. 131 (8), S. 81001. DOI: 10.1115/1.3149847.
- [HCC13] Hamraz, Bahram; Caldwell, Nicholas H. M.; Clarkson, P. John (2013a): A Holistic Categorization Framework for Literature on Engineering Change Management. In: Syst. Engin. 16 (4), S. 473–505. DOI: 10.1002/sys.21244.
- [HVM18] Hein, Htet; Voris, Nathaniel; Morkos, Beshoy (2018): Predicting requirement change propagation through investigation of physical and functional domains. In: Research in Engineering Design 29 (2), S. 309–328.
- [JLR18] Jayatilleke, Shalinka; Lai, Richard (2018): A systematic review of requirements change management. In: Information and Software Technology 93, S. 163–185. DOI: 10.1016/j.infsof.2017.09.004.
- [KCC12] Koh, Y.; Caldwell, M.; Clarkson, John (2012): A method to assess the effects of engineering change propagation. In: Research in Engineering Design 23 (4), S. 329–351.
- [Kur18] Kurrale, Armin (2018): Durchgängige Dokumentation von verteilten Zielsystemen in der Produktentwicklung durch Verwendung semantischer Metainformationen am Beispiel Connected Car. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. Institut für Produktentwicklung.
- [Lin98] Lindemann, Udo (1998): Integriertes Änderungsmanagement. Softcover reprint of the hardcover 1st ed. 1998. Berlin: Springer.
- [Neu17] Neumann, Marc (2016): Ein modellbasierter Ansatz zur risikoorientierten Entwicklung innovativer Produkte. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum, Bochum

- [PG20] Pottebaum, J.; Gräßler, I. (2020): Informationsqualität in der Produktentwicklung. Modellbasiertes Systems Engineering mit expliziter Berücksichtigung von Unsicherheit. In: Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe (7), S. 76–83.
- [Sch16] Scherer, Helmut (2016): Modellbasierte Methoden zur Modellierung des Zielsystems und des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs zur Unterstützung der Serienentwicklung von Baukästen am Beispiel von Hybrid-Triebstrangsystemen = Model Based Methods for the Modeling of the System of Objectives and the Correlation between Form and Function to support the Series Development of Modular Systems Using the Example of Hybrid Powertrains.
- [SHB19] Song, Young-Woo; Herzog, Michael; Bender, Beate (2019): Understanding the Initial Requirements Definition in Early Design Phases. In: Proc. Int. Conf. Eng. Des. 1 (1), S. 3751–3760. DOI: 10.1017/dsi.2019.382.
- [The95] The Standish Group (1995): The CHAOS report. Hg. v. The Standish Group. The Standish Group. West Yarmouth, USA.
- [The11] The Standish Group (2011): Chaos Manifesto 2011. Hg. v. The Standish Group International. West Yarmouth, USA.
- [The17] The Standish Group (2017): Chaos Manifesto 2018. Hg. v. The Standish Group International. West Yarmouth, USA.
- [Wic17] Wickel, Martina Carolina (2017): Änderungen besser managen. Dissertation. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Produktentwicklung.



## A8 Referenzprozess

### A8.1 Leitfragen für das unternehmensspezifische Tailoring

#### Potenzialanalyse

Referenzmodelle als generische Referenz für die Beantwortung der Leitfragen siehe Anhang A8.2.

#### Aktivität: Bewertung von Effizienzpotenzialen in der Entwicklung

- Leitfrage: Welche Entwicklungsaktivitäten je Anwendungsszenario werden in unserem Unternehmen derzeit umgesetzt oder sollen zukünftig umgesetzt werden?  
Ergebnis: Auswahl relevanter Entwicklungsaktivitäten
- Leitfrage: Wie effizient sind wir bei der Durchführung der ausgewählten Entwicklungsaktivitäten und wo sehen wir Potenzial zur Effizienzsteigerung?  
Ergebnis: Erwartete Effizienzpotenziale je Entwicklungsaktivität
- Leitfrage: Anhand welcher Leistungskennwerte können wir den Umfang der Potenziale einschätzen und deren Realisierung überprüfen?  
Ergebnis: Leistungskennwerte je Effizienzpotenzial

#### Aktivität: Abschätzung des Beitrags zur Einhaltung regulatorischer Vorgaben

- Leitfrage: Welche regulatorischen Vorgaben können wir durch die Methodik-Anwendung effizienter einhalten? Welche regulatorischen Vorgaben können wir durch die Methodik-Anwendung zusätzlich einhalten?

Ergebnis: Potenziale zur Einhaltung regulatorischer Vorgaben

#### Inhaltliche Einordnung

Referenzmodelle als generische Referenz für die Beantwortung der Leitfragen siehe Anhang A8.3.

#### Aktivität: Identifikation relevanter Entwicklungsprozesse

- Leitfrage: Welche Entwicklungsaktivitäten sind zur Realisierung der zuvor definierten Potenziale anzupassen oder zu erweitern?  
Ergebnis: Integration der Methodik-Anwendung in die Entwicklungsprozesse

**Aktivität: Verankerung im Entwicklungsvorgehen**

- Leitfrage: Wie ordnen wir die Methodik-Anwendung in unser unternehmensspezifisches Entwicklungsvorgehen /-prozess ein?

Ergebnis: Integration der Methodik-Anwendung in das Entwicklungsvorgehen

**Projektspezifische Einordnung**

Referenzmodelle als generische Referenz für die Beantwortung der Leitfragen siehe Anhang A8.4.

**Aktivität: Einbettung in Aufgabenbereiche des Projektmanagements**

- Leitfrage: Bei welchen Projektmanagement-Aufgaben möchten wir die Methodik anwenden?

Ergebnis: Inhaltliche Integration der Methodik-Anwendung in das Projektmanagement

- Leitfrage: In welchen Lebenszyklusphasen / Abschnitten des Projekts möchten wir die Methodik anwenden?

Ergebnis: Zeitliche Integration der Methodik-Anwendung in das Entwicklungsvorgehen

**Aktivität: Zuordnung von Verantwortlichkeiten und Aufgaben**

- Leitfrage: Wer aus dem Entwicklungsteam wendet die Methodik an und für was?

Ergebnis: Zugewiesene Verantwortlichkeiten für die Methodik-Anwendung

**A8.2 Referenzmodelle zur Potenzialanalyse****A8.2.1 Repräsentative Anwendungsszenarien**

Anwendungsszenarien sind angelehnt an das Use-Case Diagramm der UML Notation und bilden rollenspezifische Aufgaben ab. Dabei werden ausschließlich Aufgaben aufgeführt, bei denen die Informationen aus der Methodik-Anwendung unmittelbar verwertet werden können. Differenziert werden die Anwendungsszenarien organisatorisch anhand der Abschnitte im Projektmanagement, um eine direkte Übertragbarkeit auf Entwicklungsprojekte zu ermöglichen. Innerhalb der Anwendungsszenarien werden den SE-Rollen die relevanten SE-Prozesse und spezifischen Prozessaktivitäten als Aufgaben zugeordnet. Nutzenpotenziale werden dargelegt, indem die Prozessaktivitäten mit verwertbaren Informationen aus der Methodik-Anwendung verknüpft werden.

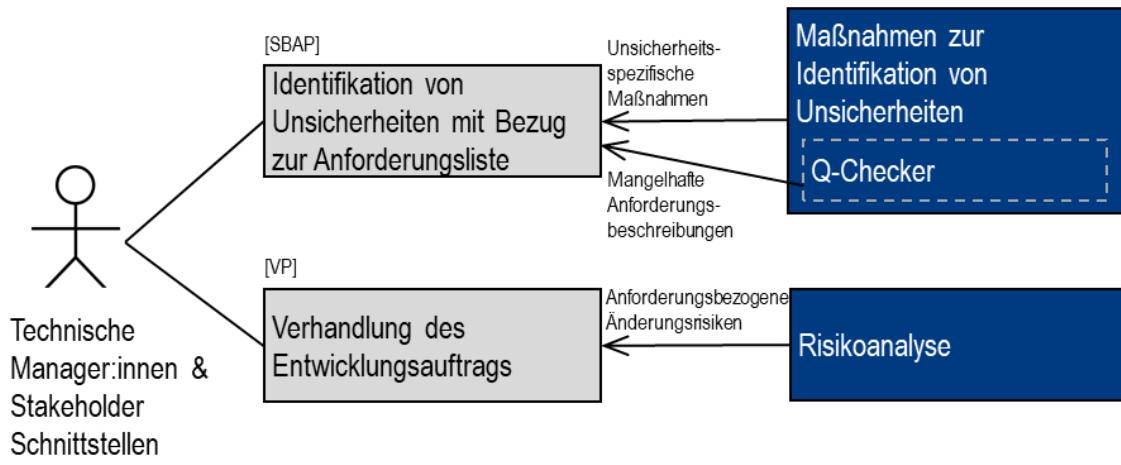
## Anwendungsszenario 1: Projektinitiierung

Das erste Anwendungsszenario der Methodik liegt in der Projektinitiierungsphase (vgl. Abbildung A 8-49). Zur Ausgestaltung des Entwicklungsauftrags sollten Unsicherheiten mit Bezug zu den Entwicklungszielen (insb. Stakeholderanforderungen) erkannt und wenn möglich reduziert werden. Ebenso sind aus verbleibenden Unsicherheiten resultierende Entwicklungsrisiken hinsichtlich Zeit- und Kostenbedarf abzuschätzen, um wirtschaftliche Auftragsbedingungen zu verhandeln. Beides geschieht im Zusammenspiel von Technischen Manager:innen und Stakeholder Schnittstellen Manager:innen.

Für die **Identifikation von Unsicherheiten mit Bezug zur Anforderungsliste** kann die Übersicht unsicherheitsspezifischer Maßnahmen genutzt werden. Zudem bietet die Funktionalität zur Qualitätsprüfung (Q-Checker) die Möglichkeit, Qualitätsmängel in der Anforderungsbeschreibung aufzuzeigen.

Zur **Verhandlung der initialen Auftragsbedingungen** können anhand der Risikoanalyse die Änderungsrisiken abgeschätzt und eingepreist werden. Sowohl die übergreifende Risikobetrachtung des gesamten Anforderungssets als auch die anforderungsspezifische Risikobewertung unterstützen die Festlegung von Zeit- und Kostenzuschlägen für eine wirtschaftliche Zusammenarbeit.

### Anwendungsszenario 1: Projektinitiierung



#### Legende

SBAP = Direkter Bezug zu Aktivität(en) im Stakeholderbedürfnis und -anforderungsdefinitionsprozess  
 VP = Direkter Bezug zu Aktivität(en) im Verhandlungsprozess

Abbildung A 8-49: Anwendungsszenario der Methodik in der Projektinitiierung

## Anwendungsszenario 2: Projektplanung

Das zweite Anwendungsszenario der Methodik liegt in der Projektplanungsphase (vgl. Abbildung A 8-50). Für die **Definition des Projektplans** können von Technischen Manager:innen die Ergebnisse der Risikoanalyse zur Festlegung von Zeit- und Kostenvorgaben sowie einer auf das Änderungsrisiko abgestimmten Reihenfolge der Entwicklungaktivitäten genutzt werden. Dabei ist primär das anforderungsspezifische Risiko mit den Detailinformationen zu exogener und endogener Änderungswahrscheinlichkeit sowie kollektiver Änderungsauswirkungen verwertbar. Beispielsweise kann mit dem Ziel einer Vorverlagerung von Änderungen zunächst die Entwicklung von Lösungselementen für risikokritische Anforderungen geplant werden.

Die **Definition eines projektspezifischen Risikomanagement-Prozesses** umfasst auch das Risikomanagement von Anforderungsänderungen. Hier kann der Referenzprozess mit den in diesem Kapitel beschriebenen Anwendungsszenarien eine Hilfestellung bieten, um die Anwendungspotenziale der Methodik in diesem Teilbereich des Risikomanagements vollumfänglich auszuschöpfen. Durchgeführt wird diese Aktivität im Zusammenspiel zwischen Technischen Manager:innen und Prozessverantwortlichen.

Zur Erarbeitung einer normgerechten Anforderungsbeschreibung ist unter anderem die **Herstellung und Verwaltung von Nachverfolgbarkeit zwischen Anforderungen** erforderlich. Diese beruht auf Anforderungsabhängigkeiten, die im Rahmen der Risikoanalyse automatisiert ermittelt werden. Lediglich eine manuelle Prüfung der Ergebnisse zur Absicherung der rechtsgültigen Ergebnisqualität ist durch Anforderungsmanager:innen vorzunehmen.

## Anwendungsszenario 2: Projektplanung

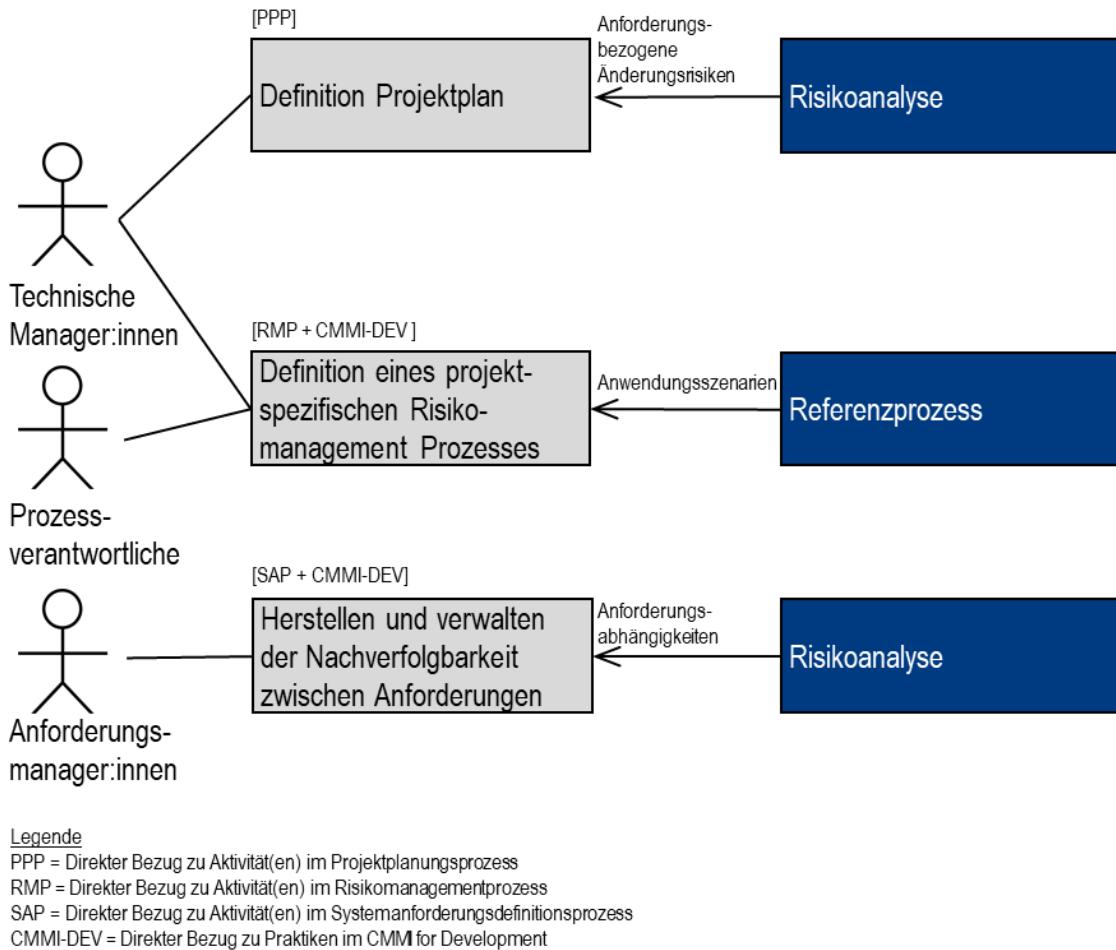


Abbildung A 8-50: Anwendungsszenario der Methodik in der Projektplanung

## Anwendungsszenario 3: Projektumsetzung und Projektcontrolling

Das dritte Anwendungsszenario der Methodik ist das begleitende Risikomanagement in den Abschnitten Projektumsetzung und Projektcontrolling (vgl. Abbildung A 8-51). Risikomanagement-Aktivitäten werden von Technischen Manager:innen und Leiter:innen umgesetzt und durch Fachexpert:innen aus den risikobehafteten Entwicklungsbereichen unterstützt – in diesem Fall den Anforderungsmanager:innen. Die Methodik unterstützt im Kontext von Anforderungsänderungen alle vier entwicklungsbegleitenden Aktivitäten des Risikomanagement-Prozesses nach INCOSE. Diese sind auch im CMMI-DEV gefordert und lauten: Erstellen und Verwalten von anforderungsspezifischen Risikoprofilen, Risikoanalyse für Anforderungen und Anforderungssets, Auswahl von Risikosteuerungsmaßnahmen sowie Überwachung von Risiken und deren Handhabung. Darüber hinaus wird der Entscheidungsmanagementprozess bei der Bewertung von Entscheidungsoptionen unterstützt, der unmittelbar mit der Auswahl von Risikosteuerungsmaßnahmen verbunden ist.

Das **Erstellen und Verwalten von anforderungsspezifischen Risikoprofilen** erfordert zunächst die Identifikation der zugrundeliegenden Unsicherheiten. Dazu können übereinstimmend mit Anwendungsszenario 1 die Maßnahmen zur Identifikation von Unsicherheiten verwendet werden. Darüber hinaus generiert die Anwendung der Risikoanalyse wesentliche Informationsinhalte eines Risikoprofils: den Risikokontext, die Eintrittswahrscheinlichkeit, die Auswirkungen und die Risikopriorität. Die Informationen aus der Risikosteuerung vervollständigen das Risikoprofil um geeignete Risikosteuerungsmaßnahmen sowie den Status einer Risikosteuerungsmaßnahme. Die Methodik deckt damit alle erforderlichen Informationen eines Risikoprofils [WRF15, S. 115] ab und kann bei kontinuierlicher Anwendung auch die Verwaltung des Risikoprofils unterstützen. Durch den Fokus auf frühe Entwicklungsphasen sind mit zunehmendem Projektfortschritt zusätzliche Maßnahmen zur Informationsbeschaffung vorzusehen, um eine ausreichende Qualität der Bewertungsgrundlage sicherzustellen.

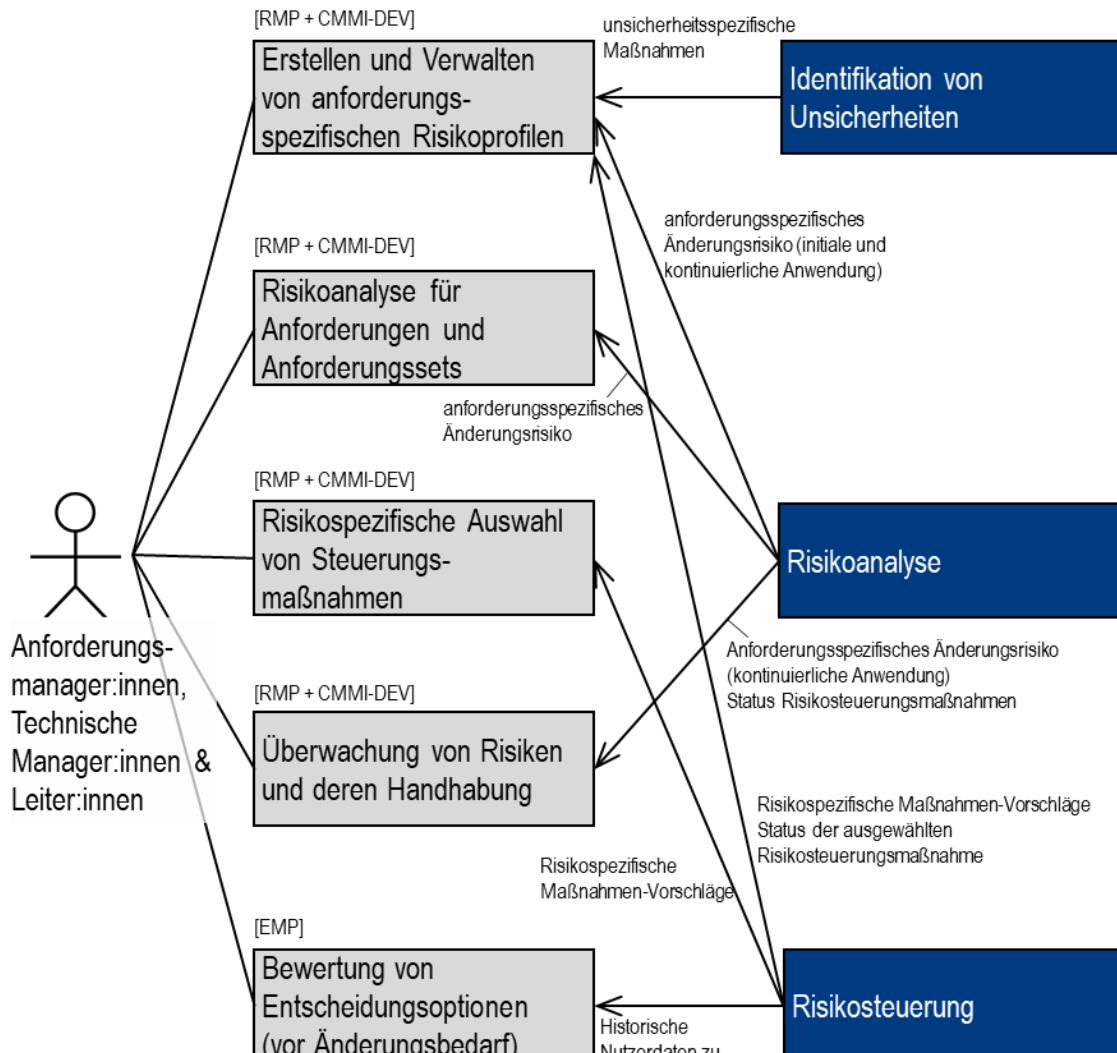
Auch für die **Risikoanalyse für Anforderungen und Anforderungssets** hinsichtlich Änderungen werden in den frühen Entwicklungsphasen alle erforderlichen Informationen durch die Risikoanalyse erzeugt. Lediglich die Zuordnung von Verantwortlichkeiten wird nicht durch die Methodik unterstützt und ist im konventionellen Projektmanagement zu dokumentieren.

Die risikospezifische **Auswahl von Risikosteuerungsmaßnahmen** ist Teil der Risikosteuerung und wird initiiert, sobald Änderungsrisiken von Anforderungen proaktiv verringert werden sollen. Die Methodik bietet dafür eine Übersicht kontextspezifischer Risikosteuerungsmaßnahmen und einen Empfehlungsmechanismus an.

Die **Überwachung von Risiken und deren Handhabung** wird bei kontinuierlicher Anwendung der Risikoanalyse und durch eine Funktionalität zur Statusüberwachung von Maßnahmen im Software-Werkzeug ermöglicht.

Die Auswahl einer Risikosteuerungsmaßnahme setzt die **Bewertung von Entscheidungsoptionen** voraus. Dies erfolgt durch Nutzer:innen, wird aber durch die Bereitstellung historischer Nutzungsdaten charakteristisch ähnlicher Projekte und Risikoausprägungen unterstützt.

## Anwendungsszenario 3: Projektumsetzung und Projektcontrolling



*Abbildung A 8-51: Anwendungsszenario der Methodik in der Projektumsetzung und dem Projektcontrolling*

## **Sekundäres Anwendungsszenario 4: Projektumsetzung und Projektcontrolling**

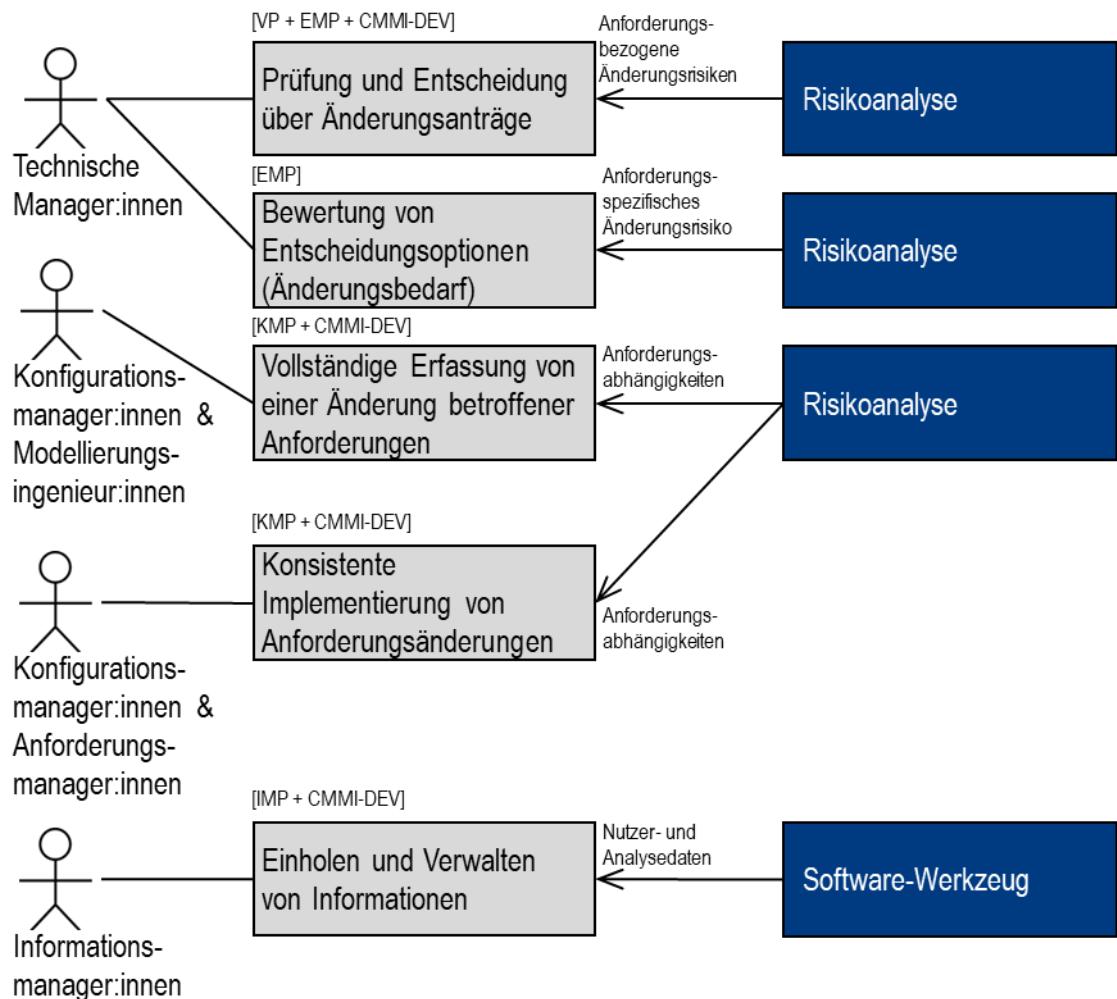
Sekundäre Anwendungsbereiche der Methodik existieren in den Abschnitten Projektumsetzung und -controlling (vgl. Abbildung A 8-52). Technische Manager:innen können die Ergebnisse der Risikoanalyse auch für einen reaktiven Umgang mit Änderungsanträgen verwenden. Zur **Prüfung und Entscheidung über Änderungsanträge** sind die erwarteten Auswirkungen sowie die Anforderungsabhängigkeiten verwertbar. Anhand der Risikoanalyse kann auch die **Bewertung von Entscheidungsoptionen** zur Implementierung eines vorliegenden Änderungsbedarfs vorgenommen werden. Beide Aktivitäten sind bedeutsam im reaktiven Änderungsmanagement von Anforderungen.

Falls ein Änderungsantrag akzeptiert wurde, können Konfigurationsmanager:innen und Modellierungsingenieur:innen anhand der Anforderungsabhängigkeiten eine **vollständige Erfassung der von einer Änderung betroffenen Anforderungen** vornehmen. Das ist beispielsweise für ein verbessertes Systemverständnis oder die Generierung eines vollständigen und konsistenten Systemmodells wichtig.

Konfigurationsmanager:innen und Anforderungsmanager:innen können mit den Anforderungsabhängigkeiten zudem eine **konsistente Implementierung von Anforderungsänderungen** sicherstellen. Nachträgliche Änderungen zur Korrektur von Inkonsistenzen im Anforderungsset und den daraus abgeleiteten Lösungselementen lassen sich so vermeiden.

Abschließend ist die grundsätzliche Erfassung und Dokumentation von **Nutzer- und Analysedaten** im Software-Werkzeug für Informationsmanager:innen nützlich, um bisher undokumentierte Aktivitäten und implizites Wissen zu erfassen. Ebenso dient die Datenerfassung zur Erzeugung strukturierter Datensätze, die zur Überprüfung und Verbesserung der Methodik-Ergebnisgüte oder dem Anlernen neuer Methoden verwendet werden können (z. B. bei Verwendung von künstlicher Intelligenz).

### Sekundäres Anwendungsszenario: Projektumsetzung und -controlling



#### Legende

- EMP = Direkter Bezug zu Aktivität(en) im Entscheidungsmanagementprozess
- KMP = Direkter Bezug zu Aktivität(en) im Konfigurationsmanagementprozess
- IMP = Direkter Bezug zu Aktivität(en) im Informationsmanagementprozess
- VP = Direkter Bezug zu Aktivität(en) im Verhandlungsprozess
- CMMI-DEV = Direkter Bezug zu Praktiken im CMM for Development

*Abbildung A 8-52: Sekundäres Anwendungsszenario der Methodik in der Projektumsetzung und dem Projektcontrolling*

### A8.2.2 Exemplarische Leistungskennwerte

Die nachfolgende Auflistung von Leistungskennwerten dient als generische Referenz zur Ableitung situations- und kontextspezifischer Leistungskennwerte. Es ist zu beachten, dass Leistungskennwerte vielfach nicht unabhängig voneinander sind. Veränderungen können aufgrund der indirekten Wirkung des Risikomanagements nicht unmittelbar mit der Methodik-Anwendung verknüpft werden, liefern jedoch Indizien. Im Zusammenspiel der Kennwerte können Aussagen über vorherrschende Effizienzpotenziale und bei retrospektiver Betrachtung die Wirkung der Methodik-Anwendung getroffen werden.

Exemplarische Leistungskennwerte zur Bewertung des **Projekterfolgs** nach [Bac99]:

- Erfolg des Produkts:
- Erfüllung der strategischen Ziele der projektverantwortlichen Organisation (Projektziel)
- Befriedigung der Nutzerbedürfnisse (Projektzweck)
- Befriedigung der Stakeholderbedürfnisse mit Produktbezug (Projektzweck)

Der Projekterfolg ist abhängig von Kontextfaktoren und unterliegt keiner allgemein anerkannten Definition. Alternative Kennwertesysteme zum Projekterfolg können [GB11, S. 11 ff.] entnommen werden.

Exemplarische Leistungskennwerte zur Bewertung der **Effizienz in Produktentwicklungsprojekten** nach [GMT16, S. 358 ff.]:

- Kosten: Kostenstreue, Kostenabweichungen, Häufigkeit von Kostenüberschreitungen
- Zeit: Durchschnittliche Produktentwicklungszeit, Termintreue
- Qualität: First-Pass-Yield, Anzahl der Änderungen vor / nach Serienanlauf
- Projektfortschritt: Zahl der abgeschlossenen Arbeitspakete, Anteil erreichter Meilensteine

Auf Projektebene ermöglicht ein systematischer Vergleich von Leistungskennwerten der Entwicklungsprojekte vor und nach der Einführung der Methodik Aussagen zu realisierten Effizienzpotenzialen. Dabei ist auf vergleichbare Projektcharakteristika und eine ausreichend große Datenbasis zu achten, um beispielsweise technologie- oder organisationsbedingte Verzerrungen zu vermeiden.

Exemplarische Leistungskennwerte zur Bewertung der **Effizienz im Änderungsmanagement**:

- Anzahl Änderungsanträge (Change Request): Eine sinkende durchschnittliche Anzahl an Änderungsanträgen kann auf die Wirksamkeit von Risikosteuerungsmaßnahmen mit präventiver Wirkung hindeuten.
- Ursachen von Änderungsanträgen (Fehlerkorrektur vs. Verbesserung): Ein sinkender durchschnittlicher Anteil an fehlerbedingten Änderungsanträgen kann auf die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Unsicherheitsidentifikation hindeuten.
- Akzeptanzquote von Änderungsanträgen: Eine abnehmende Akzeptanzquote von Änderungsanträgen kann einerseits auf eine informationsgetriebene Entscheidungsfindung und andererseits auf einen vergrößerten Handlungsspielraum im Umgang mit Änderungen durch Risikomanagement hindeuten
- Personaleinsatzquote: Ein sinkender durchschnittlicher Anteil an Personalkosten an den Gesamtkosten kann auf eine Reduktion von Ineffizienzen hindeuten.
- Anzahl an Reklamationen / Nacharbeiten nach Serienanlauf oder Produkteinführung: Eine sinkende durchschnittliche Anzahl an Reklamationen / Nacharbeiten kann auf die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Unsicherheitsidentifikation hindeuten.

Exemplarische Punkte zur Überwachung des **Risikomanagementprozesses** nach [Oeh16, S. 89]:

- Verwendung von Risikomanagementergebnissen in Entscheidungsprozessen
- Wirksamkeit des Risikomanagements bezüglich Risikoreduzierung, Stabilität des Entwicklungsprozesses, Offenheit und Transparenz und / oder Projekt- und Produktfolg
- Wahrgenommene Wirksamkeit und Bewertung des Risikomanagements durch Projektteilnehmer

Exemplarische Leistungskennwerte zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des **Risikomanagements von Anforderungsänderungen**:

- Identifikation von Unsicherheiten
- Anzahl der identifizierten Unsicherheiten
- Anzahl der Maßnahmen zur Identifikation oder Reduktion von Unsicherheiten
- Anzahl der detektierten Qualitätsdefizite von Anforderungen (Methodik spezifischer Leistungskennwert)

- Analysen von Risiken:
  - Anzahl der Anforderungen, deren Änderungsrisiko ermittelt wurde
  - Anzahl der Anforderungen, deren Änderungsauswirkungen von Anwender:innen mit dem Fragebogen bewertet wurden (spezifischer Leistungskennwert der Methodik)
- Handhabung von Risiken:
  - Anzahl der ausgewählten Risikosteuerungsmaßnahmen
  - Anzahl der umgesetzten Risikosteuerungsmaßnahmen

### A8.2.3 Regulatorische Einordnung

Für eine regulatorische Einordnung werden Anwendungspotenziale der Methodik in etablierten und in der industriellen Praxis häufig verwendeten Standards und Richtlinien aufgezeigt. Das Capability Maturity Model Integration (CMMI) ist eine Familie von Referenzmodellen, die den Transfer bewährter Praktiken zur kontinuierlichen Prozessverbesserung unterstützen und dafür unter anderem Reifegrade der Unternehmensprozesse unterscheidet. Das **CMMI for Development** (CMMI-DEV) ist weit verbreitet in der Industrie und eines der drei CMMI-Modelle. Es umfasst 22 Prozessgebiete, zu denen auch das Anforderungsmanagement und das Risikomanagement gehören. In diesen beiden Prozessgebieten liegen die wesentlichen Anwendungspotenziale der Methodik zur Steigerung des CMMI-Reifegrades. Je Reifegrad ist die Umsetzung spezifischer Ziele und Praktiken gefordert. Im Anforderungsmanagement (Reifegrad Level 2) wird als zentrales Ziel die Verwaltung von Anforderungen und deren Änderungen benannt [CMMI-DEV]. Zur Umsetzung dieses Ziels trägt die Methodik durch die Auswirkungsanalyse sowie die automatisierte Identifikation von Abhängigkeiten unmittelbar bei. Das umfangreichste Anwendungspotenzial liegt im Prozessgebiet Risikomanagement (Reifegrad Level 3) [CMMI-DEV] vor: dem Fokus der Methodik. Dort werden für die Risikokategorie Anforderungsänderungen die drei definierten Ziele (Vorbereitung des Risikomanagements, Identifikation und Analyse von Risiken sowie Risikoreduktion) und sechs der insgesamt sieben dazugehörigen Praktiken direkt unterstützt. Eine detaillierte Übersicht zu Anwendungspotenzialen der Methodik für das CMMI-DEV und die Zuordnung zu spezifischen Zielen und Praktiken kann Tabelle A 8-12 entnommen werden.

Tabelle A 8-12: Einordnung der Methodik in CMMI-DEV

Ziel	Praktik	Verwerte Informationen der Methodik
Prozessgebiet Requirement Management (Prozess des Reifegrads Level 2)		
SG 1 Manage Requirements	SP 1.3: Manage Requirements Changes	Bewertung der Auswirkung einer Anforderungsänderung
	SP 1.4: Maintain Bidirectional Traceability of Requirements	Herstellung und Verwaltung der Anforderungsnachverfolgbarkeit Erzeugen einer „Requirement Traceability Matrix“
Prozessgebiet Risiko Management (Prozess des Reifegrads Level 3) (Gültigkeitsbereich: Risikokategorie Anforderungsänderungen)		
SG 1 Prepare for Risk Management	SP 1.1: Determine Risk Sources and Categories	Übersicht der Änderungsinitiatoren (vgl. Risikoanalyse)
	SP 1.2: Define Risk Parameters	Risikoparameter (vgl. Risikoanalyse)
	SP 1.3: Establish a Risk Management Strategy	Referenzprozess zur Definition einer unternehmensspezifischen Risikomanagement-Strategie
SG 2 Identify and Analyze Risks	SP 2.1: Identify Risks	Identifikation von Unsicherheiten Risikoanalyse
	SP 2.2: Evaluate, Categorize, and Prioritize Risks	Risikoanalyse (Eintrittswahrscheinlichkeit, Auswirkungen und Priorität)
SG 3 Mitigate Risks	SP 3.1: Develop Risk Mitigation Plans	Übersicht und risikospezifische Vorschläge zu Steuerungsmaßnahmen aller vier Handhabungsstrategien (vgl. Risikosteuerung)

Die industriell eine breite Anwendung findende Richtlinie **Automotive SPICE** (in Anlehnung an ISO/IEC 33020:2015 und ISO/IEC 15504-5:2006) weist in den Prozessen eine hohe Übereinstimmung zum CMMI-DEV auf, sodass auch die Anwendungspotenziale vergleichbar sind. Für den Änderungsmanagement-Prozess ist die Identifikation von Abhängigkeiten gefordert [VDA QMC 3.1], was durch die Methodik-Anwendung im Anforderungskontext automatisiert erfolgen kann. Da das Risikomanagement als gesonderter Prozess betrachtet wird, liegt im Änderungsmanagement der Fokus auf einer effizienten Änderungsimplementierung, statt auf dem Risikomanagement. Umfassendes Anwendungspotenzial der Methodik liegt im Risikomanagement vor [VDA QMC 3.1], bei dem vier der sieben Basispraktiken für den Kontext von Anforderungsänderungen anhand der Methodik umgesetzt werden können (BP 2 bis 5). Die **ISO/IEC/IEEE 29148:2018-11** (System- und Software-Engineering - Lebenszyklus-Prozesse - Requirements Engineering) [ISO29148] verlangt als Qualitätskriterium für Anforderungen unter anderem die Nachverfolgbarkeit zwischen Anforderungen. Das Anwendungspotenzial stimmt mit dem im Änderungsmanagement-Prozess der Automotive SPICE Norm überein. Als weitere Richtlinie ist die **ISO/IEC/IEEE 15288:2015** [ISO15288] zu nennen, die dem Systems Engineering nach INCOSE zugrunde liegt. Hier wurden die Anwendungspotenziale im Rahmen der zuvor erläuterten inhaltlichen Einordnung detailliert aufgezeigt.

## A8.3 Referenzmodelle zur inhaltlichen Einordnung

### A8.3.1 Primäre Anwendungspotenziale in der Systems Engineering-Prozesslandschaft

*Tabelle A 8-13: Einordnung der Methodik in die Systems Engineering Prozesse nach INCOSE [WRF15] und ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [ISO15288] (primäre Anwendungspotenziale)*

Systems Engineering Prozesse nach INCOSE	Prozessaktivitäten	Verwertete Informationen der Methodik
Stakeholderbedürfnis und -anforderungsdefinitionsprozess	Analyse von Stakeholder-anforderungen	Qualitätsdefizite im Anforderungs-set
	Verhandlung von anforderungsbe-zogenen Konflikten	Anforderungsspezifische Risiko-abschätzung
Systemanforderungsdefinitionspro-zess	Verhandlung von anforderungsbe-zogenen Konflikten	Anforderungsspezifische Risiko-abschätzung
	Herstellen und Verwalten der Nach-verfolgbarkeit zwischen Systeman-forderungen	Anforderungsabhängigkeiten
Projektplanungsprozess	Zeit- und Kostenplanung	Anforderungsspezifische Risiko-abschätzung Risikoübersicht im Anforderungsset
	Identifikation von Risikoschwer-punkten für die Projektplanung (z. B. für die Ablaufplanung)	Anforderungsspezifische Risiko-abschätzung
Entscheidungsmanagementprozess	Bewertung von Entscheidungsopti-onen vor dem Auftreten einer Ände-rung (z. B. Risikosteuerungsmaß-nahmen)	Anforderungsspezifische Risiko-abschätzung Risikoübersicht im Anforderungsset
Risikomanagementprozess	Erstellen und Verwalten von anfor-derungsspezifischen Risikoprofilen	Anforderungsspezifische Risiko-abschätzung
	Risikoanalyse für Anforderungen und Anforderungssets	Unsicherheitssteuerungsmaßnah-men Anforderungsspezifische Risiko-abschätzung Risikoübersicht im Anforderungsset
	Kriteriengestützte Auswahl von Ri-sikosteuerungsmaßnahmen	Anforderungsspezifische Risiko-abschätzung Vorauswahl Risikosteuerungsmaß-nahmen
	Überwachung von Risiken und de-ren Handhabung	Anforderungsspezifische Risiko-abschätzung (Wiederholte Anwen-dung)
Zulieferungsprozess <sup>11</sup>	Reaktion auf / Erstellung von Zeit- und Kostenvorschlag für ein Auf-tragsangebot	Anforderungsspezifische Risiko-abschätzung Risikoübersicht im Anforderungsset

<sup>11</sup> Auf eine Unterscheidung von Zulieferungs- und Beschaffungsprozess (vgl. [WRF15, S. 139 ff.]) wird verzichtet, da die Anwendungspotenziale unverändert sind und lediglich zwei Betrachtungsperspektiven differenziert würden.

### A8.3.2 Sekundäre Anwendungspotenziale in der Systems Engineering-Prozesslandschaft

*Tabelle A 8-14: Einordnung der Methodik in die Systems Engineering Prozesse nach INCOSE [WRF15] und ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [ISO15288] (sekundäre Anwendungspotenziale)*

Systems Engineering Prozesse nach INCOSE	Prozessaktivitäten	Verwertete Informationen der Methodik
Entscheidungsmanagementprozess	Bewertung von Entscheidungsoptionen bei vorliegendem Änderungsbedarf	Anforderungsspezifische Risikoabschätzung
Konfigurationsmanagementprozess	Vollständige Erfassung der von einer Änderung betroffenen Anforderungen	Anforderungsabhängigkeiten
	Konsistente Implementierung von Anforderungsänderungen	Anforderungsabhängigkeiten
Informationsmanagementprozess	Einholen und Verwalten von Informationen (z. B. Lessons Learned)	Alle von der Methodik bereitgestellten Informationen
Zulieferungsprozess	Prüfung und Entscheidung über Änderungsbedarfe (Wechselspiel mit dem Entscheidungsmanagementprozess)	Anforderungsspezifische Risikoabschätzung

## A8.4 Referenzmodelle zur projektspezifischen Einordnung

### A8.4.1 Einordnung in die Aufgabenbereiche des Projektmanagements

*Tabelle A 8-15: Einordnung der Methodik in die Projektmanagement Prozessgruppen nach [DIN 21500-02]*

Prozessgruppe nach DIN ISO 21500:2016	Prozesse	Verwertete Informationen der Methodik
Initiierung	Erstellen des Projektauftrags	Qualitätsdefizite im Anforderungsset Maßnahmen zur Unsicherheitsidentifikation Vorauswahl von proaktiven Maßnahmen
Planung	Festlegung der Abfolge von Arbeitspaketen und Aktivitäten	Anforderungsspezifische Risikoabschätzung Risikoübersicht im Anforderungsset Anforderungsabhängigkeiten
	Schätzen der Dauer von Arbeitspaketen und Aktivitäten	Anforderungsspezifische Risikoabschätzung
	Schätzen der Kosten	Anforderungsspezifische Risikoabschätzung Risikoübersicht im Anforderungsset
	Ermitteln der Risiken	Qualitätsdefizite im Anforderungsset Maßnahmen zur Unsicherheitsidentifikation
	Risikobewertung	Anforderungsspezifische Risikoabschätzung Risikoübersicht im Anforderungsset
Umsetzung	Risikobehandlung	Vorauswahl von proaktiven Maßnahmen
Controlling	Risikocontrolling	Anforderungsspezifische Risikoabschätzung (kontinuierliche Anwendung) Risikoübersicht im Anforderungsset (kontinuierliche Anwendung)

### A8.4.2 Einordnung in das Systems Engineering-Rollenmodell

*Tabelle A 8-16: Einordnung der Methodik in das Systems Engineering-Rollenmodell nach GRÄßLER, OLEFF und HENTZE [GOH19]*

Rolle	Aufgabenfelder	Verwendete Informationen der Methodik
Stakeholder Schnittstellen Manager:innen	Erfassen und Integrieren der Änderungen von Bedürfnissen	Qualitätsdefizite im Anforderungsset Unsicherheitssteuerungsmaßnahmen Anforderungsspezifische Risikoabschätzung Risikoübersicht im Anforderungsset
	Leitung der Verhandlung zwischen Stakeholdern und Entwicklungsteam	Anforderungsspezifische Risikoabschätzung Risikoübersicht im Anforderungsset
Anforderungsmanager:innen	Spezifikation von Anforderungen	Qualitätsdefizite im Anforderungsset
	Änderungsmanagement von Anforderungen	Anforderungsspezifische Risikoabschätzung Risikoübersicht im Anforderungsset Anforderungsabhängigkeiten
Technische Manager:innen	Systematische Entscheidungsvorbereitung	Anforderungsspezifische Risikoabschätzung Risikoübersicht im Anforderungsset Vorauswahl Risikosteuerungsmaßnahmen
Leiter:innen	Projektkontrolle und –steuerung	Anforderungsspezifische Risikoabschätzung (kontinuierliche Anwendung) Risikoübersicht im Anforderungsset (kontinuierliche Anwendung)
	Kommunikation mit dem Unternehmensmanagement	Risikoübersicht im Anforderungsset Anforderungsspezifische Risikoabschätzung
Prozessverantwortliche	Identifikation und Anpassung erforderlicher Systems Engineering Prozesse	Referenzprozess
Modellierungsingenieur:innen	Pflege des Systemmodells	Anforderungsabhängigkeiten



## A9 Validierung – Fallstudie 4 (Knickarmroboter)

Das Anforderungsset ist [Hie21] entnommen worden.

*Tabelle A 8-17: Anforderungsset der Fallstudie 4*

F/W	ID	Textuelle Beschreibung (ein Satz)	Anforderung	Wert			Einheit
				Min.	Exakt.	Max.	
W	1.1	Die Druckqualität muss eine ausreichend gute Auflösung gewährleisten.	Schichtdicke		0,14		mm
W	1.2	Materialverbrauch sollte möglichst gering sein.	Fülldichte			70	%
F	1.3	Die Strukturbauenteile sollen mittels additiver Fertigung hergestellt werden.	Fertigungsverfahren				
F	1.4	Einzelne Bauteile sollen die Abmessungen 300 mm x 300 mm x 300 mm (Länge*Breite*Höhe) nicht überschreiten.	Bauraum			300 x 300 x 300	mm
F	1.5	Die Fertigung kann mittels PLA oder ABS erfolgen.	Material				
W	1.6	Die Anzahl der Bauteile für die additive Fertigung soll 25 nicht überschreiten.	Anzahl der Bauteile für die additive Fertigung			25	Anzahl
F	1.7	hohe Qualität des Roboters muss gewährleistet werden	Einhaltung der Toleranzen und Verwendung hochwertiger Filamente				
F	1.8	Einfache Fertigung durch 3D-Drucken mit STL-Dateien	STL-Dateien dürfen keine Fehler enthalten				
W	1.9	Sämtliche Schrauben für die Befestigung der Einzelteile sollten gleich sein.	Gleiche Schrauben				
F	1.10	Für die Bewegung des Roboterarms müssen genormte Zahnräder eingesetzt werden.	Genormte Zahnräder				
F	1.11	Die Anzahl der Eigenfertigungsteile soll mindestens 90% der Gesamtteile ausmachen.	Quote Eigenfertigungsteile	90			%
W	1.12	Die Druckzeit der Eigenfertigungsteile soll insgesamt maximal 96h dauern.	Druckzeit			96	h
F	1.13	Die Eigenfertigungsteile müssen die Allgemeintoleranzen der DIN ISO 2768 erfüllen.					
F	1.14	Der Greifer des Roboterarms soll gefräst werden.	Greifer wird gefräst				
W	1.15	Die Platine des Roboterarms soll in Massenfertigung produziert werden.	Platine in Massenfertigung produziert				
F	1.16	Nicht zukaufbare Bauteile sind für eine additive Fertigung auszulegen	Fertigungsverfahren				
W	1.17	Die Notwendigkeit von Stützstrukturen ist zu vermeiden	Stützstrukturen				
W	1.18	Stützstrukturen müssen nach der Fertigung ohne Rückstände entfernt werden können.	Nachbearbeitung				
F	1.19	Die Oberflächenrauheit des Systems darf nach der Fertigung nicht größer als 70 Rz sein.	Oberflächenrauheit			70	Rz
F	1.20	Das System darf eine Bauteiltoleranz von +-0,1 mm aufweisen.	Bauteiltoleranz	-0,1		0,1	mm
F	1.21	die Metalteile wie (Stahlstäbe) sollen durch Drehverfahren gefertigt werden	Drehen				
F	1.22	Die Roboterkomponenten sollen teils mit Kleber verbunden sein.	Hilfsstoff				
F	1.23	Der Roboter darf in seiner Gesamtlänge nicht länger als 25 cm sein	größte Herstellbare Abmessung			25	cm
F	1.24	Bauteiltoleranzen betragen +-0,1mm	mögliche Qualität und Toleranzen der Kunststoffbauteile	-0,1		0,1	mm
W	1.25	Alle Zeichnungen der Einzelteile als STEP-Datei zur Verfügung stellen (individuelle Anpassung der Teile ermöglichen)	Fertigungsverfahren				

F	1.26	Die Elektronikkomponenten sind Zukaufteile	Elektronikkomponenten				
F	1.27	Verbindungselemente, Lager und Federn sind Normteile, welche zugekauft werden	Normteile				
F	2.3	Maximale Kraft vor Bruch	Maximalbeanspruchung		5	kg	
F	3.1	Die elektronischen Komponenten müssen von Laien eingebaut und verdrahtet werden können.	Spannung der elektronischen Komponenten		50	V	
F	3.2	Die elektronischen Komponenten müssen genug Leistung haben, um Teile mit einem Gewicht vom max. 100 g handeln zu können.	Motorleistung	0,1		Nm	
F	3.3	Die elektronischen Komponenten müssen einfach bestellbar sein.	Verfügbarkeit				
F	3.4	Der Roboterarm sollte programmierbar sein.					
F	3.5	Die maximale Temperatur der Elektronik soll 70 Grad Celsius nicht überschreiten.	maximale Temperatur		70	°C	
W	3.6	Es können bis zu 2 Lüfter zeitgleich angeschlossen werden.	Anzahl Lüfter		2		
W	3.7	Ein elektrisches Sicherungssystem ist nicht zwangsläufig erforderlich.					
F	3.8	Die Stromversorgung muss durch 230 Volt Nennspannung gewährleistet werden.	Stromversorgung	207	253	Volt	
F	3.9	Die Kontrolleinheit muss die 230 Volt Netzspannung auf 12 Volt transformieren.	Transformation		17		Volt
F	3.10	Der Schrittmotor muss mit 12 Volt versorgt werden.	Motorversorgung		12		Volt
F	3.11	Der Linearmotor muss mit 12 Volt versorgt werden.	Motorversorgung		12		Volt
F	3.12	Der Roboterarm muss fähig sein, den Eingangsstrom zu transformieren.	Strom Transformation				
F	3.13	Der Roboterarm muss durch einen Pilzknopf-Notschalter vollständig deaktiviert zu werden.	Notaus				
F	3.14	mind 100W Leistung	Leistung	100		Watt	
F	4.1	intuitive Bedienung des Roboterarms	Bedienung				
F	4.2	Das System darf einen Schalldruckpegel i.H.v. 70 dB nach RL2006/42/EG =2,0 dB(A) nicht überschreiten	Schalldruckpegel		70	dBA	
F	4.3	Das System muss die auftretenden Vibrationen selbständig dämpfen	Vibrationsdämpfung				
W	4.4	Das System muss sich aus der Ferne steuern lassen	Fernsteuerung				
F	4.5	Der Roboterarm soll mittels mitgelieferter Software über einen PC steuer-/programmierbar sein	Bedienungsart				
F	4.6	Die Kommunikation mit einem PC soll über eine TCP/IP Schnittstelle möglich sein	Bedienung				
W	5.1	Das Gerät soll im stromlosen Zustand wartbar sein	Versetzbarkeit in stromlosen Zustand vor der Wartung				
F	5.2	Der Roboterarm soll verschieden schnell agieren können	Der Roboterarm muss mindestens über 3 einstellbare Geschwindigkeitsstufen verfügen		3		
F	5.3	Der Roboterarm soll ein Objekt von 5cm Breite greifen können	Die Greifer des Roboterarms müssen mind. 50mm gestreckt werden können		50		mm
F	5.4	Maximale Leistung der elektrischen Komponenten	Leistung		100		Watt
F	5.5	Frequenz der elektrischen Komponenten	Frequenz		50		hz
F	5.6	Drehzahl der verschiedenen Elektromotoren	Drehzahl	1	2000	Umin^-1	
F	5.7	Das System soll mittels 12V Gleichspannung betrieben werden.	Spannungsversorgung		12		V
F	5.8	Die Verlustwärme soll durch eine Luftkühlung abgeführt werden können.	Wärmeabfuhr				
F	5.9	Die Lüfter müssen fähig sein die Elektronik mit mehr als 2500 Umdrehungen pro Minute zu kühlen.	Lüftergeschwindigkeit	2500			U/min

F	5.10	Die Leistung des Netzteils muss größer gleich 100 Watt sein.	Leistung Netzteil	100			W
F	5.11	Der Reibungskoeffizient zwischen den beweglichen Komponenten der motorisierten Achsen muss kleiner gleich 0,001 sein.	Reibungskoeffizient motorisierte Achsen			0,001	
F	5.12	Der Roboter muss mit elektrischer Energie betrieben werden können.					
W	5.13	Der Roboter soll mit einer Standardspannung nach IEC 60048 voll funktionsfähig sein.		230			V
W	5.14	Die entstehende Wärme beim Betreiben des Roboters soll nicht höher als 30°C sein.		0	30	°C	
F	5.15	Der Roboter muss bei Umgebungstemperaturen zwischen -10°C und 50°C vollständig funktionieren.		-10	50	°C	
F	5.16	Das RAMPS 1.4 Controller Board muss mindestens 3 Schnittmotorsteuerungen besitzen.	Schnittmotorsteuerung	3			Stück
F	5.17	Der Wirkungsgrad der Motoren soll bei mindestens 85% liegen.	Wirkungsgrad Motoren	85			%
W	5.18	Der Greifer soll eine Last von max. 10 kg tragen können.	Tragelast		10	kg	
W	5.19	Netzschwankungen von 10Hz sind zu berücksichtigen	Netzschwankungen	0	10	Hz	
F	5.20	Das System muss fähig sein, Gegenstände mit einem Gewicht von mindestens 0,1 kg anheben zu können	Tragfähigkeit	0,1			kg
F	5.21	Das Gehäuse des Systems darf maximal 8 Grad heißer als Umgebungstemperatur werden.	Maximaltemperatur		8	Grad	
F	5.22	Das System darf durch Reibung maximal 5% Gesamtenergie verlieren.	Energieverlust		5	%	
W	5.23	die Reibung- und Wärmeverluste zwischen den bewegenden Teilen (Zahnräder, Lager, Stahlstäbe, etc) sollen nicht mehr als 15% der gesamten Leistung auftreten	Reibung- und Wärmeverluste		15	%	
F	5.24	die Energie wird von elektrischer Leistung auf mechanische Leistung umgeformt	Energietransformation				
F	5.25	Die Energiezufuhr soll mit einem Anschluss Typ C "CEE7/16" nach EN50075 erfolgen	Energieversorgung				
F	5.26	Der Roboterarm muss fähig sein, die Hardwarekomponenten mit elektrischer Energie zu versorgen.	Eingangsenergie				
W	5.27	Bei Stromausfall wird der Robotor von einer Batterie bis zum Operitionsende weiterbetrieben	Batterie				
F	5.28	Die Kühlung der Steuerung findet mittels mindestens einem 40x40 mm Lüfter statt	Kühlung				
W	6.1	Der Roboter soll für den Gebrauch in der Laborumgebung geeignet sein.	Laborverwendung				
W	6.2	Der Roboter soll für die Infrastruktur eines Labors ausgerichtet sein.	Laborverwendung				
F	6.3	Der Roboter muss die für den Laborgebrauch notwendigen Aktionen ausführen können.	Laborverwendung				
F	6.4	Der Roboter muss sicherheitstechnisch für den Laborgebrauch geeignet sein.	Laborverwendung				
F	6.5	Einsatzort des Roboterarms	IPX8 Wassergeschützt				
F	6.6	Austauschbarkeit des Greifers, mit Anschluss für andere Varianten, Adapter	Varianten				
F	6.7	Austauschbarkeit sämtlicher Elemente	Modularität				
F	6.8	Das System soll unempfindlich gegenüber Staub sein.	Fremdstoffe				
F	6.9	Das System soll, unter Zuhilfenahme der Bedienungsanleitung, von ungeschultem Personal in Betrieb genommen werden können.	Inbetriebnahme				
F	6.10	Roboterarm soll sich frei bewegen können	Motoren müssen frei steuerbar sein				

W	6.11	Roboterarm soll Anwenderfreundlich sein	Leicht verständliche Bedienungsanleitung			
F	6.12	Das System ist für Schulungszwecke in Büro-umgebungen auszulegen	Anwendungsumgebung			
F	6.13	Das System darf keine gesundheitsschädlichen Materialien beinhalten	Materialverträglichkeit			
F	6.14	Eine Bedienungsanleitung ist anzufertigen	Bedienungsanleitung			
F	6.15	Eine Montageanleitung ist anzufertigen	Montageanleitung			
W	6.16	Zusätzliches Spezialwerkzeug muss additiv gefertigt werden können. 3D-Daten des Spezialwerkzeugs sind in diesem Fall anzufertigen.	Spezialwerkzeug durch additive Fertigung			
F	6.17	Das System muss fernsteuerbar sein.	Steuerung			
F	6.18	Das System muss bei einer Luftfeuchtigkeit zwischen 0% und 100% genutzt werden können.	Luftfeuchtigkeit	0	100	%
F	6.19	Das System kann eine translatorische Zugriffsbewegung durchführen	Zugriffsbewegung			
F	6.20	Der Greifer muss in der Lage sein bei maximaler Beschleunigung ein Bauteil von 1,1 kg zu halten	Anwendung	1,1		kg
F	6.21	Der Greifer soll sich stufenlos einstellen lassen	Anwendung			
F	6.22	Der Einsatzort des Roboterarms soll bürotauglich sein.				
F	6.23	Der Greiferarm muss in beliebige Positionen verfahren können.	Positionierung			
F	6.24	Der Greifarm muss fähig sein in der Produktion eingesetzt zu werden.	Einsatzgebiet			
F	6.25	Gerät soll auf Tisch benutzt werden können	Anwendung			
W	6.26	Gerät muss mindestens 20.000 vollständige Umdrehungen bei maximaler Belastung absolvieren können	Verschleißrate	20000		Umdrehungen
F	6.27	Die Achsen sollen frühestens nach 5000 h Verschleißerscheinungen Zeigen	Betriebsstunden	5000		h
f	7.1	Der Roboterarm muss im Boden verschraubar sein	In der Grundplatte müssen 8 Gewindebohrungen eingearbeitet sein	8		
w	7.2	Muss eine für den Einsatz ausreichende Reichweite besitzen	Der Roboterarm muss komplett ausgefahren Werkstücke mit einer Entfernung von 30cm greifen können	300		mm
f	7.3	Mainboard muss sich unterhalb Des Roboterarms befinden	Die Grundplatte braucht eine ausreichende Höhe, um das Mainboard beinhalten zu können	50	69	mm
w	7.4	Montagestellen müssen leicht zugänglich sein	Die Verbindungsstellen der Komponenten müssen so konstruiert sein, dass Sie mit haushaltsüblichem Werkzeug erreicht werden können			
	7.5	Gesamtobjekt				
F	7.5.1	Höhe im zusammengefahrenen Zustand der Baugruppe	Höhe		30	cm
F	7.5.2	Breite im zusammengefahrenen Zustand der Baugruppe	Breite		30	cm
F	7.5.3	Tiefe im zusammengefahrenen Zustand	Tiefe		20	cm
	7.6	Arm 1 (Grundsockel-Arm)	Arm 1 (Grundsockel-Arm)			
F	7.6.1	Länge des 1. Arms von Sockel bis Gelenk	Länge	30		cm
F	7.6.2	Breite des 1. Arms von Sockel bis Gelenk	Breite	10		cm
F	7.6.3	Tiefe des 1. Arms von Sockel bis Gelenk	Tiefe	10		cm
	7.7	Arm 2 (Arm-Greifer)	Arm 2 (Arm-Greifer)			
F	7.7.1	Länge des 2. Arms von Gelenk bis Greifer	Länge	30		cm
F	7.7.2	Breite des 2. Arms von Gelenk bis Greifer	Breite	10		cm
F	7.7.3	Tiefe des 2. Arms von Gelenk bis Greifer	Tiefe	10		cm
	7.8	Greifer	Greifer			
W	7.8.1	Länge des austauschbaren Greifers	Länge	15		cm

W	7.8.2	Breite des austauschbaren Greifers	Breite	10		cm
W	7.8.3	Tiefe des austauschbaren Greifers	Tiefe	5		cm
W	7.9	Arbeitsradius	Arbeitsradius		75	cm
F	7.10	Die Abmessungen des Bauraums additiv gefertigter Bauteile müssen in jeder Dimension kleiner gleich 250 mm sein.	Bauraum additiv gefertigter Bauteile		250*250 *250	mm <sup>3</sup>
F	7.11	Der Abstand von Lüftern zur Schaltungsplatine muss größer gleich 25 mm und kleiner gleich 50 mm sein.	Abstand Lüfter und Schaltungsplatine.	25	50	mm
W	7.12	Der Winkel zwischen der für die additiven Fertigung geplanten Aufstandsfläche eines Bauteils und der Bauteiloberfläche sollte größer gleich 45° sein.	Oberflächenwinkel additiv gefertigter Bauteile	45		°
W	7.13	Die Längsachsen von Bohrungen sollten in einem 90° Winkel zur geplanten Aufstandsfläche der additiven Fertigung ausgerichtet sein.	Ausrichtung Bohrungen additiv gefertigter Bauteile	90		°
F	7.14	Der Roboter soll sich in V, W, X, Y und Z Achse drehen können.	Achsbewegungen			
W	7.15	Der Lüfter für die Elektronik soll im Standfuß angebracht werden.	Anordnung Lüfter			
W	7.16	Die Grundfläche der Basis soll rund sein.	Grundfläche Basis			
W	7.17	Der Durchmesser der Basis soll maximal 10 cm betragen	Durchmesser Basis		10	cm
W	7.18	Der maximal mögliche Abstand der Greifervacken soll 5cm sein.	Abstand Greifbacken	5		cm
F	7.19	Das maximale Gewicht des Roboterarms ist begrenzt	Systemgewicht		2,5	kg
F	7.20	Alle Schrittmotoren sind vom gleichen Typ	Varianz der Schrittmotoren			
W	7.21	Die Anzahl der Zukaufteile ist zu minimieren	Anzahl der Zukaufteile			
F	7.22	Das System muss sich 360° um die z-Achse bewegen können	Arbeitsradius	360		°
F	7.23	Die Installationsfläche für die Roboterbasis darf nicht größer als 200mm x 200mm sein	Roboterbasisgröße		40.000	mm <sup>2</sup>
F	7.24	Die Aufnahme muss passend für den Lüfter sein.	Aufnahme für Lüfter	39,5	40 x 40	40,5 mm
F	7.25	Korrekte Aufnahme für die Nema 17 Stepper Motoren	Aufnahme für Stepper Motoren	41	42x42	43 mm
F	7.26	Fester Sitz der Lager 608 durch Passung	Lagerfestsitz (Passung für Umfangslast)		22 M6	mm
F	7.27	Passung zwischen Lager und Welle	Genauigkeit Durchmesser Stahlwelle	7,95	8	8 mm
W	8.1	Sämtliche Komponenten des Systems müssen demontierbar sein	Demontierbarkeit			
F	8.2	Sämtliche Lager des Systems müssen lebensdauergeschmiert sein	Lebensdauerschmierung			
F	8.3	Sämtliche Schraubverbindungen müssen ohne Werkzeugwechsel gelöst werden können.	Werkzeugwechsel			
F	8.4	Für das System können Ersatzteile jederzeit nachgedruckt werden.	Ersatzteile			
F	8.5	Das System wird in Zeitintervallen von 6 Monaten gewartet.	Wartungsintervall		6	Monate
W	8.6	Die Wartung des Systems kann anhand einer Bedienungsleitung durchgeführt werden.	Wartungsdurchführung			
W	8.7	Die Verfügbarkeit der Ersatzteile soll durch Standardteile und einer Eigenfertigung unbegrenzt sein.				
F	8.8	Wartungsarbeiten sind im Einmannbetrieb durchführbar	Wartung durch einen Mitarbeiter möglich		1	Person
F	9.1	variable Winkelgeschwindigkeit um die z-Achse	Drehgeschwindigkeit	1	100	rad/s
W	9.2	Kombinierte Greifgeschwindigkeit während eines Durchgangs	Greifgeschwindigkeit	0,10	5	m/s
W	9.3	Krafteintrag über rotatorische Bewegung	Krafteintrag			

F	9.4	Die resultierende Bewegung des Greifarms soll durch die Überlagerung von ausschließlich rotatorischen Bewegungen anderer Bauteile erfolgen.	Bewegungsart				
F	9.5	Die Bewegungsform aller elementaren Bewegungen muss rotatorisch sein.	Bewegungsform				
F	9.6	Die Winkelgeschwindigkeit aller motorisierten Achsen muss größer gleich 15 °/s sein.	Winkelgeschwindigkeit Achsen	15			°/s
F	9.7	Die Beschleunigung auf Maximalgeschwindigkeit soll maximal 0,4s dauern.	Beschleunigung auf Maximalgeschwindigkeit			0,4	s
F	9.8	Die Z-/V-Achse sollen sich um 360° drehen können	Uneingeschränkter Freiheitsgrad der Z-/V-Achse	360			°
F	9.9	Die restlichen Achsen (X,Y,W) sollen sich um min. 180° drehen können	Rotationsbewegung der restlichen Achsen	180			°
F	10.1	Die Federkonstante der Greiferfedern muss größer gleich 6 N/mm und kleiner gleich 8 N/mm sein.	Federkonstante Greiferfedern	6		8	N/mm
F	10.2	Die Greiferfedern müssen als Druckfedern ausgelegt sein.	Belastung Greiferfedern.				
F	10.3	Roboterarm darf sich nicht verformen	Belastungen des Roboterarms gleichmäßig verteilen				
F	10.4	Schwingungen müssen vermieden werden	Resonanz erzeugen, um Schwingungen zu vermeiden				
F	10.5	Das System darf bei Maximallast nur eine Durchbiegung kleiner 2 aufweisen.	Durchbiegung			2	Grad
F	10.6	Das System muss eine Minimalsteifigkeit von 700 N/mm^2 aufweisen.	Steifigkeit	700			N/mm^2
F	10.7	Der Greifer soll die zu bewegenden Teile nicht zerstören.	Greiferkraft variabel				
F	11.1	Die maximal zulässigen Herstellkosten betragen 700,00€.	Herstellkosten			700	€
W	11.2	Die Kosten der Zukaufteile sollen maximal 250,00€ betragen.	Kosten Zukaufteile			250	€
F	11.3	Der maximale Verkaufspreis soll 1200,00€ betragen.	Verkaufspreis			1200	€
W	11.4	Die Kosten für die Pflege und Wartung des Roboterarms sollen maximal 100,00€ pro Jahr betragen.	Kosten Pflege und Wartung Roboterarm			100	€/a
F	11.5	Die Entwicklungskosten dürfen einen Wert von 20.000€ nicht überschreiten	Entwicklungskosten			200000	€
F	11.6	Die Werkzeugkosten dürfen bei maximal 50.000 € liegen	Werkzeugkosten			50000	€
W	11.7	Die benötigte Filamentmenge der additiven Fertigung ist zu begrenzen	Filamentmenge			1000	g
F	11.8	Einzelne Verschleißteile sollen nicht mehr als 75€ kosten	Wartungskosten			75	€
F	12.1	Roboter soll auf dem europäischen Markt vertrieben werden	Roboter erhält die CE-Kennzeichnung				
W	12.2	Kundenbedürfnissen im Hinblick auf den Service Rechnung tragen	Im Servicevertrag ist ein jährlicher Checkup inklusive				
F	13.1	Das Elastizitätsmodul der Strukturauteile darf 1500 MPa nicht unterschreiten.	E-Modul	1500			MPa
F	13.2	der Last in den Motoren soll nicht 60 Ncm überschreiten	Last	-	-	60	Ncm
F	13.3	Die Wiederholgenauigkeit des Roboterarms soll mindestens +0,5 mm betragen.	Wiederholgenauigkeit	±0,5			mm
F	13.4	Standort des Roboters soll mit dem Gesamtgewicht mitsamt Hubgewicht und Sicherheit belastet werden können	Standort				
W	14.1	Die Einzelteile sollen sich selber ausrichten.	Poka Yoke				
W	14.2	Es sollen möglichst wenig Zubehörteile verbaut werden.	Anzahl nicht gedrucktes Zubehör			80	Teile
W	14.3	Die Montage soll schnell gehen.	Montagedauer			2	Stunden

W	14.4	Die Montage sollte möglichst wenige Schritte enthalten.	Montageschritte			30	Anzahl
F	14.5	Der Knickarmroboter muss vom Nutzer ohne Vorkenntnisse montiert werden können.	einfache Montage				
W	14.6	Das für die Montage notwendige Werkzeug ist auf einen Sechskant-Schraubendreher zu begrenzen	Montagewerkzeug				
W	14.7	Das System soll aus weniger als 150 Einzelteilen bestehen.	Anzahl der Bauteile				
F	14.8	Der Roboter muss ohne Sondermontageplätze (Unterdruck, Reinraum, etc.) montiert werden können.					
F	14.9	Die Montage des gesamten Roboterarms soll auch für ungelerte Personen nur mit Hilfe der Montageanleitung möglich sein.					
F	14.10	Das System muss durch Eigeninstallation in die Einsatzumgebung einbaubar sein.	Installation				
F	14.11	Die Montage des Roboterarms soll vollständig durch den Abnehmer erfolgen.	Montage durch den Abnehmer				
F	14.12	Für die Montage ist vom Abnehmer Klebstoff bereitzustellen.	Klebstoff bereitstellen				
F	14.13	Die Montagereihenfolge der Bedienungsanleitung muss eingehalten werden	Montagevorschriften				
F	14.14	Der Montageuntergrund muss gereinigt sein	Montagevorschriften				
F	14.15	Anzugsdrehmoment für Schrauben soll 3 Nm betragen	Anzugsdrehmoment Schrauben	3		Nm	
F	15.1	Es dürfen keine umweltschädlichen Substanzen austreten.	Materialienverwendung				
F	15.2	Der Roboter soll kein "Einmalprodukt" sein, obwohl oder eben weil er leicht herzustellen ist	Die angepeilte Lebensdauer unter vorgegebenen Betriebsbedingungen soll durchschnittlich mindestens 5000 Stunden betragen	5		h	
F	15.3	Bei Schäden muss der Roboterarm vor Ort inspiziert und repariert werden können, um Transportwege zu Spezialisten vermeiden zu können.	Häufig auftretende Mängel sollen von Laien erkennbar und behebbar sein				
F	16.1	Die Systemarchitektur soll bis zum 27.08.2021 abgeschlossen sein.	Systemarchitektur	27.08.20 21			
F	16.2	Die Implementierung der Systemelemente soll bis zum 01.10.2021 abgeschlossen sein.	Implementierung der Systemelemente	01.10.20 21			
F	16.3	Die Systemintegration und Verifikation soll bis zum 15.10.2021 abgeschlossen sein.	Systemintegration und Verifikation	15.10.20 21			
F	16.4	Die Validierung und Übergabe soll bis zum 29.10.2021 abgeschlossen sein.	Validierung und Übergabe	29.10.20 21			
W	17.1	die aus Kunststoff gefertigten Teile sind in der 3D-Drucker durch Transformation zu Pulver wieder zu verwenden	Wiederverwendung				
W	17.2	die Teile sollen abgebaut werden und nach dem Stofftyp geordnet	Demontage				
W	17.3	Verschleißteile müssen gut entsorgt werden, um diese wieder zu verwenden durch Recycling	Verschleißteileentsorgung				
F	17.4	Sortenreine Entsorgung ermöglichen	keine Verbundwerkstoffe				
F	17.5	Wiederverwendbarkeit von langlebigen Komponenten sicherstellen	Module aus anderen Baugruppen verwenden				
w	18.1	Der Greifarm muss genau positionierbar sein	Die Abweichung von Ist und Soll zur vorgegebenen Position des Greifarms darf höchstens 0,5mm betragen	0,5		mm	
F	18.2	Das Steuerboard muss die einzelnen Motoren unabhängig voneinander ansteuern können.	unabhängige Ansteuerung				
F	18.3	Der Greifer muss geöffnet und geschlossen werden können.	Regelung des Greifarms				
F	18.4	Der Roboter muss Objekte greifen, aufheben und an einer definierten anderen Stelle ablegen können.	Funktion des Roboters				

F	18.5	Die Drehgeschwindigkeit der Motoren muss frei steuerbar sein.	Geschwindigkeit der Motoren				
W	18.6	Die Positionen sollen möglichst schnell geregelt werden können.	schnelle Regelung der Position				
W	18.7	Der Greifer soll mit einem Servomotor geöffnet und geschlossen werden.	Verwendung eines Servomotors				
F	18.8	Der Greifarm muss beliebige Positionen im Arbeitsbereich erreichen können.	Arbeitsbereich des Roboters				
F	18.9	Der Microcontroller muss die 4 Motoren unabhängig voneinander ansteuern können.	Ansteuerung	4			Stk.
F	18.10	Der Greifer muss über den Motor geschlossen und geöffnet werden können.	Greifer				
W	19.1	Die Schnittstellen zwischen den einzelnen Armelementen sollen ohne externe Getriebe realisiert werden. (gedrucktes Getriebe)					
F	19.2	Der Roboter muss Befehlstrukturen in den Programmiersprachen C++ und C# verarbeiten können.					
F	19.3	Der Roboter muss mit einem Ethernetschluss zwecks Softwareupgrades und Datenaustausch an das Produktionsnetzwerk angeschlossen werden.					
W	19.4	Der untere horizontale Motor soll als X-Motor bezeichnet werden.	X-Motor				
W	19.5	Der obere horizontale Motor soll als Y-Motor bezeichnet werden.	Y-Motor				
W	19.6	Der vertikale Motor soll als Z-Motor bezeichnet werden.	Z-Motor				
F	19.7	Der Roboterarm soll eine USB-C Schnittstelle haben.	USB-C Schnittstelle				
F	19.8	Der Roboterarm soll eine WLAN Schnittstelle haben.	Wlan Schnittstelle				
F	19.9	Der Roboterarm soll eine Bluetooth Schnittstelle haben.	Bluetooth Schnittstelle				
F	19.10	Die Stellmotoren sind mit einer Arduino One Platine verknüpft	Kompatibilität der Stellmotoren mit Arduino One Platine				
F	19.11	Eine Kompatibilität mit dem Arduino Mega Drive Package ist zu gewährleisten.	Arduino Mega Drive Package Kompatibilität				
F	19.12	Der Roboterarm weißt am freien Ende einen Greifer auf, der Objekte durch Klemmkraft aufnehmen kann.	Greifer				
W	19.13	Eine Arretierung der Klemmkraft des Greifers ist vorzusehen	Arretierung der Klemmkraft der Greifers				
W	19.14	Die Verbindung zwischen Microcontroller und Computer soll per USB erfolgen.	USB-Verbindung zwischen Microcontroller und Computer				
F	19.15	Standardtreiber verwenden	Software	Arduino Mega- Driver			
W	20.1	Allgemeine Sicherheitshinweise, Strom/Einklemmen/Schutzhelm	Schutzsystem	3			Stück
F	20.2	Schutzvorrichtung, Isolierung gegen elektrischen Strom	Schutzsystem				
F	20.3	Warnung bei erreichen der maximal erlaubten Kraft	Tonsignal		100		dB
F	20.4	Notstopp bei Überlast	Notstopp		150		g
F	20.5	Muss europäischen Sicherheitsnormen entsprechen	DIN EN				
F	20.6	Die Leistungszufuhr der Systems soll durch ein systemunabhängiges Netzteil erfolgen.					
F	20.7	Der Roboter muss bei einem physischen Widerstand innerhalb von 10ms sofort zum Stillstand kommen.		5	10		ms

F	20.8	Die Gelenkbereiche des Roboters müssen abgedeckt werden. (Vermeidung von Personalverletzungen durch Klemmungen oder Quetschungen)					
F	20.9	Die Software des Roboters muss vor unauthorisierten externen Zugriffen geschützt werden.					
F	20.10	Schalter für Notabschaltung	Not-Aus-Schalter einbauen				
W	20.11	Bedienoberflächen sollten sich mit einem Zugriffsschutz sperren lassen.	Sperrung Bedienoberfläche				
F	20.12	Normen und Gesetze für Robotertechnik müssen eingehalten werden.	Normen und Gesetze				
F	20.13	Der Zugriff auf sämtliche Signale muss manuell zugänglich sein.	Manueller Zugriff				
F	20.14	Bei Störungen muss der Roboterarm in gesenkter Position stehen bleiben.	Störung				
F	20.15	Gesamtprodukt muss so gestaltet sein, dass keine Klemmgefahr für Benutzer entsteht.	Klemmgefahr				
F	20.16	Der Roboterarm muss in allen Betriebssituationen eine ausreichende Sicherheit gegen Materialversagen bieten	Mechanische Sicherheit	1,4			
F	20.17	Drehmomentsüberwachung, um Auto-Abschaltung nach Kollision zu gewährleisten	Drehmomentsüberwachung				
F	20.18	Der Werkstoff des Systems muss eine CE-Kennzeichnung aufweisen	CE-Kennzeichnung				
F	20.19	Es soll ein Abfangbehälter für den Fall einer Leckage der möglichen Betriebsflüssigkeit vorhanden sein	Umweltschutz	200		ml	
F	20.20	Bei temporären Überlasten muss eine Sicherung den Stromfluss unterbrechen	Schutzsysteme		3,5	A	
F	20.21	Im Störfall soll ein optisches Signal vorhanden sein	Schutzsysteme				
F	20.22	Der Greifarm muss die Anforderungen der DIN EN ISO 10218 erfüllen.	Sicherheitsnorm				
F	20.23	Am Roboterarm muss auf sicherheitsrelevante Gefahren hingewiesen werden.	Gefahrenhinweise				
F	21.1	Der Roboterarm muss über eine App steuerbar sein	Der Roboterarm muss eine Wlan Verbindung aufbauen können				
W	21.2	Es muss eine schnelle Signalverarbeitung erfolgen	Die Signalverarbeitung muss 0,5 Gigahertz betragen	0,5		GHz	
F	21.3	Roboterarm muss über einen PC ansteuerbar sein	Der Roboterarm muss über eine USB Schnittstelle verfügen				
F	21.4	Die Schaltungsplatine muss die Möglichkeit bieten mit der Software Proterface angesteuert werden zu können.	Ansteuerung Schaltungsplatine				
F	21.5	Die Schaltungsplatine muss die Möglichkeit bieten einen Computer per USB-Typ-B-Kabel anzuschließen.	Anschluss Steuerungsplatine Computer				
F	21.6	Der Roboter muss digitale Befehle und Programmsätze verarbeiten können.					
F	21.7	Die Bewegungen des Roboters sollen mit Rotations- und Widerstandssensoren überwacht werden.					
W	21.8	Die Betriebsdaten des Roboters sollen digital an einen Computer ausgegeben werden. (Temperatur, Laufzeit, Fehlercodes, etc.)					
F	21.9	Die Signalleuchte muss eine Lichtstärke von 400 mcd aufweisen	Leuchtstärke		400	mcd	
F	21.10	Informationen zum Bewegungsablauf der Hauptachsen sollen über eine geeignete PC-basierte Software eingegeben werden.	Eingabe des Bewegungsablaufs der Hauptachsen über PC-basierte Software				
F	21.11	Die Positionierung der Nebenachsen soll manuell durch den Bediener erfolgen.	Manuelle Positionierung der Nebenachsen				
F	21.12	Der Roboterarm muss die Möglichkeit bieten, Eingangsinformationen entgegenzunehmen.	Eingangsinformationen				

F	21.13	Der Roboterarm muss die Möglichkeit bieten, Ausgangssignale zu senden.	Ausgangsinformationen				
F	21.14	Der Roboterarm muss fähig sein, Programme auf einem Datenträger zu speichern und abzurufen.	Datenspeicherung				
	21.15	Signaltöne					
F	21.16	Es soll ein Signalton erfolgen, wenn ein neuer Befehl erfolgreich aufgenommen wurde.		60	80	dB	
	21.17	Es soll ein anderer Signalton erfolgen, wenn eine Störung vorliegt.		80	100	dB	
	21.18	Programmierung					
F	21.19	Die Programmierung soll über Arduino Mega Driver erfolgen.					
W	21.20	Bereits programmierte Befehle sollen per Smartphone App wiederholt werden können.					
F	21.21	Eine Lampe leuchtet, wenn der Roboterarm bestromt ist.	Lampe				
W	21.22	Der Roboter hat eine Signalsäule, welche den Betriebszustand anzeigt	Signalsäule				
W	22.1	Die Programmierung soll verständlich sein und eine einfache Struktur aufweisen.	Bedienfreundlichkeit der Programmierung				
W	22.2	Die Implementierschritte sollen durch Kommentare erklärt werden.	nachvollziehbare Programmierung				
W	22.3	Die Koordinaten der Bauteilpositionen sollen mit Hilfe einer Liste bzw. Arrays im absoluten Koordinatensystem vom Roboterfuß erfasst werden.	Koordinatenbestimmung				
W	22.4	Der Roboterarm muss die Möglichkeit bieten, eine Ursprungsposition zu speichern und automatisch zu dieser zurück kehren können.	Ursprungsposition		280	°C	
F	23.1	Das Material muss im FDM-Verfahren druckbar sein.	Schmelzpunkt				
F	23.2	Das Material muss als FDM-Filament verfügbar sein.	Materialverfügbarkeit				
F	23.3	Der Werkstoff der Lagerkugeln für die Z-Achse muss Stahl der Sorte 100Cr6 sein.	Werkstoff Lagerkugeln Z-Achse				
F	23.4	Der Werkstoff des für die X-Achse verwendeten Rundprofils muss nicht rostender Stahl sein.	Werkstoff Rundprofil X-Achse				
F	23.5	Der Werkstoff der Greiferfedern muss nicht rostender Edelstahl sein.	Werkstoff Greiferfedern				
W	23.6	Der Werkstoff muss mechanischen Belastungen zwischen 200N und 300N standhalten.		200	300	N	
F	23.7	Als Hilfsstoff soll ein geeigneter Schmierstoff zwischen den bewegenden Teilen benutzt werden	Schmierstoff	-	-	-	cm <sup>3</sup>
W	23.8	Die Lager, die zwischen den bewegenden Armen montiert werden, sollen aus Stahl sein	Lager	-	-	-	-
F	23.9	Der Greifer soll innen mit Gummi beschichtet sein um die zu befördernden Teile nicht zu beschädigen.	Material				
F	23.10	Das Gummi soll frühestens nach 2000h Betriebsstunden ersetzt werden müssen.	Verschleiß				
W	23.11	Das Filament soll optisch ansprechend sein.	Material				

## **Erklärung zur Zitation von Inhalten aus studentischen Arbeiten**

In Ergänzung zu meinem Antrag auf Zulassung zur Promotion in der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn erkläre ich gemäß §11 der Promotionsordnung und unter Beachtung der Regelung zur Zitation studentischer Arbeiten:

Die von mir vorgelegte Dissertation habe ich selbstständig verfasst, und ich habe keine anderen als die dort angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Es sind Inhalte studentischen Ursprungs (studentische Arbeiten) in dieser Dissertation enthalten.

Ich habe die verwendeten Arbeiten entsprechend der Regelung „Zitation aus studentischen Arbeiten in Dissertationen“ zitiert.

Paderborn, 11.04.2022:

## **Das Heinz Nixdorf Institut – Interdisziplinäres Forschungszentrum für Informatik und Technik**

Das Heinz Nixdorf Institut ist ein Forschungszentrum der Universität Paderborn. Es entstand 1987 aus der Initiative und mit Förderung von Heinz Nixdorf. Damit wollte er Ingenieurwissenschaften und Informatik zusammenführen, um wesentliche Impulse für neue Produkte und Dienstleistungen zu erzeugen. Dies schließt auch die Wechselwirkungen mit dem gesellschaftlichen Umfeld ein.

Die Forschungsarbeit orientiert sich an dem Programm „Dynamik, Mobilität, Vernetzung: Eine neue Schule des Entwurfs der technischen Systeme von morgen“. In der Lehre engagiert sich das Heinz Nixdorf Institut in Studiengängen der Informatik, der Ingenieurwissenschaften und der Wirtschaftswissenschaften.

Heute wirken am Heinz Nixdorf Institut acht Professoren mit insgesamt 130 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Pro Jahr promovieren hier etwa 15 Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler.

## **Heinz Nixdorf Institute – Interdisciplinary Research Centre for Computer Science and Technology**

The Heinz Nixdorf Institute is a research centre within the Paderborn University. It was founded in 1987 initiated and supported by Heinz Nixdorf. By doing so he wanted to create a symbiosis of computer science and engineering in order to provide critical impetus for new products and services. This includes interactions with the social environment.

Our research is aligned with the program “Dynamics, Mobility, Integration: Enroute to the technical systems of tomorrow.” In training and education the Heinz Nixdorf Institute is involved in many programs of study at the Paderborn University. The superior goal in education and training is to communicate competencies that are critical in tomorrow's economy.

Today eight Professors and 130 researchers work at the Heinz Nixdorf Institute. Per year approximately 15 young researchers receive a doctorate.

## Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

- |         |   |         |   |
|---------|---|---------|---|
| Bd. 379 | ABELDGAWAD, K.: A System-Level Design Framework for Networked Driving Simulation. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 379, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-942647-98-4   | Bd. 386 | SCHNEIDER, M.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung und Analyse von Wertschöpfungssystemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 386, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-947647-05-7   |
| Bd. 380 | JUNG, D.: Local Strategies for Swarm Formations on a Grid. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 380, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-942647-99-1   | Bd. 387 | ECHTERHOFF, B.: Methodik zur Einführung innovativer Geschäftsmodelle in etablierten Unternehmen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 387, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-947647-06-4  |
| Bd. 381 | PLACZEK, M.: Systematik zur geschäftsmodellorientierten Technologiefrühauflklärung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 381, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-947647-00-2   | Bd. 388 | KRUSE, D.: Teilautomatisierte Parameter-identifikation für die Validierung von Dynamikmodellen im modellbasierten Entwurf mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 388, Paderborn, 2019 – ISBN 978-3-947647-07-1                |
| Bd. 382 | KÖCHLING, D.: Systematik zur integrativen Planung des Verhaltens selbstoptimierender Produktionssysteme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 382, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-947647-01-9  | Bd. 389 | MITTAG, T.: Systematik zur Gestaltung der Wertschöpfung für digitalisierte hybride Marktleistungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 389, Paderborn, 2019 – ISBN 978-3-947647-08-8   |
| Bd. 383 | KAGE, M.: Systematik zur Positionierung in technologieinduzierten Wertschöpfungsnetzwerken. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 383, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-947647-02-6   | Bd. 390 | GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 15. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 21. und 22. November 2019, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 390, Paderborn, 2019 – ISBN 978-3-947647-09-5 |
| Bd. 384 | DÜLME, C.: Systematik zur zukunftsorientierten Konsolidierung variantenreicher Produktprogramme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 384, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-947647-03-3  | Bd. 391 | SCHIERBAUM, A.: Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden im Maschinenbau. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 391, Paderborn, 2019 – ISBN 978-3-947647-10-1  |
| Bd. 385 | GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 14. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 8. und 9. November 2018, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 385, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-947647-04-0 | Bd. 392 | PAI, A.: Computationally Efficient Modelling and Precision Position and Force Control of SMA Actuators. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 392, Paderborn, 2019 – ISBN 978-3-947647-11-8   |

## Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

- |         |   |         |   |
|---------|---|---------|---|
| Bd. 393 | ECHTERFELD, J.: Systematik zur Digitalisierung von Produktprogrammen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 393, Paderborn, 2020 – ISBN 978-3-947647-12-5   | Bd. 400 | GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 16. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 2. und 3. Dezember 2021, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 400, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-19-4 |
| Bd. 394 | LOCHBICHLER, M.: Systematische Wahl einer Modellierungstiefe im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 394, Paderborn, 2020 – ISBN 978-3-947647-13-2                                  | Bd. 401 | BRETZ, L.: Rahmenwerk zur Planung und Einführung von Systems Engineering und Model-Based Systems Engineering. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 401, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-20-0                      |
| Bd. 395 | LUKEI, M.: Systematik zur integrativen Entwicklung von mechatronischen Produkten und deren Prüfmittel. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 395, Paderborn, 2020 – ISBN 978-3-947647-14-9                                    | Bd. 402 | WU, L.: Ultrabreitbandige Sampler in SiGe-BiCMOS-Technologie für Analog-Digital-Wandler mit zeitversetzter Abtastung. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 402, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-21-7              |
| Bd. 396 | KOHLSTEDT, A.: Modellbasierte Synthese einer hybriden Kraft-/Positionsregelung für einen Fahrzeugachsprüfstand mit hydraulischem Hexapod. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 396, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-15-6 | Bd. 403 | HILLEBRAND, M.: Entwicklungssystematik zur Integration von Eigenschaften der Selbstheilung in Intelligente Technische Systeme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 403, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-22-4     |
| Bd. 397 | DREWEL, M.: Systematik zum Einstieg in die Plattformökonomie. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 397, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-16-3   | Bd. 404 | OLMA, S.: Systemtheorie von Hardware-in-the-Loop-Simulationen mit Anwendung auf einem Fahrzeugachsprüfstand mit parallelkinematischem Lastsimulator. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 404, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-23-1            |
| Bd. 398 | FRANK, M.: Systematik zur Planung des organisationalen Wandels zum Smart Service-Anbieter. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 398, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-17-0  | Bd. 405 | FECHTELPETER, C.: Rahmenwerk zur Gestaltung des Technologietransfers in mittelständisch geprägten Innovationsclustern. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 405, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-24-8             |
| Bd. 399 | KOLDEWEY, C.: Systematik zur Entwicklung von Smart Service-Strategien im produzierenden Gewerbe. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 399, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-18-7  |         |   |



Anforderungsänderungen sind ein wesentlicher Grund für Ineffizienzen und Projektfehlschläge in der Entwicklung komplexer technischer Systeme. Proaktives Management von Anforderungsänderungen hat das Potenzial, den Umgang mit Anforderungsänderungen effizienter zu gestalten. Dafür ist ein systematischer Ansatz erforderlich, der eine ganzheitliche Bewertung und Handhabung des Änderungsrisikos im industriellen Entwicklungskontext ermöglicht.

Im Rahmen dieser Dissertation wird mit der ProMaRC-Methodik ein neuartiger Ansatz für das proaktive Management von Anforderungsänderungen vorgestellt. Die Methodik wurde in enger Zusammenarbeit mit Industrieanwender:innen aus der Automobilindustrie entwickelt und anhand von fünf Fallstudien validiert. Mittels automatisierter Abhängigkeitsanalyse auf Grundlage künstlicher Intelligenz wird der Anwendungsaufwand gegenüber bestehenden Ansätzen reduziert. Die teilautomatisierte Bewertung und Handhabung der Änderungswahrscheinlichkeit und -auswirkung erfolgt anhand eines modifizierten PageRank-Algorithmus und umfasst erstmalig alle für die Risikoanalyse relevanten Einflussfaktoren. Die Validierung belegt, dass durch die ProMaRC-Methodik eine überzeugende Kombination aus praxistauglichem Anwendungsaufwand und Vollständigkeit der Analyse erzielt wird. Damit erschließt diese Dissertation das bisher kaum beachtete Forschungsfeld des proaktiven Managements von Anforderungsänderungen und fördert eine effizientere Produktentwicklung.