

Integrierte Modellierung der Dynamik und der Verlässlichkeit komplexer mechatronischer Systeme

Thorben Kaul, Tobias Meyer, Walter Sextro

Universität Paderborn

Pohlweg 47-49, 33102 Paderborn

Tel. 05251/60-1811, Fax. 05251/60-1803

E-Mail: {thorben.kaul|tobias.meyer|walter.sextro}@uni-paderborn.de

Zusammenfassung

Die starke Integration von Sensorik, Aktorik, Hard- und Software stellt Herausforderungen an die Verlässlichkeit intelligenter mechatronischer Systeme dar. Diese Systeme verfügen aber auch über großes Potential zur Verbesserung ihrer Verlässlichkeit durch eine Anpassung des Systemverhaltens an den aktuellen Zustand. Um den Umfang der Systemmodelle zu reduzieren und die Anpassung des Systemverhaltens zu ermöglichen, sind fortschrittliche Modellierungsmethoden notwendig, mit denen die Verlässlichkeit in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses sichergestellt und evaluiert werden kann.

Von den Attributen der Verlässlichkeit ist insbesondere die Zuverlässigkeit in hohem Maße von den auftretenden Belastungen an den Komponenten und damit vom dynamischen Systemverhalten abhängig. Bisherige Modellierungsansätze bilden diese Abhängigkeit nur unzureichend ab. Es wird daher ein Ansatz zur integrierten Modellierung mechatronischer Systeme vorgestellt. Dieser ist in der Lage, sowohl die Dynamik als auch die Zuverlässigkeit des Systems abzubilden. Die Transformation eines Modells des dynamischen Systemverhaltens generiert dabei ein Zuverlässigkeitsmodell. Für typischerweise konkurrierende Ziele können mit Hilfe von Mehrzieloptimierungsverfahren Betriebspunkte eines Systems bestimmt werden. Das integrierte Modell kann zur Erzeugung von Zielfunktionen für die Dynamik als auch für die Zuverlässigkeit genutzt werden. Die Ergebnisse ermöglichen eine Verhaltensanpassung durch Wahl eines paretooptimalen Betriebspunkts während des Betriebs.

Das vorgeschlagene Konzept zur integrierten Modellierung mechatronischer Systeme bietet aufgrund des modellbasierten Entwicklungsansatzes und der automatisierten Transformation eines Verlässlichkeitsmodells eine Reduktion der Benutzereingaben und eine Entlastung des Benutzers. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit von Benutzerfehlern gesenkt und die Verlässlichkeit bereits während der Entwicklung erhöht. Somit können Iterationsschleifen vermieden und die Entwicklungskosten gesenkt werden.

Schlüsselworte

Verlässlichkeit, Zuverlässigkeit, Dynamik, integrierte Modellierung

Integrated model for dynamics and dependability of complex mechatronic systems

Abstract

Intelligent mechatronic systems feature complex sensor and actuator systems as well as more sophisticated information processing than in a standard mechatronic system, making system dependability a challenging effort. However, the risk of increased system complexity also provides the chance to adapt system behavior to increase dependability this way. To enable for these opportunities, reduced complexity of the system model as well as advanced modelling technics are required to evaluate system dependability in early design phase.

System reliability is highly influenced by load on individual system components during operation as the prevailing load on a component is crucial for its degradation and therefore for its lifetime. The introduced integrated model is more convenient than prior approaches in modelling the dependency between system dynamics and reliability. Therefore an integrated model for dynamics and dependability of mechatronic systems is introduced. Here a transformation of a model of system dynamics generates a model of system reliability. However, for competitive objectives of the system at hand multi-objective optimization can be used to compute operating points. The integrated model can be used to formulate performance- as well as reliability-related objective functions. To achieve an adaption of system behavior to current environmental conditions or systems states, pre-computed pareto-optimal operating points are chosen.

The proposed concept of integrated modelling of mechatronic systems reduces the user input and is less susceptible to user errors due to the model-based approach and the automated transformation of a reliability model. Applied in early design phase, integrated modelling is capable of increasing system dependability and supporting an efficient design process.

Keywords

Reliability, Dependability, System Dynamics, Integrated Modelling

1 Einleitung

An moderne mechatronische Produkte des Maschinenbaus werden steigende Funktionsanforderungen gestellt, die mit erhöhter Komplexität einhergehen. Die Kombination von Mechanik, Elektro- und Regelungstechnik, Informatik und Mathematik erlaubt darüber hinaus die Entwicklung intelligenter mechatronischer Systeme und ermöglicht die Realisierung von selbstoptimierenden Systemen als eine Klasse intelligenter mechatronischer Systeme. Sie sind in der Lage, autonom auf veränderte Umwelteinflüsse oder Systemzustände zu reagieren und ihr Betriebsverhalten daran anzupassen. Die Integration dieser Fähigkeiten steigert die ohnehin hohe Komplexität mechatronischer Systeme nochmals. Neben dieser stellen die kurzen Entwicklungszyklen und steigender Kostendruck in Entwicklung und Produktion eine Herausforderung an die Verlässlichkeit der Produkte dar [GRS+14]. Dazu trägt bei, dass aus der Reaktion selbstoptimierender Systeme auf äußere Einflüsse ein schwer vorhersagbares Betriebsverhalten resultiert, das über die Lebensdauer zu stark ändernden dynamischen Lasten auf das System selbst führt [MSK+13]. In diesem Umfeld kann die Systemzuverlässigkeit nur durch zusätzliche Maßnahmen wie fortgeschrittene Modellierungsmethoden sichergestellt werden.

Als Grundlage selbstoptimierender Systeme dient die modellbasierte Mehrzieloptimierung, mit der mögliche Betriebspunkte bestimmt werden. Soll das System in der Lage sein, sein Verhalten an die aktuelle Verlässlichkeit anzupassen, muss diese bereits in der Mehrzieloptimierung zugrundeliegenden Modell berücksichtigt werden. Dabei muss die Verlässlichkeit des Systems in einer Zielfunktion quantifiziert werden. Zur Quantifizierung der Verlässlichkeit wird die Zuverlässigkeit verwendet, da diese eine starke Abhängigkeit von dem dynamischen Systemverhalten aufweist. Aufgrund der komplexen Wirkzusammenhänge ist dabei ein integrierter Modellierungsansatz von Dynamik und Zuverlässigkeit des Systems notwendig, wie es auch im zweiten Abschnitt dieses Artikels noch näher erläutert werden wird.

Das aktuelle Vorgehen zur Ableitung verlässlichkeitsrelevanter Zielfunktionen wird vorgestellt und ein Vorgehen zur integrierten Modellierung von Dynamik und Zuverlässigkeit skizziert. Das aus dem Modellierungsansatz hervorgehende Zuverlässigkeitsmodell kann zur Aufstellung von Zielfunktionen für Mehrzieloptimierungsverfahren genutzt werden. Der dritte Abschnitt beleuchtet den Stand der Technik zur integrierten Modellierung von Dynamik und Verlässlichkeit. Im vierten Abschnitt wird ein Systemmodell für die geschlossene Modellierung von Dynamik und Zuverlässigkeit im Rahmen der Mehrzieloptimierung vorgestellt und beschrieben. Im fünften Abschnitt wird ein Fazit gezogen.

2 Verlässlichkeit komplexer mechatronischer Systeme

Bei der Entwicklung technischer Produkte müssen verschiedene Eigenschaften des Systemverhaltens, wie beispielsweise Dynamik, Effizienz und Zuverlässigkeit, als Zielgrö-

ßen gegeneinander abgewogen werden. Selbstoptimierende Systeme sind in der Lage, die Auswahl eines geeigneten Kompromisses von der Entwicklungs- in die Betriebsphase zu verlegen, indem mittels modellbasierter Mehrzieloptimierung zahlreiche mögliche Betriebspunkte bestimmt werden [GRS+14]. Dazu ist es allerdings notwendig, mathematische Modelle der Zielgrößen als Zielfunktionen zu formulieren, wobei der Entwickler mit der vollen Komplexität des Produktes konfrontiert wird.

Anpassungen des Systemverhaltens können konzeptioneller Art sein, sich auf die Auswahl der Komponenten beziehen, konstruktiv umgesetzt werden oder auch softwaretechnische Größen wie Reglerparameter und -strategien einschließen. Alle diese Änderungen, ob konzeptioneller, konstruktiver oder softwaretechnischer Art, haben Einfluss auf die Systemdynamik [GRS+14], die wiederum die auf einzelne Komponenten wirkenden Lasten und darüber die Zuverlässigkeit des Systems beeinflusst. Soll die Zuverlässigkeit, oder einzelne Aspekte wie etwa die Zuverlässigkeit, innerhalb der Mehrzieloptimierung als Zielgröße berücksichtigt werden, um eine Verhaltensanpassung zu ermöglichen, wird aktuell ein Modell der Systemzuverlässigkeit aus einem Dynamikmodell manuell abgeleitet wie in Bild 1 links dargestellt. Die Systemzuverlässigkeit wird in Abhängigkeit der Lasten der Komponenten, die sich durch die Optimierungsparameter und die zugehörige Systemdynamik ergibt, berechnet. Das Aufstellen einer Zielfunktion für die Systemzuverlässigkeit erfolgt ebenfalls auf Grundlage der Einschätzungen des Entwicklers.

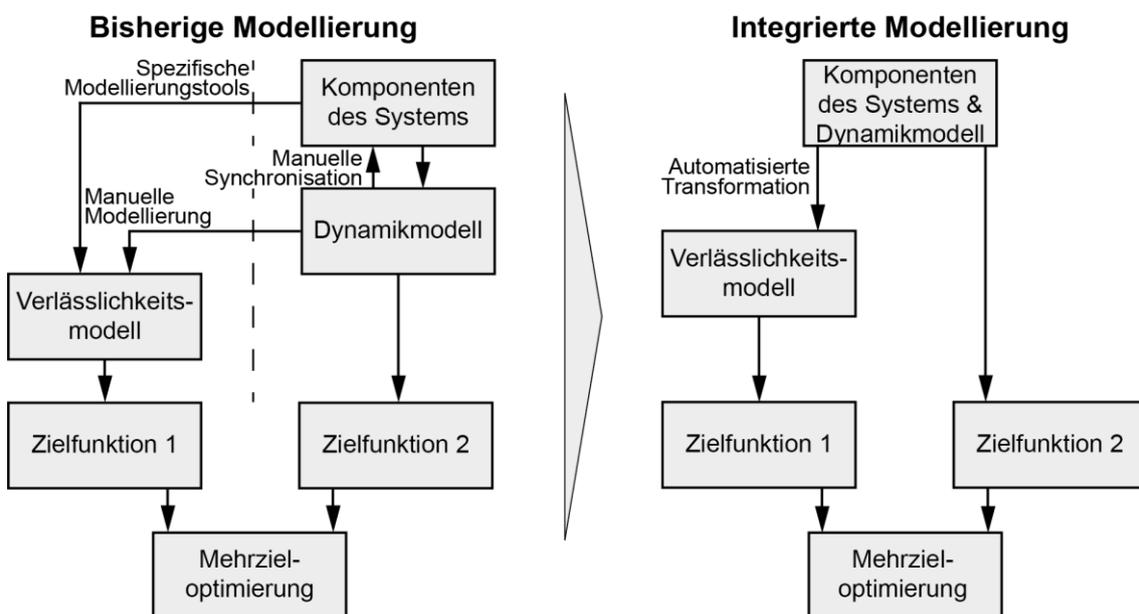


Bild 1: Bisheriges und integriertes Vorgehen zur geschlossenen Modellierung der Dynamik und Zuverlässigkeit in der Mehrzieloptimierung

Aus der manuellen Ableitung eines Modells der Systemzuverlässigkeit ergeben sich einige schwerwiegende Nachteile. Aufgrund der Komplexität mechatronischer Systeme und der starken Interaktion der Komponenten können nicht alle Aspekte berücksichtigt

werden, wodurch das reale Ausfall- und Verschleißverhalten nicht vollständig abgebildet wird. Mit jeder Anpassung des Mehrzieloptimierungsproblems tritt nicht nur eine Veränderung der Systemdynamik oder -struktur auf, sondern es muss auch manuell das Verlässlichkeitsmodell aktualisiert werden. Dieser Prozess ist sowohl fehleranfällig als auch ineffizient. Eine automatisierte Ableitung eines Modells der Systemzuverlässigkeit (Bild 1 rechts) ist in der Lage den Entwickler zu unterstützen und sowohl die Vollständigkeit als auch die Effizienz bei der Modellbildung zu erhöhen.

3 Stand der Technik

[GFD+09] liefert einen umfangreichen Überblick über bestehende Ansätze, die neben dem Verhalten des Systems weitere Aspekte wie etwa die Ziele, die Struktur und die Gestalt abbilden. Dabei wird allerdings kein automatisch synchronisiertes Vorgehen verfolgt, sondern es werden einzelne, nicht direkt gekoppelte Modelle für die unterschiedlichen Aspekte aufgebaut.

Stärker fokussiert auf eine integrierte Modellierung von Dynamik und Verlässlichkeit komplexer Systeme sind zahlreiche Verfahren, die sich in zwei Modellierungsansätze unterteilen lassen. Der erste Ansatz versucht ein System interdisziplinär und domänenübergreifend zu beschreiben. Hier finden sowohl Sprachen zur umfassenden Systembeschreibung wie SysML, MODELICA und VHDL-AMS Anwendung ([DIK10], [S11], [BML07]) als auch auf die Modellierung von Dynamik und Verlässlichkeit ausgerichtete spezialisierte Sprachen wie LARES (Language for REconfigurable dependable Systems) oder AltaRica. Dem gegenüber steht der Ansatz, bestehende multidomänen-Modellierungswerkzeuge wie Matlab/Simulink mittels zusätzlichen Programmpaketen zu erweitern ([PM01], [HM08]).

Beide genannten Modellierungsansätze wurden in zahlreichen Arbeiten für eine integrierte Modellierung verwendet. Ziel der Verlässlichkeitsmodelle ist eine Quantifizierung der Systemzuverlässigkeit, qualitative Modelle werden daher nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

Die automatisierte Erzeugung einer FMEA (Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse) aus SysML-Modellen wird in [DIK10] vorgestellt und ein Vergleich zu AltaRica gezogen. Das methodische Vorgehen zur Modellbildung mit SysML wird in den Entwicklungsprozess eingebunden. Qualitative Methoden wie die FMEA können jedoch nicht als Basis einer Zielfunktion zur numerischen Mehrzieloptimierung genutzt werden.

Ein Ansatz zur integrierten Modellierung von elektrischen Systemen in Flugzeugen wird in [S11] vorgestellt. Es werden MODELICA-Bibliotheken zur Simulation der Energieversorgung von Flugzeugen erstellt und ein Algorithmus zur automatisierten Erstellung von Zuverlässigkeitsblockdiagrammen und Fehlzustandsbäumen vorgestellt. Das Vorgehen ist auf elektrischen Komponenten beschränkt, deren Ausfallverhalten

ausschließlich durch Zufallsausfälle beschrieben wird. Lebensdauerinformationen wie Ausfallraten müssen vom Benutzer eingegeben werden.

In [BML07] wird eine Methode zur Berücksichtigung der Systemzuverlässigkeit im Entwicklungsprozess elektronischer Systeme diskutiert. Ausgehend von einer Systembeschreibung in VHDL-AMS wird eine Monte-Carlo-Simulation zur Abbildung des Ausfallverhaltens des Systems durchgeführt und evaluiert. Die Methode berücksichtigt den Einfluss der Degradation auf das Betriebsverhalten elektronischer Komponenten. Eine domänenübergreifende Modellierung ist mit VHDL-AMS nicht möglich – sie dient ausschließlich der Beschreibung elektronischer Schaltung.

Zur Bewertung der Zuverlässigkeit eines selbstoptimierenden mechatronischen Systems wird in [MSS+13] das LARES-Framework verwendet. Es werden die Hardware-Komponenten des Systems in Abhängigkeit der aus der aktuellen Situation resultierenden Belastungen und die nicht-deterministische Verhaltensadaption modelliert, um die Verlässlichkeit des betrachteten Systems zu evaluieren. Dabei wird allerdings der Zusammenhang zwischen Systemkonfiguration und -verhalten zur aktuell gültigen Ausfallrate nicht im Modell selbst bestimmt, sondern muss extern vorgegeben werden.

In [PM01] wird ein Algorithmus zur automatisierten Ableitung von Fehlzustandsbäumen aus Matlab/Simulink-Modellen vorgestellt. Der Algorithmus basiert auf einer Gefahrenanalyse mittels HAZOP (HAZard and OPerability study) für jede Komponente und ist damit auf umfangreiches Benutzerwissen und -eingaben angewiesen.

Ein teilautomatisierter Algorithmus zur Durchführung einer FMEA aus Matlab/Simulink-Modellen wird in [HM08] beschrieben. Das Vorgehen ist auf umfangreiche Benutzereingaben angewiesen und eignet sich aufgrund seines qualitativen Modells nicht zur Ableitung einer Zielfunktion.

Allen Ansätzen ist gemein, dass die Synchronisation zwischen Dynamik- und Verlässlichkeitsmodell, beispielsweise über veränderte Ausfallraten oder Lasten, nicht vollautomatisch durchgeführt wird sondern noch immer eines Benutzereingriffs bedarf, was den Nutzen stark einschränkt und der Einbettung in ein Mehrzieloptimierungsproblem im Wege steht.

4 Integrierte Modellierung

Die interdisziplinäre Betrachtung von Dynamik und Verlässlichkeit eines mechatronischen Systems im Rahmen einer integrierten Modellierung erfordert umfassende Systemkenntnis. Soll das integrierte Systemmodell im Rahmen der Mehrzieloptimierung genutzt werden, müssen alle für die Zielfunktionen relevanten Modelle integriert werden. Es wird mit allen notwendigen Informationen zur Abbildung der Zielgrößen angereichert und unter Berücksichtigung aller auftretenden Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Domänen ausgewertet.

Das Systemmodell und das Modell der Systemzuverlässigkeit können unabhängig von der Mehrzieloptimierung verwendet werden. So werden kritische Komponenten durch Evaluation der Systemzuverlässigkeit ohne Formulierung eines Mehrzieloptimierungsproblems identifiziert und Maßnahmen können ergriffen werden. Dies stellt einen ressourcenschonenden Ansatz zur Sicherstellung einer gewünschten Systemzuverlässigkeit dar.

Im Entwicklungsprozess mechatronischer Systeme besitzt die Modellierung der Dynamik einen großen Stellenwert. Das Systemmodell basiert daher üblicherweise auf einem Modell des dynamischen Systemverhaltens, das um Informationen zu Verlässlichkeitsaspekten, z.B. Lebensdauerinformationen oder relevante geometrische Größen der Komponenten im System, erweitert wird, ohne den zugrundeliegenden Charakter eines Dynamikmodells zu verlieren. Weitere Lebensdauerinformationen der Komponenten, wie Ausfallrate oder Zuverlässigkeit, werden dann aus diesem Modell erzeugt.

Die Abbildung der Zuverlässigkeit des betrachteten Systems erfolgt automatisiert mit einer Transformation des Systemmodells in ein Modell der Systemzuverlässigkeit. Zentrales Ziel ist, zusätzliche Benutzereingaben auf ein Minimum zu reduzieren und einen hohen Automatisierungsgrad in der Modellsynthese zu gewährleisten.

4.1 Systemmodell

Der integrierten Modellierung von Dynamik und Zuverlässigkeit und der automatisierten Ableitung eines Modells der Systemzuverlässigkeit aus einem Systemmodell liegt ein topologieorientierter Modellierungsansatz zugrunde (Bild 2). Das Modell des dynamischen Systemverhaltens kann unabhängig vom Modell der Systemzuverlässigkeit simuliert werden, sodass eine gezielte Auslegung der Dynamik ohne erhöhten Berechnungsaufwand durchgeführt werden kann.

Die Zuverlässigkeit der in einem System enthaltenen Komponenten bestimmt in hohem Maße die Verlässlichkeit des Gesamtsystems. Das dynamische Systemverhalten beeinflusst die an den Komponenten auftretenden Lasten. Der Einfluss dieser Lasten auf die Komponenten führt zu Degradation und einer Herabsetzung der geplanten Lebensdauer. Um die Degradation der Komponenten abbilden zu können, werden daher Lebensdauermodelle genutzt. Dazu ist für jede Komponente im Systemmodell ein Lebensdauermodell notwendig, da die auftretenden Belastungen komponentenabhängig sind und nicht auf baugleiche Komponenten verallgemeinert werden können. Das klassische Modell des dynamischen Systemverhaltens muss im Systemmodell um Modelle zur Abbildung der Lasten auf die einzelnen Komponenten erweitert werden. Die Lasten hängen von der Simulationszeit und den Optimierungsparametern ab.

Im Zuge einer Hierarchisierung und Strukturierung komplexer mechatronischer Systeme erfolgt die Bildung von Baugruppen im topologieorientierten Systemmodell entsprechend dem Aufbau des realen Systems. Den Baugruppen können eigene Lebens-

dauermodelle zugewiesen werden, wobei dann Lebensdauermodelle von Komponenten innerhalb der Baugruppe überschrieben werden. Die Lebensdauermodelle der Komponenten oder Baugruppen eines Systems werden hierarchisch betrachtet – das Lebensdauermodell auf der höchsten Hierarchieebene geht in die Berechnung der Systemzuverlässigkeit ein, darunter liegende Lebensdauermodelle werden vernachlässigt. Die im Systemmodell vorhandene Hierarchisierung der Komponenten in Baugruppen wird für eine konsistente Abbildung im Zuverlässigkeitsmodell übernommen.

Um die Abhängigkeit zwischen dynamischem Systemverhalten und Degradation der Komponenten mittels Lebensdauermodellen abbilden zu können, ist eine Berechnung des Systemmodells auf zwei unterschiedlichen Zeitskalen notwendig. Die dynamischen Lasten auf die Komponenten werden mittels einer Simulation des Dynamikmodells bestimmt. Es wird das Dynamikmodell für ein *charakteristisches Manöver* mit hinreichend kleiner Integrationsschrittweite simuliert. Das charakteristische Manöver stellt einen Bewegungsablauf des betrachteten Systems dar, der die tatsächliche Nutzung möglichst gut abbildet, und ist identisch mit dem Betriebszyklus für den das Systemverhalten im Rahmen der Mehrzieloptimierung optimiert wird.

Es wird eine konsistente Behandlung des Systemmodells während der Simulation des dynamischen Systemverhaltens und der Optimierung gewährleistet und der Simulationsaufwand begrenzt. Aus dem charakteristischen Manöver muss eine aussagekräftige Quantifizierung des Systemverhaltens mittels der Zielfunktionen der Systemdynamik und der Systemzuverlässigkeit möglich sein.

Die Berechnung der Systemzuverlässigkeit aus dem abgeleiteten Zuverlässigkeitsmodell wird für die Betriebsdauer des betrachteten Systems auf der zweiten Zeitskala durchgeführt und liegt im Bereich von Stunden bis Jahren. Die Simulation des Dynamikmodells über die gesamte Betriebsdauer des Systems zur vollständigen Abbildung der auftretenden Lasten ist nicht sinnvoll und mit steigender Komplexität des betrachteten Systems nicht mehr durchführbar.

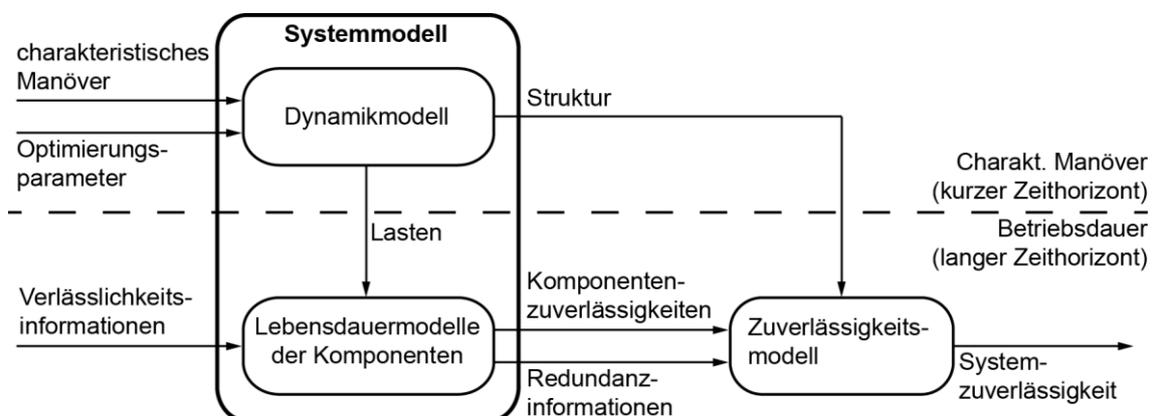


Bild 2: Systemmodell und abgeleitetes Zuverlässigkeitsmodell

Die im charakteristischen Manöver berechneten Lasten werden in den Lebensdauermodellen der Komponenten kumuliert und eine äquivalente Last für das charakteristische Manöver berechnet. Für die äquivalente Last kann mittels einer Energiebetrachtung die Degradation der Komponente bestimmt und die Lebensdauer ermittelt werden. Die Lebensdauer wird unter der Annahme berechnet, dass die gewählten Modellparameter Mittelwerte einer Menge an baugleichen Komponenten abbilden. Demnach kann die berechnete Lebensdauer als Mittelwert der ausfallfreien Zeit, MTTF (Mean Time To Failure), der Komponente betrachtet werden.

Das Ausfallverhalten maschinenbaulicher Produkte kann in guter Näherung mit der Weibull-Verteilung beschrieben werden. Für viele Maschinenelemente, wie Wälzlager, sind die Parameter der Verteilung bekannt [B07]. Elektronische Bauteile sind zumeist Zufallsausfällen unterworfen. Die unbekannt Parameter der Verteilungsfunktionen können mittels der MTTF berechnet werden. Unter Annahme einer Verteilungsfunktion ist es möglich, die Zuverlässigkeit der Komponenten über der Zeit in Abhängigkeit der Optimierungsparameter zu ermitteln.

Die Zuverlässigkeitswerte der Komponenten gehen in die Parametrierung des Zuverlässigkeitsmodells ein. Es stellt die Abhängigkeiten und die Auswirkungen des Ausfallverhaltens einzelner Komponenten auf das Gesamtsystem dar. Eine Auswertung des Zuverlässigkeitsmodells liefert die Systemzuverlässigkeit über der Betriebsdauer, aus der dann eine Zielfunktion für die Mehrzieloptimierung synthetisiert wird.

4.2 Transformation eines Zuverlässigkeitsmodells

Zentral für die integrierte Modellierung von Dynamik und Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme ist ein Algorithmus zur vollständig automatisierten Transformation eines Zuverlässigkeitsmodells aus dem Systemmodell. Das Zuverlässigkeitsmodell umfasst sowohl strukturelle als auch quantitative Anteile. Die Modellstruktur kann aus der Analyse der Interaktion der Komponenten abgeleitet werden. Je nach vorliegendem Dynamikmodell können beispielsweise Signalpfade zwischen den Komponenten analysiert werden, um Rückschlüsse auf Abhängigkeiten im kausalen Ausfallverhalten der Komponenten ziehen zu können. Die quantitativen Anteile des Zuverlässigkeitsmodells werden in der Parametrierung berücksichtigt und umfassen unter anderen Komponentenzuverlässigkeiten oder Redundanzinformationen.

Der Transformationsalgorithmus muss unterschiedliche Definitionen des Systemausfalls in der Modellbildung berücksichtigen. Die Benutzervorgabe, wann das betrachtete System als ausgefallen gilt, wird vom Algorithmus in geeigneter Form in das Zuverlässigkeitsmodell übertragen. Die Parametrierung des Zuverlässigkeitsmodells findet auf Ebene des Systemmodells statt. Der Benutzer hat aufgrund der automatisierten Transformation keine direkte Interaktionsmöglichkeit mit dem Zuverlässigkeitsmodell, was eine konsistente Modellbildung im Rahmen der Optimierungsiterationen gewährleistet.

4.3 Parametrierung des Zuverlässigkeitsmodells

Das Systemmodell wird vorzugsweise über eine GUI (Graphical User Interface) parametrieren. Diese Parametrierung ist in zwei Abschnitte unterteilt — auf die Modelle der Dynamik und der Zuverlässigkeit.

Die Parametrierung des Zuverlässigkeitsmodells umfasst die Definition des charakteristischen Manövers, eines kritischen Ereignisses und allgemeiner verlässlichkeitsrelevanter Kenngrößen. Das charakteristische Manöver ist bereits für die Mehrzieloptimierung definiert und kann hier erneut verwendet werden. Im Modell wird es durch vom Benutzer identifizierte Eingänge des Systemmodells und geeignet definierte Eingangsgrößen abgebildet.

Der Ausfall eines beliebigen Systems ist an die zu erfüllende Funktion gebunden — kann die gewünschte Funktion des Systems nicht erfüllt werden, gilt es als ausgefallen. Komplexe mechatronische Systeme besitzen neben einer Hauptfunktion typischerweise eine große Anzahl an Nebenfunktionen, die keinen unmittelbaren Beitrag zur Hauptfunktion leisten, wie etwa Komfortfunktionen im Automobil. Der Benutzer muss anhand der Funktionen eines mechatronischen Systems eine Definition des zu betrachtenden Systemausfalls vornehmen. Dies kann in Abhängigkeit des gewählten Zuverlässigkeitsmodells über die Definition eines unerwünschten Ereignisses durchgeführt werden. Das unerwünschte Ereignis kann beispielsweise das Ausbleiben oder die Überschreitung eines Toleranzbandes für ein beliebiges Signal innerhalb des Systemmodells sein.

Die Eingabe von verlässlichkeitsrelevanten Kenngrößen und Komponentenparametern findet über die GUI der Komponenten im Systemmodell statt. Die Eingabe von Kenngrößen des Zuverlässigkeitsmodells hängt von der Modellierungstiefe des dynamischen Systemverhaltens ab. So kann es für Redundanzen ausreichend sein, die Redundanzordnung einer Komponente in der GUI anzugeben. Dieses Vorgehen führt zu einem Minimalmodell des dynamischen Systemverhaltens, in dem redundante Komponenten nur einmal eingebunden sind. Eine Rekonfiguration bei der Nutzung redundanter Komponenten ist so nicht abbildbar. Hier muss das Dynamikmodell des Systems alle redundanten Komponenten und ein Logikelement zur Rekonfiguration enthalten. Daneben ist die Eingabe von Ausfallraten oder Komponentenzuverlässigkeiten möglich, wodurch die Auswertung eines Lebensdauermodells nicht mehr notwendig ist. Die Eingabe von Komponentenparametern, wie etwa Geometrie oder Werkstoffkenngrößen, sind von den Parametern des Modells des dynamischen Systemverhaltens zu unterscheiden und dienen ausschließlich der Parametrierung der Lebensdauermodelle der Komponenten.

4.4 Einbettung in Mehrzieloptimierung

Das beschriebene Systemmodell und die automatisierte Transformation eines Zuverlässigkeitsmodells können im Rahmen der Optimierung komplexer mechatronischer Systeme im Entwicklungsprozess angewandt werden.

Numerische Mehrzieloptimierungsverfahren arbeiten iterativ; Parameterwerte werden im Optimierungsalgorithmus mit jeder Iteration variiert, das dynamische Systemverhalten beeinflusst, und das resultierende Verhalten über die Zielfunktionen quantifiziert und bewertet. Unter der Annahme, dass keine Rekonfiguration redundanter Komponenten stattfindet, wird das Zuverlässigkeitsmodell zu Beginn der Optimierung abgeleitet. In den Iterationsschritten der Optimierung findet nur noch eine Anpassung der Parameter aufgrund der veränderten dynamischen Lasten auf die Komponenten und eine Berechnung der aktuellen Systemzuverlässigkeit statt. Die dynamischen Lasten auf die Komponenten werden aus der Simulation des charakteristischen Manövers innerhalb der Optimierung gewonnen. Der zusätzliche Berechnungsaufwand zur Berücksichtigung der Zuverlässigkeit in einer Zielfunktion wird so stark reduziert.

5 Resümee und Ausblick

Die zentralen Aspekte dieser Arbeit sind einerseits die Synthese eines Zuverlässigkeitsmodells aus einem Systemdynamikmodell und andererseits die algorithmische Zusammenführung von Lebensdauermodellen einzelner Komponenten oder Baugruppen mit Parametrierung aus dem Systemdynamikmodell. Zentraler Bestandteil ist die Modellierung des betrachteten Systems auf zwei Zeitskalen zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit über die gesamte Betriebsdauer.

Ein Systemmodell, das eine automatisierte Transformation eines Zuverlässigkeitsmodells ermöglicht, entlastet den Benutzer erheblich und ist in der Lage, den Entwicklungsprozess bereits in frühen Phasen signifikant zu unterstützen.

Die vorgestellte integrierte Modellierung der Dynamik und der Verlässlichkeit komplexer mechatronischer Systeme ermöglicht die Abbildung der Abhängigkeit der Zuverlässigkeit vom dynamischen Systemverhalten. Unberücksichtigt bleibt jedoch der Einfluss der Degradation der Komponenten auf die Dynamik des Systems. Ein Ansatz weiterer Arbeiten kann die Untersuchung des Einflusses von Degradation und daraus resultierender Geometrie- und Parameteränderungen auf das dynamische Systemverhalten sein, was zu einer vollständigeren Abbildung mechatronischer Systeme im Sinne der integrierten Modellierung führen würde.

Literatur

- [B07] Birolini, A.: Reliability engineering. Bd. 5, Springer, 2007.
- [BML07] Bestory, C.; Marc, F.; Levi, H.: Statistical analysis during the reliability simulation, In: Microelectronics Reliability 47.9, S. 1353–1357, 2007.
- [DIK10] David, P.; Idasiak, V.; Kratz, F.: Reliability study of complex physical systems using SysML, In: Reliability Engineering & System Safety, S. 431–450, 2010.
- [GFD+09] Gausemeier, J.; Frank, U.; Donoth, J.; Kahl, S.: Specification technique for the description of self-optimizing mechatronic systems, Research in Engineering Design 20.4, S. 201–223, 2009.
- [GRS+14] Gausemeier, J.; Rammig, F. J.; Schäfer, W.; Sextro, W.: Dependability of Self-Optimizing Mechatronic Systems, Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [HM08] Hecht, H.; Menes, R.: Software FMEA Automated and as a Design Tool, In: Proc of the Society of Automotive Engineers, 2008.
- [MSS+13] Meyer, T.; Sondermann-Wölke, C.; Sextro, W.; Martin Riedl; Gouberman, A.; Siegle, M.: Bewertung der Zuverlässigkeit selbstoptimierender Systeme mit dem LARES-Framework, In: 9. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, S. 161–174, 2013.
- [MSK+13] Meyer, T.; Sondermann-Wölke, C.; Kimotho, J. K.; Sextro, W.: Controlling the Remaining Useful Lifetime using Self-Optimization, In: Chemical Engineering Transactions 33, S. 625–630, 2013.
- [PM01] Papadopoulos, Y.; Maruhn, M.: Model-based synthesis of fault trees from matlab-simulink models, In: International Conference on Dependable Systems and Networks, DSN 2001. S. 77–82, 2001.
- [S11] Schallert, C.: Inclusion of reliability and safety analysis methods in modelica, In: 8th International Modelica Conference, 2011.

Autoren

Thorben Kaul hat Maschinenbau an der Universität Paderborn studiert. Seit 2014 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik der Universität Paderborn. Im Rahmen seiner Tätigkeit am Lehrstuhl befasst er sich mit der integrierten Modellierung von Dynamik und Verlässlichkeit mechatronischer Systeme.

Tobias Meyer hat Maschinenbau an der Universität Paderborn studiert. Seit 2011 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik der Universität Paderborn. Seine Forschung befasst sich mit der Nutzung von Selbstoptimierung zur Anpassung des Systemverhaltens zur Erhöhung der Verlässlichkeit.

Walter Sextro hat Maschinenbau an der Leibniz Universität Hannover und am Imperial College in London studiert. Nach seiner Industrietätigkeit in Deutschland und den USA promovierte er 1997 an der Universität Hannover. Seine Habilitation hat er im Bereich dynamischer Kontaktprobleme mit Reibung verfasst. In den Jahren 2004-2009 hatte er eine Professur für Mechanik und Getriebelehre an der TU Graz inne. Seit 2009 leitet er den Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik der Universität Paderborn.