

Konzipierung eines selbstoptimierenden hybriden Energiespeichersystems unter besonderer Berücksichtigung der Verlässlichkeit

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier, Peter Iwanek, Rafał Dorociak

Heinz Nixdorf Institut

Fürstenallee 11, 33102 Paderborn

Tel.05251 / 60 6267 , Fax.05251 / 60 6268

E-Mail: Peter.Iwanek@hni.uni-paderborn.de

Karl Stephan Stille, Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker

Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik, Universität Paderborn

Warburger Str. 100, 33098 Paderborn

Tel.05251 / 60 3011 , Fax.05251 / 60 3443

E-Mail: Stille@lea.upb.de

Zusammenfassung

Die absehbare Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik wird mechatronische Systeme mit inhärenter Teilintelligenz ermöglichen. Hierfür verwenden wir den Begriff Selbstoptimierung (S.O.). Selbstoptimierende (s.o.) Systeme reagieren autonom und flexibel auf sich ändernde Umfeldbedingungen [ADG+09]. Die Entwicklung derartiger Systeme erfordert eine enge Zusammenarbeit der Entwickler der beteiligten Domänen Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik.

In diesem Beitrag wird erklärt, wie die Steigerung der Verlässlichkeit durch S.O. bei der Konzipierung eines s.o. Systems adäquat berücksichtigt wird. Die Konzipierung des hybriden Energiespeichersystems des innovativen Schienenfahrzeugs RailCab [Rai12-ol] wird retrospektive durchgeführt. Dies erfolgt von der ersten Funktionsdefinition über die Lösungsauswahl und die dazugehörige Nutzwertanalyse bis hin zur Produktkonzeption des Energiespeichersystems. Es wird gezeigt, wie die Schwachstellen und Widersprüche eines technischen Systems identifiziert sowie mit Hilfe geeigneter Gegenmaßnahmen behoben werden können. Hierbei soll insbesondere die Integration der S.O. als Möglichkeit zur Behebung der Schwachstellen betrachtet werden. Somit wird gezeigt wann und wie die Entscheidung über die s.o. Auslegung des Systems getroffen und die Steigerung der Verlässlichkeit dabei ins Kalkül gezogen wird.

Schlüsselworte

Konzipierung, Selbstoptimierung, Verlässlichkeit, Mechatronik, Hybrider Energiespeicher

1 Einleitung

Erzeugnisse des Maschinenbaus und verwandter Branchen wie der Automobilindustrie, Bahntechnik und Automatisierungstechnik beruhen heute vielfach auf dem engen Zusammenwirken der Domänen Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik. Der Begriff Mechatronik bringt dies zum Ausdruck. Mechatronische Produkte sind aufgrund der Beteiligung mehrerer Domänen durch eine hohe Komplexität geprägt [VDI2206]. Der Entwurf derartiger Produkte stellt daher eine Herausforderung dar. Dies gilt insbesondere für das Erreichen der Verlässlichkeit¹ [BGJ+09]. Indikatoren hierfür sind die vielen Rückrufaktionen der letzten Jahre (z.B. Gaspedal-Rückrufaktion von Toyota im Jahre 2010 [Toy10-ol], 186 Rückrufaktionen im Jahr 2011 [Kra11] etc.). Diese Rückrufaktionen sind meist mit sehr hohen Kosten sowie einem Imageschaden verbunden [Spi12-ol].

Zudem ermöglicht die absehbare Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik die Entwicklung mechatronischer Systeme mit inhärenter Teilintelligenz. Hierfür wird der Begriff Selbstoptimierung (S.O.) verwendet. Selbstoptimierende Systeme reagieren autonom und flexibel auf sich ändernde Umfeldbedingungen [ADG+09]. Durch diese Eigenschaft werden die mit der Absicherung der Verlässlichkeit verbundenen Herausforderungen weiterhin zunehmen.

Die meisten Fehler lassen sich letztendlich auf eine unzureichende Abstimmung der beteiligten Domänen zurückführen [BGJ+09]. Die daraus entstehenden Probleme bzgl. der Verlässlichkeit werden erst bei der Integration der Beiträge der involvierten Domänen erkannt. Zeitraubende und kostenintensive Iterationsschleifen sind oft die Folge. Die wesentlichen Voraussetzungen für die Entwicklung von verlässlichen mechatronischen Systemen sind die verbesserte Kommunikation und Kooperation der beteiligten Fachexperten im Sinne einer ganzheitlichen Spezifikation der Produktkonzeption sowie der frühzeitige Einsatz von Methoden zur Steigerung der Verlässlichkeit bereits in der Konzipierung [DGG+13]. Des Weiteren sind die faszinierenden Potentiale die sich hinsichtlich der Verlässlichkeit durch den Einsatz der S.O. ergeben, zu nutzen. So kann durch die Definition von entsprechenden zu verfolgenden Zielfunktionen die Verlässlichkeit des Systems explizit bei der Optimierung berücksichtigt werden [DHK+09].

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Vorgehen vorgestellt, welches neben den etablierten Methoden zur Steigerung der Verlässlichkeit, die Möglichkeit vorsieht, die S.O. früh-

¹ Wir verwenden die Definition der Verlässlichkeit nach AVIZIENIS ET AL. [ALR+04]. Demnach ist Verlässlichkeit ein Oberbegriff für Zuverlässigkeit, Sicherheit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Vertraulichkeit und Integrität. Im Fokus des vorliegenden Beitrags stehen die Verlässlichkeitsaspekte Zuverlässigkeit und Sicherheit. Die englischen Begriffe „dependability“ und „reliability“ werden im deutschsprachigen Raum teilweise unterschiedlich übersetzt. In der einschlägigen Literatur werden diese als Verlässlichkeit und Zuverlässigkeit übersetzt (siehe z.B. [BL04, S. 20]). Die jüngsten Normen sehen eine Übersetzung als Zuverlässigkeit und Funktionsfähigkeit vor (siehe z.B. [VDI4001-2]). In diesem Beitrag wird die erstere Terminologie verwendet.

zeitig zur Steigerung der Verlässlichkeit zu berücksichtigen und gegebenenfalls einzusetzen. Dazu wird die Produktkonzeption mit fortschreitender Entwicklung wiederholt auf Schwachstellen und Widersprüche untersucht. Zur Behebung der identifizierten Schwachstellen in der Produktkonzeption stehen häufig mehrere Möglichkeiten zur Auswahl z.B. Überdimensionierung bzw. redundante Auslegung, die Auswahl alternativer Lösungsmuster oder der Einsatz der S.O. [DHK+09]. Für den Einsatz der S.O. sind die Schwachstellen zu identifizieren, bei denen die Behebung durch S.O. die optimale Lösung darstellt. Dabei ist es von hoher Relevanz die Schwachstellen der Produktkonzeption frühzeitig zu identifizieren. Die Anwendung des Vorgehens wird am Beispiel des hybriden Energiespeichersystems (HES) des innovativen autonomen Schienenfahrzeugs RailCab (Neue Bahn Technik Paderborn [Rai12-ol]) durchgeführt. Dabei wird die Konzipierung des HES retrospektive durchgeführt.

Im Kapitel 2 wird der Entwurf von selbstoptimierenden (s.o.) Systemen vorgestellt. Hierbei wird im Kapitel 2.1 das Vorgehensmodell für die Entwicklung s.o. Systeme und im Kapitel 2.2 die Spezifikationstechnik CONSENS erläutert. Im Kapitel 3 wird nachfolgend das Vorgehen zur Steigerung der Verlässlichkeit unter besonderer Berücksichtigung der S.O. erläutert. Dabei erfolgt die Validierung des Vorgehens anhand eines Anwendungsbeispiels. Der Aufsatz schließt mit einer Zusammenfassung im Kapitel 4.

2 Entwurf von selbstoptimierenden Systemen

In diesem Abschnitt wird ein Entwurfsinstrumentarium vorgestellt, das Dritte in die Lage versetzt selbstständig s.o. Systeme zu entwickeln. Das Entwurfsinstrumentarium wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs (SFB) 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ entwickelt [ADG+09]. Die wesentlichen Bestandteile sind ein Vorgehensmodell für die Entwicklung s.o. Systeme sowie die Spezifikationstechnik CONSENS zur domänenübergreifenden Beschreibung der Prinziplösung s.o. Systeme.

2.1 Vorgehensmodell für die Entwicklung s.o. Systeme

Die Entwicklung s.o. Systeme umfasst im Wesentlichen zwei Phasen, „domänenübergreifende Konzipierung“ sowie „domänenspezifischer Entwurf und Ausarbeitung“. In der Konzipierung erarbeiten Entwickler der Domänen Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungs- und Softwaretechnik gemeinsam die Prinziplösung. Diese legt den grundsätzlichen Aufbau und die Wirkungsweise des Systems fest. In der anschließenden Phase Entwurf und Ausarbeitung arbeiten die Entwickler die ihre Domänen betreffenden Aspekte parallel zueinander aus. Diese Entwicklungsphase ist durch einen hohen Abstimmungs- und Koordinationsaufwand geprägt.

Das Vorgehensmodell beschreibt, wie es s.o. Systeme zu entwickeln gilt. Es ist jedoch auch für klassische mechatronische Systeme anwendbar [DGG+13]. Bei der Entwicklung klassischer mechatronischer Systeme werden dabei die Prozessschritte, die spezi-

fisch für s.o. Systeme durchgeführt werden müssen, nicht berücksichtigt. Zu diesen Prozessschritten zählen beispielsweise die Prozessschritte „Integration von kognitiven Funktionen“ oder „Erstellung S.O.-Konzept“ [Dum11].

2.2 Spezifikationstechnik CONSENS

Die Beschreibung der Prinziplösung erfolgt mit der im SFB 614 entwickelten Spezifikationstechnik CONSENS (CONceptual design Specification technique for the Engineering of mechatronic Systems) [GFD+08]. Die Beschreibung der Prinziplösung eines s.o. Systems umfasst die Aspekte Anforderungen, Umfeld, Zielsystem, Anwendungsszenarien, Funktionen, Wirkstruktur, Gestalt und Verhalten (vgl. Bild 1). Die genannten Aspekte werden rechnerintern durch Partialmodelle repräsentiert. Da die Aspekte zueinander in Beziehung stehen und ein konsistentes Ganzes ergeben sollen, besteht die Prinziplösung aus einem kohärentem System von Partialmodellen [GFD+08]. Aus diesem Grund werden ferner die Querbeziehungen zwischen den Partialmodellen abgebildet. Beispielsweise wird modelliert, welche Systemelemente aus dem Partialmodell Wirkstruktur eine bestimmte Funktion erfüllen (z.B. kann die Funktion „Vorschubkraft erzeugen“ durch das Systemelement Linearmotor realisiert werden) [GFD+08]. Die Aspekte und die entsprechenden Partialmodelle sind im Wechselspiel zu erarbeiten.

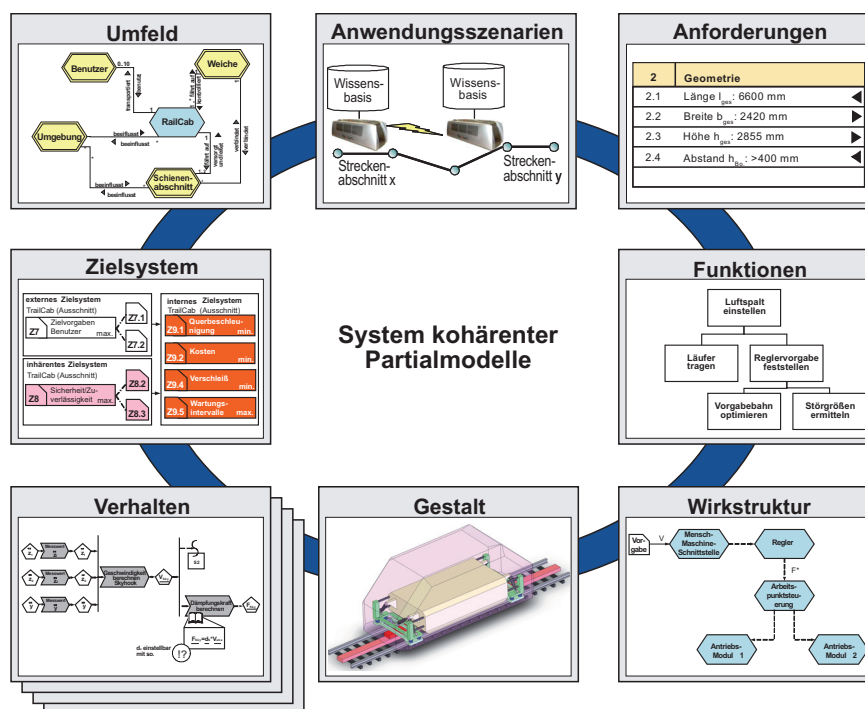


Bild 1: Partialmodelle der domänenübergreifenden Beschreibung der Produktkonzeption [GFD+08]

Bei der Spezifikation von s.o. Systemen spielen die Modellierung von Zuständen und Zustandsübergängen und die Auswirkungen auf die Wirkstruktur eine wesentliche Rol-

le. Diese Art der Modellierung erfolgt in der Gruppe der Verhaltensmodelle. Für s.o. Systeme ist zudem der Aspekt Zielsystem von besonderer Bedeutung [GFD+08]. In diesem Partialmodell werden die im Betrieb zu verfolgenden Ziele modelliert. Ziele eines mechatronischen Systems sind in diesem Sinne z.B. „minimiere Energieverbrauch“, „maximiere Leistungsfähigkeit“ oder „maximiere Verlässlichkeit“. Die Ziele werden in Abhängigkeit der auftretenden Situation unterschiedlich hoch priorisiert [DGG+13].

Die erarbeitete Beschreibung der Prinziplösung stellt das wesentliche Ergebnis der Konzipierung dar. Sie dient als Ausgangspunkt für die Phase Entwurf und Ausarbeitung, in der die beteiligten Domänen (Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik) die Produktkonzeption parallel und in Abstimmung ausarbeiten.

3 Vorgehen zur Absicherung der Verlässlichkeit eines mechatronischen Systems in der Konzipierung unter besonderer Berücksichtigung der Selbstoptimierung

Im Folgenden wird ein Vorgehen vorgestellt, welches die Entwickler eines technischen Systems in die Lage versetzt, die Verlässlichkeit des Systems in der frühen Entwicklungsphase der Konzipierung abzusichern. Insbesondere wird erklärt, wie dabei die S.O. berücksichtigt werden kann. Die Anwendung des Vorgehens wird anhand des Energiespeichersystems des innovativen autonomen Schienenfahrzeugs RailCab durchgeführt [Rai12-ol]. Hierbei handelt es sich um ein verlässlichkeitskritisches System: Fällt das Energiespeichersystem aus bzw. ist es nicht funktionsfähig, so kann dies zu Ausfällen bzw. eingeschränkter Funktionsfähigkeit anderer Module des RailCabs führen und so die Umwelt und den Menschen gefährden.

3.1 Anwendungsbeispiel: Energiespeichersystem des RailCabs

Das innovative Schienenfahrzeug RailCab (Neue Bahntechnik Paderborn [Rai12-ol]) ist ein Verkehrssystem für den zukünftigen schienengebunden Transport von Personen und Gütern im Nah- und Fernverkehrsbereich. Als fortgeschrittenes mechatronisches System vereint es die Vorteile des Individualverkehrs, wie Flexibilität und Komfort mit denen eines Schienenfahrzeugs bei Nutzung der vorhandenen Trassen [GDT+11]. Ein RailCab besteht aus mehreren mechatronischen Funktionsmodulen (MFM) wie z.B. dem Antriebsmodul, der aktiven Spurführung, dem aktiven Feder-Neigemodul und einem Energiespeichermodul (oder Energiespeichersystem – ESS). Dieses ESS versorgt die Module über das elektrische Bordnetz mit Leistung. Die Realisierung des Antriebsmoduls, ein doppelt gespeister Asynchron-Linearmotor, ermöglicht neben dem Antrieb eine berührungslose Leistungsübertragung aus der Strecke in das Fahrzeug [ADG+09]. Allerdings ist eine ausreichende Leistungsübertragung nicht in jeder Situation möglich, da sie vom Arbeitspunkt des Antriebsmoduls abhängt (z.B. ist bei hohen Geschwindig-

keiten des RailCabs die Leistungsaufnahme des Läufers größer als die übertragene Leistung [Pot05]). Das Antriebsmodul kann folglich den Momentan-Leistungsbedarf des Bordnetzes nicht decken, sondern benötigt im Gegenteil selbst Leistung aus dem Bordnetz. Dies ist insbesondere bei geringen Vorschubkräften oder hohen Geschwindigkeiten der Fall [GDT+11]. Im weiteren Verlauf werden die wesentlichen Schritte der Konzipierung am Beispiel des Energiespeichersystems vorgestellt.

3.2 Konzipierung der funktionalen Architektur des Energiespeichersystems

Entsprechend der im Kapitel 2.2 vorgestellten Vorgehensweise zur Erarbeitung der Prinziplösung wird zunächst das Umfeld des zu entwickelnden ESS betrachtet. Im Wesentlichen steht dabei das ESS in enger Wechselwirkung mit dem elektrischen Bordnetz des RailCabs und mit den daran angeschlossenen Lasten inkl. dem Antriebsmodul (sowohl Energie- und Leistungssenke als auch -quelle) sowie der Umwelt.

Im nächsten Schritt folgt die Definition der Anwendungsszenarien für das ESS. Grundsätzlich gibt es drei Extremsituationen, die es bei der Entwicklung des Systems im besonderen Maße zu berücksichtigen gilt:

1. Die erste Situation tritt ein, wenn sich das RailCab z.B. auf einem Streckenabschnitt mit passivem Stator befindet, also ohne streckenseitige Leistungsversorgung [ADG+09]. In dieser Situation muss sichergestellt werden, dass das ESS genügend Energie für die Fahrzeugvollversorgung hat sowie das ESS in einem zulässigen Bereich betrieben wird, da sonst anbindende Leistungselektronik überlastet wird. Zudem sollte dabei das ESS in der Lage sein, hohe Leistungsspitzen sämtlicher Verbraucher abzudecken [ADG+09].
2. Die zweite Extremsituation tritt auf, wenn das RailCab bei mittlerer Geschwindigkeit sehr stark abgebremst wird. In diesem Fall ist es prinzipiell möglich, aus dem Antriebsmodul eine sehr hohe Leistung aufzunehmen. Das ESS sollte in dieser Situation in der Lage sein, die zur Verfügung stehende Leistung vollständig aufzunehmen und die gesamte Energie zu speichern, um sie nicht in thermische Verluste umwandeln zu müssen.
3. Die dritte Situation tritt auf, wenn das RailCab zum Erhalten der geforderten höheren Geschwindigkeit nur wenig Vorschubkraft benötigt (z.B. Gefälle) oder das RailCab auf Fernverkehrsabschnitten mit hohen Geschwindigkeiten fährt. In dieser Situation speist das Antriebsmodul z.B. sehr wenig Leistung in das Bordnetz ein (Leistungsübertragung über das Antriebsmodul nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit ab [SSH+09]) und sämtliche Verbraucher (z.B. Feder-Neigemodul etc.) müssen vom ESS mit Leistung versorgt werden. Dies bedeutet, dass das ESS in der auftretenden Situation, zum einen plötzlich auftretende Leistungsspitzen der Verbraucher decken muss (z.B. durch erhöhten Leistungsbedarf des Feder-Neigemoduls auf unebenen Strecken [ADG+09]). Zum ande-

ren muss das ESS genügend Energie zur Verfügung stellen, um die Verbraucher über die absehbare Länge dieser Streckenabschnitte zu versorgen.

Aus der vorgestellten Umfeldbeschreibung und den beschriebenen Anwendungsszenarien ergeben sich die wesentlichen Anforderungen an das Energiespeichersystem. Ein Ausschnitt der Anforderungen ist in Bild 2 dargestellt.

Energiespeichersystem			
F/W	Nr.	Anforderungen	f. / n. f.
F	1.1	Das ESS darf die zur Verfügung stehenden geometrischen Abmessungen nicht übersteigen.	n. f.
F	2.1	Das ESS darf das maximal definierte Gewicht nicht übersteigen.	n. f.
F	4.1	Das ESS muss in der Lage sein, die maximale erzeugte Leistung des Antriebsmoduls aufzunehmen.	f.
F	4.2	Das ESS muss in der Lage sein, die maximal benötigte Leistung des Antriebsmoduls zur Verfügung zu stellen.	f.
F	4.3	Das ESS muss in der Lage sein, sämtliche Verbraucher über einen langen Streckenabschnitt (Fernverkehr) mit Energie zu versorgen.	f.
F	5.2	Das ESS soll im Betrieb einen hohen Wirkungsgrad aufweisen (insb. beim Laden und Entladen).	f.
F	8.1	Das ESS darf keine Schäden an Personen durch Brand oder Explosion verursachen (Sicherheit).	f. / n. f.
W	8.2	Das ESS sollte in der Lage sein, die auftretenden Situationen richtig einzuschätzen, um die Funktionalität zu gewährleisten (Zuverlässigkeit).	f.
...

Legende

- F/W Fest- / Wunschanforderung
- f. / n. f. funktionale / nicht funktionale Anforderung

Bild 2: Anforderungen die sich für das zu entwickelnde ESS ergeben (Ausschnitt)

Auf Basis der funktionalen Anforderungen (rechte Spalte der Anforderungsliste (vgl. Bild 2)) wird die Funktionshierarchie erarbeitet. Die Gesamtfunktion „Module des RailCab mit Leistung versorgen“ wird schrittweise in Unterfunktionen unterteilt. Das ESS sollte in der Lage sein, diese Funktionen umzusetzen, um die entsprechende Funktionalität des Systems realisieren zu können. Ein Ausschnitt der Funktionshierarchie des ESS ist in Bild 3 dargestellt. Funktionen des HES die sich aus den funktionalen Anforderungen ergeben sind z.B. „Energie speichern“ und „Leistung bereitstellen“ etc.

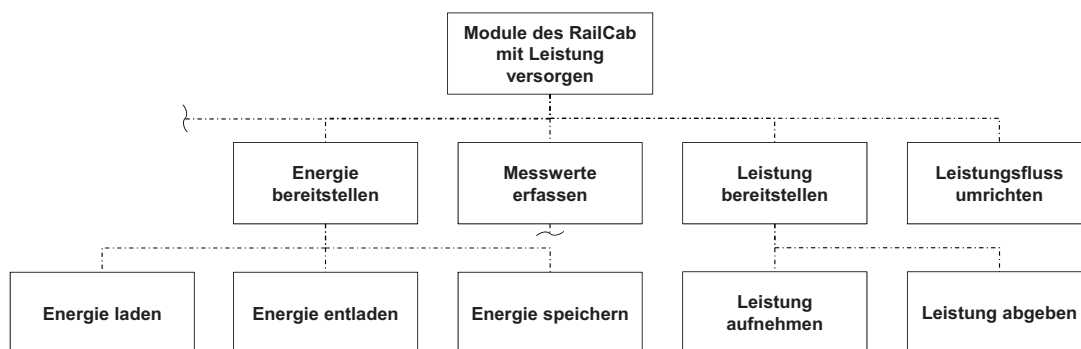


Bild 3: Funktionshierarchie des ESS (Ausschnitt)

3.3 Herausforderungen bei der Lösungssuche und -auswahl für mechatronische Systeme im Rahmen der Konzipierung

Nach dem Aufstellen der Funktionshierarchie folgt die Suche nach Lösungsmustern. Für die definierten Funktionen werden Lösungsmuster ausgewählt, mit denen die Funktion prinzipiell konkretisiert werden kann. Dieser Prozessschritt wird nachfolgend detaillierter betrachtet, da sich dort bereits erste Möglichkeiten ergeben, die Verlässlichkeit des zu entwickelnden Systems sicherzustellen. Im Rahmen der Konzipierung sind grundsätzlich frühzeitige Analysen (Prozessschritt „System analysieren“ im Bild 4) vorgesehen (z.B. hinsichtlich der Verlässlichkeit, der Wirtschaftlichkeit, des dynamischen Verhaltens etc.). Im Hinblick auf die Verlässlichkeit des Systems kann beispielsweise die frühzeitige kombinierte FMEA (Fehlzustandsart- und –auswirkungs-analyse) und FTA (Fehlzustandsbaumanalyse) auf Basis der Prinziplösung durchgeführt werden [Dor12]. Die eingesetzten Methoden benötigen jedoch eine ausspezifizierte Lösungsvariante inkl. der Spezifikation der Wirkstruktur sowie des Verhaltens (vgl. Bild 4).

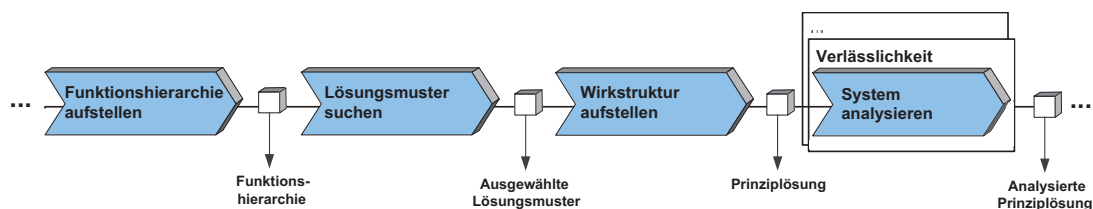


Bild 4: Prozessschritte in der Phase Konzipierung nach [GFD+08](Ausschnitt)

In vielen Fällen sind jedoch bereits frühzeitigere Analysen sinnvoll. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn während der Lösungssuche und -auswahl die Feststellung erfolgt (z.B. über eine Nutzwertanalyse), dass kritische Analyseaspekte unzureichend erfüllt werden, (im Falle des ESS ist dies die Sicherheit). In diesem Fall sind zunächst die betroffenen Analyseaspekte tiefgehend zu untersuchen, damit Verbesserungsmaßnahmen (z.B. Einsatz der S.O.) unmittelbar getroffen werden können. Dadurch werden nachträgliche Iterationsschleifen reduziert bzw. vermieden, was Geld und Zeit spart. Hierfür wurde im Rahmen dieser Arbeit das Vorgehen zur Konzipierung eines mechatronischen Systems angepasst und erweitert, was im Folgenden detailliert erklärt wird.

3.4 Berücksichtigung besonders kritischer Analyseaspekte bei der Lösungssuche und –auswahl

Damit die für das betrachtete System besonders kritischen Analyseaspekte bereits bei der Lösungssuche und -auswahl berücksichtigt werden können, bedarf es einer Erweiterung der Konzipierung um weitere Prozessschritte, die im Folgenden vorgestellt werden. Diese schließt das Identifizieren und Umsetzen von Gegenmaßnahmen ein (z.B. den Einsatz der S.O.). Hierzu wurde der Prozessschritt „Lösungsmuster suchen“ detaillierter betrachtet. Für diesen Prozessschritt wurde die folgende Methode erarbeitet, mit der die kritischen Analyseaspekte (z.B. Verlässlichkeit oder Wirtschaftlichkeit) explizit bei der Suche und Auswahl von Lösungen betrachtet werden.

Das Vorgehen ist dabei in **vier Phasen** unterteilt (Bild 5).

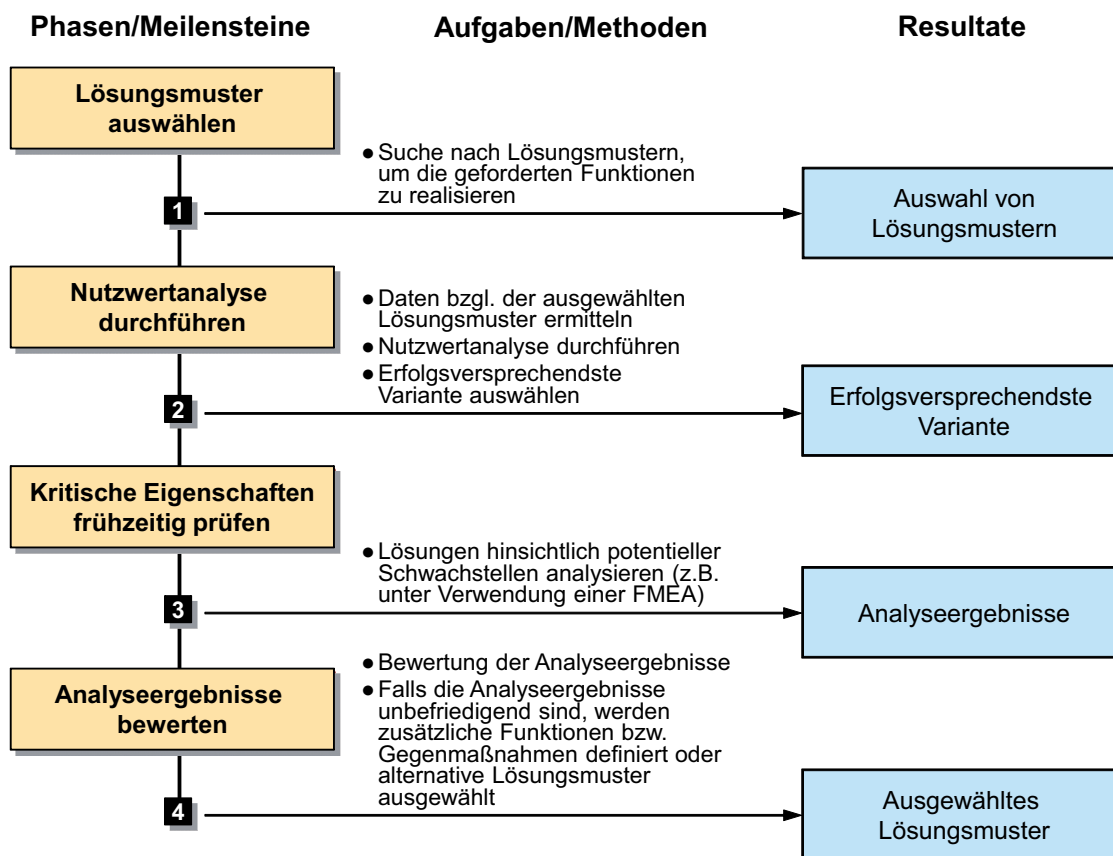


Bild 5: Vorgehen im Prozessschritt Lösungsmuster suchen

Lösungsmuster auswählen: In diesem Prozessschritt werden zunächst potentielle Lösungsmuster identifiziert, mit denen die in der Funktionshierarchie definierten und geforderten Funktionen konkretisiert werden können. Z.B. können zum Konkretisieren der Funktionen „Energie speichern“ und „Leistung bereitstellen“ die Lösungsmuster Lithium-Ionen-Batterie (Li-Ion), Nickel-Metallhydrid-Batterie (NiMH), Doppelschichtkondensator (DLC) oder Kombination aus Doppelschichtkondensator (DLC) und NiMH-Batterie (hybrid) eingesetzt werden [ADG+09]. Durch die Verwendung eines hybriden Energiespeichersystems (HES) können die Vorteile der Speichertechnologien DLC (sehr hohe Leistungsdichte) und NiMH-Batterie (hohe Energiedichte) genutzt werden. Dabei übernimmt die NiMH-Batterie die Funktion des Langzeitspeichers, während der DLC Leistungsspitzen versorgen kann. Als Resultat dieser Phase erarbeitet der Entwickler Varianten für das zu entwickelnde ESS. Diese bestehen aus der Kombination von verschiedenen Lösungsmustern (Umrichter, Informationsverarbeitung (IV) etc.) für die jeweiligen Funktionen.

Nutzwertanalyse durchführen: In diesem Prozessschritt werden die zuvor ausgewählten Lösungsmuster miteinander verglichen. Hierzu ist zunächst eine Datenermittlung durchzuführen, um die Lösungsmuster entsprechend der ausgewählten Kriterien (z.B. Funktionalität, Wirtschaftlichkeit, Verlässlichkeit etc.) zu bewerten. Als Resultat erhält

der Entwickler die erfolgversprechendste Variante. Bei der Analyse ist zu erkennen, dass bzgl. der aufgestellten Kriterien die HES-Variante insbesondere bei der Funktionalität (Leistungs- und Energiedichte) die Erfolgversprechendste ist (vgl. Bild 6).

Beurteilungskriterien gemäß Kriterien	Gew. [%]	Zu beurteilende Varianten (Kombination von Lösungsmustern)					
		Variante A mit Lithium-Ionen		Variante B mit NiMH		Variante C mit DLC und NiMH	
		Bew. (0-10)	Bew x Gew.	Bew. (0-10)	Bew x Gew.	Bew. (0-10)	Bew x Gew.
1. Funktionalität	40						
1.1 Leistungsdichte	15	4	0,6	2	0,3	10	1,5
1.2 Energiedichte	20	10	2,0	7	1,4	7	1,4
1.3 Sonstige Kriterien	5	8	0,4	4	0,2	8	0,4
2. Verlässlichkeit	40						
2.1 Sicherheit	25	2	0,5	5	1,25	5	1,25
2.2 Zuverlässigkeit	15	8	1,2	8	1,2	7	1,05
2.3 Sonstige Kriterien	5	6	0,3	7	0,35	6	0,30
3. Kosten/ Aufwand	20	8	1,6	7	1,4	6	1,2
	100%		6,6		6,1		7,1

Hybrides Energiespeichersystem (im Wesentlichen DLC und NiMH-Batterie) als leistungsstärkste Variante

Bild 6: Nutzwertanalyse der Varianten (wesentliche Lösungsmuster)

Beim Betrachten der Nutzwertanalyse fällt jedoch auf, dass diese Variante hinsichtlich der Verlässlichkeit eine geringe Bewertung erhält. Dies ist insbesondere durch die erhöhte Komplexität des ESS aufgrund der zusätzlichen Systemelemente begründet, die prinzipiell zusätzliche Schwachstellen des Systems darstellen (DLC, NiMH-Batterie, DC/DC-Steller, Informationsverarbeitung (IV), Regler, Sensoren etc.). Zudem besteht für diese Variante ein erhöhter Regelungsaufwand, um die Zuverlässigkeit der einzelnen Komponenten (DLC und NiMH-Batterie) im Betrieb sicher zu stellen. Z.B. muss der DLC in den entsprechenden Situationen den erforderlichen Ladegrad aufweisen. Dabei ist die Zuverlässigkeit eines Systems bzw. einzelner Systemelemente nach [BGJ+09] als zeitabhängige Funktionsfähigkeit definiert. Dieser Aspekt wird nun nachfolgend detaillierter betrachtet, um frühzeitig die Verlässlichkeit des Systems sicherzustellen.

Kritische Eigenschaften frühzeitig prüfen: Nach der Identifikation der erfolgversprechendsten Variante wird diese hinsichtlich kritischer Eigenschaften geprüft. Dies kann potentiell sämtliche niedrig bewertete Kriterien betreffen. Bezogen auf das Anwendungsbeispiel sind dies die Verlässlichkeit sowie der Entwicklungsaufwand der Variante HES. Für die Verlässlichkeit kann beispielsweise eine FTA auf Basis der Wirkstruktur durchgeführt werden, um die Schwachstellen der Variante offenzulegen [Dor12]. Um diese frühzeitige Analyse durchzuführen, müssen jedoch im Vergleich zu der Analyse nach [Dor12] nur die wesentlichen Systemelemente spezifiziert werden, die maßgeblich die Funktionalität des Systems bestimmen (vgl. Bild 7). Für das Anwendungs-

beispiel sind dies die Systemelemente DLC, NiMH-Batterie, IV und Umrichter sowie die beiden Umfeldelemente Antriebsmodul und weitere (Leistungs-)verbraucher.

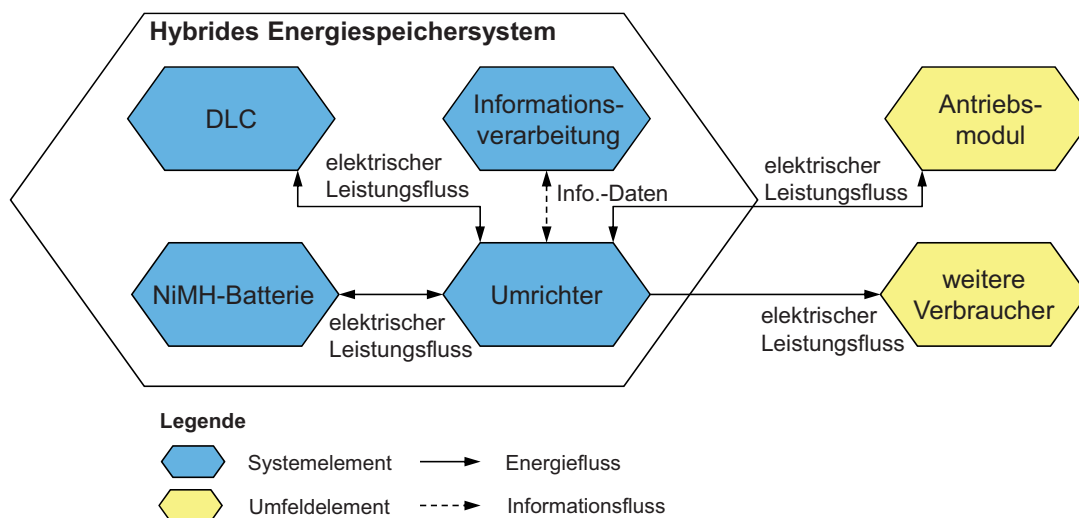


Bild 7: Wirkstruktur mit den wesentlichen Systemelementen des HES (Ausschnitt)

Durch das Durchführen einer FTA werden nun nachfolgend Fehlermöglichkeiten identifiziert die für die jeweiligen Systemelemente auftreten könnten. Dabei werden nachfolgend auch die Ursachen für die Fehler aufgedeckt, sowie deren Ursachen usw. Im Folgenden werden nur die Fehler betrachtet, die unmittelbare Auswirkungen auf die definierten Situationen haben.

In Situation 2 (z.B. hohe Einspeiseleistung durch das Bremsen) ist es beispielsweise notwendig, dass das HES die eingespeiste Leistung des Antriebsmoduls vollständig aufnimmt. Prinzipiell übernimmt im HES diese Funktion der DLC. Gründe dafür, dass der DLC die eingespeiste Leistung nicht aufnehmen kann (Fehlfunktion nach [BGF+09]: „DLC kann Leistung nicht aufnehmen“) sind: *DLC bereits vollständig geladen, die elektrische Leistung wird durch die IV nicht auf den DLC umgerichtet, Defekt der elektrischen Leitung* etc. Im nächsten Schritt könnten nachfolgend die Ursachen für die entdeckten Fehler identifiziert werden. Beispielsweise könnte es passieren, dass der Leistungsfluss von der IV nicht entsprechend umgeleitet wird, weil dieser die *aktuelle Situation (Leistungsspitze durch das Einspeisen beim Bremsvorgang) nicht erkennt* oder, dass der *DLC zur Zeit vollgeladen* ist, weil die Informationsverarbeitung nachfolgend den DLC entladen wollte (Wirkungsgrad wird im Betrieb erhöht, da die Nutzung des DLC aufgrund des niedrigeren Innenwiderstand effizienter ist [Rom13]; gemäß Anforderung 5.2). Durch das Betrachten des entstandenen Fehlerbaums (vgl. Bild 8), ist zu erkennen dass die funktionale Anforderung 4.1 in einigen Situationen, wie der betrachteten Situation 2, in Konflikt mit der funktionalen Anforderung 5.2 steht. Dies deutet auf den Bedarf hin, in Abhängigkeit der jeweiligen Situation, die Relevanz der Anforderungen zu gewichten.

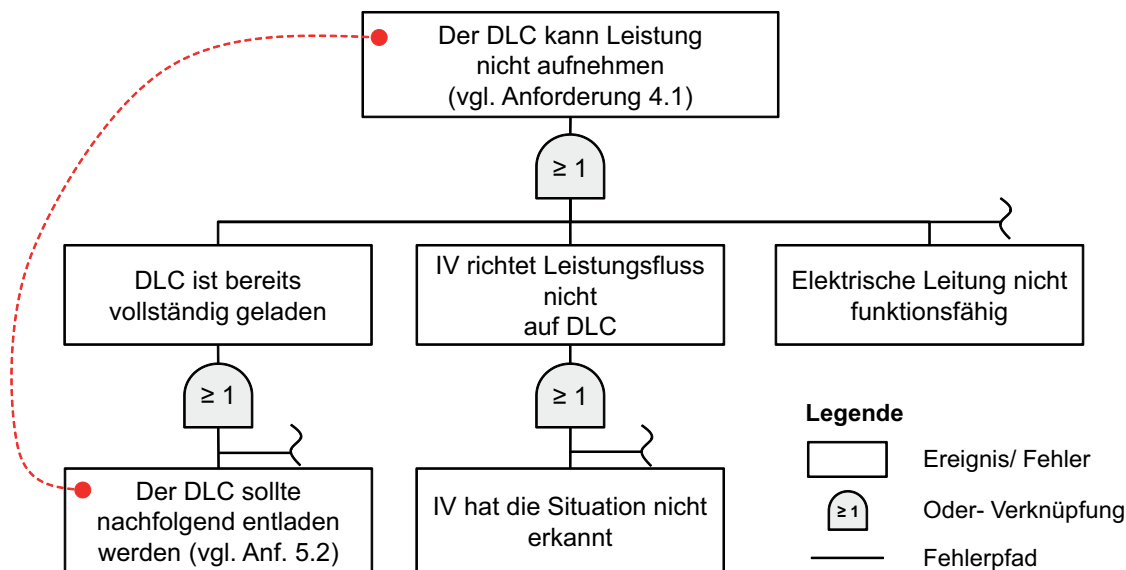


Bild 8: Fehlerbaum für die Betrachtung der Situation 2 (Ausschnitt)

Für weitere Situation werden mit Hilfe der FTA zusätzliche Zielkonflikte identifiziert. So kann z.B. für die Situation 3. die Anforderung 4.2 (ESS muss den Leistungsbedarf der Verbraucher decken) nicht erfüllt werden, wenn der *DLC nicht oder unzureichend geladen* ist. Somit muss der DLC zur Lösung des Fehlers einen bestimmten Mindest- oder Maximalladegrad aufweisen. Dies bedeutet jedoch, dass der DLC nicht beliebig ge- bzw. entladen werden kann (entgegen Anforderung 5.2). Es ergibt sich hierdurch ein situationsabhängiger Konflikt zwischen den funktionalen Anforderung 4.2 und 5.2.

Analyseergebnisse bewerten: Nach dem Erarbeiten der Analyseergebnisse werden diese bewertet. Dabei wird kontrolliert, ob die ermittelten Ergebnisse hinreichend sind, um das Lösungsmuster in der Produktkonzeption zu berücksichtigen. Falls die Analyseergebnisse unbefriedigend sind, werden entsprechende Gegenmaßnahmen ergriffen, um z.B. die Verlässlichkeit zu verbessern. Hierbei können zum einen notwendige zusätzliche Funktionen (im Sinne von Nebenfunktionen) definiert werden, für die anschließend wiederum Lösungsmuster gesucht werden. Falls z.B. ein Sensor keine zufriedenstellende Risiko-Prioritätszahl (RPZ) als Resultat der FMEA bzgl. eines potentiellen Ausfalls erhält, kann die Funktion des Sensors dupliziert (d.h. redundant ausgelegt) und das Lösungsmuster erneut zum Konkretisieren ausgewählt werden. Durch diese Maßnahme kann die RPZ wesentlich verringert werden, da die Ausfallwahrscheinlichkeit deutlich gesenkt wird. Zum anderen sind aber auch alternative bzw. innovative Lösungsmuster in Betracht zu ziehen, mit denen die Steigerung der Verlässlichkeit erreicht werden kann. Zusätzlich kann aber auch insbesondere das Wirkparadigma der S.O. eingesetzt werden, um die Verlässlichkeit bzgl. des ausgewählten Lösungsmusters zu steigern.

Bei der Bewertung der Ergebnisse des Anwendungsbeispiels werden nachfolgend Gegenmaßnahmen gesucht, mit denen die auftretenden Fehler sowie Konflikte zwischen funktionalen Anforderungen vermieden werden können. Dabei ergibt sich aus der star-

ken situationsabhängigen Relevanz der Anforderungen, die Möglichkeit S.O. als Gegenmaßnahme einzusetzen, um optimales Verhalten zu realisieren.

Berücksichtigung der Selbstoptimierung

Um die aufgezeigten Konflikte und Schwachstellen des Systems optimal zu lösen, wird auf das Wirkparadigma der S.O. zurückgegriffen. Durch den Einsatz der S.O. kann das System in den jeweiligen Situationen die verschiedenen funktionalen Anforderungen autonom und dynamisch priorisieren. Die funktionalen Anforderungen werden dafür zunächst als Ziele definiert, die im Betrieb zu verfolgen sind. Die Ziele werden dabei in dem dafür vorgesehenen Partialmodell Zielsystem abgebildet. Zur Identifikation der Ziele kann auf die Methode nach POOK [PGD12] zurückgegriffen werden, die eine Weiterentwicklung der Methode zur Identifikation von S.O.-Potential darstellt [ADG+09]. Durch den Einsatz der Methode sowie unter der Berücksichtigung der aufgezeigten Problematik (Wechselspiel aus der Betrachtung der Anforderungen und Anwendungsszenarien) können für das HES die Ziele „max. Energieeffizienz“ (vgl. Anforderung 5.2) sowie „max. Leistungsreserve“ bzw. „max. Ladegrad des DLC“ (vgl. Anforderung 4.2) definiert werden. Durch das Ziel „max. Energieeffizienz“ wird eine möglichst häufige Nutzung des DLC angestrebt. Hierdurch werden die Energieverluste minimiert, da beim Laden und Entladen des DLC aufgrund des geringen Innenwiderstandes wesentlich weniger Verluste auftreten, als durch die Nutzung der NiMH-Batterie [Rom13]. Durch das Ziel „max. Leistungsreserve“ wird der DLC, in den dafür vorgesehenen Situationen, auf einem bestimmten Ladegrad gehalten, mit dem der energetische Bedarf der meisten unerwarteten Leistungsspitzen abgedeckt werden kann. Mit Hilfe der Ziele sowie einer autonomen Anpassung bzw. Priorisierung dieser Ziele, kann das HES für die jeweils auftretende Situation stets das optimale Verhalten realisieren. Damit geht der Einsatz der S.O. weit über bekannte Regelstrategien hinaus und steigert somit für das gegebene Anwendungsbeispiel die Verlässlichkeit des gesamten RailCabs. in besonderem Maße.

Integration von kognitiven Funktionen in die Produktkonzeption

Um die S.O. nachfolgend in der Produktkonzeption zu integrieren, sind zunächst zusätzliche Funktionen (z.B. Streckenabschnitt planen, Situation wahrnehmen) für die Informationsverarbeitung (bei s.o. Systemen wird für die Informationsverarbeitung das Operator Controller Module genutzt) des Systems zu definieren [DGR11], [Dum11]. Diese zusätzlichen Funktionen (auch kognitive Funktionen genannt) werden anschließend durch Lösungsmuster für fortgeschrittene mechatronische Systeme konkretisiert. Dabei können z.B. durch den Einsatz des Lösungsmusters Mehrzieloptimierung, optimale Kompromisse zwischen den definierten Zielen für die jeweiligen Situationen gefunden werden. Die Auswahl entsprechender Lösungsmuster erfordert nachfolgend eine Erweiterung der Systemspezifikation. Die Erweiterung umfasst beispielsweise die Integration von zusätzlichen Funktionen und entsprechenden Systemelementen (z.B. Optimierer,

Interpreter, Analyseelement) für die *Ist-Analyse*, die *Zielbestimmung* sowie die *Verhaltensanpassung*, um das ausgewählte Lösungsmuster zu realisieren [DGR11].

4 Resümee und Ausblick

Der Entwurf verlässlicher s.o. Systeme stellt eine Herausforderung dar. Dies ist u.a. mit hoher Komplexität des Systems sowie der Beteiligung mehrerer Fachdisziplinen begründet. Mit Hilfe von CONSENS ist es möglich dieser Herausforderung zu begegnen, indem eine gemeinsame Kommunikations- und Kooperationsplattform geschaffen wird. Zudem unterstützt der Einsatz von CONSENS den Entwurf s.o. Systeme. Jedoch fehlte es bislang an einem Vorgehen, mit dem die Potentiale, die sich durch den Einsatz der S.O. ergeben, frühzeitig erkannt werden können. Mit Hilfe der aufgezeigten Methode, können Widersprüche und Schwachstellen der Produktkonzeption z.B. hinsichtlich der bereits bei der Lösungsmusterauswahl tiefergehend analysiert werden. Zudem erlaubt die Methode die frühzeitige Berücksichtigung der S.O., um die aufgezeigten Widersprüche und Schwachstellen der Produktkonzeption optimal lösen zu können. Auf Basis des Anwendungsbeispiels Energiespeichersystem des RailCabs, wurde gezeigt wie mit Hilfe der vorgestellten Methode, die Produktkonzeption stetig verbessert werden kann, um letztendlich durch den Einsatz der S.O. die Verlässlichkeit des ESS sicherzustellen.

Danksagung

Diese Arbeit ist im Sonderforschungsbereich (SFB) 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ der Universität Paderborn entstanden. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Vorhabens.

Literatur

- [ADG+09] ADELT, P.; DONOTH, J.; GAUSEMEIER, J.; GEISLER, J.; HENKLER, J.; KAHL, S.; KLÖPPER, B.; KRUPP, A.; MÜNCH, E.; OBERTHÜR, S.; PAIZ, C.; PORRMANN, M.; RADKOWSKI, R.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; VÖCKING, H.; WITKOWSKI, U.; WITTING, K.; ZNAMENSCHYKOW, O.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen, Anwendungen, Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 234, Paderborn, 2009
- [ALR+04] AVIZIENIS, A.; LAPRIE, J.-C.; RANDELL, B.; LANDWEHR, C.: Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, Vol. 1, No. 1, Jan-Mar 2004
- [BL04] BERTSCHE, B.; LECHNER, G.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2004
- [BGJ+09] BERTSCHE, B.; GÖHNER, P.; JENSEN, U.; SCHINKÖTHE, W.; WUNDERLICH, H.-J.: Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme – Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen. Springer-Verlag, Berlin, 2009
- [DGG+13] DOROCIAC, R.; GAUKSTERN, T.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; VABHOLZ, M.: A methodology for the improvement of dependability of self-optimizing systems. In: Production Engineering – Research and Development. Springer-Verlag, Vol. 7, No. 1, 2013

- [DGR11] DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.; ROMAUS, C.: Towards the design of cognitive functions in self-optimizing systems exemplified by a hybrid energy storage system. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering 2011. SAGE Publications, Vol. 225, No. 5, 2011
- [DHK+09] DELL'AERE, A.; HIRSCH, M.; KLÖPPER, B.; KOESTER, M.; KRUPP, A.; KRÜGER, M.; MÜLLER, T.; OBERTHÜR, S.; POOK, S.; PRIESTERJAHN, C.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SONDERMANN-WÖLKE, C.; TICHY, M.; VÖCKING, H.; ZIMMER, D.: Verlässlichkeit selbstoptimierender Systeme – Potentiale nutzen und Risiken vermeiden. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 235, Paderborn, 2009
- [Dor12] DOROCIAC, R.: Early Probabilistic Reliability Analysis of Mechatronic Systems. The Annual Reliability and Maintainability Symposium, January 23-26 2012, Reno, Nevada, USA, 2012
- [Dum11] DUMITRESCU, R.: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 286, Paderborn, 2011
- [GDT+11] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; TSCHIRNER, C.; STILLE, K.S.: Modellbasierte Konzipierung eines hybriden Energiespeichersystems für ein autonomes Schienenfahrzeug. In: Maurer, M.; Schulze, S.-O.: Tag des Systems Engineering. Carl Hanser Verlag, München, 2011
- [GFD+08] GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; DONOTH, J.; KAHL, S.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme des Maschinenbaus. Teil 1 Konstruktion 7/8-2008, Teil 2 Konstruktion 9/2008
- [Kra11] KRAFTFAHRT-BUNDESAMT: Jahresbericht 2011
- [PGD12] POOK, S.; GAUSEMEIER, J.; DOROCIAC, R.: Securing the Reliability of Tomorrow's Systems with Self-Optimization. In: Proceedings of the reliability and maintainability symposium, 2012
- [Pot05] POTTHARST, A.: Energieversorgung und Leittechnik einer Anlage mit Linearmotor getriebenen Bahnfahrzeugen. Dissertation, Universität Paderborn, 2005
- [Rai12-ol] RAILCAB – NEUE BAHNTECHNIK PADERBORN - Projektwebseite [online]. Unter: <http://railcab.de/>, Letzter Aufruf 11. Oktober 2012
- [Rom13] ROMAUS, C.: Selbstoptimierende Betriebsstrategien für ein hybrides Energiespeichersystem aus Batterien und Doppelschichtkondensatoren. Dissertation, Universität Paderborn, 2013
- [Spi12-ol] SPIEGEL ONLINE: Probleme bei Daimler: Motordefekt verursacht Millionenschaden [online]. Unter: <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/mercedes-autos-hatten-motor-mit-defekten-injektoren-a-853276.html>, [Letzter Aufruf 5. Dezember 2012]
- [SSH+09] SCHNEIDER, T.; SCHULZ, B.; HENKE, C.; WITTING, K.; STEENKEN D.; BÖCKER, J.: Energy Transfer via Linear Doubly-Fed Motor in Different Operating Modes. In: International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Miami, Florida, Mai 2009
- [Toy10-ol] TOYOTA DEUTSCHLAND: Toyota Deutschland informiert über Gaspedal-Rückrufaktion [online]. Unter: http://www.toyota.de/about/news/details_2010_04c.tmx, Letzter Aufruf 25. September 2012
- [VDI2206] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Richtlinie 2006, Beuth Verlag, Berlin, 2004
- [VDI4001-2] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): VDI 4001, Blatt 2: Terminologie der Zuverlässigkeit. Beuth-Verlag, Berlin, 2006

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier ist Professor für Produktentstehung am Heinz Nixdorf Institut. Er promovierte an der TU Berlin bei Prof. Spur. In seiner zwölfjährigen Industrietätigkeit war Dr. Gausemeier Entwicklungschef für CAD/CAM-Systeme und zuletzt Leiter des Geschäftsbereiches Prozessleitsysteme. Er ist Mitglied des Vorstands und Geschäftsführer der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP). Ferner ist er Initiator und Aufsichtsratsvorsitzender des Beratungsunternehmens UNITY AG. Herr Gausemeier ist Vizepräsident von acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. 2012 wurde er erneut in den Wissenschaftsrat berufen.

Dipl.-Ing. Peter Iwanek ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentstehung bei Prof. Gausemeier am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn. Im Rahmen seiner Tätigkeit im Sonderforschungsbereich 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ arbeitet er an Methoden, Vorgehensmodellen und Werkzeugen für den Entwurf s.o. Systeme.

M Sc. Rafał Dorociak ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentstehung bei Prof. Gausemeier am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn. Schwerpunkt seiner Arbeiten im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ sind Methoden, Vorgehensmodelle und Werkzeuge für den Entwurf s.o. Systeme.

Dipl.-Ing. Karl Stephan Stille hat sein Diplomstudium der Mechatronik an der Johannes-Kepler-Universität in Linz/Donau abgeschlossen. Dabei spezialisierte er sich im Bereich der elektrischen Antriebe und der Leistungselektronik. Seit dem 1. Sept. 2010 ist er im Fachgebiet LEA als Wissenschaftlicher Mitarbeiter angestellt. Er forscht im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 614 im Bereich der selbstoptimierenden Methoden und konzentriert sich dabei auf Energiemanagement.

Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker studierte Elektrotechnik an der TU Berlin und promovierte danach am dortigen Institut für Mechanik. Von 1988 bis 2001 arbeitete er im Forschungslabor für Elektrische Antriebstechnik und Leistungselektronik der AEG AG, welches später auf die DaimlerChrysler AG überging, als Leiter der Gruppe Regelungstechnik. Von 2001 bis 2003 führte er ein eigenes Ingenieurbüro. Seit 2003 ist Herr Böcker Professor für Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik an der Universität Paderborn