

## Veranstaltungsort:

Heinz Nixdorf MuseumsForum  
Fürstenallee 7, 33102 Paderborn

- **Mechatronische Produkte**  
(neue Funktionalitäten, Industrie 4.0, Kosteneffizienz, Zuverlässigkeit, ...)
- **Ressourceneffizienz**  
(Energie, Material, ...)
- **Automatisierte Mobilität**  
(Konzepte, Modelle, Sensorik)
- **Systems Engineering und Entwicklungsmanagement**  
(Prozesse, Verfahren, Software, ...)
- **Innovative Konzepte und digitale Geschäftsmodelle**  
(Modelle, Regelung, Optimierung, Eco-Systeme)
- **Nutzerfreundlichkeit und Akzeptanz**  
(Assistenzsysteme, Schnittstellen, Interaktion, Gesetzgebung, ...)
- **Systemvernetzung und Systemintegration**  
(Konzepte, Verfahren, ...)
- **Smarte Aktoren**  
(Konzepte, Beispiele, ...)
- **Serienfertigung mechatronischer Produkte**  
(Fallbeispiele, Komponenten, Architektur, Qualitätsmanagement, ...)

[www.VDI-Mechatroniktagung.de](http://www.VDI-Mechatroniktagung.de)

# Priorisierung von Anforderungen für die Entwicklung mechatronischer Systeme

## Prioritization of Requirements for the Development of Mechatronic Systems

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler, Christian Oleff, M.Sc., Philipp Scholle, M.Sc. RWTH, Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, Lehrstuhl für Produktentstehung, 33102 Paderborn, Deutschland, {iris.graessler, christian.oleff, philipp.scholle}@hni.upb.de

### Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein Ansatz vorgestellt, welcher die Bewertung des Risikos von Anforderungsänderungen in der Entwicklung mechatronischer Systeme ermöglicht. Ausgehend von einer Anforderungsliste werden die Wechselwirkungen in einer Requirements Structure Matrix (RSM) teilautomatisch erfasst. Parallel werden Anforderungen in Bezug auf ihren Ursprung („Einflussbereich“) kategorisiert und darauf aufbauend priorisiert. Diese Priorisierung basiert auf dem Veränderungsrisiko und wird durch die drei Kriterien „Dynamik“, „Unsicherheit der Wissensbasis“ und „Relevanz für den Entwicklungsprozess“ charakterisiert. Das Vorgehen wird anhand strukturierter Interviews mit Projektleitern und Entwicklern und der Fallstudie eines Pedelecs als mechatronischem System validiert. Durch die Anwendung der Methode können disziplinübergreifende Abhängigkeiten von Anforderungen zur Reduktion von Iterationen in der Entwicklung mechatronischer Systeme – wie dem Pedelec – berücksichtigt werden.

### Abstract

In the development of mechatronic systems, risks are caused by changing requirements. In this paper, an approach towards the assessment of such kind of risks is presented. Starting with the requirements list, interactions between requirements are structured in the Requirements Structure Matrix (RSM) semi-automatically. In parallel, requirements are categorized according to their source (“influence area”) and prioritized. This prioritization is based on the risk of change. It is characterised by the criteria “dynamics”, “uncertainty of knowledge base” and “relevance for product development”. The approach is validated by two approaches: structured interviews with project managers and developers as well as a case study focusing on a pedelec. By application of the approach, cross-disciplinary relations of requirements can be considered in order to reduce iterations in the development of mechatronic systems such as the pedelec.

## 1 Einleitung

In der Entwicklung mechatronischer Systeme spielen Anforderungen aus verschiedenen Disziplinen (Softwaretechnik, Maschinenbau und Elektrotechnik) eine zentrale Rolle. In der Regel muss eine große Anzahl von Anforderungen a) in Bezug auf alle beteiligten Disziplinen und b) auf allen Detaillierungsebenen des Systems erfasst und gehandhabt werden [1]. Änderungen einzelner Anforderungen können Auswirkungen auf andere Anforderungen (auch disziplinübergreifend) implizieren [2]. Solche Anforderungsänderungen sind ein Hauptgrund für Iterationen und Verzögerungen in Produktentwicklungsprojekten [3]. Ursache von Anforderungsänderungen können externe Einflüsse (z.B. zunehmende Präzision von Kundenwünschen) sein, vielfach führen jedoch auch interne Einflüsse (z.B. Konkretisierung, Ergänzung oder Korrektur von Anforderungen) zu Anforderungsänderungen [4]. Anforderungsmanagement ist daher ein Erfolgsfaktor in Produktentwicklungsprojekten [5]. Dabei muss die Abhängigkeit von Anforderungen explizit beachtet werden [6]. Gleichzeitig muss auch das den Anforderungen inhärente Veränderungsrisiko in die Betrachtung integriert werden [7]. Ziel dieses Beitrags ist daher die Beantwortung der folgenden Forschungsfragen:

- Wie können Risiken von Anforderungsänderungen in interdisziplinären Produktentwicklungsprojekten erfasst und bewertet werden?
- Wie kann diese Betrachtung um die Wechselwirkungen der Anforderungen erweitert und zur Ableitung von Reaktionsstrategien genutzt werden?

In diesem Beitrag wird aufbauend auf einer Literaturstudie zum Anforderungsmanagement und dem Risikomanagement (Abschnitt 2) eine Methode zur Risikobewertung von Anforderungsänderungen in der Entwicklung mechatronischer Produkte vorgestellt (Abschnitt 3). Diese wurde für die Validierung in einem Software-Werkzeug implementiert. Die Validierung erfolgt durch strukturierte Interviews mit Entwicklern und die Anwendung an einer Fallstudie der Entwicklung eines Pedelecs (Abschnitt 4).

## 2 Stand der Wissenschaft

In diesem Kapitel werden die etablierten Ansätze des Anforderungs- und Risikomanagements erläutert, auf die sich diese Arbeit stützt. Außerdem werden Forschungsergebnisse zu Herausforderungen in der interdisziplinären Zusammenarbeit dargelegt und auf dieser Grundlage der Bedarf einer methodischen Unterstützung für mechatronische Entwicklungsvorhaben abgeleitet.

## 2.1 Anforderungsmanagement

Die Erhebung, Festlegung, Dokumentation und Nachverfolgung der Anforderungen wird in der Entwicklung mechatronischer Systeme unter dem Begriff Requirements Engineering zusammengefasst [3]. Durch Dahlstedt wird in der Domäne Softwaretechnik ein Referenzmodell vorgestellt, welches verschiedene Typen von Anforderungsabhängigkeiten aufbauend auf dem Referenzmodell von Pohl (siehe [3]) beinhaltet [8]. Beide Referenzmodelle ermöglichen eine Strukturierung der Anforderungen nach verschiedenen Kriterien wie etwa strukturellen Aspekten oder im Hinblick auf die Zielsetzung innerhalb des Entwicklungsprojektes.

Eben und Lindemann verwenden zur Strukturierung der Anforderungen die Wechselwirkungen zwischen den Anforderungen auf Basis der Design Structure Matrix (DSM) [9]. Hierbei werden die Anforderungen im Hinblick auf ihre Aktivität, Passivität und Kritikalität innerhalb des Anforderungsnetzwerkes bewertet [9].

Die teilautomatische Bewertung von Anforderungsabhängigkeiten wird durch Gräßler et al. [10] vorgeschlagen. Hierbei werden die Anforderungen auf Grundlage einer Regelbasis vernetzt. Ausgangspunkt sind die den einzelnen Anforderungen zugeordneten Hauptmerkmale.

In der Domäne Softwaretechnik werden Requirements Traceability-Analysen genutzt, um Wechselwirkungen der Anforderungen zu identifizieren. Hierbei ist die Nachverfolgbarkeit der Anforderungen (engl. Traceability) entscheidend für die Analyse von Wechselwirkungen und Anforderungsänderungen. Auf Basis dieser kann die Stabilität von Anforderungen etwa durch Requirements Stability Indices (RSIs) bewertet und Anforderungen priorisiert werden [11, 12]. Innerhalb der Change Propagation Method (CPM) werden Risiken durch die Propagation von Änderungen in komplexen interdisziplinären Systemen bewertet [13]. Hierbei dient die DSM des Systems als Referenz. Auf Basis dieser Wechselwirkungen und des Veränderungsrisikos (ausgedrückt durch die Änderungswahrscheinlichkeit) können so die Auswirkungen von Änderungen erfasst werden [13]. Der Ansatz beruht hierbei auf den einzelnen Komponenten, nicht auf den Anforderungen als solches.

## 2.2 Interdisziplinäre Entwicklung

Interdisziplinäre Teams haben vielfach Kommunikationsschwierigkeiten. Diese können zu Ineffizienzen führen [14, 15] und effektive Entscheidungsfindung erschweren [15]. Dies führt bei Anforderungsänderungen zu dem Problem, dass die Änderungspropagation innerhalb des Anforderungsnetzwerkes aufgrund unzureichender Kommunikation der Disziplinen unberücksichtigt bleibt. Des Weiteren haben Entwickler nur für die jeweils angestammte Disziplin bzw. den Fachbereich ein tiefgreifendes Verständnis des Systems. Da Anforderungsänderungen üblicherweise auf Grundlage von Erfahrungswerten antizipiert, bewertet und konsistent im gesamten Anforderungsset implementiert werden, geht mit einem eingeschränkten Systemverständnis häufig eine fehlerbehaftete Handhabung von disziplinüber-

greifenden Anforderungsänderungen einher [13]. Insbesondere das Wissen über Disziplinen, die nicht in direkten Zusammenhang mit dem Aufgabenbereich eines Entwicklers stehen, werden zumeist kaum in die Überlegungen einbezogen [13].

## 2.3 Risikomanagement

Für die Entscheidung über die Implementierung einer Anforderungsänderung ist es notwendig, das damit verbundene Risiko zu handhaben. Risikomanagement ist ein immanenter Bestandteil der Unternehmensführung und ist dadurch bedingt, dass Entscheidungen unter Unsicherheit getroffen werden müssen [16]. Solche Entscheidungen sind sowohl mit negativen als auch mit positiven Effekten verbunden. Der Fokus des Risikomanagements liegt aber zumeist auf den negativen Effekten [17]. Ein elementares Ziel des Risikomanagements ist es, die Risikokosten zu senken oder zu vermeiden [16, 18]. Dafür werden kontinuierlich relevante Risiken identifiziert und bewertet. Die Beurteilung erfolgt üblicherweise anhand der Eintrittswahrscheinlichkeit und des prognostizierten Schadensausmaßes; sie wird anhand dieser Kennwerte in ein Risikoportfolio eingeordnet [16, 17]. Potenzielle Maßnahmen zur Steuerung des Risikos werden aus der Risikoklassifizierung abgeleitet und sind die Risikovermeidung, -verminderung, -begrenzung, -überwälzung und -akzeptanz [16].

## 2.4 Handlungsbedarf

Voraussetzung für die Initiierung geeigneter Risikosteuerungsmaßnahmen im Kontext von Anforderungsänderungen ist eine umfassende und hochwertige Datengrundlage. Der bisherige Umgang mit Anforderungsänderungen ist methodisch unzureichend unterstützt und vielfach zu sehr auf eine Disziplin ausgerichtet. Für eine effektive und effiziente Handhabung von Anforderungsänderungen als Erfolgsfaktor muss das Wissen über Anforderungsabhängigkeiten aller Disziplinen gebündelt und geeignete Maßnahmen zur methodischen und informationstechnischen Unterstützung abgeleitet werden.

## 3 Methode zur Priorisierung von Anforderungen in der Entwicklung mechatronischer Produkte

In diesem Abschnitt wird die Methode zur Priorisierung von Anforderungen in der Entwicklung mechatronischer Produkte dargestellt. Die Methode baut hierbei auf den Vorarbeiten zur teilautomatischen Vernetzung (siehe [10]) und der Priorisierung von Anforderungen (siehe [7]) auf. Die Methode ist in **Abbildung 1** dargestellt. Ausgangspunkt der Methode sind die erfassten und dokumentierten Anforderungen an das mechatronische Produkt in einer Anforderungsliste. Die Anforderungen werden dann parallel im Hinblick auf ihre Vernetzung (Abschnitt 3.1) und ihre Priorisierung (Abschnitt 3.2) analysiert. Die Ergebnisse werden anschließend in der Risikoklassifizierung (Abschnitt 3.3) zusammengeführt.

### 3.1 Vernetzung

Die Anforderungen werden zur Analyse der Vernetzung in einer Requirements Structure Matrix (RSM) erfasst. In dieser werden die Abhängigkeiten der Anforderungen untereinander abgebildet [19]. Die RSM ist gerichtet und gewichtet, so dass Wirkrichtungen von propagierenden Anforderungsänderungen ebenso erfasst werden wie die Stärke der Einflüsse. Die Ableitung der RSM stellt hierbei einen großen Aufwand in der Entwicklung dar [10]. Zur Reduktion des Aufwandes wird der Ansatz der teilautomatischen Ableitung der RSM nach Gräßler et al. [10] zum Aufstellen der RSM verwendet. Den Anforderungen werden hierzu Hauptmerkmale (analog zu den Hauptmerkmalen nach Pahl/Beitz [20]) zugeordnet. Für diese Hauptmerkmale sind die generischen Abhängigkeiten auf Basis einer Literaturstudie durch Gräßler et al. [10] modelliert worden. Auf Basis des generischen Abhängigkeitsmodells und der spezifisch den Anforderungen zugeordneten Hauptmerkmale wird die RSM teilautomatisch abgeleitet. Anwender können die resultierende RSM gegebenenfalls auf der Grundlage von Erfahrungswissen anpassen.

### 3.2 Priorisierung

Die Priorisierung der Anforderungen wird parallel zur Vernetzung durchgeführt. Im ersten Schritt durch die Erfassung der Einflüsse, welche innerhalb der Produktentwicklung Anforderungsänderungen hervorrufen können. Die Identifikation dieser Einflüsse erfolgt hierbei unternehmens- und produktspezifisch (siehe [7]). Zur Reduktion des Aufwandes werden die Einflüsse in Einflussbereiche gegliedert (bspw. Kunden, rechtliche Rahmenbedingungen, Produktionsrestriktionen, ...), welche anschließend im Hinblick auf ihr Veränderungsrisiko bewertet werden. Die Bewertung ist dabei an die in der industriellen Praxis verbreitete Methode der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) angelehnt (siehe [7]). Diese Bewertung erfolgt auf Basis der Kriterien „Unsicherheit“, „Dynamik“ und „Relevanz“ (vgl. [7]). Die Kriterien bilden dabei die Unsicherheit der Anforderungen (in Bezug auf die Vollständigkeit und die explizite Erfassung dieser), die Dynamik (als Einschätzung der Häufigkeit von Anforderungsänderungen und deren Intensität) sowie der Relevanz (in Bezug auf die Realisierbarkeit von Anforderungsänderungen und deren Umfang) ab. Aus der Bewertung dieser drei Kriterien wird analog zur FMEA ein Prioritäts-Score (PS)

durch Multiplikation der drei Zahlenwerte (Skala 1 – 10) berechnet.

### 3.3 Risikoklassifizierung

Die klassische Risikoklassifizierung stützt sich auf die Beurteilung der Eintrittswahrscheinlichkeit und des Schadensausmaßes [16]. Auch die in dieser Arbeit vorgestellte Methode erfasst alle dafür relevanten Einflussgrößen, unterscheidet aber nicht strikt nach den beiden genannten Faktoren. Die Eintrittswahrscheinlichkeit lässt sich aus der Passivsumme, der Unsicherheit und Dynamik ableiten, während das Schadensausmaß aus der Aktivsumme und der Relevanz resultiert. Ein Grund für die abweichende Zuordnung im Risikoportfolio ist die Dimensionalität der Kennwerte und die damit einhergehende Unschärfe bei einer Verrechnung. Während die Priorisierungskennwerte (Dynamik, Unsicherheit, Relevanz) auf einer standardisierten Skala erfasst werden, sind die Abhängigkeiten (Aktiv-/ Passivsumme) absolute Werte, die vom untersuchten Anforderungsset abhängen. Ein weiterer Grund ist das Ziel einer intuitiven Anwendbarkeit für den Entwickler. Durch die Strukturierung der Ergebnisse entsprechend des Vorgehen der Datenerfassung (Priorisierung und Vernetzung) sollen Anwender die Einflüsse der Kennwertgrößen und etwaiger Veränderungen besser nachvollziehen und interpretieren können.

Die Intensität der Vernetzung wird in die Kategorien „Hoch“, „Mittel“ und „Gering“ (vgl. Systemgrid nach Reibnitz [21]). Darin ist die Aktivsumme der Anforderungen höher gewichtet als die Passivsumme. Grund dafür ist, dass risikoorientierte Maßnahmen insbesondere bei Anforderungen wirken, die einen starken Änderungsimpuls in das Netzwerk initiieren (hohe Aktivsumme). Der Grad der Beeinflussung durch andere Anforderungen (Passiv-Summe) ist wesentlich schwerer durch Maßnahmen zu beeinflussen (siehe auch Abschnitt 3.4).

Die Einordnung der Anforderungen in Prioritätskategorien kann an die situativen Bedarfe angepasst werden. In diesem Fall werden analog zur Vernetzung die drei Kategorien „Hoch“ ( $PS > 400$ ), „Mittel“ ( $400 \leq PS \leq 100$ ) und „Gering“ ( $100 > PS$ ) unterschieden. Das Ergebnis der Analyse von Vernetzung und Priorisierung der Anforderungen wird in einem Risikoportfolio mit den Achsen „Prioritäts-Score“ und „Vernetzungs-Score“ dargestellt. Insgesamt resultieren daraus drei Klassen zur Darstellung des Änderungsrisikos von Anforderungen: „Kritisch“, „Relevant“ und „Unkritisch“.

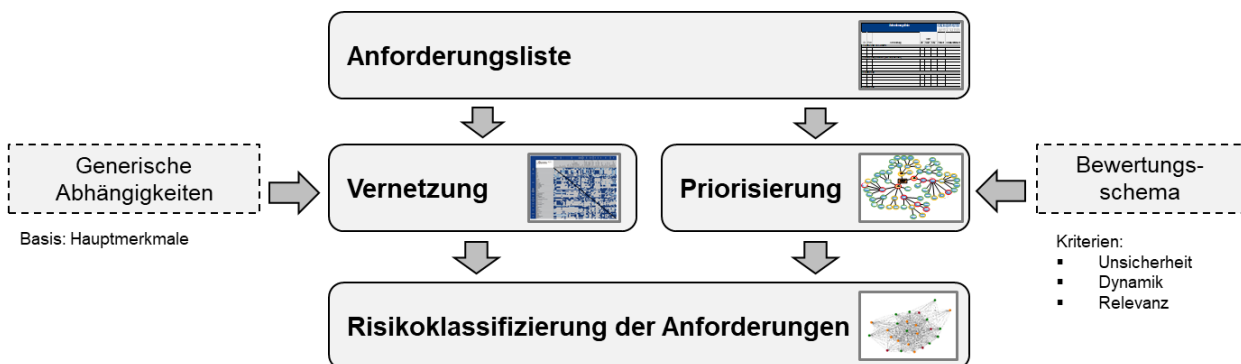


Abbildung 1 Methode zur Priorisierung von Anforderungen in der Entwicklung mechatronischer Produkte

### 3.4 Risikoportfolio

In einem Risikoportfolio werden alle Anforderungen und deren zweidimensionale Risikobewertung visualisiert. Hilfreich ist die Information über das Anforderungsänderungsrisiko bereits in den frühen Phasen einer Entwicklung mechatronischer Produkte. Sobald das zu entwickelnde Produkt durch ein initiales Anforderungsset (z.B. Lastenheft) beschrieben ist, kann eine Vorabanalyse durchgeführt werden. Diese kann sowohl den Konkretisierungsbedarf des Anforderungssets aufzeigen als auch eine genauere Zeit- und Kostenkalkulation ermöglichen. Bis zur Einigung auf ein Pflichtenheft können sehr wirksame Risikosteuerungsmaßnahmen initiiert werden, die das spätere Projektrisiko deutlich beeinflussen.

Im weiteren Verlauf des Entwicklungsprojekts kann das kontinuierlich angewandte Risikoportfolio die Identifikation und Handhabung änderungskritischer Anforderungen optimieren. Dies schließt die konsistente Umsetzung und Dokumentation einer Änderungskaskade mit ein. Auch nach der Festlegung der Produktgestalt („Design Freeze“), können zur Fehlerkorrektur oder durch den Kunden Änderungen erforderlich werden. In solchen Phasen wird insbesondere die Entscheidung über den Implementierungsgrad von Änderungsimpulsen unterstützt.

Abhängig von dem Entwicklungsvorhaben können unterschiedliche Maßnahmen zur aktiven Steuerung des Risikos von Anforderungsänderungen umgesetzt werden. Diese können sowohl präventiv als auch reaktiv sein. Für eine Reduzierung der Priorität sind die drei Faktoren Unsicherheit, Dynamik und Relevanz entscheidend.

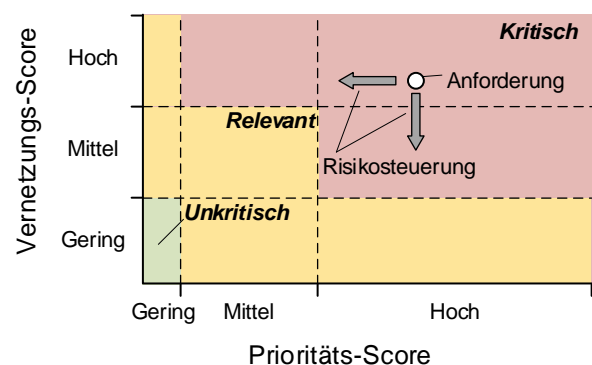
Die Unsicherheit repräsentiert das Wissen über den Einflussbereich und kann somit durch Maßnahmen zur Informationsgewinnung vermindert werden. Beispielsweise können eine Stakeholderanalyse (vgl. [22]), zusätzliche Gespräche mit den Stakeholdern oder auch Marktanalysen die Wissensgrundlage aufwerten und eine vollständige und korrekte Definition von Anforderungen begünstigen.

Die Dynamik einer Anforderung ist schwieriger zu beeinflussen, da der Anzahl und Intensität von Änderungen einer Anforderung häufig kausale Zusammenhänge zugrunde liegen. Dies bezieht sich jedoch nur auf erforderliche Änderungen. Eine Sensibilisierung der Stakeholder und die bereits erläuterte Aufwertung der Wissensgrundlage sind wirksame Maßnahmen, um nicht zwingend erforderliche Änderungsimpulse zu reduzieren. Dem können auch Maßnahmen zur Risikoüberwälzung förderlich sein, bei denen der Änderungsaufwand beispielsweise durch eine entsprechende Gestaltung des Pflichtenhefts oder anderer Verträge vom Stakeholder zu tragen ist.

Die Relevanz von Anforderungen kann beispielsweise durch das vorsorgliche Integrieren von Änderungsspielräumen reduziert werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Anpassung der Produktkonzeption (z.B. Modularisierung oder alternatives Lösungsprinzip) mit dem Ziel, dass besonders änderungskritische Anforderungen weniger bedeutsam für den Projekterfolg werden oder leichter zu realisieren sind.

Außerdem kann eine wiederholte Evaluation der Anforderungsverbindlichkeit (Wunsch vs. Forderung) auf Grundlage der Risikoinformationen angestrebt werden.

All diese Faktoren zielen auf eine Verschiebung der Anforderungen entlang der X-Achse (PS) ab. Eine Verschiebung entlang der Y-Achse (VS) ist durch das Entwicklungsteam schwieriger umzusetzen, da für die Vernetzungsintensität vor allem unbeeinflussbare physikalische Wirkprinzipien ausgewertet werden. Aktiv könnte beispielsweise durch Modularisierung die Schnittstelle(n) zwischen vernetzten Teilsystemen beeinflusst werden. Aufgrund des großen Aufwands und einer entsprechend hohen Anzahl an neuen Änderungsimpulsen sind Maßnahmen zur Reduzierung der Priorität und einem risikosensiblen Umgang mit stark vernetzten Anforderungen in vielen Fällen vorteilhafter. Ein schematisches Risikoportfolio mit den Effekten von Risikosteuerungsmaßnahmen wird in **Abbildung 2** dargestellt.



**Abbildung 2** Anforderungsänderungs-Risikoportfolio zur Ableitung von Steuerungsmaßnahmen

## 4 Validierung

Die Validierung der Methode zur Priorisierung der Anforderungen in der Entwicklung mechatronischer Systeme erfolgt in zwei Schritten: In einem ersten Schritt wird die Methode in strukturierten Interviews mit Fachexperten validiert (Abschnitt 4.1). In einem zweiten Schritt erfolgt die Anwendung auf die Fallstudie eines Pedelecs als mechatronisches System (Abschnitt 4.2).

### 4.1 Interviews mit Anwendern

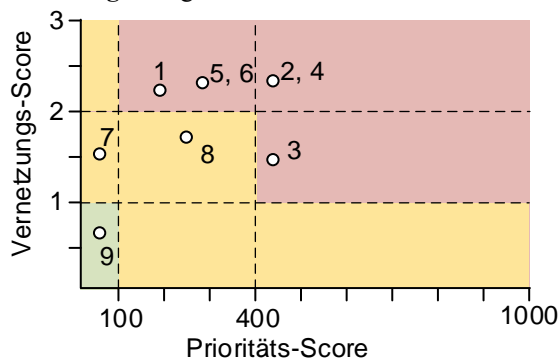
Die semi-strukturierten Interviews wurden mit Projekt- und Entwicklungsingenieuren sowie -leitern aus verschiedenen Branchen wie der Automobil-, Umform- und Bäckereitechnik geführt.

Der prinzipielle Nutzen der Methode in der Entwicklung mechatronischer Systeme wird dabei als hoch eingeordnet. Der Ansatz einer Kombination aus teilautomatischer Vernetzung und Priorisierung mittels des FMEA-analogen Prioritäts-Scores wird von den Anwendern positiv bewertet, da zwar durch die Verallgemeinerung von Anforderungseigenschaften die Genauigkeit der Bewertung reduziert wird, aber im Gegenzug der Anwendungsaufwand sinkt und damit die Anwendbarkeit für umfangreiche Anforderungslisten gefördert wird. Die Ergebnisgüte der Methode

und die Wirksamkeit der darauf basierenden Risikosteuerungsinstrumente kann noch nicht ausreichend bewertet werden. Erste Pilotanwendungen werden aber als vielversprechend bezüglich der Erkennung von Anforderungsänderungen, ihrer Propagation und der inhärenten Risiken eingeschätzt. Anwender sehen die Vorteile insbesondere bei der Sensibilisierung für interdisziplinäre Auswirkungen von Anforderungsänderungen und der Absicherung von erfahrungsgestützten Einschätzungen. Kritikpunkte an der Methode adressieren unter anderem die Abhängigkeit von der subjektiven Bewertung der Priorität sowie die Sensitivität der Ergebnisse in Bezug auf die zu Grunde liegende Vernetzung der Anforderungen. Die Portfolio-Darstellung stellt für die Anwender einen hohen Nutzen in Bezug auf die Klassifizierung der Anforderungen dar.

## 4.2 Fallstudie – Pedelec

Die Methode wurde zudem durch eine Fallstudie validiert, deren Betrachtungsgegenstand durch ein Pedelec festgelegt war. Die Anforderungsliste enthält Anforderungen aus den Domänen Softwaretechnik, Maschinenbau und Elektrotechnik. Die Anforderungen wurden mittels der teilautomatischen Erkennung von Anforderungsabhängigkeiten auf Basis der Hauptmerkmale in eine RSM überführt. Parallel wurden die Einflussbereiche analysiert. Hierbei sind insbesondere die Anforderungen aus den Einflussbereichen „Endkunde“ und „Batteriezulieferer“ hoch priorisiert. Das Portfolio zur Klassifizierung für einen Auszug aus der insgesamt 80 Elemente umfassenden Anforderungsliste ist in **Abbildung 3** dargestellt.



**Abbildung 3** Portfolio zur Klassifizierung der Anforderungen für das Pedelec (grün: unkritisch, gelb: relevant, rot: kritisch)

Als kritisch werden dabei Anforderungen an Rad- und Rahmengröße (1), Motordrehmoment (2), Gesamtmasse (3) sowie Anforderungen an den Akku (4, 5, 6) (Energiedichte, Nennspannung und Ladestrom) klassifiziert. Diese stammen einerseits aus den hoch priorisierten Einflussbereichen, sind aber andererseits auch stark mit anderen Anforderungen vernetzt. Änderungen an diesen Anforderungen können daher propagierende Anforderungsänderungen verknüpfter Anforderungen, etwa der Masse des Akkus (7) oder der Dauerleistung des Pedelec (8) hervorrufen. Die Anforderung an die Traglast des Gepäckträgers (9) wurde hingegen als unkritisch eingestuft, da diese einem gering priorisierten Einflussbereich zugeordnet wurden und gleichzeitig nur in geringem Maße mit den anderen Anforderungen vernetzt ist. Die Methodenanwendung war dabei

in zweierlei Hinsicht hilfreich. Einerseits deckten sich zahlreiche Vorabeschnitzungen der Anwender mit den Analyseergebnissen. Dies lässt darauf schließen, dass die erfahrungsbasierte Beurteilung hochwertige Ergebnisse liefert. Die Methode leistet in diesem Fall eine Rückbestätigung und Absicherung. Andererseits werden dem Anwender aber auch bisher unberücksichtigte Anforderungen aufgezeigt. Eine Sensibilisierung und Ausweitung der Perspektive findet statt. Das bezog sich in der Fallstudie zumeist auf Anforderungen der Risikoklasse „Relevant“, dessen Bewertung zudem häufig auf interdisziplinär wirkende Abhängigkeiten zurückzuführen war. Eine Erklärung könnte sein, dass bei einer unstrukturierten Beurteilung vorwiegend kritische Anforderungen in den Fokus rücken. Die Vielzahl an zunächst unwichtig erscheinenden Anforderungen wird nur unzureichend betrachtet. Genau bei solchen Anforderungen leistet die Methode eine Sensibilisierung der Anwender und zeigt die Risikoeffekte komplexer Zusammenhänge auf. Diese sind bei genauerer Analyse durchaus nachvollziehbar, werden bei einer oberflächlichen Betrachtung und disziplinspezifischen Überlegungen aber häufig unterbewertet.

## 5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde eine Methode vorgestellt, die die Erfassung und Bewertung von Anforderungsänderungen in interdisziplinären Entwicklungsprojekten ermöglicht. Dies bezieht die Wechselwirkungen zwischen Anforderungen ein und führt dadurch zu einer ganzheitlichen Beurteilung. Durch die steigende Komplexität und Interdisziplinarität werden insbesondere die Abhängigkeiten zwischen den Anforderungen und die Änderungspropagation in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Zudem wird durch das resultierende Risikoportfolio die Ableitung geeigneter Risikosteuerungsmaßnahmen erleichtert und anhand exemplarischer Vorgehensweise erläutert. Auf Grundlage dieser Informationen können Ineffizienzen bei der Handhabung von disziplinübergreifenden Anforderungsänderungen verringert werden.

Die Validierung durch Anwender-Interviews und die Fallstudie am Beispiel des Pedelecs zeigen, dass die Methode die Möglichkeiten einer rationalen Entscheidungsfindung erweitert und dadurch die erfolgreiche Entwicklung mechatronischer Systeme unterstützt. Neben dem aktuell noch hohen initialen Einführungsaufwand der Methode stellt auch die zum Teil unstrukturierte Dokumentation der Anforderungen in Industrieunternehmen ein Hindernis für die Anwendung dar. Außerdem sind die Risikosteuerungsmaßnahmen zu erweitern und hinsichtlich Wirksamkeit zu analysieren. Dies soll durch die kontinuierliche Anwendung in unterschiedlichen Entwicklungsprojekten mechatronischer Systeme umgesetzt werden.

## Danksagung

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „OptiAMix“ wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Additive Fertigung – Individualisierte Produkte, komplexe Massenprodukte, innovative Materialien (ProMat\_3D)“ gefördert.

## Literatur

- [1] Weber, M.; Weisbrod, J.: "Requirements engineering in automotive development. Experiences and challenges". In: IEEE Software 20 (2003) 1, S. 16–24.
- [2] Pohl, K.; Rupp, C.: "Requirements engineering fundamentals". Rocky Nook, Santa Barbara, CA, 2015.
- [3] Pohl, K.: "Requirements engineering. Fundamentals, principles, and techniques". Springer, New York, 2010.
- [4] 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.
- [5] Brauns, C.: „Requirements Engineering und Management in der wehrtechnischen Beschaffung. Empirische Bestandsaufnahme, Konzeptentwicklung, Evaluation“. Dissertation, Hamburg, 2016.
- [6] Scholle, P.; Song, Y.-W.; Herzog, M.; Bender, B.; Gräßler, I.: „Methoden der Anforderungsstrukturierung zur Steuerung von Produktentwicklungsprozessen“. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.) Design for X. Beiträge zum 26. DfX Symposium. Hamburg, 2015, S. 121–132.
- [7] Gräßler, 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. Hamburg, 2018, S. 333–344.
- [8] Dahlstedt, Å. G.; Persson, A.: "Requirements Interdependencies: State of the Art and Future Challenges". In: Aurum, A.; Wohlin, C. (Hrsg.) Engineering and Managing Software Requirements. Berlin, Heidelberg, 2005, S. 95–116.
- [9] Eben, K. G. M.; Lindemann, U.: "Structural Analysis of Requirements. Interpretation of structural criteria" 12<sup>th</sup> International Dependency and Structure Modelling Conference DSM '10, 2010, S. 249–261.
- [10] Gräßler, I.; Scholle, P.; Hentze, J.; Oleff, C.: "Semi-Automated Assessment of Requirement Interrelations". In: Marjanović, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojčević, N.; Škec, S. (Hrsg.) Proceedings of the DESIGN 2018 15<sup>th</sup> International Design Conference, 2018, S. 325–334.
- [11] Shao, F.; Peng, R.; Lai, H.; Wang, B.: "DRank: A semi-automated requirements prioritization method based on preferences and dependencies". In: Journal of Systems and Software 126 (2017) Supplement C, S. 141–156.
- [12] Christopher, F. X.; Chandra, E.: "Prediction of software requirements stability based on complexity point measurement using multi-criteria fuzzy approach". In: International Journal of Software Engineering & Applications (2012) Vol. 3 No. 6, S. 101–115.
- [13] Clarkson, P. J.; Simons, C.; Eckert, C.: "Predicting Change Propagation in Complex Design". In: Journal of Mechanical Design 126 (2004) 5, S. 788.
- [14] Feith, A.: „Zur Fachkommunikation interdisziplinärer Teams in der Produktentwicklung“. Dissertation, Darmstadt, 2014.
- [15] Janich, N.; Zakharova, E.: „Wissensasymmetrien, Interaktionsrollen und die Frage der „gemeinsamen“ Sprache in der interdisziplinären Projektkommunikation“. In: Fachsprache 33 (2011) 3–4, S. 187–204.
- [16] Diederichs, M.: „Risikomanagement und Risikocontrolling“. Verlag Franz Vahlen, München, 2012.
- [17] Vanini, U.: „Risikomanagement. Grundlagen, Instrumente, Unternehmenspraxis“. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2012.
- [18] Saitz, B.; Braun, F.: „Das Kontroll- und Transparenzgesetz. Herausforderungen und Chancen für das Risikomanagement“. Gabler Verlag, Wiesbaden, 1999.
- [19] Gräßler, I.; Hentze, J.: „Structuring and Describing Requirements in a Flexible Mesh for Development of Smart Interdisciplinary Systems“. In: Araujo, A.; Mota Soares, C. A. (Hrsg.) Smart Structures and Materials. Basel, 2017, S. 1622–1631.
- [20] Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (H.): „Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung“. Springer, 2013.
- [21] Reibnitz, U. v.: „Szenario-Technik. Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung“. Gabler, Wiesbaden, 1992.
- [22] Freeman, R. E.: "Strategic management. A stakeholder approach". Pitman, Boston Mass. u.a., 1984.