

## Herausforderung der Entwicklung zuverlässiger kognitiver Produkte

Thierry Sop Njindam und Kristin Paetzold  
*Institut für Technische Produktentwicklung  
Universität der Bundeswehr München*

### 1 Ausgangssituation

Innovation und technologische Weiterentwicklung bedeuten eine stetige Dynamik in der Produktentwicklung. Das Schlagwort "Mechatronik", ein seit 40 Jahren geläufiger Begriff und bezeichnend für das Paradigma der synergetischen Integration mechanischer, elektronischer und Software-Komponenten, prägt viele alltägliche Produkte. Neben der Integration von Komponenten aus diesen unterschiedlichen Disziplinen ist man bestrebt, das Verhalten der zu entwickelnden Systeme in Hinsicht auf die Interaktion mit dem Menschen zu optimieren. Daraus ist eine Reihe neuer Entwicklungen wie smart-, adaptive-, selbstoptimierende-, und neuerdings kognitive technische Systeme entstanden.

Kennzeichnend für kognitive technische Systeme ist die funktionale Integration und Einbettung von Sensoren, Aktoren und Informationsverarbeitung in physische Systeme, wodurch ihre kognitiven Fähigkeiten (Wahrnehmen, Lernen Planen, Schlussfolgern) implementiert werden [1]. Hierdurch haben diese Systeme ein bis dato unerreichtes hohes Maß an Autonomie erworben und rechtfertigen damit die zu bewältigende Komplexität bei ihrer Entwicklung. In diesem Zusammenhang stellt die Zuverlässigkeit einen Kernaspekt dar, welche im Rahmen der Produktentwicklung sicherzustellen ist und in einer möglichst frühen Phase des Entwicklungsprozesses evaluiert werden soll.

---

Die Zuverlässigkeit wird nach [2] definiert als die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Produkt während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt. In den einzelnen Fachdisziplinen existieren bereits Methoden und Ansätze zur Zuverlässigkeitsanalyse. Die Herausforderung besteht aber darin, eine Methodik zur frühzeitigen Bewertung der Systemzuverlässigkeit zu entwickeln, welche sowohl die Module und Komponenten kognitiver Produkte für sich als auch die Interaktion untereinander berücksichtigt. Ein integrativer Lösungsansatz ermöglicht eine Produktvalidierung schon in den frühen Entwicklungsphasen und steigert folglich die Produktqualität.

## 2 Kognitive Produkte

Kognitive Produkte sind verbraucherorientierte Produkte, die um kognitive Fähigkeiten erweitert sind und also aus dem komplexen Zusammenspiel von Funktionen aus verschiedenen Bereichen Mechanik, Elektronik, Mikroprozessoren und Software resultieren [10]. Sie bedürfen weiterhin aufgrund ihrer starken Kooperation mit dem Menschen einen hohen Qualitätsstandard und insbesondere die höchstmögliche Zuverlässigkeit, die frühzeitig abzusichern ist.

Ein zentrales Element bei der Entwicklung kognitiver Produkte stellen ihre kognitiven Fähigkeiten dar, welche durch die kognitive Systemarchitektur (Bild 1) zugrunde gelegt werden und das Strukturkonzept des Produktes maßgeblich beeinflussen. Die kognitive Systemarchitektur setzt dabei die Synergie zwischen den einzelnen kognitiven Fähigkeiten voraus, welche in einzelnen Modulen implementiert werden. Mittels Sensoren nimmt das System seine Umwelt sowie seine Position wahr und enthält darüber hinaus Informationen über seine Aktoren. Die durch diese Wahrnehmung erhaltenen Informationen lösen in Abhängigkeit von den auszuführenden Tätigkeiten einen Denkprozess aus. Infolgedessen weißt dann das System " was es tut, und warum es dies tut " [3]. *Lernen* wird hierbei als der Erwerb oder die Reorganisation von Erkenntnissen bezeichnet, wodurch das Systemverhalten entfaltet wird und sich letztendlich an sich verändernde Situationen anpasst [11]. *Denken* wird in diesem Kontext durch den Begriff "Reasoning" ausgedrückt und wird als der Prozess angesehen, bei dem das System auf Basis von Grundsätzen und logischen Prinzipien schlussfolgert. Die Informationen über Objekte und Ereignisse, ihren Zusammenhang in der Umwelt sowie Informationen über Ablauf und Folge von Operationen werden in der Wissensbasis, "Knowledge & Models" gespeichert [1].

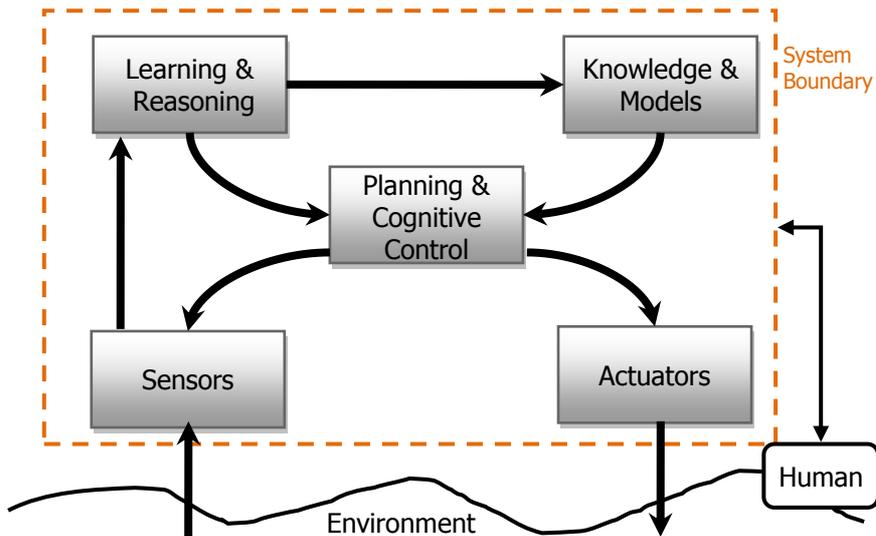


Bild 1: kognitive Systemarchitektur [1]

### 3 Systemzuverlässigkeit kognitiver Produkte

Auf der Basis der Systemarchitektur soll der Ausfall sowohl einzelner Module als auch der Systemkomponenten mit einem Zustandsübergangsdia-gramm, such Ausfallverhaltensmodell genannt, untersucht werden. Darauf aufbauend werden entsprechende Zuverlässigkeitsblockdiagramme erstellt, die zur Formulierung der Systemzuverlässigkeit genutzt werden.

#### 3.1 Ausfallverhaltensmodelle

Die Fachdomänen Mechanik und Elektronik bieten heutzutage sowohl Methoden zur qualitativen Zuverlässigkeitsanalyse (Fehlerbaumanalyse, Fehler-Möglichkeits- und Einflussanalyse,...) als auch bewährte statistische Wahrscheinlichkeitsfunktionen zur quantitativen Beschreibung ihres Ausfallverhaltens [5], [9]. Diese Vorgehensweise überträgt sich allerdings nicht auf den Softwarebereich, da hier ein ganz anderes Ausfallverhalten zu beachten ist und Fehler, inhärent, meistens vor der Inbetriebnahme vorliegen.

Je früher Fehler aufgedeckt und beseitigt werden desto geringer fallen die damit verbundenen Kosten aus. Diese Problematik der frühzeitigen Zuverlässigkeitsabsicherung wird durch das Fehlen von notwendigen Produktinformationen noch verstärkt. Es werden Annahmen getroffen, deren Aus-

gestaltung vom Erfahrungsschatz der Entwickler abhängig ist [5]. Dennoch soll eine Absicherung der Zuverlässigkeit kognitiver Produkte in den frühen Entwicklungsphasen das höchstmögliche Ausschließen von Systemausfällen und Gefährdungen für den Nutzer durch die Festlegung eines Zuverlässigkeitsziels für die weiteren Entwicklungsphasen ermöglichen.

Zuverlässige kognitive Produkte erfüllen in Anlehnung an [2] ihre von den Entwicklern festgelegten Funktionen unter zulässigen Betriebsbedingungen innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls. Für kognitive Produkte zielt die Zuverlässigkeitsbetrachtung auf die Analyse des Systems als Ganzes. In diesem Sinne wird zur Formulierung der Systemzuverlässigkeit kognitiver Produkte (Bild 2) auf der einen Seite die Zuverlässigkeit der Komponenten aus den involvierten Disziplinen ermittelt und bewertet werden. Zusätzlich sollen die Zusammenhänge zwischen den Komponenten, die durch die Emergenz kognitiver Produkte ausgedrückt werden, im Rahmen dieser Formulierung mitberücksichtigt werden. Diese Wechselwirkungen zwischen den Zuverlässigkeitsaussagen spiegeln sich in der Systemzuverlässigkeit.

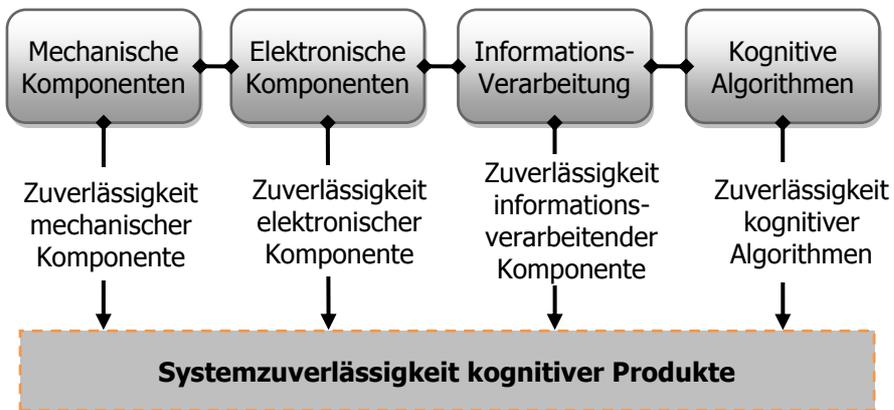


Bild 2: Systemzuverlässigkeit kognitiver Produkte

Die Systemzuverlässigkeit kognitiver Produkte wird maßgeblich durch ihr Verhalten beeinflusst. Je nachdem welches Modul der kognitiven Systemarchitektur (Bild 1) versagt, stellen sich neue Zustände ein, was ein neues Produktverhalten zur Folge hat. Dieser Ansatz soll im Folgenden anhand der Analyse der Systemzuverlässigkeit eines kognitiven Rollators veranschaulicht werden. Zustandsübergangdiagramme stellen zur Darstellung und Visualisierung der sich einstellenden Zustände bei einem Ausfall sowohl von

---

Modulen der kognitiven Systemarchitektur als auch der restlichen Komponenten ein geeignetes Werkzeug dar.

Ein kognitiver Rollator ist in der Lage seine Umwelt und sich selbst wahrzunehmen, sich an den Nutzer, z.B. durch Verstellen der Höhe seiner Handgriffe und der Höhe des Sitzes, selbständig anzupassen, seine Systemzustände zu erkennen, zu denken, aus den Ereignissen Wissen zu generieren, abzuspeichern und situationsgerecht zu handeln. Die Darstellung und Analyse des Ausfallverhaltensmodells bedarf jedoch für die folgende Betrachtung einiger grundsätzlicher Annahmen:

- Eine Fehlerbehebung bzw. Reparatur verursacht keinen zusätzlichen Fehler im System.
- Nach der Fehlerbehebung kehrt das System in den Anfangszustand zurück.
- Ein Modul- bzw. Komponentenausfall wird vom Rollator detektiert, diagnostiziert und, sofern möglich, korrigiert. Der entsprechende Systemzustand wird auf dieser Basis eingestellt.
- Es werden keine redundanten Komponenten betrachtet.

Sechs mögliche Zustände können festgestellt werden:

- Im *Zustand 0* erfüllt der Rollator alle seine Funktionen. Alle kognitiven Fähigkeiten funktionieren einwandfrei, wodurch das Produkt als kognitiv bezeichnet wird [8].
- Durch den Ausfall des Speicher- und Wissensmodul befindet sich das System im *Zustand 1*. Es ist in der Lage weder Wissen zu akquirieren noch zu speichern, kann aber weiterhin alle anderen Fähigkeiten "Lernen, Wahrnehmen, Planen, Handeln" aufweisen. Dies zeichnet ein adaptives Verhalten aus.
- Der *Zustand 2* weist eine Leistungseinschränkung zweiter Stufe auf. Bezeichnend hierfür ist der Ausfall des "Lern- und Denkmoduls". Das System kann nur wahrnehmen, handeln und ist auf das vorab gespeicherte Wissen angewiesen. Daher wird das Produkt als "smart" bezeichnet.
- Der *Zustand 3* beinhaltet die Kombination der Ausfälle des "Lern- und Denkmoduls" sowie des "Speicher- und Wissensmoduls". Das System kann in diesem Zustand nur noch starr auf Ereignisse reagieren und verhält sich wie ein klassisches mechatronisches System.
- Der Ausfall einer Komponente und nicht des Gesamtsystems schränkt die Systemleistung ein und überführt das System in den

*Zustand 4.* Eine Reparatur kann von dem System selbst nicht vorgenommen werden (im Gegensatz zu den Ausfällen der Zustände 1 und 2), da die in diesem Zustand auftretenden Fehler größtenteils physikalischer Natur sind.

- Durch den Ausfall sicherheitskritischer Komponenten oder das Auftreten eines sicherheitskritischen Ereignisses findet der Übergang in den *Zustand 5* statt. Das System wird ausgeschaltet oder der idle-Modus (Leerlauf) wird in Anlehnung an [7] aktiviert.

Eine entsprechende Fehlerklassifikation der genannten Systemzustände wird in der folgenden Tabelle veranschaulicht.

<b>Zustand</b>	<b>Fehler</b>	<b>Auswirkung</b>
<b>0</b>	kein	System funktioniert einwandfrei;
<b>1</b>	Speicher- und Wissensmodul ausgefallen Leistungseinschränkung 1. Stufe	Adaptives Verhalten
<b>2</b>	Lern- und Denkmodul ausgefallen; Leistungseinschränkung 2. Stufe	"Smartes" Verhalten
<b>3</b>	Ausfall des Speicher- und Wissensmoduls + Ausfall des Lern- und Denkmoduls Leistungseinschränkung 3. Stufe	Mechatronisches Verhalten
<b>4</b>	Komponentenausfall; Leistungseinschränkung 4. Stufe	Eingeschränkte Nutzung
<b>5</b>	Totaler Systemausfall	Systemstillstand

Tabelle 1 : auftretende Zustände und Fehlerklassifikation

Die angesprochenen Systemzustände werden in zwei Ausfallverhaltensmodellen dargestellt. Der Rollator befindet sich zu Funktionsbeginn im Zustand 0 und funktioniert einwandfrei. In der ersten Konstellation fällt zuerst das Lern- und Denkmodul aus, er wechselt somit in den Zustand 1, wo er seinen Fehler korrigieren und in den Anfangszustand zurückgehen kann. Es besteht auch die Möglichkeit in diesem Zustand zu verbleiben. Als nächstes kann das Lern- und Denkmodul ausfallen und das System würde unmittelbar in den Zustand 3 übergehen und eventuell in diesem Zustand verbleiben. Fallen zusätzlich Komponenten aber nicht das komplette System aus, so wechselt das System in den Zustand 4, in welchem es nur eingeschränkt genutzt wird. Das System wird schließlich beim Auftreten eines sicherheitskritischen Ereignisses in den Zustand 5 wechseln. Das Bild 3 illustriert das Ausfallverhaltensmodell dieser ersten Konstellation.

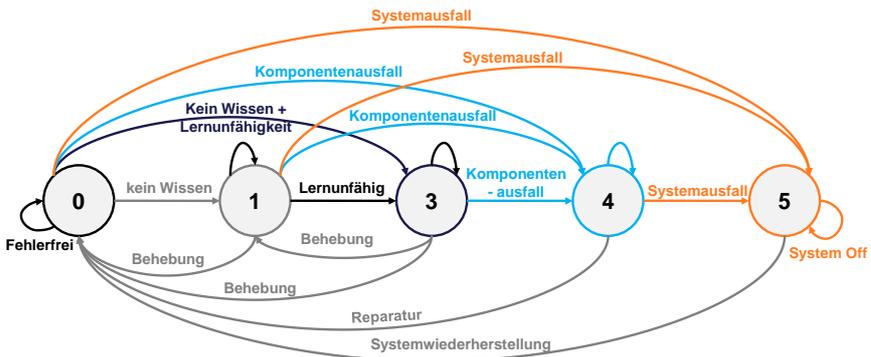


Bild 3: erstes Ausfallverhaltensmodell zur Verhaltensbeschreibung eines kognitiven Rollators

Das zweite Ausfallverhaltensmodell (Bild 4) des kognitiven Rollators weist ähnliche Eigenschaften wie das Erste auf. Der essentielle Unterschied liegt darin, dass das Lern- und Denkmodul vor dem Speicher- und Wissensmodul ausfällt - somit ein Übergang von Zustand 0 in den Zustand 2, anstelle Zustand 1 wie im ersten Ausfallverhaltensmodell, erfolgt. Dies zeigt, dass die Modulausfallreihenfolge das Verhalten kognitiver Produkte maßgeblich beeinflusst.

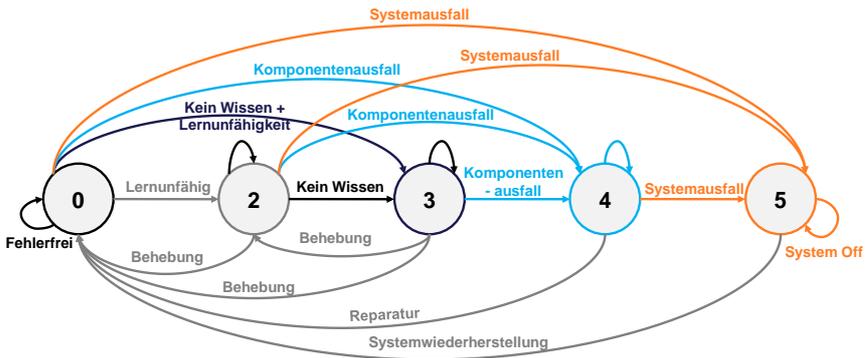


Bild 4: zweites Ausfallverhaltensmodell zur Verhaltensbeschreibung eines kognitiven Rollators

### 3.2 Aufstellung der Systemzuverlässigkeit

Zur quantifizierbaren Bewertung der Systemzuverlässigkeit kognitiver Produkte muss neben der Quantifizierung des Ausfallverhaltens von Komponenten auch ihre gegenseitige Abhängigkeit berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck dient die Systemarchitektur (Bild 1) als Ausgangsbasis. Es gilt, weiterhin ohne Berücksichtigung der internen Modulstrukturen ein Zuverlässigkeitsblockschaltbild des Gesamtsystems abzuleiten. Die Module "Lernen und Denken", "Wissen und Speichern" sowie "Planung und kognitive Steuerung" werden entsprechend getrennt behandelt und durch jeweils eine Zuverlässigkeitskenngröße ( die Überlebenswahrscheinlichkeit  $R(t)$  ) charakterisiert. Die Überlebenswahrscheinlichkeit bezeichnet hierbei die Wahrscheinlichkeit, dass das Modul bzw. das System im Intervall  $[0, t]$  nicht ausfällt.

Weiterhin werden Zuverlässigkeitsblockdiagramme genutzt, um relevante Module, die zur Erfüllung der geforderten Funktionen funktionsfähig sein müssen, miteinander zu verschalten und darauf aufbauend die Systemzuverlässigkeit zu formulieren. Die Zuverlässigkeitsblockdiagramme eignen sich hierfür hervorragend, da die Zuverlässigkeitsziele ausgehend von der aufgestellten Verschaltung auf untergeordnete Baugruppen und Bauteile sowie im Einklang mit dem Entwicklungsfortschritt aufgeteilt und detailliert werden können.

Das Zuverlässigkeitsblockdiagramm des kognitiven Rollators wird im Anfangszustand durch eine serielle Verschaltung der Module realisiert (Bild 5). Diese Serien-Modulverschaltung setzt voraus, dass der Ausfall eines Moduls den Gesamtausfall des Teilsystems bedeuten würde und impliziert diesbezüglich das einwandfreie Funktionieren aller Elemente zur Erfüllung der geforderten Funktion.

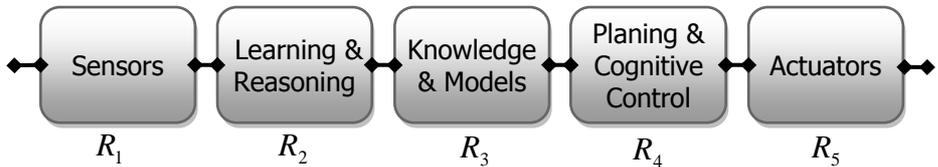


Bild 5: Zuverlässigkeitsblockschaltbild kognitiver Produkte

In Anbetracht dieser Forderung resultiert die Überlebenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems im *Zustand 0* aus dem Produkt der Überlebenswahrscheinlichkeiten seiner in Serie verbundenen Module:

$$R_{Sys} = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot R_6$$

Fällt das Lern- und Denkmodul oder das Wissens- und Speichermodul aus, wechselt das System vom *Zustand 0* in den *Zustand 1* bzw. in den *Zustand 2*. Dies wird durch die parallele Verschaltung dieser beiden Module mit einer Serienschaltung der restlichen Module realisiert (Bild 6).

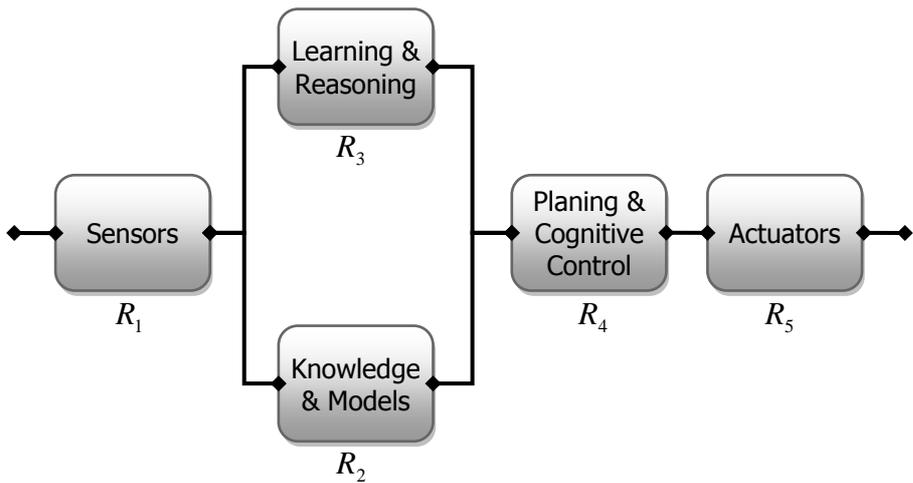


Bild 6: Zuverlässigkeitsblattschaltbild kognitiver Produkte mit Leistungseinschränkung

Die entsprechende Systemüberlebenswahrscheinlichkeit ergibt sich somit zu

$$R_{S_{\text{ys}}} = R_1 \cdot (R_2 + R_3 - R_2 \cdot R_3) R_4 \cdot R_5$$

Gerät das System in den *Zustand 3*, in welchem die beiden Module "Wissens- und Speichermodul" sowie "Lern- und Denkmodul" ausgefallen sind, bleiben nur noch die Module "Planungs- und kognitives Steuerungsmodul" sowie "Sensorik" und "Aktorik" funktionstüchtig. Das entsprechende Zuverlässigkeitsblockdiagramm weist eine Serienschaltung dieser Module auf (Bild 7) und die zugehörige Systemüberlebenswahrscheinlichkeit ergibt sich dementsprechend aus dem Produkt der einzelnen Modulüberlebenswahrscheinlichkeiten.

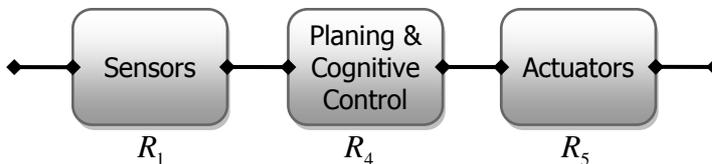


Bild 7: Zuverlässigkeitsblattschaltbild mechatronischer Produkte

$$R_{S_{\text{ys}}} = R_1 \cdot R_4 \cdot R_5$$

---

Diese ganzheitliche Zuverlässigkeitsbetrachtung schließt den Ausfall der Module "Sensorik", "Aktorik" und "kognitive Steuerung" aus. Ein Ausfall der "Sensorik" würde bedeuten, dass das System weder sich noch die Umwelt wahrnehmen könnte. Das System könnte beim Ausfall der "Aktorik" keine Handlungen mehr vornehmen. Das Kernmodul, das "Planungs- und kognitive Steuerungsmodul" ist für das Produkt essentiell und das System würde durch seinen Ausfall direkt in den Zustand 5 wechseln.

Zweifelsohne sind bei der Formulierung der Systemzuverlässigkeit die Wechselwirkungen der Komponenten aus den Fachdisziplinen in der Zuverlässigkeitsformulierung zu berücksichtigen. Vor allem die Konzepte zur Steigerung der Systemzuverlässigkeit wie Multifunktionalität, Fehlertoleranz, Kompensierung und die der Fehlerfortpflanzung sollten stärker in Betracht gezogen werden. Erschwerend kommt hinzu, dass es bis dato kein zufriedenstellendes Software-Zuverlässigkeitsmodell gibt, welches als Standard anzusehen ist und zusätzliche unbekannte sowie schwer handhabbare Faktoren wie Umgebung, Nutzer und Nutzungshäufigkeit miteinbezieht.

#### 4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der in diesem Beitrag verfolgte Ansatz zur Zuverlässigkeitsbetrachtung beruht darauf, die Systemzuverlässigkeit kognitiver Produkte anhand ihrer Systemarchitektur, trotz der Komplexität und der Verflochtenheit ihrer Komponenten und Modulen aus unterschiedlichen Fachdisziplinen, zu formulieren und gleichzeitig die Nutzersicherheit zu gewährleisten.

Das Fehlen einer geeigneten Entwicklungsmethodik sowie die komplizierte quantitative Formulierung der Systemzuverlässigkeit kognitiver Produkte in den frühen Entwicklungsphasen stellt für die Produktentwicklung, speziell bei der Aufstellung eines geeigneten Software-Zuverlässigkeitsmodells, die größten Herausforderungen dar. Die frühzeitige Festlegung und Absicherung von Zuverlässigkeitszielen gekoppelt mit einer entwicklungsbegleitenden Aufteilung dieser Ziele auf die späten Phasen würde, trotz der in den frühen Entwicklungsphasen mangelhaften Produktinformationen, die Qualität und die Sicherheit kognitiver Produkte erheblich verbessern.

---

## Literatur

- [1] Beetz, M. et al., "Cognitive Technical Systems – What is the Role of Artificial Intelligence?" KI 2007: Advances in Artificial Intelligence, Vol. 4667, Berlin, Springer 2007, pp. 19-42.
- [2] Verein Deutscher Ingenieure (1990) VDI 4001 Blatt 2 Terminologie der Zuverlässigkeit. Beuth, Berlin
- [3] Brachman, R. J., "Systems That Know What They're Doing", Intelligent Systems, Vol. 17, No 6, 2002, pp 67-71.
- [4] Wedel, M.: "Zuverlässigkeitsanalyse von Automatisierungssysteme in den frühen Entwicklungsphasen", GMA-Kongress - Erfolgsfaktor Automation - Automation im gesamten Lebenszyklus, 2007
- [5] Bertsche, B. et al.: "Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme: Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen", Berlin, Springer, 2008
- [6] Göhner, P. et al.: "Reliability Considerations for Mechatronic Systems on the Basis of a State Model." Proceedings of the Dependability and Fault Tolerance Workshop; 17th International Conference on Architecture of Computing Systems (ARCS '04), Augsburg: 106-112
- [7] Kain S. et al.: "Controller Architecture for safe Cognitive Technical Systems", 26th International Conference on Computer Safety, Reliability and Security, Nuremberg, Germany, pp 518-531, 2007
- [8] Paetzold, K.: "Ethische Aspekte bei der Entwicklung kognitiver technischer Systeme für die Unterstützung bei demenziellen Erkrankungen", International Conference of Engineering Design, ICED'07
- [9] Birolini, A.: "Reliability Engineering: Theory and Practice", Springer-Verlag, Berlin, 2004
- [10] Metzler, T. & Shea, K.: "Cognitive Products: Definition and Framework", International Design Conference - Design 2010, Dubrovnik, 2010
- [11] T. Mitchell, "The discipline of machine learning," Tech. Rep.CMU-ML-06-108, Carnegie Mellon University, 2006.