

Innovative Methoden zur Analyse elektrifizierter Antriebsstränge zukünftiger Fahrzeuge

Markus Ernst^{1*}, Jürgen Fabian¹, Mario Hirz¹

¹TU Graz, Institut für Fahrzeugtechnik, Inffeldgasse 11/II, 8010 Graz,
markus.ernst@tugraz.at, <http://www.ftg.tugraz.at>

Kurzfassung: Eine nachhaltige Entwicklung von Elektrofahrzeugen bedeutet nicht nur die Realisierung eines alltagstauglichen Fahrzeugkonzepts, sondern auch die Berücksichtigung sicherheitskritischer Aspekte. Mechatronische Komponenten und Systeme sind dabei ein wesentlicher Bestandteil im modernen Fahrzeug der Zukunft. Die Automobilindustrie ist daher stets mit der Herausforderung konfrontiert das Ausfallrisiko dieser sicherheitsrelevanten Bauteile zu senken. Daher entsteht der Wunsch nach innovativen Analyse- und Bewertungsmethoden, um die Bewertung sicherheitskritischer Aspekte so früh wie möglich im Entwicklungsprozess moderner Fahrzeuge integrieren zu können.

Gemäß dem aktuellen Stand der Technik sowie gängigen Qualitätsmethoden und -normen (z. B. ISO TS 16949) lässt sich eine sicherheitsorientierte Systemgestaltung anhand der ISO 26262 (Road vehicles – Functional safety, ISO-Norm für sicherheitsrelevante elektrische/elektronische Systeme in Kraftfahrzeugen) und ASIL (Automotive Safety Integrity Level) realisieren. Allerdings bieten bisherige klassische Analyse- bzw. Entwicklungsmethoden, wie beispielsweise die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA), keine zufriedenstellende Lösung für komplexe Systeme. Um den Entwicklungsprozess mechatronischer Komponenten zu optimieren und Fehlfunktionen zukünftiger Systeme so weit wie möglich zu reduzieren, sollen neuartige innovative Analysemethoden potentiell gefährliche Situationen erkennen, bewerten und Abhilfemaßnahmen festlegen.

Die eingereichte Publikation stellt ein Datenmodell einer innovativen Analysemethodik vor, welches auch sicherheitskritische Fehlfunktionen, sowie deren Folgen, Risiken und Ursachen bereits in der Entwicklungsphase einbindet und daraus Sicherheitsmechanismen und Maßnahmen ableiten kann. Mittels dieser umfassenden, innovativen Analysemethode kann die Entwicklung automotiver mechatronischer Systeme bezüglich der Sicherheitskennwerte optimiert werden, um das Ausfallrisiko zu senken und im Weiteren mögliche Sicherheitsmaßnahmen effektiv einleiten zu können.

Keywords: Elektromobilität, mechatronische Systeme, Analysemethode, Qualitätsmanagement, funktionale Sicherheit, ISO 26262

1 Einleitung

Die zunehmende Urbanisierung, veränderte gesetzliche Rahmenbedingungen und steigendes Kundenbewusstsein bezüglich nachhaltiger Mobilitätslösungen führen zur verstärkten Entwicklung alternativer Antriebstechnologien in der Fahrzeugtechnik. Einen Lösungsansatz stellt die Elektrifizierung der Antriebsstränge dar, wobei sowohl rein elektrische Antriebe, als auch Kombinationen von elektrischen Modulen mit konventionellen Antriebseinheiten (hybride Antriebe) dargestellt werden. Eine Elektrifizierung der Antriebsstränge soll die Abhängig-

keit der Mobilität von fossilen Kraftstoffen reduzieren, den (lokalen) Ausstoß von Schadstoffemissionen und des Treibhausgases CO₂ vermindern, und den Gesamtwirkungsgrad der Antriebssysteme verbessern.

Fossile Kraftstoffe haben den Vorteil sehr hoher Energiedichten, wobei die Umwandlung von chemischer in mechanische Energie in Verbrennungskraftmaschinen allerdings mit einem relativ schlechten Wirkungsgrad behaftet ist. Im Schnitt können nur ca. 20-30% der im Kraftstoff gebundenen Energie tatsächlich in Bewegungsenergie umgewandelt werden. In elektrischen Antrieben wird die elektrische Energie in Batteriesystemen gespeichert. Als Nachteile sind bei dieser Technologie die geringe Speicherkapazität und der derzeitige hohe Kostenaufwand zu nennen. Des Weiteren dauern die Aufladevorgänge deutlich länger als das Auftanken von konventionellen Kraftstofftanks. Bei gleicher Reichweite des Fahrzeugs wiegt heute ein Batteriesystem etwa 20-30-mal so viel wie ein gefüllter Kraftstofftank. Aus diesem Grund haben heutige Elektrofahrzeuge meist Reichweiten, die zwischen 100 und 200 km liegen.

Hybride Antriebskonzepte stellen eine Übergangstechnologie dar, welche den Wirkungsgrad des Antriebs durch eine Kombination von konventionellen Verbrennungskraftmaschinen und elektrischen Systemen verbessern kann. Hier wird versucht, die jeweiligen Stärken der beiden Systeme so zu kombinieren, dass insgesamt ein geringerer Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch und gleichzeitig eine ausreichende Reichweite erzielt werden.

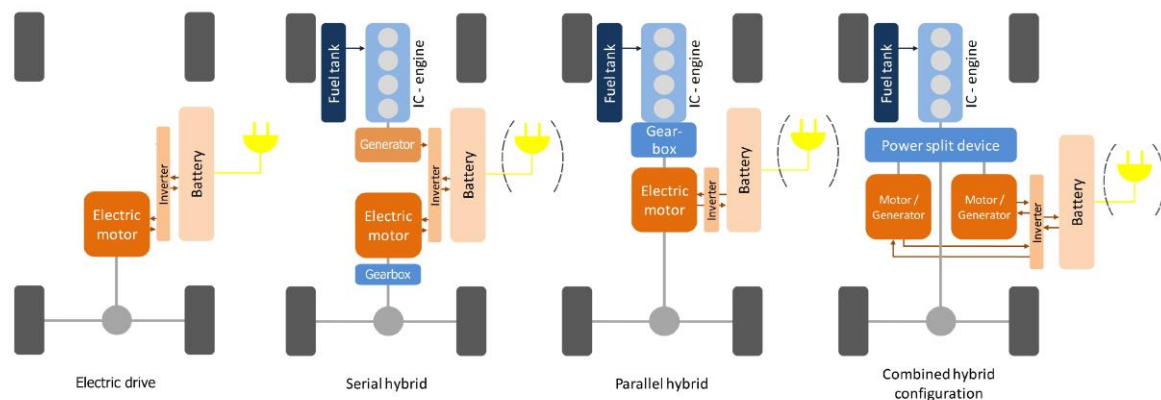


Abb. 1: Beispiele für elektrische und hybride Antriebsstrangkonfigurationen

Bei Einsatz von Elektrofahrzeugen oder Plugin-Hybridfahrzeugen ist zu beachten, dass die Technologie zur Stromerzeugung einen großen Einfluss auf den Gesamtwirkungsgrad hat. Als eine Kennzahl zur Bewertung dieses Wirkungsgrades wird der äquivalente Ausstoß des Treibhausgases CO₂ (CO₂e) herangezogen. Bei einer Stromerzeugung in Kohlekraftwerken kann die CO₂-Bilanz eines E-Fahrzeuges schlechter ausfallen, als wenn für dieselbe Mobilitätsleistung ein konventionell angetriebenes Ottokraftstoff- oder Dieselfahrzeug verwendet wird. In diesem Zusammenhang ist die Anwendung von Elektromobilität immer in Kombination mit dem zum Aufladen verfügbaren Strom-Mix zu sehen.

2 Qualitätsmethoden in der Elektromobilität

Die steigende Komplexität von Dienstleistungen, Produkten und Kundenanforderungen drängt das Thema Qualität innerhalb der Automobilbranche immer weiter in den Vordergrund. Der Begriff Qualität leitet sich vom lateinischen Wort „qualitas“ ab, welches gleichbedeutend mit Beschaffenheit, Brauchbarkeit, Eigenart und Güte ist. Dabei dient Qualität den Verbraucherbedürfnissen, wird durch den Nutzer wahrgenommen und ist mit hochwertigen Prozessen sowie Produkten von hoher technischer Zuverlässigkeit verbunden. Daraus folgt eine starke Verknüpfung der Zuverlässigkeit mit einer Minimierung des Ausfallsrisikos, welches zu einer Verringerung der Produkthaftung führt, [1].

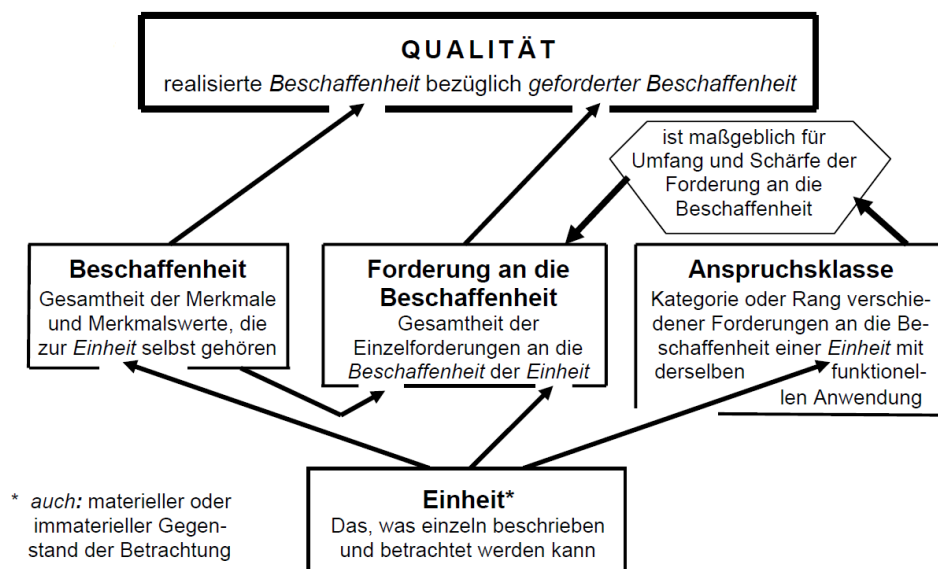


Abb. 2: Definition von Qualität (Entflechtungsprinzip), gemäß [2]

Gemäß der Definition von Qualität wird von einem Produkt erwartet, dass es seine zugesicherten Eigenschaften über die vereinbarte Lebensdauer störungsfrei bereitstellen kann. Dies setzt die genaue Kenntnis der produktspezifischen Anwendung sowie deren Belastungen voraus und dient sowohl als Grundlage für die Produktentwicklung, als auch für den Produktionsprozess sowie -ablauf.

Zur Qualitätskontrolle der zugesicherten Produkteigenschaften werden während des gesamten Entwicklungsprozesses Typenprüfungen sowie Lebensdauertests durchgeführt. Um die gesamte Lebensdauer eines Fahrzeuges abbilden zu können, werden in der Praxis beschleunigte Prüfungen herangezogen, wobei hier das exakte Wissen um die Fehlermechanismen sowie Beschleunigungsfaktoren vorliegen muss.

Im Verlauf der Produktentwicklung müssen einerseits Toleranzen von verwendeten Komponenten und andererseits Prozessschwankungen berücksichtigt werden. Mit Hilfe eines toleranten Designs sowie einer toleranten Produktionskette kann die Qualität der Produktherstellung in hohem Volumen über eine lange Zeitspanne unterstützt werden. Dabei geben Bauteiluntersuchungen, welche in den Grenzbereichen der Prozesstoleranzen liegen, Aufschluss über die Prozessfähigkeit. Durch weitere Untersuchungen der Prozessschritte (z. B. durch Stichproben), sowie der zugekauften Teile und Materialien (Qualitätssicherungsvereinbarung-

gen mit den Lieferanten) lassen sich Fehler erkennen und behandeln, wobei die geforderte Fehlerrate deutlich unter 10 ppm liegen soll. Zur gezielten und raschen Fehlerortung ist ein umfassendes Rückverfolgbarkeitskonzept (Traceability) zweckdienlich, in welchem die wichtigsten Prozessparameter, Produktionshilfsmittel, Testergebnisse sowie Materialien hinterlegt sind. Zusätzlich dienen Ein- und Ausgabe-Schnittstellen zur Datenauslesung und softwaregestützten Computerauswertung, [3].

3 Analysemethoden und Sicherheitsstandards elektrifizierter Antriebsstränge

Die Elektrifizierung des Antriebsstranges bringt die Entwicklung neuer mechatronischer Komponenten und Systeme mit sich. Diese ermöglichen einerseits die effizientere Nutzung alternativer Antriebsvarianten und -kombinationen und beeinflussen andererseits auch vor allem die Sicherheit des Antriebsstranges in der Automobilindustrie. Alternative Antriebssysteme weisen aufgrund der unterschiedlichen Komponenten oft einen komplexen Struktur- und Funktionsaufbau auf, welcher vor allem für die Entwicklung eine Herausforderung im Bereich der Analysemethodik darstellt. Eine grundlegende Definition zum Ablauf des Entwicklungsprozesses solcher elektrifizierter Systeme im Antriebsstrang stellt die Richtlinie VDI 2206 [4] dar, welche vor allem mit dem V-Modell eine Vorgehensweise aufzeigt, siehe Abb. 3, [5].

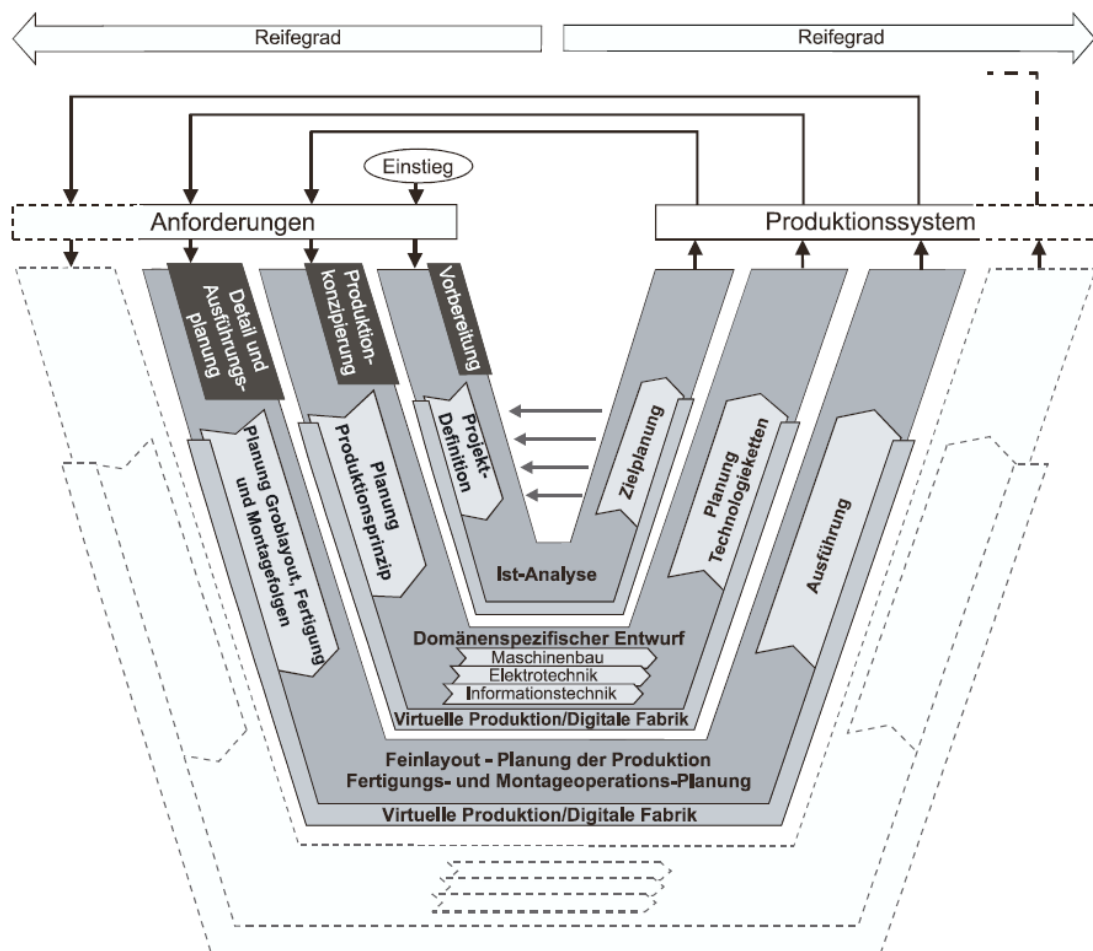


Abb. 3: V-Modell für mechatronische Systeme, [4]

Da die Elektrifizierung im Antriebsstrang immer weiter an Bedeutung gewinnt, fließt auch die Betrachtung des Ausfallverhaltens vermehrt in den Entwicklungsprozess mit ein. Sicherheitskritischen Bauteilen kommt bei diesen Analysen eine wesentliche Bedeutung zu, da deren Ausfall zu großen Schäden von Mensch und Maschine führen kann. Automobilhersteller und -zulieferer sind mit der Reduktion der Ausfallwahrscheinlichkeit elektrischer Bauteile im Antriebsstrang konfrontiert, um die Zuverlässigkeit so früh wie möglich im Entwicklungsprozess bewerten und dadurch die Anforderungen und Qualitäts-Standards wie z. B. ISO 26262 „Road vehicles – Functional safety“ [6], erfüllen zu können. Die Richtlinie für die Zuverlässigkeit sicherheitsrelevanter Systeme von in Serie produzierten Personenkraftwagen wird durch die ISO 26262 deklariert. Ihr Hauptaugenmerk gilt der funktionalen Sicherheit, welche in allen Phasen der Entwicklungskette betrachtet wird. Dafür werden für die elektrifizierten Systeme Sicherheitsziele in der Form von automotiven Sicherheits-Integritätslevel abgeleitet. Die Bewertung der Risiken jeder Gefährdungssituation erfolgt mit der Angabe einer Funktion F , welche die Auftrittswahrscheinlichkeit bzw. -häufigkeit eines gefährlichen Ereignisses, die Fähigkeit der Abwehr eines spezifischen Schadens und den potentiellen Schweregrad des resultierenden Schadens oder der Gefahr beinhaltet. Diese Risikobewertung wird mit einer Einstufung in vier ASIL (Automotive Safety Integrity Level) Bereichen abgeschlossen und liefert dadurch Sicherheitsvorgaben, welche die Vermeidung von Risiken und Gefährdungen bewirken sollen, [5-6].

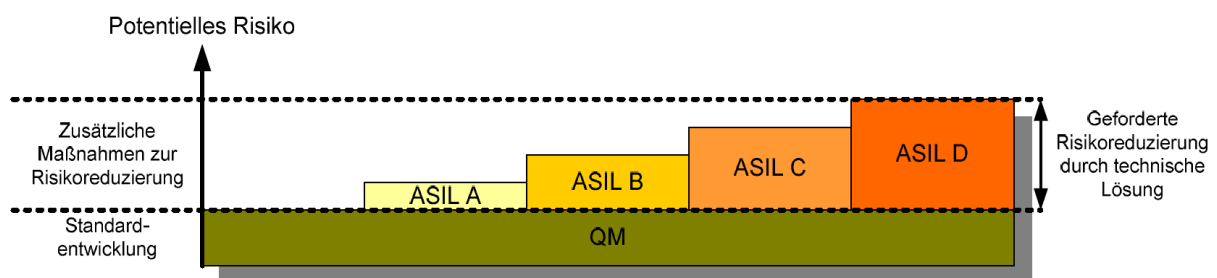


Abb. 4: Risikoreduzierung mittels ASIL Stufen, [8-9]

Zusätzlich zur Einstufung der elektrischen, sicherheitskritischen Komponenten, meistens bestehend aus Hardware und Software, nach der ISO 26262 kann als weiteres Analysewerkzeug die sogenannte Failure Mode and Effects Analysis (FMEA, dt. „Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse“) verwendet werden. Dieses Verfahren gilt als eine der meist eingesetzten und bekanntesten qualitativen Zuverlässigkeitsanalysen. Diese Methode dient vor bzw. während der Entwicklung von elektrifizierten Antriebssystemen zur Ermittlung möglicher Ausfallarten, Ausfallursachen und den Ausfallfolgen von diversen Systemen. Als Ergebnis liefert die FMEA eine Zuverlässigkeitsbewertung durch ein mögliches Ausfallrisiko über die so genannte Risikoprioritätszahl (RPZ). Diese wird durch die Bedeutung der Fehlerfolge (B), die Auftrittswahrscheinlichkeit des Fehlers (A) und dessen Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) bestimmt und dient als Entscheidungskriterium zur Einleitung von weiteren Optimierungsmaßnahmen oder detaillierteren Analysen der betrachteten Funktionen. Der Ablauf dieser Analyseverfahren gliedert sich in fünf Schritte, siehe Abb. 5, [5], [10].



Abb. 5: Fünf Schritte der FMEA-Analyse, gemäß [10]

Als weitere, alternative Analyseverfahren bietet sich als sogenannte Top-Down-Betrachtung die Fault Tree Analysis (FTA, dt. „Fehlerbaumanalyse“) an, welche ebenfalls oft in der Praxis zur Zuverlässigkeitsanalyse verwendet wird. Für mechatronische Komponenten stellt beispielsweise ein unerwünschten Ausfall bzw. Fehler das primäre Ausgangsereignis dar. Zu ermitteln sind die dazugehörigen Ursachen, welche den Ausfall zu verantworten haben. Als Grundlage für die Darstellung der Funktionen und Zusammenhänge werden boolesche Operatoren eingesetzt. Durch Einsatz der FTA-Methode können Fehlerpfade der elektrischen Komponenten durch Verknüpfung unterschiedlicher Operatoren der Verzweigungen ermittelt werden. Die FTA wird sowohl zur qualitativen als auch zur quantitativen Zuverlässigkeitsanalyse eingesetzt. Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode besteht in der Identifikation von kritischen Ausfallgefahren und der Möglichkeit, präventive Maßnahmen zu deklarieren, [5], [7].

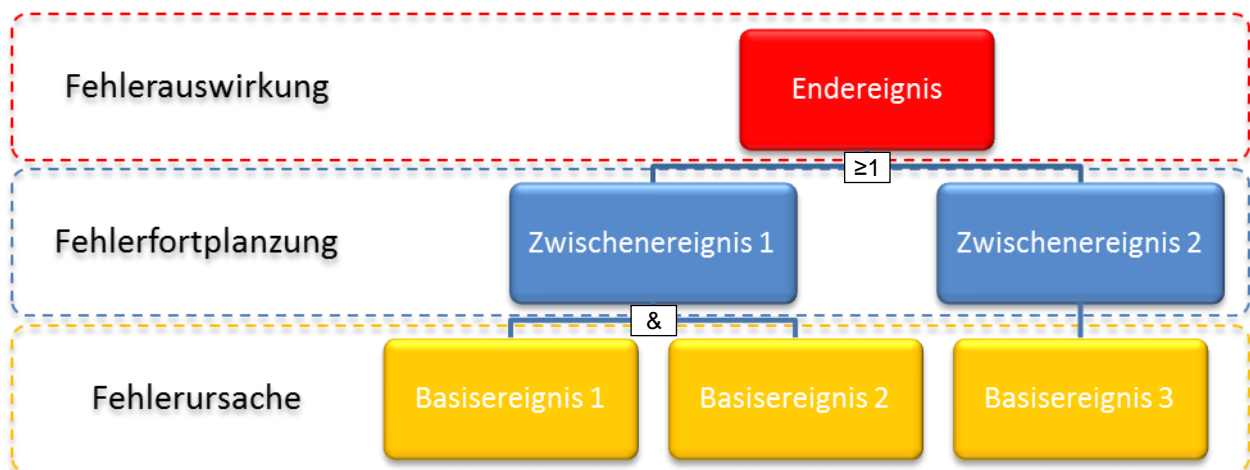


Abb. 6: Beispiel für die Verknüpfung einer FTA-Analyse, gemäß [7]

Nachteil bei den konventionellen Analyseverfahren ist der eingeschränkte Grad an zu erfassender Komplexität. Zwar können durchaus große Systeme mit vielen Subsystemen dargestellt werden, jedoch kann die Vernetzung bzw. die Funktionen der Komponenten untereinander oft nur unzureichend analysiert werden. Im Fall der elektrischen Antriebe herrscht eine Vielzahl von Daten- und Informationsflüssen zwischen den einzelnen Komponenten über diverse Bussysteme. Die Darstellung dieser Kommunikation und die Analyse des Zusammenwirkens der einzelnen Komponenten bzw. deren Abhängigkeit voneinander stellen die beschriebenen Analyseverfahren vor große Herausforderungen, was eine treibende Kraft zur Entwicklung von innovativen Analyseverfahren darstellt.

Eine alternative Möglichkeit, um den Komplexitätsgrad der Analyseverfahren zu erhöhen, liefert die Situationsbasierte qualitative Modellbildung und Analyse (SQMA), welche als quali-

tatives Bewertungsverfahren für die Automatisierungstechnik entwickelt wurde. Bei dieser Analyseform werden ausgehend von einem Gesamtsystem in mehreren Detaillierungsschritten die Komponenten modulartig dargestellt. Die Kommunikation der Komponenten untereinander und mit der Umgebung wird mittels Schnittstellen (Terminals) definiert. Des Weiteren können physikalische Größen mittels qualitativer Variablen (Quantities) und das Verhalten der Komponenten mittels Situationen (Situations) deklariert werden; deren Zusammenhang wird mit Situationsregeln (Situation Rules) beschrieben. Die Einzelkomponenten werden in einer sogenannten Netzliste mit Knoten und mehreren Schnittstellen zum Gesamtsystem verknüpft. Die Analyse und Auswertung erfolgt mittels Betrachtung der Transitionen zwischen den Systemsituationen und liefert Bedingungen, Abhängigkeiten und Zusammenhänge von Komponenten und Systemgrößen. Der Aufbau des Gesamtmodells erfolgt in mehreren Ebenen ersichtlich in Abb. 7, [5].

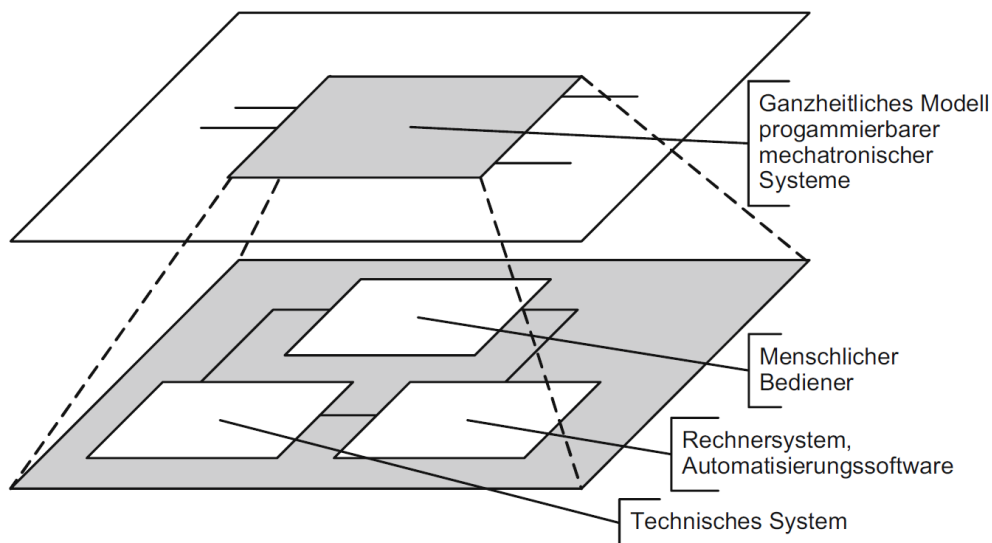


Abb. 7: Aufbau des Modells der SQMA, [5]

Durch das Beispiel in Abb. 7 kann gezeigt werden, dass noch weitere innovative Analysemethoden möglich und erforderlich sind. Der Komplexität der Systeme sind keine Grenzen gesetzt und die Erfüllung weiterer Normen bzw. Richtlinien zwingt die Industrie zur Suche nach neuen Analyse- und Bewertungsmöglichkeiten. Nicht nur die Darstellung der Vernetzung von Einzelkomponenten zu einem Gesamtsystem und deren Kommunikation, sondern die Implementierung von Übertragungsfunktionen zwischen den Subsystemen stellt ein großes Erweiterungspotential für innovative Analysemethoden dar. Je detaillierter die Darstellung der einzelnen Signalpfade ermöglicht wird, desto präziser können auch in weiterer Folge notwendige Sicherheitsmaßnahmen bei drohenden Systemausfällen, vor allem in Bezug auf sicherheitskritische Bauteile im Automobil, abgeleitet werden. Abb. 8 zeigt die Anwendung der modularen Analysemethodik beispielhaft anhand eines mechatronischen Systems. Der Aufbau des Systems ist in drei Ebenen gegliedert. Je tiefer die Ebene, desto höher ist der Detaillierungsgrad. In der obersten Ebene ist das Gesamtsystem mit den allgemeinen Einflussgrößen Input, Umgebung und Output zu sehen. Die darunterliegende Ebene gliedert das Gesamtsystem in die Grundmodule eines mechatronischen Systems und zeigt deren Informationsfluss. In der untersten Ebene erfolgt eine weitere Detaillierung des Grundsystems in

E/E- und Mechanik-Einheit. Erstere wird nochmals in Software und Hardware aufgeteilt. Neben den unterschiedlichen Informationsflüssen können mit dieser Analysemethodik auch sicherheitskritische Signalpfade gut dargestellt werden (rote Markierung), welche in weiterer Folge auch eine effiziente Einleitungen von Maßnahmen ermöglichen.

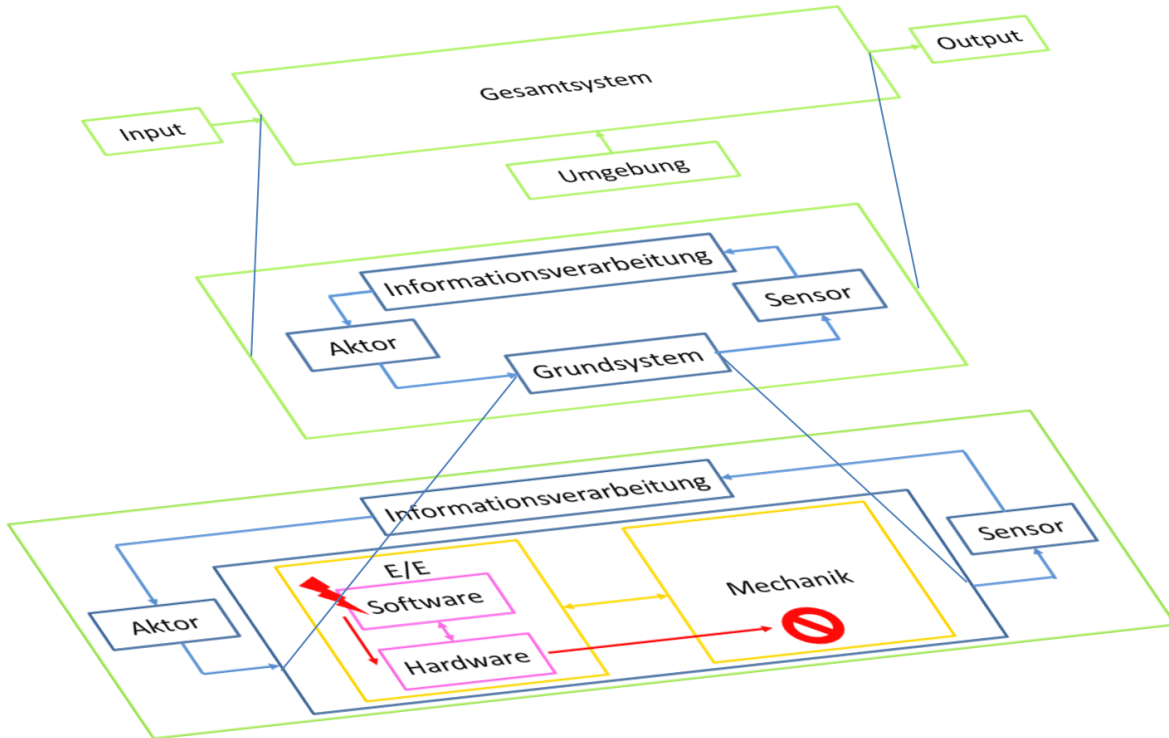


Abb. 8: Beispiel einer innovativen Analyse an einem mechatronischen System

4 Zusammenfassung

Die zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstranges und die daraus folgende erhöhte Komplexität, aufgrund des Zusammenspiels mehrerer Komponenten, verlangt nach innovativen Lösungen für eine bestmögliche Analyse in der Entwicklung mechatronischer Module.

Konventionelle Analysemethoden haben eine weite Verbreitung und große Akzeptanz in der Industrie, jedoch reichen die Darstellungsmöglichkeiten, vor allem im Bereich der diversen Kommunikationspfade einzelner Komponenten nicht aus, um eine vollständige Analyse des Gesamtsystems zu realisieren. Die zunehmenden Qualitätsansprüche und die wachsende Anzahl an elektronischen Bauteilen im Fahrzeug steigern zusätzlich die Anforderungen an die bestehenden Analysemethoden. Des Weiteren stellen der Einsatz sicherheitskritischer Bauteile und die Einhaltung von diversen Sicherheitsstandards zusätzliche Herausforderungen in der Entwicklung und Analyse von Fahrzeugen dar. Der Wunsch nach innovativen Lösungen und Darstellungsmöglichkeiten in der Entwicklung komplexer Systeme ist somit allgegenwärtig. Je komplexer bzw. vernetzter die Funktionen neuer Fahrzeugtechnologien werden, desto exakter, umfangreicher und innovativer müssen die Analysemethoden werden, um die steigenden Qualitäts- und Sicherheitsstandards erfüllen zu können.

5 Literaturverzeichnis

- [1] A. Böge et al: „Vieweg Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik“, Vieweg Verlag, 18. Auflage, 2007, ISBN 978-3-8348-0110-4
- [2] W. Geiger, W. Kotte: „Handbuch Qualität – Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme – Perspektiven“, Vieweg Verlag, 4. Auflage, 2005, ISBN 978-3-5283-3357-7
- [3] A. Kampker, D. Vallée, A. Schnettler: „Elektromobilität – Grundlagen einer Zukunftstechnologie“, Springer Verlag, 2013, ISBN 978-3-642-31985-3
- [4] Verein Deutscher Ingenieure: „VDI 2206 – Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“, 2004
- [5] B. Bertsche et al: „Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme – Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen“, Springer Verlag, 2009, ISBN 978-3540850892
- [6] International Standard Organization: „ISO 26262: Road vehicles – Functional safety“, 2011
- [7] M. Junglas: „Methodische Entwicklung hochintegrierter mechatronischer Systeme unter funktionalen, zuverlässigkeits- und sicherheitstechnischen Aspekten – Analyse und Quantifizierung“, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2012
- [8] M. H. Schlummer: „Beitrag zur Entwicklung einer alternativen Vorgehensweise für eine Proven-in-Use-Argumentation in der Automobilindustrie“, Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 2012
- [9] A. Dold: „Implementation of Requirements From ISO 26262 in the Development of E/E Components and Systems – Challenges & Approach“, Stuttgart, Automotive Electronics and Electrical Systems Forum, 2008
- [10] M. Werdich: „FMEA – Einführung und Moderation“, Springer Verlag, 2. Auflage, 2012, ISBN 978-3-8348-1787-7