UNI STUTTGART

Berichte aus dem
Institut für Maschinenelemente
Antriebstechnik • CAD • Dichtungen • Zuverlässigkeit

Patrick Jäger

# Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen

Bericht Nr. 121

**D 93**
**ISBN 3-936100-22-5**

**Institut für Maschinenelemente**
Antriebstechnik • CAD • Dichtungen • Zuverlässigkeit

Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
Tel. (0711) 685 – 66170

Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche, Ordinarius und Direktor

# Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen

Von der Fakultät

Maschinenbau

der Universität Stuttgart

zur Erlangung der Würde eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Patrick Jäger**

geboren in Tuttlingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. P. Göhner

Tag der Einreichung: **28.06.2006**

Tag der mündlichen Prüfung: **05.03.2007**

Institut für Maschinenelemente

2007

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche, Leiter des Instituts für Maschinenelemente, für die Ermöglichung und die ständige Förderung der Arbeit sowie für das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. P. Göhner, Leiter des Instituts für Automatisierungs- und Softwaretechnik, möchte ich für die Übernahme des Mitberichts und die kritische Durchsicht der Arbeit danken.

Ich möchte mich an dieser Stelle auch bei allen Mitarbeitern des IMA für die schöne Zeit bedanken, die ich am Institut verbringen konnte. Insbesondere danke ich den Mitgliedern des „Zuv-Teams“ für die ständige kollegiale Unterstützung während meiner IMA-Zeit und die vielen gemeinsamen Aktivitäten, die meine Erinnerungen an die Institutszeit prägen werden.

Nicht zuletzt möchte ich mich hiermit auch bei den Mitgliedern der DFG Forschergruppe 460 für die sehr angenehme, fachbereichsübergreifende Projektarbeit bedanken, die mit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

**Stuttgart, im März 2007**

# Inhaltsverzeichnis

# Abstract


## Reliability Assessment of Mechatronic Systems in Early Stages of Development

Due to the current economic conditions it is necessary to keep short times of development and to exactly meet customers' expectations. Nowadays a special part of these expectations are those concerning quality and reliability of the system purchased. One reason for the grown importance of these features are negative experiences collected by the customers. Regarding the development process itself, reliability engineering is not assigned the importance that would reflect its marketing relevance. Typically reliability assessments are conducted in late phases of development and thus are only able to "recognize" product reliability but not to influence it. If the relevance of reliability engineering shall really increase it is necessary to perform reliability assessments already in early stages of development and also to apply it to nowadays existing complex systems. This work presents a methodology that takes these two points into account.

The methodology is characterized by according features. Especially the consideration of mechatronic systems in early phases is possible. Therefore the methodology uses appropriate procedures to anticipate the final system setup based on expert knowledge. This step is typically accompanied by uncertainties. Using the anticipated system setup it is possible to model and calculate reliability metrics. This step is also subject to data imprecision. All appearing data uncertainties are handled by using the Monte Carlo Method.

A feature of the methodology is that especially software-intensive mechatronic systems can be analyzed. At this the methodology shows the ability to be practically used, as it only requires information that can be given by development experts in early stages of development.

Thus the methodology allows to compare different concepts in early phases of development with regard to system reliability. The concept which offers the highest reliability potential can be identified. Expensive and time-intensive development loops can be avoided.

# Kurzfassung


## Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen

Das aktuelle wirtschaftliche Umfeld macht es notwendig, neue Produkte nach sehr kurzen Entwicklungszeiten an den Markt zu bringen und dort die Kundenerwartungen zu treffen. Ein Teil der Kundenerwartungen sind heutzutage – u. a. aufgrund schlechter Erfahrungen seitens der Kunden – Zuverlässigkeits- und Qualitätsansprüche. Trotzdem wird der Zuverlässigkeitsarbeit im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses aktuell nicht der Platz eingeräumt, der ihrer marketingstrategischen Bedeutung entspricht. Zuverlässigkeitsanalysen werden typischerweise erst sehr spät im Entwicklungsprozess durchgeführt und können dann lediglich noch „feststellen“, welche Zuverlässigkeit entwickelt wurde. Eine echte Bedeutungszunahme der Zuverlässigkeitsarbeit macht es erforderlich, diese früher im Entwicklungsprozess und auch bei der Entwicklung komplexer Systeme ansetzen zu können. Diese Arbeit stellt eine Methodik vor, die hierzu geeignet ist.

Die entwickelte Methodik zeichnet sich durch entsprechende Eigenschaften aus. So ist sie insbesondere darauf abgestellt, mechatronische Systeme in frühen Entwicklungsphasen zu bewerten. Hierbei wird durch geeignete Vorgehensweisen im Rahmen der Gesamtmethodik schon sehr früh eine expertengestützte Antizipation der Systemendgestalt erreicht. Dieser Schritt ist mit entsprechenden Aussageunsicherheiten verbunden. Auf Basis der antizipierten Systemgestalt kann die Zuverlässigkeit dann modelliert und berechnet werden. An dieser Stelle können Datenungenauigkeiten auftreten. Zur Handhabung sämtlicher Ungenauigkeiten wird die sog. Monte Carlo Methode genutzt.

Von besonderer Bedeutung ist der Umstand, dass die Methode insbesondere die Betrachtung von softwareintensiven Systemen gestattet. Besonders an dieser Stelle zeichnet sich die Methode durch eine hohe praktische Anwendbarkeit aus, da sie lediglich Informationen benötigt, die von entsprechenden Entwicklungsexperten schon in frühen Phasen bereitgestellt werden können.

Auf diese Art und Weise ist die Methode fähig, verschiedene Konzepte, die in der Konzeptphase vorliegen, zuverlässigkeitstechnisch relativ zueinander zu bewerten. Hiermit können das zuverlässigkeitstechnisch beste Konzept frühzeitig identifiziert und somit teure und zeitintensive Entwicklungsschleifen vermieden werden.

# Abkürzungen und Formelzeichen

| | |
|---|---|
| BBN | Bayesian Belief Net |
| FTA | Fault Tree Analysis |
| OBC | On Board Computer |
| ÜK | Überbrückungskupplung |
| ZA | Zustandsautomat |
| ZABM | Zustandsautomaten-Beschreibungsmodell |

| | |
|---|---|
| $dd$ | Defektdichte einer Softwarekomponente |
| $b$ | Formparameter der Weibull Verteilung |
| $b_{Rad}$ | Breite eines Zahnrades |
| $f_{tb}$ | Verhältnisfaktor |
| $k$ | Wöhlerexponent |
| $m_n$ | Verzahnungsmodul |
| $n$ | Schwingspielanzahl |
| $\Delta n_{nominal}$ | Sollwert des Kupplungsschlupfes |
| $op$ | Nutzungsintensität einer Softwarekomponente |
| $p$ | Allgemeine Bezeichnung für einen Modellparameter |
| $t_0$ | Ausfallfreie Zeit, Parameter der Weibull Verteilung |
| $u$ | Übersetzungsverhältnis |
| $B_q$ | Lebensdauer(quantil) |
| $C$ | Bauraumbreite |
| $D$ | Bauraumtiefe |
| $F_t$ | Tangentialkraft |

| | |
|---|---|
| $H$ | Bauraumhöhe |
| $K_1$ | Faktor bei der Zahnradfestigkeitsberechnung |
| $K_{f\alpha}$ | Faktor bei der Zahnradfestigkeitsberechnung |
| $K_{h\alpha}$ | Faktor bei der Zahnradfestigkeitsberechnung |
| $K_v$ | Faktor bei der Zahnradfestigkeitsberechnung |
| $M$ | Drehmoment |
| $N$ | Ertragbare Schwingspielanzahl, Anzahl an Monte Carlo Replikationen |
| $S$ | Gesamtschädigung eines Bauteils |
| $S_{Kollektiv}$ | Schädigung eines Bauteils durch einen Kollektivdurchlauf |
| $T$ | Charakteristische Lebensdauer, Lageparameter der Weibull Verteilung |
| $\alpha$ | Parameter eines Softwarezuverlässigkeitsmodells |
| $\varepsilon$ | Zufallsvariable zur Beschreibung des Störterms einer Modellgleichung |
| $\lambda(t)$ | Ausfallrate |
| $\sigma_A$ | Ertragbare Spannungsamplitude |

# 1 Einleitung

Die heutige wirtschaftliche Umwelt ist geprägt von zunehmendem Wettbewerb, sich ständig schneller wandelnder Umfeldbedingungen und dem damit einhergehenden Zwang für die wirtschaftenden Unternehmen, sich diesem Umfeld anzupassen. Einen wesentlichen Aspekt für produktentwickelnde Firmen stellen in diesem Zusammenhang die immer kürzer gewordenen Lebenszyklen der Produkte dar [GER 1991], die sich bis heute, wie in **Bild 1-1** anhand steigender Serienanlaufzahlen dargestellt, weiter verkürzt haben.

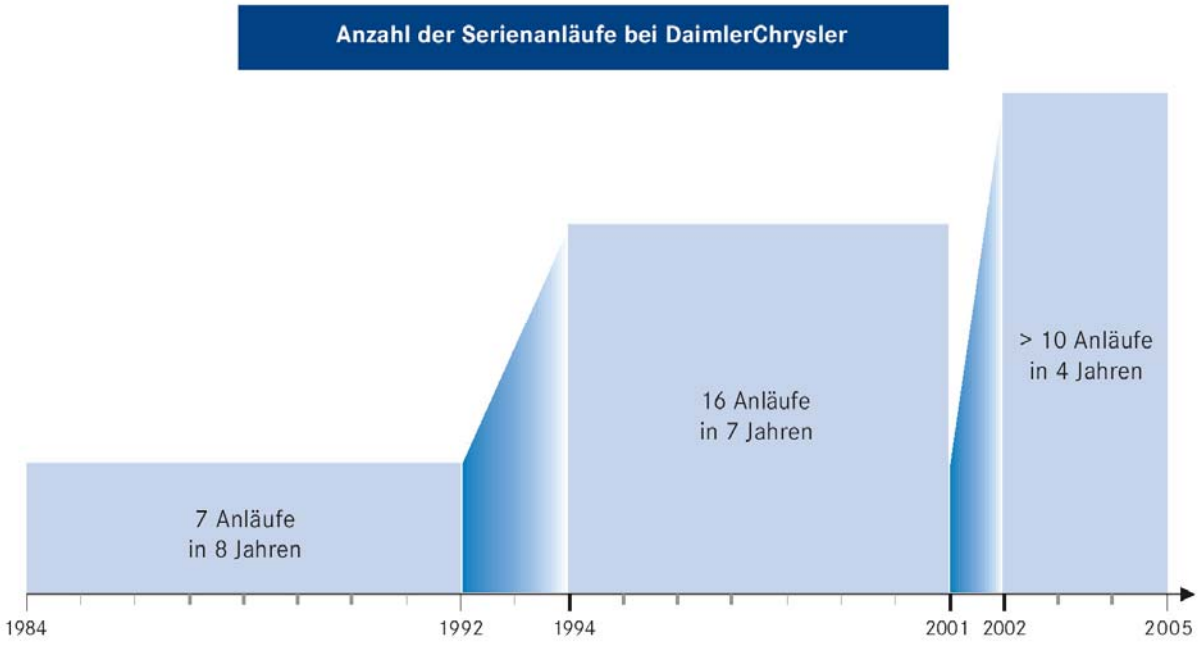


**Bild 1-1:** Die Produktlebenszyklen verkürzen sich [INT 2004]

Zusätzlich zur Verringerung der Entwicklungszeiten ist zu berücksichtigen, dass die Produkte an Komplexität zugenommen haben. Insbesondere durch die starke Nutzung informationsverarbeitender und mechatronischer Technologien konnte der Kundennutzen technischer Produkte, z. B. durch eine starke Funktionsanreicherung, gesteigert werden.

Innerhalb der letzten Jahre ist allerdings festzustellen, dass die starke Nutzung neuer Technologien gekoppelt mit niedrigen Entwicklungszeiten zu Qualitätseinbußen bei vielen technischen Produkten geführt hat. Hierfür stellvertretend kann die seit mehreren Jahren steigende Anzahl an jährlichen Rückrufaktionen in der Automobilindustrie angesehen werden [KBA 2005].

Da die Wettbewerbssituation steigende Entwicklungszeiten und höhere Produktpreise, die eine Verbesserung der Qualität ermöglichen könnten, nicht zulässt, müssen andere Lösungswege gefunden werden.

Eine Option hierbei ist, die Produktqualität durch frühzeitige Maßnahmen zu kontrollieren. Dies gilt insbesondere für die hauptsächlich in der Entwicklungsphase angesiedelte Zuverlässigkeitsarbeit [BER 2004].

Bislang werden insbesondere quantitative Zuverlässigkeitsanalysen meist erst in späten Entwicklungsphasen, hauptsächlich zu Beginn der Ausarbeitungsphase, durchgeführt, wie **Bild 1-2** zeigt.

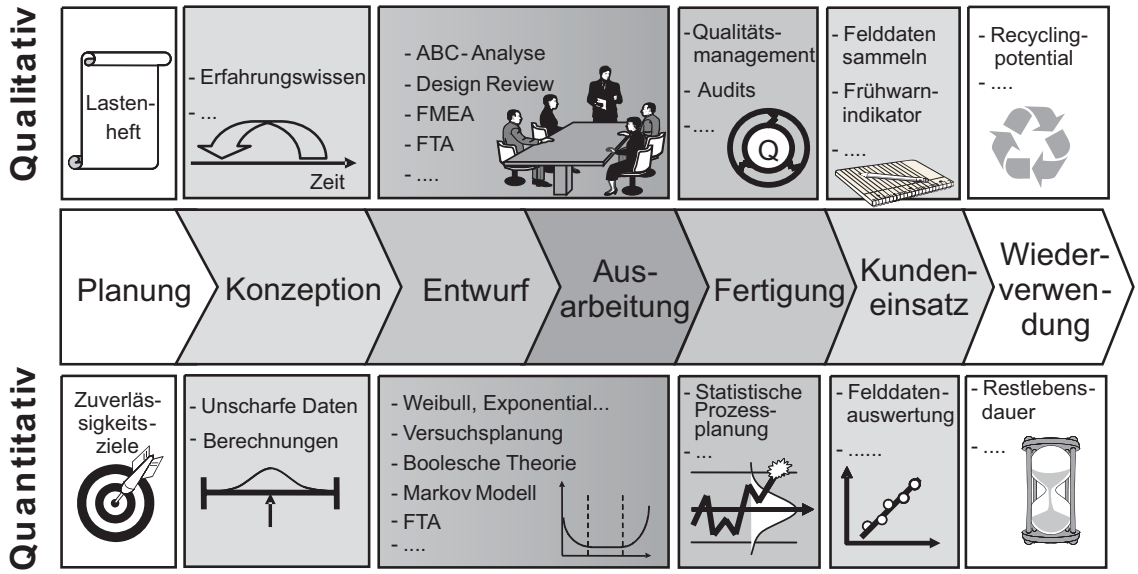


**Bild 1-2:** Aktivitäten zur Zuverlässigkeitssicherung während des Entwicklungs- und Nutzungsprozesses [BER 2004]

Das Resultat einer solchen Vorgehensweise kann u. a. ein erneutes Durchlaufen der vorigen Entwicklungsphasen bedeuten, wenn sich z. B. in der Ausarbeitungsphase zeigen sollte, dass die geforderte Zuverlässigkeit nicht gewährleistet werden kann.

## 1.1 Problemstellung

Der Hauptgrund für das späte Einsetzen der quantitativen Zuverlässigkeitsarbeit im Rahmen der Produktentwicklung ist die vergleichsweise schlechte quantitative Datenlage in frühen Entwicklungsphasen, wie aus **Bild 1-2** zu entnehmen ist. Es liegen Informationen in Form von Erfahrungswissen und unscharfen Daten vor. Diese Situation ist hauptsächlich auf den geringen Detaillierungsgrad von Entwicklungsdokumenten in frühen Entwicklungsphasen zurückzuführen, wie **Bild 1-3** verdeutlicht. Auch der Umstand, dass quantitative Daten, z. B. in Form von Testergebnissen, erst in spä-

ten Phasen vorliegen und Vorgängerinformationen meist nur teilweise auf Neuentwicklungen übertragen werden können, trägt zu einer ungenauen Datenlage bei. Da die gebräuchlichen quantitativen Zuverlässigkeitswerkzeuge von einer guten Datenbasis ausgehen, sind entsprechende Methoden nicht oder nur bedingt frühzeitig einsetzbar.

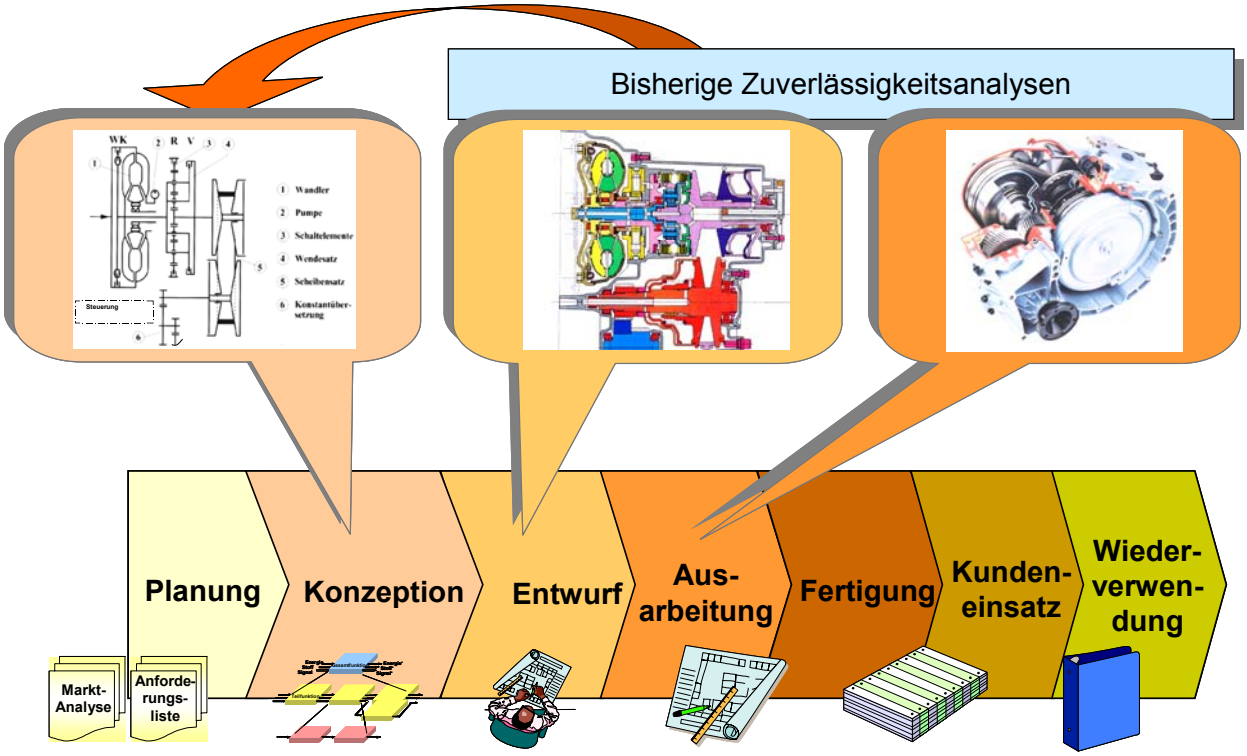


**Bild 1-3:** Steigender Detaillierungsgrad im Entwicklungsprozess

Werden – entsprechend des Themas dieser Arbeit – mechatronische Produkte betrachtet, so verstärkt sich im Vergleich zu rein mechanischen Produkten das Problem einer schlechten Informationslage in frühen Entwicklungsphasen nochmals. So existieren im Entwicklungsprozess mechatronischer Produkte bestimmte Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Fachbereichen, die es zu beachten gilt. Eine solche Abhängigkeit besteht u. a. darin, dass die Systemsoftware in ihrer Ausprägung genau auf das zu steuernde und zu regelnde technische System (z. B. ein Fahrzeuggetriebe) abgestellt sein muss. Eine Änderung des technischen Systems zieht sehr wahrscheinlich auch eine Änderung der Software nach sich, was auch eine Auswirkung auf die Gesamtsystemzuverlässigkeit hat.

Zusätzlich zu den rein systematischen Abhängigkeiten ist aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht eine starke Unterschiedlichkeit der Fachbereiche festzustellen. So handelt es sich z. B. bei Software um einen Systembestandteil, der über kein verschleißdominiertes Ausfallverhalten verfügt. Es existieren auch keine einheitlichen Zuverlässigkeitsmodelle für Softwarebestandteile.

Um bereits in frühen Entwicklungsphasen quantitative Zuverlässigkeitsinformationen über das entstehende mechatronische Produkt ableiten zu können, bedarf es einer Methode, die auf den beschriebenen Randbedingungen aufbaut. Dies sind zusammenfassend aufgelistet

- eine von Ungenauigkeiten geprägte quantitative Datenlage,
- die Notwendigkeit, das mechatronische Gesamtsystem in seiner endgültigen Struktur frühzeitig eingrenzen zu können und
- die Berücksichtigung fachbereichsspezifischer Unterschiede im Hinblick auf die Zuverlässigkeitsbeschreibung und -bestimmung.

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik für die quantitative Zuverlässigkeitsbeurteilung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen. Von zentraler Bedeutung hierfür sind die genannten Randbedingungen. Der Aufbau der Arbeit passt sich an die Berücksichtigung der einzelnen Randbedingungen an.

Nach einer Betrachtung des Standes der Technik wird in Kapitel 3 die Mechatronik aus Sicht der Zuverlässigkeitsarbeit betrachtet. Ziel ist die Festlegung einer definitorischen Basis und die Identifikation geeigneter Methoden zur Zuverlässigkeitsmodellierung mechatronischer Systeme.

Ausgehend von rein mechanischen Strukturen werden in Kapitel 4 die Implikationen früher Entwicklungsphasen auf die Zuverlässigkeitsarbeit analysiert. Die Kernaufgabe liegt hierbei auf der Handhabung unscharfer, quantitativer Zuverlässigkeitsdaten. Die hier abzuleitende Vorgehensweise ist nicht fachbereichsspezifisch, sondern allgemein anwendbar.

Das Kapitel 5 bildet den Übergang zu mechatronischen Systemen. Es wird gezeigt, wie die Systemanalyse und -beschreibung mechatronischer Produkte in frühen Phasen durchgeführt werden kann, um eine Bewertungsbasis für quantitative Zuverlässigkeitsanalysen aufzubauen. Hierbei werden für alle Fachbereiche entsprechend geeignete Darstellungsformen genutzt bzw. entwickelt.

In Kapitel 6 wird untersucht, wie sich die zuverlässigkeitstechnischen Unterschiede der beteiligten Fachbereiche auf die Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme auswirken. Hierbei werden insbesondere die Eigenheiten von Softwarebestandteilen berücksichtigt, da dieser Fachbereich zuverlässigkeitstechnisch durch etliche Besonderheiten gekennzeichnet ist.

Mit dem Abschluss von Kapitel 6 sind sämtliche, oben aufgeführten Randbedingungen berücksichtigt.

Die dann – unter Verwendung der Ergebnisse der Kapitel 3 bis 6 – zur Verfügung stehende Gesamtmethodik wird in Kapitel 7 auf zwei künstliche Beispiele angewandt.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung. Das **Bild 1-4** strukturiert die Arbeit.

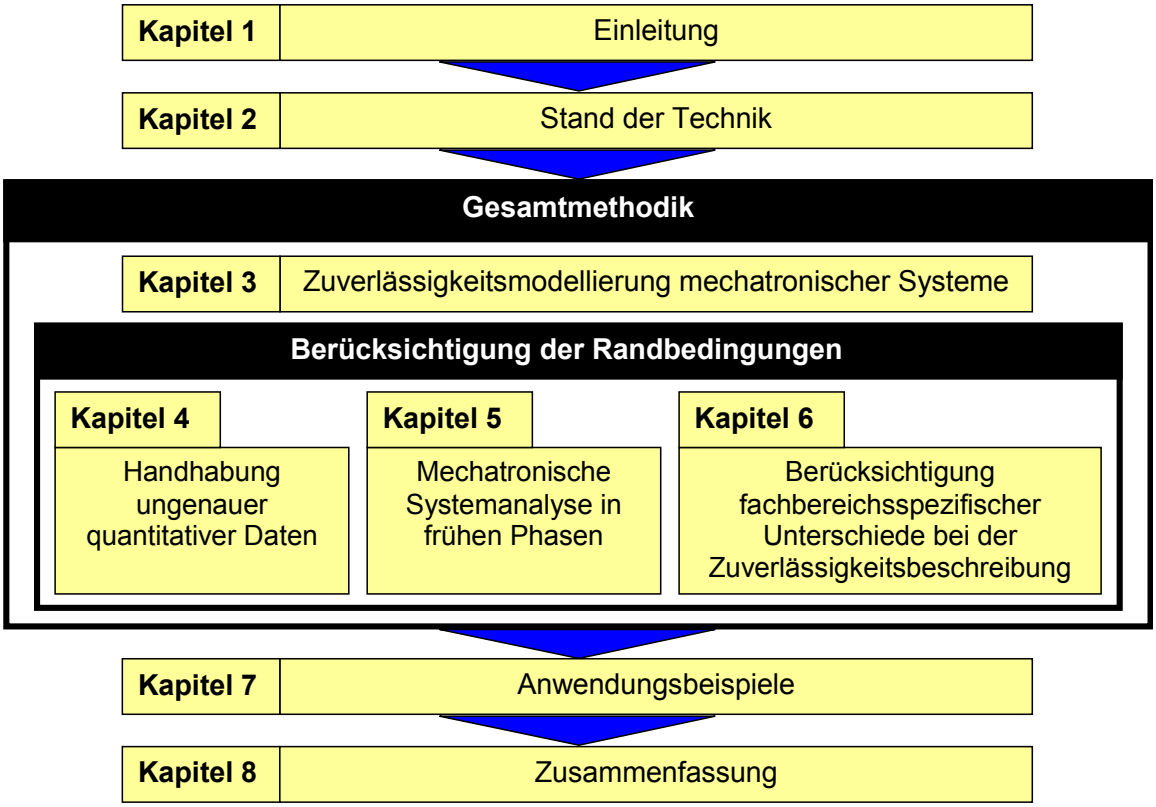


**Bild 1-4:** Gliederung der Arbeit

# 2 Stand der Technik

In diesem Kapitel sollen zuverlässigkeitstechnische Grundlagen mechatronischer Systeme erläutert werden. Hierzu wird gezeigt, welche Randbedingungen bei der Zuverlässigkeitsarbeit in den einzelnen Domänen vorliegen und welche Begrifflichkeiten sich jeweils etabliert haben.

## 2.1 Grundlagen mechatronischer Systeme

Mechatronische Systeme sind heutzutage allgegenwärtig. Durch die Kombination aus Mechanik und moderner Informationsverarbeitung (Elektronik und Software) kann die Leistungsfähigkeit und Funktionalität von Produkten deutlich gesteigert werden. Ein Beispiel hierfür sind CVT-Getriebe. Die ersten Getriebe dieser Bauart besaßen, wie z. B. das Ford CTX Getriebe [SIM 1990], weitgehend mechanisch/hydraulische Strukturen. Modernere CVT-Getriebe, wie das ZF Ecotronic [BOO 1994] oder das Front-CVT der Mercedes-Benz A-Klasse [GRE 2004] verfügen über eine elektronische Steuerung, die die Leistungsfähigkeit des Getriebes steigert, aber, u. a. aufgrund erhöhter Komplexität, auch zu Unzuverlässigkeiten führen kann.

Steigende Anzahlen von Rückrufaktionen kombiniert mit Berichten über kritische Funktionsstörungen [KÖS 2004], [NN 2003a], z. B. bei Automobilen, verdeutlichen, dass die Zuverlässigkeitsarbeit insbesondere bei mechatronischen Produkten verbessert werden muss.

Der Begriff „Mechatronik“ verfügt noch über keine allgemein akzeptierte und einheitliche Definition [GAU 2003]. Vielmehr ist eine ständige Weiterentwicklung und Ausdehnung des Begriffs über neue Technologieentwicklungen zu erwarten. So war der ursprüngliche Begriffsinhalt, der 1969 von Ko Kikuchi, dem Präsidenten der YASKAWA Electric Corporation, geprägt wurde, eine Kombination aus Mechanik und Elektronik. Später, als die elektronische Datenverarbeitung eine Technologierevolution einleitete, wurde der Ausdruck „Mechatronik“ um diesen Begriffsinhalt erweitert. Für die vorliegende Arbeit stellt die Mechatronik-Definition von Harashima, Tomizuka und Fukuda [HAR 1996]

*„Mechatronics is the synergetic integration of mechanical engineering with electronic and intelligent computer control in the design and manufacturing of industrial products and processes.”*

eine geeignete Version dar, weil sie die Integration der drei erwähnten Mechatronikdomänen beschreibt.

Analog zu dieser Definition werden in dieser Arbeit mechatronische Systeme als Kombination von Mechanik, Elektronik und Software betrachtet. Hierbei wird unter Elektronik die Gesamtheit aller Bauteile der Informationsverarbeitung verstanden, die eine physische Repräsentation haben. Oftmals wird unter Elektronik auch Software verstanden. Es ist hier allerdings aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht zu unterscheiden. Dieser Umstand wird besonders in den Kapiteln 5 und 6 herausgestellt.

Im Folgenden wird auf die jeweiligen zuverlässigkeitstechnischen Besonderheiten der drei Mechatronikdomänen Mechanik, Elektronik und Software eingegangen.

### 2.1.1 Mechanik

Eine wesentliche Eigenheit mechanischer Bauteile ist das Auftreten von Driftausfällen. Lager fallen meist nicht schlagartig aus, sondern verursachen zuvor z. B. ein stärker werdendes Geräusch. Viele Dichtungen werden langsam undicht, bevor ein kritischer Leckagewert überschritten wird. Viele Elektronikausfälle und alle Softwareausfälle hingegen treten aufgrund eines fehlenden Verschleißphänomens nicht zeitlich gehäuft und ohne vorherige Hinweise auf.

Aufgrund ihres meist dominierenden Gewichtsanteils sind mechanische Strukturen fast nie redundant angeordnet und bei einer ständigen Funktionsanforderung (z. B.: Automobilgetriebe) manifestiert sich ein Ausfall sofort. Dementsprechend ist auch die für mechanische Systemumfänge gebräuchliche Zuverlässigkeitsdefinition nach [TZU 1986]

*„Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Einheit während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt.“*

auf den Ausfall einer physikalischen Einheit bezogen.

Von großer Bedeutung für eine korrekte Zuverlässigkeitsbewertung mechanischer Systemumfänge ist die Unterscheidung verschiedener Ausfallarten eines Bauteils. Jede Ausfallart muss mathematisch beschrieben werden, um eine Bauteilzuverlässigkeit modellieren zu können.

Aufgrund der anwendungsspezifisch sehr unterschiedlichen Gestalt mechanischer Strukturen und der Abhängigkeit des Ausfallverhaltens von nicht bauteilinhärenten Faktoren ist eine zuverlässigkeitstechnische Standardisierung mechanischer Bauteile schwer möglich. Trotzdem existieren Katalogwerke, wie z. B. [DEN 1995], die für

mechanische Bauteile Zuverlässigkeitkennwerte bereitstellen. Im Fall von [DEN 1995] werden sogar Ausfallraten vorgegeben, die bekanntermaßen kein verschleißbehaftetes Verhalten beschreiben können. Entsprechende Katalogwerte sind somit sehr kritisch zu betrachten.

Die Mechanik ist stark von verschleißbedingtem Ausfallverhalten gekennzeichnet. Dieses ist u. a. auch für das Auftreten von Driftausfällen verantwortlich. Die Ermüdung mechanischer Bauteile rührt von schwingenden Belastungen her. Diese führen bei einem mechanischen Bauteil zu einer fortschreitenden Absenkung der ertragbaren Spannungsamplitude $\sigma_A$ mit steigenden Schwingspielzahlen $N$ [DIE 1992]. Die sog. Wöhlerkurve stellt den Zusammenhang $\sigma_A(N)$ dar. Hervorzuheben ist, dass die Wöhlerkurve insbesondere durch die Mittelspannung stark beeinflusst wird, was sich u. a. durch mittelspannungsabhängige Dauerschwingfestigkeiten, z. B. nach Haigh, zeigt.

Die Lebensdauer eines mechanischen Bauteils wird einerseits von der bauteilinhärenten Belastbarbeit, andererseits aber von der aufgeprägten Belastung bestimmt. Dieser Zusammenhang wird durch das Modell der Stress-Strength-Inference [OCO 2002] beschrieben. Hier ergibt sich die Lebensdauerverteilung eines mechanischen Bauteils aus einer Überlagerung stochastisch verteilter Belastungen und Belastbarkeiten. Dementsprechend ergeben sich stochastisch verteilte Lebensdauern (Schwingspielzahlen). Dieser Umstand verdeutlicht sich durch Wöhlerlinien, die, wie in **Bild 2-1** abgebildet, auf ein bestimmtes Lebensdauerquantil (z. B. 10 %) bezogen sind.

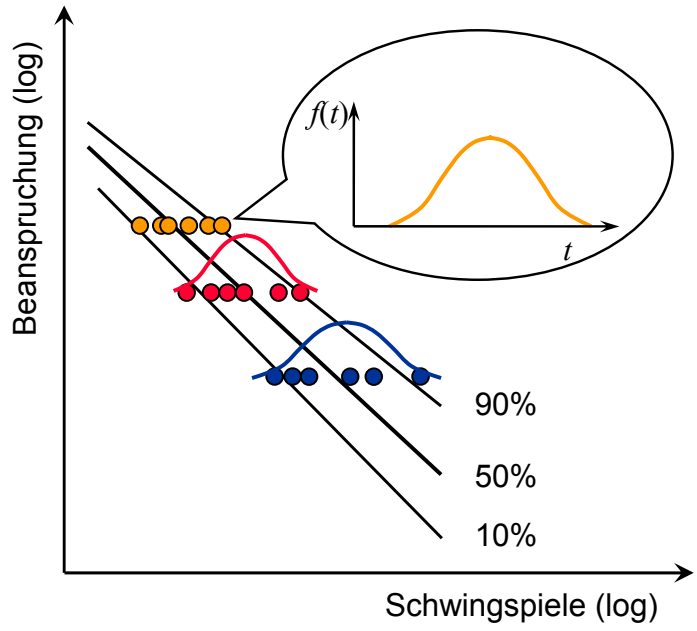


**Bild 2-1:** Auf Lebensdauerquantile bezogene Wöhlerlinien

Wöhlerlinienverläufe hängen neben der Mittelspannung u. a. von der Art des Bauteils, der Belastungsart, dem Werkstoff und dem Härteverfahren ab.

Die stochastisch verteilten Lebensdauern auf jedem Beanspruchungshorizont lassen sich bei mechanischen Bauteilen meist mittels einer Weibullverteilung beschreiben. Diese Verteilungsart erlaubt es, zeitabhängige Ausfallraten $\lambda(t)$ zu modellieren, was die Voraussetzung für die mathematische Beschreibung verschleißdominierten Ausfallverhaltens ist.

Oft treten bei mechanischen Bauteilen sich während der Betriebszeit ändernde Belastungshöhen, sog. Lastkollektive, auf. Dies ist am Beispiel eines Automobilgetriebes, das permanent unterschiedlichen Motormomenten ausgesetzt ist, einfach vorzustellen. Diesem Umstand widmet sich im Besonderen die Betriebsfestigkeitslehre, die somit einen integralen Bestandteil der Zuverlässigkeitsarbeit bei mechanischen Systemen darstellt. Ein wichtiger Teilbereich der Betriebsfestigkeitsrechnung für die Belange der Zuverlässigkeitstechnik ist die Bestimmung der Anzahl ertragbarer Lastkollektive. Diese Information wird im Rahmen der Zuverlässigkeitstechnik dann z. B. als Lageparameter einer entsprechenden Lebensdauerverteilung genutzt.

Für die Ermittlung der Lebensdauer durch Kollektive beanspruchter Bauteile werden

- Wöhlerlinien bezüglich der zu analysierenden Ausfallmechanismen,
- die auf das Bauteil wirkenden (den Ausfallmechanismus anregenden) Lastkollektive und
- eine Theorie zur Berücksichtigung verschieden hoher Belastungen bei der Lebensdauerberechnung

benötigt.

Kernelement der Lebensdauerberechnung stellt die Ermittlung der Wöhlerlinie im Einstufenversuch dar. Hierbei wird dasselbe Bauteil auf verschiedenen Lastniveaus bis zum Ausfall betrieben. Ergebnis sind auf jedem Lastniveau streuende Ausfallzeiten und daraus ermittelbare Ausfalldichten, die wiederum zu Wöhlerkurven für die jeweiligen Lebensdauerquantile führen, wie **Bild 2-1** darstellt.

Zur Ermittlung der auf ein Bauteil einwirkenden Lastkollektive gibt es verschiedene Methoden. Kernaufgabe dieser Methoden ist die Transformation eines Belastungs-Zeit-Verlaufs in ein Lastkollektiv. Hierzu werden sog. Klassierverfahren, wie z. B. Verweildauerverfahren, Klassengrenzenüberschreitungsverfahren oder auch das Rainflowzählverfahren angewendet. Diese Verfahren unterscheiden sich u. a. im Hinblick auf die Anzahl berücksichtigter Klassierungsparameter. Die bekannten Verfahren werden in [HAI 1989] und [BER 2004] thematisiert.

In der Betriebsfestigkeitslehre existieren drei verschiedene Konzepte zur Lebensdauerberechnung. Dies sind

- das Nennspannungskonzept,
- das örtliche Konzept (Kerbgrundkonzept) sowie
- die Bruchmechanik (Rissfortschrittskonzept).

Die Bruchmechanik wird im Maschinenbaubereich wenig verwendet, weil das Berechnungsziel derselben die Ermittlung einer Restlebensdauer nach einem Werkstoffanriss darstellt.

Das Nennspannungskonzept ist bauteilorientiert. So werden bauteilspezifische Einflüsse, wie z. B. Rauhigkeiten, direkt mit erfasst. Der Vorteil der Verwendung des örtlichen Konzeptes ist, dass nur eine einzige Werkstoffwöhlerlinie und keine speziellen Bauteilwöhlerlinien berücksichtigt werden müssen. Diesem Vorteil steht allerdings der Nachteil unberücksichtigter bauteilspezifischer Eigenheiten, die z. B. aus der Fertigung resultieren können, entgegen. In [BRO 1995] wird gezeigt, dass bei jeweiliger Verwendung des Nenn- bzw. Kerbgrundkonzeptes erhebliche Lebensdauerdifferenzen bei identischen Lastniveaus festzustellen sind. Dementsprechend wird in der Praxis oft eine Mischung aus örtlichem und Nennspannungskonzept genutzt [FOT 1995].

Liegen Wöhlerkurve und Lastkollektiv für eine bestimmte Schädigungsart vor, so wird ein Werkzeug benötigt, das es erlaubt, auf Basis dieser beiden Informationen eine Lebensdauerberechnung durchzuführen. Hierfür hat sich die Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren [PAL 1924] und Miner [MIN 1945] etabliert.

Die Schadensakkumulationshypothese gestattet es, basierend auf ermittelten Lastkollektiven und entsprechender Wöhlerlinien, eine zu erwartende Lebensdauer des Bauteils bezüglich des untersuchten Schadensbildes zu errechnen. Hierzu werden die in den einzelnen Laststufen des Kollektivs auftretenden Teilschädigungen zu einer Schädigung $S_{Kollektiv}$ kumuliert. Dabei wird die Schwingspielzahl jeder Belastungsstufe $n_i$ zu der der Wöhlerlinie entsprechenden maximal ertragbaren Schwingspielanzahl $N_i$ ins Verhältnis gesetzt.

$$S_{Kollektiv} = \sum_{i=1}^{m} \frac{n_i}{N_i} \tag{2.1}$$

$S_{Kollektiv}$ entspricht der Schädigung, die das Bauteil nach einmaligem Durchlaufen des Lastkollektivs aufweist. Entsprechend der Schadensakkumulationshypothese ist mit einem Ausfall des Bauteils – im Sinne des Auftretens des Schadensbildes – bei einer Gesamtschadenssumme von $S = 1$ zu rechnen.

Das **Bild 2-2** zeigt graphisch die drei bekannten Schadensakkumulationshypothesen

- Miner (original),

- Miner-Haibach und
- Corten-Dolan.

Diese unterscheiden sich maßgeblich in der Behandlung niedriger Beanspruchungen, die unterhalb der Dauerfestigkeitsgrenze nach Miner liegen. Nur die Schadensakkumulation entsprechend der Original-Form der Miner-Regel basiert auf der Annahme, dass Beanspruchungszyklen unterhalb der Dauerfestigkeitsbeanspruchung keine schädigende Wirkung haben.

Es gibt keine einheitliche Regelung, welche Hypothese für welche Bauteile angewendet werden soll. Nach [RAD 2003] ist zu bemerken, dass die durch die Miner-Regel vorhergesagte Lebensdauer das 0,2- bis 6-fache der tatsächlichen Lebensdauer betragen kann. Hierbei ist aber zu berücksichtigen, dass dazu auch ungenaue Eingangsdaten beitragen können.

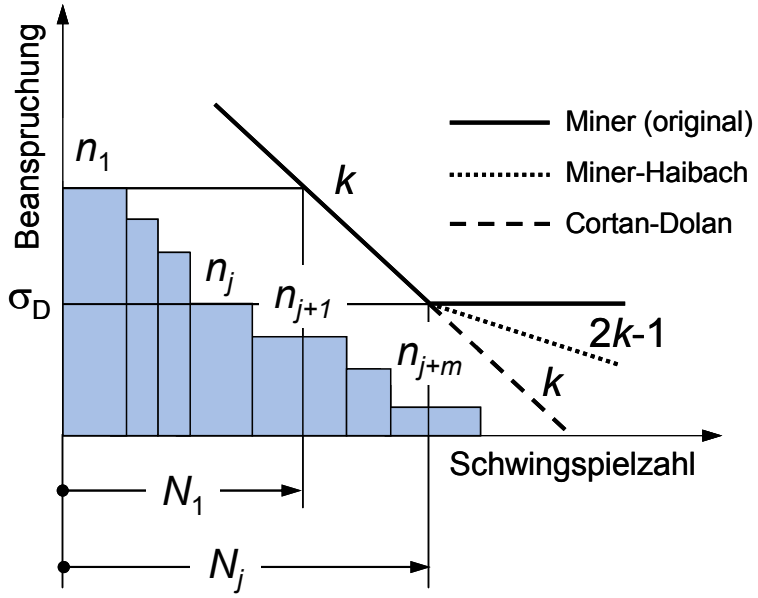


**Bild 2-2:** Schadensakkumulationshypothesen

Die vom Bauteil ertragbare Kollektivanzahl, die direkt mit einer Bezugsgröße, wie z. B. zurückgelegten Kilometern in einer bestimmten Gangstufe, korrespondiert, ergibt sich zu

$$Kollektivanzahl = \frac{1}{S_{Kollektiv}}. \tag{2.2}$$

Diese erwartbare Lebensdauer ist entsprechend dem genutzten Wöhlerlinienquantil mit einer bestimmten Ausfallwahrscheinlichkeit verbunden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Zuverlässigkeitsanalyse mechanischer Systeme auf

- dem Bekanntsein repräsentativer Lastkollektive und
- entsprechender Wöhlerlinien,
- der Verwendung einer entsprechenden Schadensakkumulationshypothese,
- dem Wissen über mögliche Ausfallursachen innerhalb des Systems verknüpft mit
- der mathematischen Beschreibung deren Ausfallverhaltens

basiert.

Zusätzlich zu berücksichtigen sind solche Elemente, die sich aktuell noch einer Berechnung entziehen aber trotzdem ein relevantes Ausfallverhalten aufweisen.

### 2.1.2 Elektronik

Der serienmäßige Einsatz elektronischer Komponenten im Kraftfahrzeug begann 1967 mit der elektrischen Benzineinspritzung. Bis heute wurde die Elektronik in immer neuen Bereichen rund um das Automobil eingesetzt und dieser Trend hält noch an. So wurde 1986 von Ehlers [EHL 1986] für die Automobilelektronik ein Grenzkostenanteil von 24 % prognostiziert. Neueren Ergebnissen nach liegt dieser bei 35%, da momentan schon ein Kostenanteil von ca. 20% erreicht ist [SCL 2004].

Elektronik und Software ergänzen sich in einem mechatronischen System zur Informationsverarbeitung. Zusammen steuern und regeln sie das Verhalten des technischen Systems. Im Rahmen der Produktentwicklung wird durch die sog. Software-Hardware-Partitionierung festgelegt, welche Steuerungsfunktionen durch Elektronik und welche durch Software übernommen werden.

Im Gegensatz zu mechanischen Systemumfängen fällt Elektronik während der Nutzungsdauer rein zufällig und ohne Vorwarnung aus [PAU 1997]. Vielfältige Literatur propagiert deshalb für die mathematische Beschreibung des Ausfallverhaltens elektronischer Komponenten die Exponentialverteilung, so auch das Military Handbook [MIL 1991]. Mit verschiedenen Berechnungsparametern, z. B. für Umgebungsbedingungen oder Spannungsbelastung, wird eine Berechnung der konstanten Ausfallrate der einzelnen katalogisierten Komponenten ermöglicht. Bei der Verwendung solcher Kataloge ist zu beachten, dass absolute Zuverlässigkeitsaussagen sehr kritisch hinterfragt werden müssen, dass aber auf einer Datensammlung und einem Modell basierende Vergleiche zwischen verschiedenen Steuergeräten sehr aussagekräftig sind und auch oft angewandt werden [PAU 1997]. Die Ausfallarten von elektronischen Komponenten lassen sich nach [BIR 1997] in die vier Kategorien Kurzschluss, Unterbrechung, Drift und Funktionsfehler unterteilen. Die Ausfallmechanismen, die zu den

Ausfallarten führen, sind oft physikalisch/chemischer Natur. So fallen integrierte Schaltkreise u. a. aufgrund von Korrosion oder der durch Temperaturzyklen bedingten mechanischen Ermüdung von Anschlussdrähten (Bonds) aus. Diese Ausfallmechanismen sind verschleißorientiert und treten vermehrt am Ende der Nutzungsphase auf, was dann zu steigenden Ausfallraten führt.

In [BAJ 1999] ist eine ausführliche Beschreibung von aktiven und passiven Elektronikbausteinen im Hinblick auf Ausfallmechanismen und Zuverlässigkeit gegeben. Zur mathematischen Beschreibung dienen verschiedene Modelle, wie z. B. das Arrhenius-Modell [OCO 2002], das den Temperatureinfluss auf die Zuverlässigkeit berücksichtigt. Zu berücksichtigen sind aber nicht nur Fehler, die durch physikalisch/chemische Einwirkung entstehen, sondern auch solche, die entwicklungs- und fertigungsbedingt auftreten. Speziell die entwicklungsbedingten Fehler gewinnen durch die immer komplexer werdenden Steuerungsaufgaben an Bedeutung.

An dieser Stelle ist eine Unterscheidung elektronischer Bauelemente zu vollziehen. Unter dem Überbegriff „Elektronik“ werden auch passive Bauelemente, wie z. B. Kondensatoren und Widerstände verstanden. Solche Bauelemente enthalten jedoch keine integrierte Logik, wie es bei integrierten Schaltkreisen der Fall ist. Diese Art von Bauteilen, wie z. B. ASICs (*engl.: Application Specific Integrated Circuits*), werden entworfen, um komplexe Regelungs- und Steuerungsaufgaben zu übernehmen. Der integrierte Schaltkreis repräsentiert genau wie ein entsprechender Softwarecode einen Algorithmus. Der einzige Unterschied ist die physische Gestalt eines integrierten Schaltkreises.

Beim Design der Schaltkreise können genau die gleichen Spezifikations- und Implementierungsfehler auftreten, wie bei der Entwicklung von Software. Dies wird besonders deutlich anhand der Tatsache, dass bei der Entwicklung integrierter Schaltkreise der auf einem Chip zu realisierende Algorithmus oftmals in Form von Hardwarebeschreibungssprachen, wie z. B. VHDL (*engl.: Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language*), entwickelt wird [LEH 1994]. Dementsprechend anfällig sind auch integrierte Schaltkreise für Entwicklungsfehler, die zu einem nicht spezifikationsgemäßen Verhalten der Elektronik führen können.

Eine weitere Art von Fehlern sind solche, die auf die Fertigung zurückzuführen sind. Fertigungsbedingte Fehler können vor der Auslieferung z. B. durch Burn-in-testing teilweise aufgedeckt werden [SCE 2001]. Ziel dieser Methode ist, dass Systeme mit Fertigungsfehlern, wie z. B. einer angebrochenen Lötstelle, nicht erst beim Kunden in Form von Frühausfällen, sondern schon beim Hersteller ausfallen.

Es gibt Fertigungsfehler, wie z. B. Kurzschlüsse, die den logischen Aufbau eines Schaltkreises und somit den integrierten Regelungsalgorithmus tangieren. Dies kann

zu nicht spezifikationsgemäßem Produktverhalten führen. Zur Auffindung solcher Fehler sind geeignete Testsequenzen notwendig, mit denen die Schaltkreise nach der Fertigung überprüft werden.

Über den Bereich der Fertigungs- und Entwicklungsfehler hinaus gibt es speziell bei der Elektronik noch sog. transiente Fehler, also solche, die im Verlauf der Zeit auftreten aber auch wieder verschwinden können. Ursachen für solche Fehler sind beispielsweise externe aber auch systeminterne elektromagnetische Felder. Das **Bild 2-3** zeigt die Fehlerquellen entlang des Lebenszyklus mikroelektronischer Systeme.

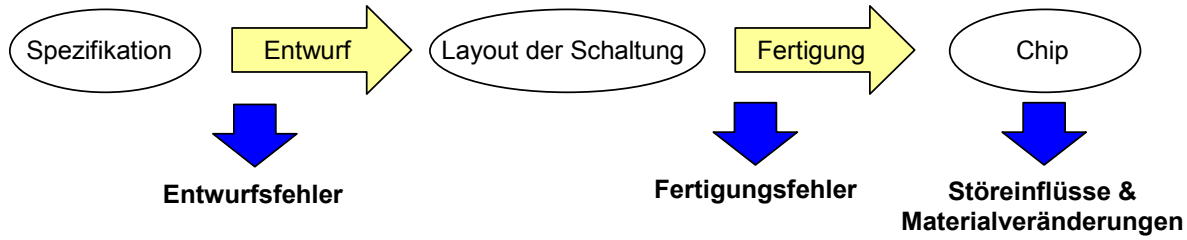


**Bild 2-3:** Fehlerquellen im Lebenszyklus eines mikroelektronischen Systems

### 2.1.3 Software

Musa, Iannino und Okumoto beschreiben in [MUS 1990], dass die Qualität, die Kosten und die Zeit auch für Software die drei maßgeblichen Entwicklungscharakteristika sind. Software-Zuverlässigkeit spiegelt eine benutzerorientierte Sicht der Software-Qualität wider. Aus diesem Blickwinkel sind die Zuverlässigkeitsinterpretationen für alle drei Mechatronik-Domänen identisch.

Shooman [SHO 1984] definiert Software-Zuverlässigkeit wie folgt.

*"Software reliability is the probability, that a given software system operates for some time period without software error, on the machine for which it was designed, given that it is used within the design limits."*

Anders als bei mechanischen Systemumfängen gibt es bei Software keinen Verschleiß. Die Funktionsfähigkeit der Software ist nach Beendigung der Programmier- und Debugging-Phase eine feste Größe. Softwareversagen tritt nur auf, wenn

- eine ungeprüfte Anwendungskonstellation existiert und
- ein Programmierfehler vorhanden ist, der bei dieser Anwendungskonstellation zu einem Softwareversagen führt [BEC 1989].

Somit ist das Auftreten von Softwareversagen an das Zustandekommen entsprechender Anwendungskonstellationen gebunden, in denen die Software ablaufen muss. Das

Auftreten von fehlerauslösenden Konstellationen ist zufälliger Natur [BEC 1989]. Dies ist der Grund für eine probabilistische Definition der Software-Zuverlässigkeit.

Für die Bewertung der Software-Zuverlässigkeit, was meist einer Aussage über die Softwareausfallrate entspricht, werden u. a. Zuverlässigkeitswachstumsmodelle eingesetzt. Hierzu gehören z. B. das Jelinski-Moranda- [CHO 1987], das Goel-Okumoto- oder das Musa-Okumoto-Modell [SIN 1995]. Diese Modelle erlauben entweder eine Aussage über die Anzahl noch enthaltener Fehler in einer Software auf Basis der während des Debugging-Prozesses gefundener Fehler oder sie prognostizieren Zeitdauern zwischen aufeinanderfolgenden Softwareversagensereignissen. Mit den genannten Modellen lassen sich sinkende Ausfallraten modellieren, weswegen sie in der Testphase von Software von Bedeutung sind. So nutzen Zuverlässigkeitsbewertungsprogramme solche Modelle, um die Einhaltung gesetzter Zuverlässigkeitsziele zu kontrollieren [MUS 1995].

Da es auch auf dem Gebiet der Softwareentwicklung eine Bestrebung gibt, die Zuverlässigkeit nicht erst in der Testphase festzustellen, sondern diese prognostizieren zu können, haben sich in diesem Fachbereich Ansätze zur Modellierung der Softwarezuverlässigkeit entwickelt. Es handelt sich hierbei nicht mehr um Verifikationsmodelle, die in der Testphase genutzt werden, sondern um solche, die auf Basis von verschiedenen Softwarebeschreibungsmaßen Aussagen über die in der Nutzungsphase zu erwartende Zuverlässigkeit machen.

Ein wesentlicher Ausgangspunkt hierbei ist die Berücksichtigung verschiedener Komplexitätsmaße, wie z. B. die sog. zyklomatische Zahl, bei der die Komplexität eines Programms anhand des entsprechenden Flussgraphen bewertet wird [NYS 1999]. Sowohl Komplexitäts- als auch andere Softwaremaße sind beschreibende Größen vieler in der Literatur dargestellter Modelle zur Prognose von Software-Maintainability [MUT 2000], [OMA 1994], Fehleranfälligkeit (*engl.: fault proneness*) [DEN 2002], [MEN 2003] oder Software-Zuverlässigkeit [NAG 2003], [ROM 1993]. Entsprechende Modelle werden meist anhand eines verfügbaren Datensatzes entwickelt, leiden aber dementsprechend an einer Generalisierbarkeit, was teilweise zu Widersprüchen unter den Modellen führt. Dieser Umstand wird in [FEN 1999] beschrieben.

Wichtig für die Betrachtung der Software-Zuverlässigkeit ist die Unterteilung der Ursachen von Softwarefehlern. Hier sind Spezifikationsfehler von Implementierungsfehlern zu unterscheiden. Spezifikationsfehler entstehen durch mangelhafte konzeptionelle Vorbereitung der Software und zeichnen sich dadurch aus, dass das spezifikationsgemäße Verhalten einer Software nicht der Anwendererwartung entspricht. Implementierungsfehler hingegen führen zu einem Softwareverhalten, das nicht der Spezifi-

kation entspricht. In diesem Zusammenhang sind auch die Validierung und Verifikation von Software zu nennen. Erstere prüft die Spezifikation auf Richtigkeit, letztere den Code. In einer Studie [HAS 1995] wurden 34 Vorfälle des Versagens von Steuerungssystemen untersucht. Hierbei erwiesen sich Spezifikationsfehler als der größte Verursacher.

### 2.1.4 Zusammenfassender Überblick

Um die Unterschiede der Mechatronikfachbereiche im Hinblick auf die Zuverlässigkeitsbetrachtung und -beschreibung zusammenfassend darzustellen dient **Bild 2-4** und folgende Ausführungen.

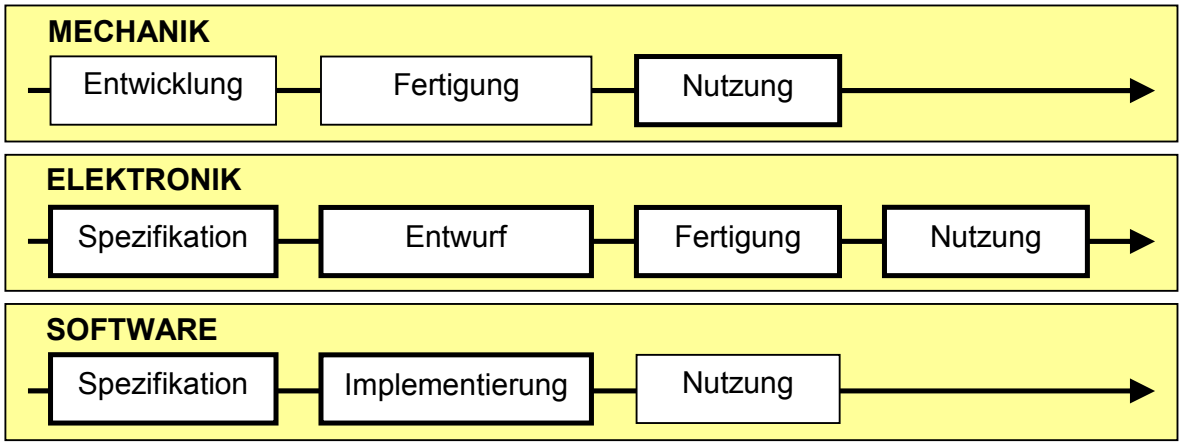


**Bild 2-4:** Übliche Schwerpunkte der Zuverlässigkeitsarbeit in den Fachbereichen

Werden die mechanischen Anteile eines mechatronischen Produktes betrachtet, so ist festzustellen, dass hauptsächlich die Nutzungsphase zuverlässigkeitstechnisch betrachtet wird. Die möglichst genaue Prognose des Ausfallverhaltens in der Nutzungsphase ist ein Ziel der Entwicklungsarbeit. Hierzu notwendig sind ein fehlerfreier Entwicklungs- und ein beherrschter und fähiger Fertigungsprozess. Sowohl die Reife des Entwicklungsprozesses als auch die Güte des Fertigungsprozesses wird bei der mechanischen Zuverlässigkeitsarbeit meist als gegeben vorausgesetzt.

In den Fachbereichen Elektronik und Software sind auch der Entwicklungs- und Fertigungsprozess zuverlässigkeitstechnisch von Bedeutung. Der Grund hierfür ist u. a. darin zu suchen, dass die Nutzungsphase bei Elektronik aber insbesondere bei Software nur teilweise das Ausfall- und Versagensverhalten beeinflusst. Vielmehr sind systematische und unsystematische Entwicklungsfehler der Hauptverursacher von Versagensereignissen. Im Falle von Software führen z. B. Implementierungsfehler zu möglichen Versagensereignissen in der Nutzungsphase. Die Zuverlässigkeitsarbeit im

Softwarebereich ist aufgrund der nahezu unmöglichen Prognose von Versagensereignissen in der Nutzungsphase hauptsächlich darauf abgestellt, Entwicklungsfehler durch geeignete Methoden zu vermeiden oder zu identifizieren und die Zuverlässigkeit durch konstruktive Maßnahmen, wie z. B. Plausibilitätstests, qualitativ zu erhöhen. Die quantitative Auswirkung dieser Maßnahmen ist allerdings nur ex post bestimmbar, da keine Regeln für den Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeitsmaßnahme und resultierender Wirkung existieren, wie sie z. B. aus der Mechanik bekannt sind.

Elektronik ist im Vergleich zu Software auch Verschleißverursachern, wie z. B. Vibrationen oder Feuchtigkeit ausgesetzt, was eine dementsprechende Auslegung erforderlich macht. Zugleich handelt es sich bei vielen Elektronikkomponenten um solche, die über eine integrierte Logik verfügen. Somit können dieselben Entwicklungsfehler auftreten wie bei Software.

## 2.2 Begriffe in den einzelnen Domänen

Für eine domänenübergreifende zuverlässigkeitstechnische Betrachtung mechatronischer Systeme muss zuerst die Begriffswelt der einzelnen Domänen betrachtet werden. Diese orientiert sich stark an den beschriebenen zuverlässigkeitstechnischen Eigenheiten der einzelnen Domänen.

Mechanik:

In der Mechanik wird aus Sicht der Zuverlässigkeitsarbeit meist von Systemen ausgegangen, die die Produktion fehlerlos – also ohne Montage-, Fertigungs-, oder andere Fehler – verlassen. Sollte dies nicht der Fall sein, so manifestiert sich dies in sog. Frühausfällen, gekennzeichnet durch eine sinkende Ausfallrate.

Wenn ein Teil korrekt hergestellt wurde, so kennt die Mechanik hauptsächlich zwei zuverlässigkeitstechnische Begriffe, nämlich den Ausfall und das Versagen. Der Unterschied der Begriffe liegt im eigentlichen Auftreten des Ausfalls und in seiner Auswirkung auf das Systemverhalten. Entsprechend [DIN 40041] beendet der Ausfall die Funktionsfähigkeit einer materiellen Einheit, während das Versagen den Zeitpunkt bezeichnet, bei dem sich die Nichtfunktionsfähigkeit offenbart. Der Begriff der Störung definiert die Zeit nach einem Versagen.

Elektronik:

In [AVI 2000] wird eine grundlegende Definitionsbasis der Zuverlässigkeitsbegriffe für elektronische Systeme vorgestellt. Es werden die Begriffe „fault“, „error“ und „failure“ definiert. Ein „failure“ tritt auf, wenn das System sich nicht korrekt verhält. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass ein „failure“ entweder dadurch zustande kommen

kann, dass die Spezifikation nicht erfüllt ist, oder dadurch, dass die Spezifikation die Anforderungen nicht richtig beschreibt. Die Ursache für einen „failure“ ist der „error“. Die Ursache für einen „error“ ist ein „fault“. Ein Beispiel soll die Begriffszusammenhänge verdeutlichen.

Beispiel:

*Ein Regelungssystem generiert eine starke Abweichung einer zu regelnden physikalischen Größe von einem erforderlichen Sollwert. Bei der Implementierung des nötigen Regelungsalgorithmus wurde anstatt des erforderlichen Sollwertes ein falscher Wert genutzt. Somit ist ein „fault“ vorhanden. Während des gesamten Betriebs des Regelungssystems wird ein falscher Wert eingeregelt. Dies entspricht einem „error“. Dieser „error“ wird allerdings nicht sofort offensichlich, da die einzuregelnde physikalische Größe nur zu wenigen Zeitpunkten während der Systembetriebszeit benötigt wird. Erst, wenn es ein bestimmter Betriebszustand notwendig macht, tritt die eingeregelte Größe in Erscheinung und führt dann zu einem nicht spezifikationsgemäßen Verhalten, also einem „failure“.*

Software:

Die Zuverlässigkeitsbegriffswelt der Software ist geprägt von den Spezifikations- und Programmierfehlern. Spezifikationsfehler sind Planungsfehler. Programmierfehler sind – vorausgesetzt, dass keine Spezifikationsfehler vorliegen – die Ursache für die Nichtfunktionsfähigkeit von Software. Musa, Iannino und Okumoto [MUS 1990] weisen dem Wort Programmierfehler den Begriff „fault“ oder „bug“ zu mit der Definition

*“A fault is the defect in the program that, when executed under particular conditions, causes a failure.”*

Ein „failure” wird definiert mit *“…is the departure of the external results of program operation from requirements…”*, also den Auswirkungen, die der Produktnutzer bemerkt.

In [ROD 2002] wird für Software eine dreistufige Definitionsreihe vorgeschlagen, wie in **Bild 2-5** gezeigt. Hierbei wird zusätzlich zu den Begriffen „fault“ und „failure“ der Begriff „error“ eingefügt, wobei dieser aufgrund eines faults auftritt, aber möglicherweise erst später oder gar nicht zu einem failure führt.

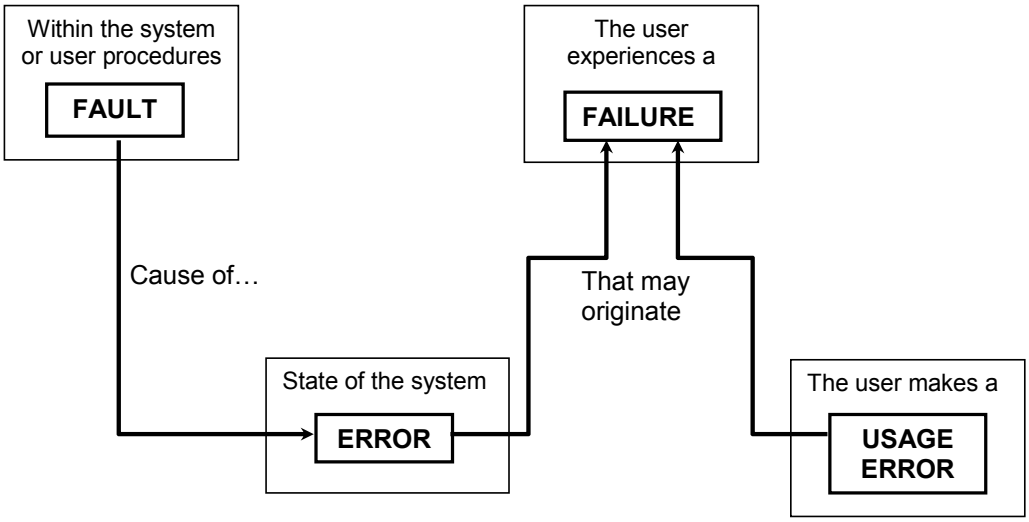


**Bild 2-5:** Definitionsgebäude von „fault“, „error“ und „failure“ nach [ROD 2002]

Dementsprechend deckt sich diese Definition mit den Zusammenhängen nach [AVI 2000].

Eine wesentliche Vorraussetzung für die Betrachtung der Zuverlässigkeit mechatronischer Systemumfänge ist die Nutzung einer einheitlichen und widerspruchsfreien Begriffswelt. Dies erscheint umso notwendiger, als es in den verschiedenen Domänen gleichnamige Begriffe gibt, die, verstärkt durch eine gewisse angelsächsisch-deutsche Begriffszweisprachigkeit, verschiedene Inhalte haben. Ein Beispiel hierfür ist der Begriff „failure“, der nach [DIN 40041] die Beendigung der Funktionsfähigkeit bezeichnet. Die Software-Zuverlässigkeitstechnik benutzt diesen Begriff, um die Auswirkungen einer Nichtfunktionsfähigkeit zu beschreiben.

# 3 Grundlagen einer zuverlässigkeitsorientierten Mechatronikentwicklung

Während im vorigen Kapitel die zuverlässigkeitstechnischen Eigenheiten der einzelnen Mechatronikfachbereiche thematisiert wurden, besteht das Ziel dieses Kapitels darin, fachbereichsübergreifende Grundlagen für die zuverlässigkeitstechnische Betrachtung mechatronischer Systeme zu legen. Hierbei wird zuerst eine geeignete Definition der Zuverlässigkeit für mechatronische Systeme identifiziert. Einen weiteren Schritt stellt ein fachbereichsübergreifendes Verständigungsinstrument dar, welches es den Vertretern der einzelnen Domänen erlaubt, die Eigenheiten der jeweils anderen Domänen mit Einfluss auf die Zuverlässigkeit nachzuvollziehen. Hiermit wird u. a. die Gefahr von Missverständnissen aufgrund gleich lautender aber inhaltlich verschieden belegter Begriffe gemindert. Zuletzt wird untersucht, wie sich die Charakteristika von mechatronischen Systemen auf die Zuverlässigkeitsmodellierung auswirken und welche Modellierungsweisen geeignet sind.

## 3.1 Zuverlässigkeitsdefinition für mechatronische Produkte

Auf Basis der herausgestellten Eigenheiten der einzelnen Domänen muss für die Zuverlässigkeitsanalyse solcher Systeme eine grundlegende Zuverlässigkeitsdefinition erfolgen. Jede der Domänen hat ihre eigene Sprache und Definitionen entwickelt. Hier gilt es, aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht eine gemeinsame Definitionsgrundlage zu schaffen. Nach [RAK 2002] gibt es viele Zuverlässigkeitsdefinitionen. Im Folgenden sind einige Vertreter aufgelistet, wobei es sich hierbei nur um einen kleinen Teil der bekannten Definitionen handelt. Diesbezüglich wird auf [KOC 2004] verwiesen, wo weitere Definitionsquellen verzeichnet sind.

### 3.1.1 Verschiedene Zuverlässigkeitsdefinitionen

Der derzeitige internationale Konsens [RAK 2002] bezüglich des Oberbegriffes „Zuverlässigkeit“ lautet [IEV 1995]:

*„Zuverlässigkeit (engl. dependability): Zusammenfassender Ausdruck zur Beschreibung der Verfügbarkeit und ihrer Einflussfaktoren Funktionsfähigkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft.“*

Der Zuverlässigkeitsbegriff dieser Definition ist ein Oberbegriff. Ihm zugeordnet wird die Eigenschaft der Funktionsfähigkeit (*engl.: reliability*). Im Deutschen wird auch der Begriff „reliability“ mit „Zuverlässigkeit“ übersetzt. Dies stellt aber kein Problem dar, da aus dem Kontext, in dem der Ausdruck „Zuverlässigkeit“ benutzt wird, ersichtlich ist, ob es sich um den allgemeinen Oberbegriff oder um die Fähigkeit einer Einheit handelt [RAK 2002].

In [KOC 2004] wird eine Definition für „Dependability of mechatronic units“ gegeben. Entsprechend dem großen Umfang des Begriffs „Dependability“– hier sind auch Verfügbarkeits- und Instandhaltungsaspekte betroffen – fällt diese sehr allgemein und umfassend aus.

*“Dependability of mechatronic units is defined as the qualitative and quantitative assessment of degree of performance of reliability and safety related predefinitions taking into consideration all relevant influencing factors (attributes).”*

Die Überlebenswahrscheinlichkeit ist die Maßgröße der Funktionsfähigkeit im Sinne von [IEV 1995]. Für die Beschreibung der Zuverlässigkeit im Sinne der Funktionsfähigkeit gibt es verschiedene Definitionen, von denen im Folgenden einige aufgezeigt werden.

In [VDA 2000] findet sich folgende Definition:

*„Zuverlässigkeit ist die Fähigkeit einer Ware, denjenigen durch den Verwendungszweck bedingten Anforderungen zu genügen, die an das Verhalten ihrer Eigenschaften während einer gegebenen Zeitdauer unter festgelegten Bedingungen gestellt werden.“*

Diese Definition ist qualitativer Art. Ein Produkt muss Anforderungen genügen, die unter bestimmten Bedingungen an das Produkt gestellt werden. Diese Anforderungen werden nur innerhalb eine bestimmten Zeit abverlangt.

In [DIN 55350] wird die Zuverlässigkeitsforderung als derjenige Teil einer Qualitätsforderung beschrieben, der das Verhalten der Einheit während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen betrifft.

Entsprechend dieser Definition ist die Zuverlässigkeit ein Teil der Produktqualität, der sich auf gewisse Zeiteinheiten bezieht.

Eine andere Definition aus [VDA 2000] lautet:

*„Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Erzeugnis unter gegebenen Betriebsbedingungen während einer bestimmten Zeit Mindestwerte nicht unterschreitet.“*

Der Hauptunterschied zu den bisher genannten Definitionen liegt in der Einführung des Wahrscheinlichkeitsbegriffes und im Bezug auf Mindestwerte.

Zuverlässigkeitsüberlegungen wurden zunächst hauptsächlich im amerikanischen Raum betrieben. Daher stammt die ursprüngliche in Deutschland übernommene Definition der Zuverlässigkeit [TZU 1986]:

*„Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Einheit während einer definierten Zeitdauer unter angegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt."*

In [VDI 4004] wird der Begriff „Funktionszuverlässigkeit" definiert.

*„Die Funktionszuverlässigkeit ist die Überlebenswahrscheinlichkeit gegenüber Ausfällen/Versagensereignissen, die eine/mehrere definierte (Nutz-/Schutz-) Leistungsfunktionen aufheben oder unzulässig beeinträchtigen. Ihr zugeordnet sind die Funktionsausfallrate und dementsprechend andere ausfall/versagensbezogene Kenngrößen."*

Diese Definition unterscheidet die Begriffe Ausfall und Versagen, die in [DIN 40041] differenziert werden. Der Ausfall einer Einheit beendet die Funktionsfähigkeit derselben. Das Versagen einer Einheit tritt erst auf, wenn die geforderte Funktion aufgrund eines Ausfalls bei Anforderung der entsprechenden Funktion durch das System oder den Nutzer nicht erbracht wird, wie **Bild 3-1** illustriert.

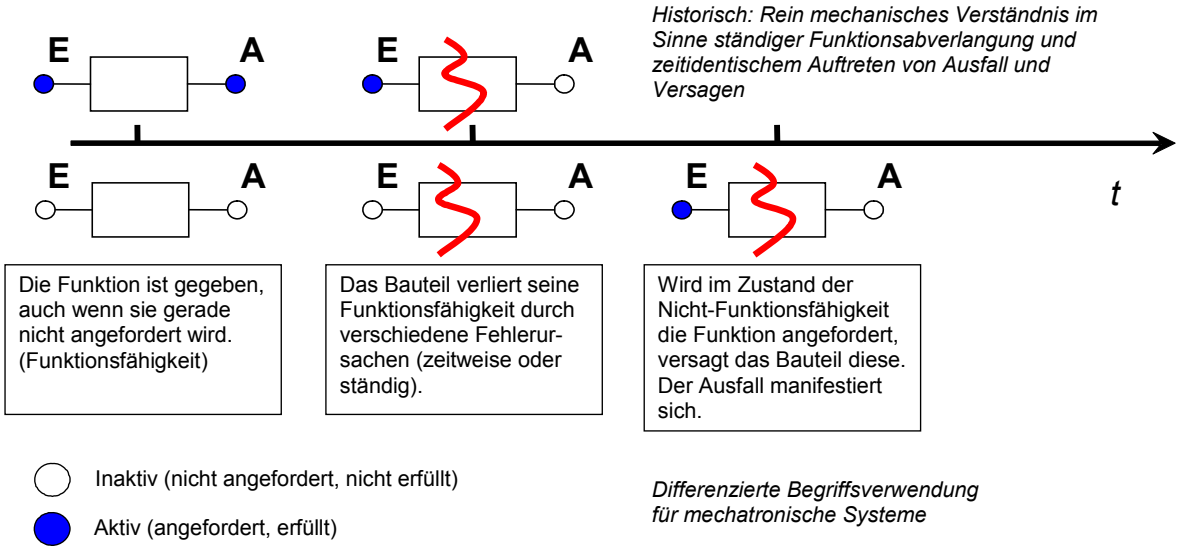


**Bild 3-1:** Ausfall und Versagen

Die fälschlicherweise oft angenommene Identität der Begriffe Ausfall und Versagen rührt aus der ursprünglich stark von der Mechanik geprägten Zuverlässigkeitsarbeit her, bei der sich der Ausfall einer Einheit aufgrund der eng abgesteckten Funktionalität meist direkt äußert und somit das Versagen zeitidentisch mit dem Ausfall auftritt.

### 3.1.2 Geeignete Zuverlässigkeitsdefinition für mechatronische Systeme

Die oben beschriebenen Zuverlässigkeitsdefinitionen sind in ihrem Aussagegehalt sehr ähnlich. So bezieht sich die Zuverlässigkeit auf die zeitabhängige Funktionsfähigkeit einer Betrachtungseinheit. Als Maßeinheit der Funktionsfähigkeit dient die Überlebenswahrscheinlichkeit gegenüber der Nicht-Funktionsfähigkeit.

Es stellt sich an dieser Stelle die Frage, ob die Zuverlässigkeitsdefinition für mechatronische Systeme dem Wesensgehalt der obigen Definitionen entspricht und ob es eine Spezialisierung gibt.

Der Vergleich der einzelnen Domänen im Bezug auf Zuverlässigkeitsbetrachtungen zeigt, dass die Bereiche Elektronik und Software in ihrer Methodik, ihrem Entwicklungsprozess und ihren Begrifflichkeiten große Schnittmengen aufweisen. Hiervon hebt sich die Mechanik stark ab. Dies ist hauptsächlich dadurch begründet, dass Fehlermechanismen und Fehlereinflussmöglichkeiten in den Domänen Software und Elektronik im Vergleich zur Mechanik vergleichsweise komplex oder zumindest weniger lang erforscht sind. In allen drei Bereichen gilt jedoch, dass die Zuverlässigkeit eine kundenorientierte Maßgröße für die Produktqualität ist. Diese Sichtweise eröffnet eine Möglichkeit der Zuverlässigkeitsbeschreibung, die für alle drei Bereiche zielführend ist.

Für den Kunden steht die Funktionsfähigkeit des Produktes im Fokus und er kann direkt auch nur sie beurteilen. Insbesondere bei mechatronischen Produkten spielt, wie bereits erwähnt, die Funktionsorientierung eine maßgebliche Rolle. Hierfür eignet sich die schon genannte Definition entsprechend [VDI 4004]:

*„Die Funktionszuverlässigkeit ist die Überlebenswahrscheinlichkeit gegenüber Ausfällen/Versagensereignissen, die eine/mehrere definierte (Nutz-/Schutz-) Leistungsfunktionen aufheben oder unzulässig beeinträchtigen. Ihr zugeordnet sind die Funktionsausfallrate und dementsprechend andere ausfall/versagensbezogene Kenngrößen.“*

Es werden von vornherein verschiedene Funktionsarten beschrieben. Ferner wird nicht direkt vom Ausfall eines Bauteils oder einer Einheit gesprochen, sondern es wird die Aufhebung oder die Beeinträchtigung einer Funktion berücksichtigt. Diese Betrachtungsweise ist speziell für die Integration von Software- und Elektronikumfängen sehr geeignet. Der Grund hierfür ist, dass elektroniklastige Funktionen nach dem Auftreten eines Versagensereignisses in einigen Fällen, z. B. nach einem Systemneustart oder nach dem Verschwinden eines transienten Fehlers, wieder problemlos reagieren. Aus diesen Gründen wird in dieser Arbeit die Definition nach [VDI 4004] als Zuverlässigkeitsdefinition für mechatronische Systeme genutzt.

## 3.2 Beschreibung mechatronischen Ausfallverhaltens

Aufbauend auf einer geeigneten Definition ist es notwendig, eine begriffliche Basis für die interdisziplinäre Zusammenarbeit zu schaffen.

### 3.2.1 Mechatronisches Ausfallverhaltensmodell

Um das Arbeiten in domänenübergreifenden Projektteams zu erleichtern und durch uneinheitliches Begriffsverständnis verursachte Missverständnisse zu vermeiden, wird ein übergeordnetes Definitionsmodell benötigt. Hierzu ist eine Analyse der verschiedenen funktionsorientierten Systemzustände eines mechatronischen Produktes notwendig. Die Elektronik-Domäne soll hierzu den Ausgangspunkt bilden, da sie sehr reich an Einflüssen ist, die sich auf die Funktionsfähigkeit des mechatronischen Systems auswirken können.

Elektronik kann entsprechend dem **Bild 2-3** schon zu Beginn der Nutzung nicht funktionsfähig sein oder erst im Betrieb ihre Funktionsfähigkeit verlieren. Eine fehlerbehaftete Funktion versagt bei ihrer Anwahl den Dienst. Ist der Fehler von temporärem Charakter (z. B. kurzfristige Beeinträchtigung durch elektromagnetische Felder), so ist ein Versagen möglich, folgt aber nicht unbedingt. Hierzu notwendig ist, dass eine Funktionsanwahl während des Fehlerzustandes erfolgt.

Mechanische Strukturen können ebenfalls schon zu Beginn der Nutzungsphase nicht funktionsfähig sein. Dieser Umstand ist im Vergleich zu Software- und Elektronik-Systemen weniger bedeutend, soll aber trotzdem berücksichtigt werden. Mechanik versagt meist aufgrund von Verschleiß und Ermüdung. Zeitweise Fehler sind nur in speziellen Fällen (z. B. zeitweises Klemmen) vorhanden. Somit folgt aus dem Ausfall einer mechanischen Komponente bei der nächsten Funktionsanwahl meist das Versagen derselben.

Software unterliegt der Möglichkeit, aufgrund eines Spezifikations- oder Programmierfehlers von Beginn der Betriebszeit an bezüglich einer bestimmten Funktion in einem bestimmten Anwendungsfall nicht funktionsfähig zu sein.

Es sind also abstrahiert über alle Fachbereiche hinweg folgende Zustände möglich:

- 0: Funktion ist gegeben (funktionsfähig).
- 1: Funktion würde, wenn gefordert, nicht gewährleistet werden können.
- 2: Funktion wird abgerufen und das System war in Zustand 1.

Um die erläuterten Zustände sowie die notwendigen Zustandsübergänge im Zusammenhang darzustellen, eignen sich sog. Zustandsautomaten (ZA). Es handelt sich

hierbei um Graphen, die aus Knoten und Kanten bestehen, wobei die Zustandsübergänge durch die Kanten und die Zustände durch die Knoten repräsentiert werden.

Der ZA in **Bild 3-2** stellt alle möglichen Zustände und Zustandswechsel für alle beteiligten Mechatronikdomänen dar. Ein ZA beschreibt jeweils nur eine einzige Produktfunktion. Gibt es derer mehrere, so existieren auch mehrere Zustandsautomaten.

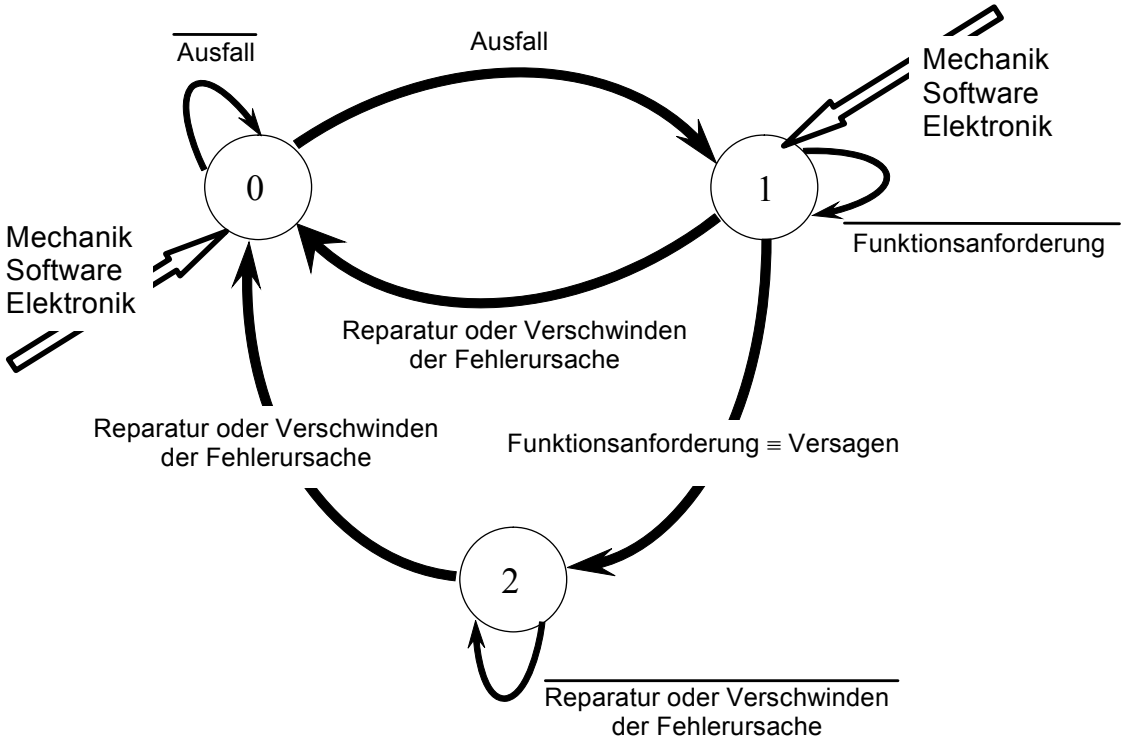


**Bild 3-2:** Modell zur Beschreibung mechatronischer Zuverlässigkeitszustände [ZIM 2004]

Es gibt zwei mögliche Eintrittszustände in den ZA. Entweder die Funktion ist bei Inbetriebnahme gegeben (Z0) oder aufgrund von Fabrikations-, Programmier- und Spezifikationsfehlern sowie anderer Ursachen nicht gegeben (Z1). Ist die Funktionsfähigkeit nicht gegeben (Z1), so tritt bei Aufruf dieser Funktion ein Versagen auf und der ZA befindet sich im Zustand Z2. Handelt es sich um einen dauerhaften Fehler, wie z. B. einen Wellenbruch, so kann nur durch Reparatur wieder Zustand Z0 erreicht werden. Handelt es sich um einen temporären Fehler, so kann die Funktion nach dem Verschwinden des Fehlers (z. B. Zusammenbrechen eines externen E-Feldes) automatisch, also ohne Reparatur im eigentlichen Sinne, wieder in den Zustand Z0 übergehen. Ist die Funktionsfähigkeit zu Beginn der Betriebszeit gewährleistet (Z0), wird durch einen Ausfall der Zustand Z1 angenommen. In diesem Zustand würde die Funktion, wenn sie vom Benutzer angefordert würde, nicht bereitgestellt werden können. Bei Vorhandensein einer zeitweisen Fehlerursache ist das Rückspringen in Z0 möglich. Geschieht dies, bevor der Produktnutzer auf die nicht funktionsfähige Funktion zugreifen will, so bemerkt dieser nichts von einer temporären Nicht-Funktionsfähigkeit seines Produktes. Das **Bild 3-3** illustriert die Zusammenhänge.

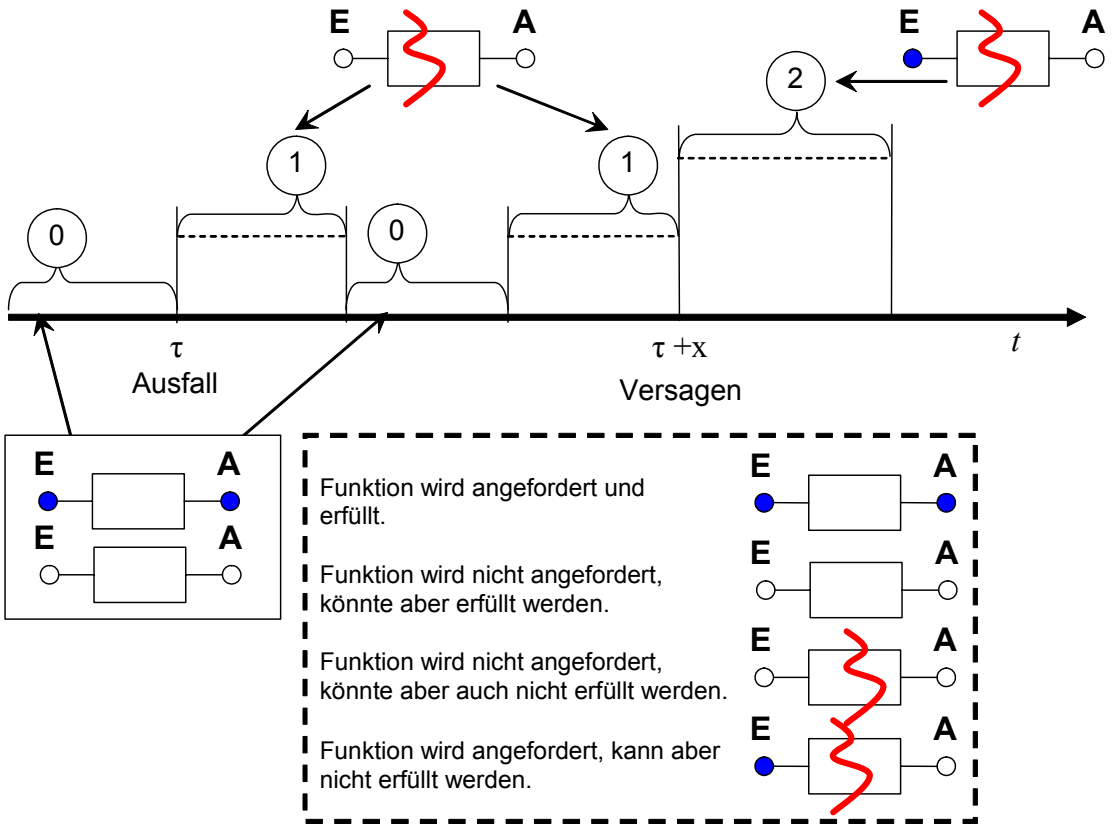


**Bild 3-3:** Definitionsbasis für das Zustandsmodell

### 3.2.2 Verifikation des Modells anhand von Beispielen

Die Anwendbarkeit des ZA-Beschreibungsmodells (ZABM) soll anhand von drei Beispielen dargestellt werden.

Beispiel 1: Ausfall eines Automatikgetriebes durch einen Montagefehler

Das **Bild 3-4** zeigt die Einbausituation eines Axiallagers in einem Automatikgetriebe. Dieses Lager stützt einen rotierenden Außenlamellenträger gegenüber einer festen Statorwelle ab. Auf dieser Statorwelle hat das Axiallager eine Laufbahn. Die andere Laufbahn wird durch eine Laufscheibe realisiert. Zum Axiallager gehören auch Ausgleichsscheiben, um die fertigungsbedingt auftretenden Axialspiele im Getriebe auszugleichen.

Der zu betrachtende Schadensfall kommt bei der Montage durch ein Vertauschen der Laufscheibe mit den Ausgleichsscheiben zustande. Der Montagefehler führt im Betrieb zur Zerstörung des Lagers und damit zum Getriebeausfall. Besonders unangenehm ist, dass ein werksinterner Funktionstest ohne Beanstandung absolviert wird [BER 2004]. Der Funktionstest erfolgt mit relativ niedriger Last, die von den bis zu 0,1 mm dünnen und ungehärteten Ausgleichsscheiben ertragen werden kann. Erst bei höheren Belastungen und entsprechender Laufzeit verformen sich die Ausgleichs-

scheiben sehr stark, führen zum Blockieren des Axiallagers und damit auch zum Blockieren des Getriebes.

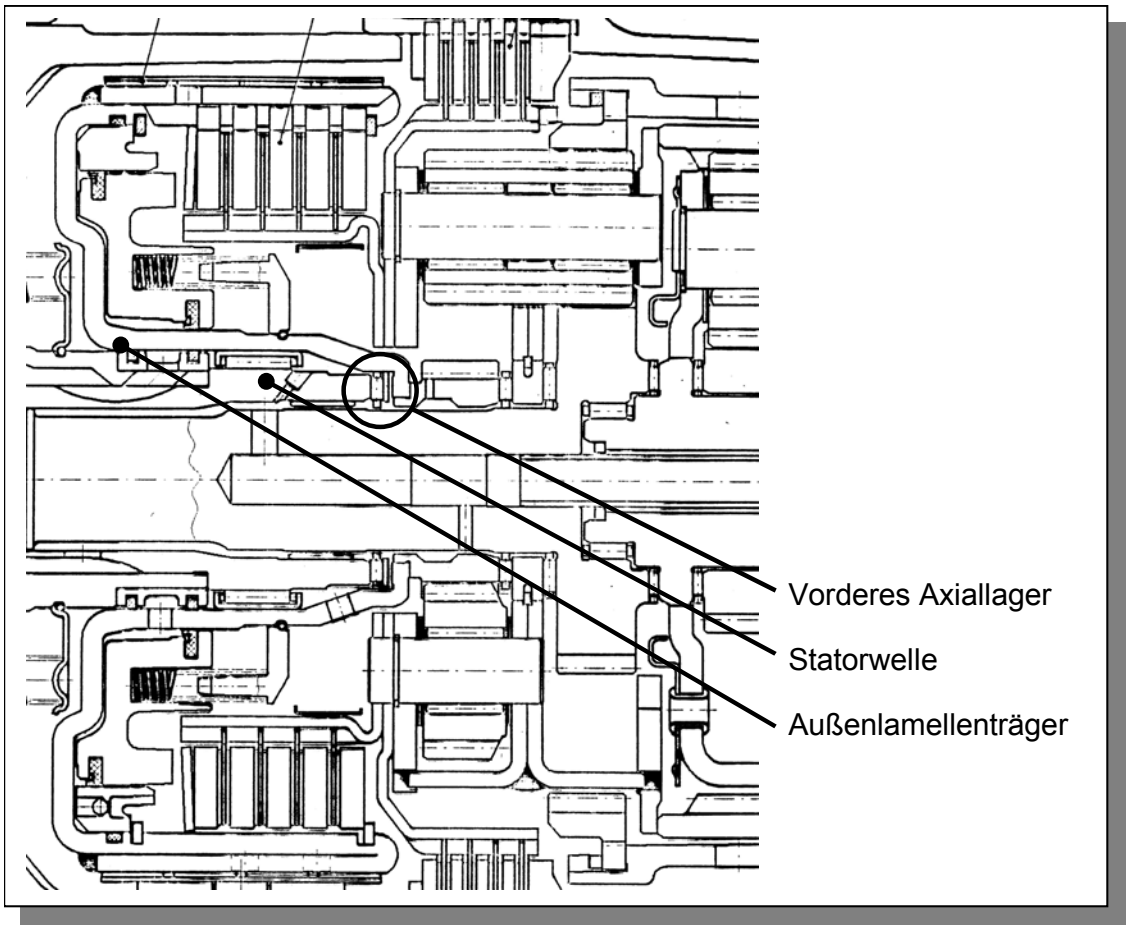


**Bild 3-4:** Einbauort des Axilalagers und der Laufscheibe [BER 2004]

Wie lässt sich dieses Beispiel in das ZABM einordnen? Das ZABM bezieht sich auf eine einzelne Produktfunktion. Es soll hier beispielsweise die Produktfunktion „Drehmoment übertragen“ betrachtet werden. An dieser Stelle ist zu hinterfragen, in welchem Zustand in das ZABM eingetreten wird. Hier kann davon ausgegangen werden, dass die Ausgleichsscheiben den Belastungen im realen Betrieb nach kürzester Zeit erliegen. Somit ist die Funktionsfähigkeit zu Beginn der Nutzung nicht gegeben und die Getriebefunktion „Drehmoment übertragen“ tritt im Zustand 1 in das ZABM ein. Wenn die Ausgleichsscheiben überlastet sind, fallen sie aus und das Getriebe blockiert. Zustand 2 wird eingenommen. Es handelt sich hierbei um keinen temporären, sondern um einen durch ungeplanten Verschleiß auftretenden permanenten Fehler. Ein Übergang in Zustand 0 ist deswegen ohne Reparatur unmöglich.

Das direkte Eintreten der Getriebefunktion in Zustand 1 kann im Sinne von [AVI 2000] durch das Vorliegen eines „faults“, also eines entwicklungs- oder fertigungsbedingten Fehlers, begründet werden.

Generell ist festzustellen, dass das Definitionsschema nach [AVI 2000] mit dem ZABM kompatibel ist. Letzteres vermag aber das gegenseitige fachbereichsübergreifende Verständnis zu steigern, was eine wichtige Voraussetzung für eine effektive mechatronische Zuverlässigkeitsarbeit darstellt.

Beispiel 2: Absturz der Ariane 5 Rakete

Nur kurze Zeit nach dem Start der Rakete am 4. Juni 1996 stellte die Software für das Trägheitsbezugssystem (Inertial Referenz System - IRS) aufgrund eines Ausnahmefehlers seine Arbeit ein und begann Diagnosedaten zu senden. Der On-Board Computer (OBC) versuchte daraufhin auf das Backup-Inertialsystem zuzugreifen. Dieses schaltete sich aufgrund desselben Fehlers jedoch bereits zuvor aus. Da der Computer damit nicht umzugehen wusste, interpretierte er die Fehlercodes, die nun von beiden Komponenten gesendet wurden, als Flugdaten und versuchte die Flugbahn dementsprechend anzugleichen. Dies wiederum führte zur Vollaussteuerung der Triebwerksdüsen und folglich zur Zerstörung der Rakete [LIO 1996].

*Hintergrund*

Die Bewegung der Rakete wird über ein Inertial Referenz System erfasst, welches seine Daten an den OBC überträgt. Dieser bestimmt aufgrund der Bewegungsdaten die Ausrichtung der Triebwerksdüsen und gibt diese Daten an die Steuerung weiter. Aufgrund der notwendigen Redundanz existieren zwei Inertialsysteme identischer Ausführung sowohl auf der Hardware- als auch auf der Softwareseite. Tritt in einem der beiden Systeme ein Spezifikationsfehler auf, trifft dies mit hoher Wahrscheinlichkeit auch auf das andere System zu, da es sich um identische Algorithmen handelt. Die verwendete Software wurde nur mit leichter Modifikation aus Ariane 4 übernommen, da diese schon erprobt war, allerdings weist deren Flugbahn eine andere Charakteristik auf [LIO 1996].

*Der Fehler*

Bei der Übernahme der Steuerungssoftware aus der Ariane 4 wurden nicht alle Codeteile gegen einen Überlauf geschützt. Die Begründung dafür war, dass die verbleibenden Variablen durch physikalische Abhängigkeiten limitiert würden oder es genug Spielraum gäbe. Diese Annahmen treffen auch zu, jedoch nur bei Ariane 4. Eine gravierende Entscheidung des Managements war es, die Flugdaten der Ariane 5 nicht in die Spezifikation für die Software einfließen zu lassen. Auch zu den Planungsfehlern zuzurechnen ist die Ausnahmebehandlung im Falle eines Ausfalles des Inertialreferenzsystemes. Der OBC war nicht auf einen gleichzeitigen Ausfall beider Systeme vorbereitet [LIO 1996].

Das Software-Problem von Ariane 5 lässt sich ebenfalls mit dem ZABM darstellen. Auch hier wird wiederum nur die entscheidende Funktionalität der Software betrachtet. Es handelt sich dabei um die „Erfassung der Horizontalgeschwindigkeit".

Die Software für das Trägheitsbezugssystem (IRS) wurde ursprünglich für Ariane 4 entwickelt. Der Einsatz dieser Software in Ariane 4 war erfolgreich und verlief fehlerfrei. Die Funktion „Erfassung der Horizontalgeschwindigkeit" für die Anwendung in Ariane 4 würde im Zustand 0 in das ZABM eintreten. Durch die versäumte Anpassung der Software auf die Gegebenheiten bei der Ariane 5 tritt die Funktion „Erfassung der Horizontalgeschwindigkeit", bei Ariane 5 im Zustand 1 in das ZABM ein. Die technische Begründung hierfür sind die mit Ariane 5 nun möglichen – im Vergleich zu Ariane 4 deutlich höheren – horizontalen Geschwindigkeitswerte. Die entsprechende Software ist hierfür allerdings nicht ausgelegt. Sobald die Funktion „Erfassung der Horizontalgeschwindigkeit" gefordert wird und zu hohe Geschwindigkeitswerte vorliegen, folgt ein Variablenüberlauf und die beiden Trägheitsbezugssysteme stellen als Folge davon ihren Dienst ein. Die Funktion „Erfassung der Horizontalgeschwindigkeit" geht bei zu hohen Geschwindigkeitswerten in Zustand 2 des entsprechenden ZABM über. Das Resultat war die Zerstörung der Ariane 5.

Die Aussagekraft des ZABM wird in [ZIM 2004] durch weitere Beispiele bestätigt.

## 3.3 Zuverlässigkeitsmodellierung mechatronischer Systeme

Das ZABM ist fähig, das mechatronische Ausfallverhalten auf der Basis von Funktionen zu beschreiben. Es wird direkt nicht der Ausfall von Bauteilen, sondern das Nichtgegebensein von Funktionen betrachtet. Speziell im Bereich rein mechanischer Systeme führt der Ausfall einer Komponente oft zum Ausfall des Gesamtsystems. Mechanische Systeme bestehen oft aus teuren und schweren Einzelkomponenten. Im Zuge der Kosten- und Gewichtseinsparungsmaxime z. B. der Automobilindustrie folgt daraus oft eine redundanzlose Struktur mechanischer Produkte. Darüber hinaus konnten mechanische Produkte früher oft auf eine einzige Kernfunktionalität reduziert werden, wie z. B. „Drehmoment wandeln" bei einem einfachen Übersetzungsgetriebe. Somit war der Ausfall einer Komponente auch identisch mit dem Eintritt in die Nicht-Funktionsfähigkeit und die Definition der Zuverlässigkeit für mechanische Umfänge [TZU 1986] bezog sich denn auch auf den Ausfall einer physischen Einheit und nicht auf das Versagen einer Funktion.

Bei mechatronischen Produkten ist dieses Denken nicht mehr möglich. Mechatronische Systeme unserer Zeit sind oftmals hochkomplexe (im Sinne von stark vernetzt) und große (im Sinne der Anzahl der Bauteile) Gebilde. Der Ausfall oder das Versagen

einer Komponente (physisch und nicht physisch) führt nicht immer zum Totalverlust der Gesamtfunktionalität, sondern oft nur zu einer Einschränkung der Gesamtfunktionalität [MÜL 1986]. Es existiert also ein sehr differenziertes Ausfallverhalten. Zudem besteht die Möglichkeit, dass eine Komponente an der Bereitstellung mehrerer Funktionen beteiligt ist. Dieser Umstand soll im Folgenden mit dem Begriff „Multifunktionalität“ beschrieben werden.

Eine Folge des Funktionenreichtums aktueller Produkte ist, dass verschiedene Produktfunktionen vom Produktnutzer als verschieden bedeutend erachtet werden können. Fiele eine Komponente aus, die eine geringwertige Funktion beeinträchtigt, so wäre es nicht zielorientiert, deswegen das System als ausgefallen zu betrachten. Diese rein „digitale“ Betrachtungsweise wird einer kundenorientierten Zuverlässigkeitsarbeit nicht gerecht. So würden z. B. nur die wenigsten Automobilkunden mit ihrer Kaufentscheidung unzufrieden sein, wenn an ihrem Auto die Innenbeleuchtung flackert. Umgekehrt würde es sich bei einem Ausfall der Drehmomentübertragung verhalten.

Ziel dieses Abschnittes ist es, die angedeuteten Besonderheiten mechatronischer Systeme im Hinblick auf die Zuverlässigkeitsarbeit zu betrachten. Es wird untersucht, welche Eignung verschiedene Zuverlässigkeitsmodellierungsmethoden diesbezüglich aufweisen und wie eine Gesamtbetrachtung eines mechatronischen Konzeptes erfolgen kann.

### 3.3.1 Anforderungen an die Modellierung

Für die Bewertung der Eignung verschiedener bekannter Zuverlässigkeitsmodellierungsmethoden bedarf es bestimmter Bewertungskriterien, die den Charakter mechatronischer Systeme abbilden. Diesbezüglich werden die Kriterien

- Reparierbarkeit,
- Anzahl der Fehlfunktionen,
- Art der Verschaltung,
- das Vorhandensein von Multifunktionalitäten und in diesem Zusammenhang
- das Vorhandensein gebundener Redundanzen bzw. passiver Zustände

identifiziert.

Generell muss unterschieden werden, ob die Zuverlässigkeitsbetrachtung eine Untersuchung im Sinne des ersten Systemausfalls darstellt, oder ob von reparierbaren Systemen ausgegangen werden soll. Im Hinblick auf das Vorhandensein von Software kommt diesem Punkt besondere Bedeutung zu. Software kann, wenn konzeptionell

vorgesehen, von einem „ausgefallenen“ Zustand in einen funktionsfähigen Zustand zurücküberführt werden. Eine Möglichkeit hierzu ist ein Neustart des Systems. Dies ist insbesondere bei mechanischen Systemumfängen aufgrund ihres physikalischen Ausfallens unmöglich. Für eine realitätsnahe Modellierung ist es sinnvoll, die „Reparierbarkeit“ von Software mit zu betrachten. Hierzu eignen sich u. a. Markovketten [JES 2005].

Eine weitere Systematisierungsdimension ist die Anzahl der Fehlfunktionen. Mechatronische Produkte zeichnen sich durch eine große mögliche Fülle an Funktionalitäten aus. Dementsprechend ist die Nutzung eines einzigen Zuverlässigkeitsblockdiagramms für ein komplexes mechatronisches Produkt nicht mehr anwendbar. Vielmehr besteht für jede Funktion des mechatronischen Produkts die Notwendigkeit der Zuverlässigkeitsmodellierung. Die Zuverlässigkeit ist in diesem Sinne allerdings dann nicht mehr als Wahrscheinlichkeit für den Nichtausfall des Systems zu verstehen, sondern als Wahrscheinlichkeit für den Erhalt einer bestimmten Systemfunktion.

Die Multifunktionalität kann als ein Kerncharakteristikum mechatronischer Systeme angesehen werden. Sie bezeichnet die Eigenschaft einer Komponente, an der Realisierung mehrerer Systemfunktionen beteiligt zu sein. Insbesondere für Elektronik und Software ist dies ein entscheidender Punkt. Eine zentrale Recheneinheit kann an sehr vielen, nämlich den meisten mit Informationsverarbeitung behafteten, Funktionen beteiligt sein. Betrachtet man Software, so hängt es stark von der Softwarearchitektur ab, ob Multifunktionalitäten vorliegen oder nicht. Als Beispiel kann ein Addierer dienen, der sämtliche Additionsaufgaben aller anderen Softwarebausteine übernimmt. Versagt dieser, so sind sämtliche abhängigen Funktionen davon beeinflusst. Bei einer dezentralen Softwarearchitektur, bei der z. B. jeder Baustein seinen eigenen Addierer hat, ist die Multifunktionalität eingeschränkt oder ganz aufgehoben.

Bei der Nutzung von Fehlerbäumen zur Modellierung der übergeordneten Systemzuverlässigkeit, die als Wahrscheinlichkeit für das Nichtversagen einer einzigen Systemfunktion betrachtet werden kann, würde sich die Multifunktionalität durch das mehrfache Erscheinen einer Systemkomponente in Form mehrerer entsprechender Fehlerelemente (z. B. Zahnradbruch und -grübchen) im Fehlerbaum bemerkbar machen.

Das Vorhandensein gebundener Redundanzen stellt die letzte Systematisierungsdimension dar und beschreibt den Umstand, dass eine Komponente die Möglichkeit hat, an zwei Systempositionen eine Redundanzfunktion einzunehmen, nach der Zuweisung zu einer Position allerdings an dieser gebunden ist und nicht auch noch die zweite Position einnehmen kann. Anhand eines Beispiels kann dies besser nachvollzogen werden. In dem in **Bild 3-5** dargestellten Tanksystem erfüllt das Überlaufventil die Eigenschaft der gebundenen Redundanz.

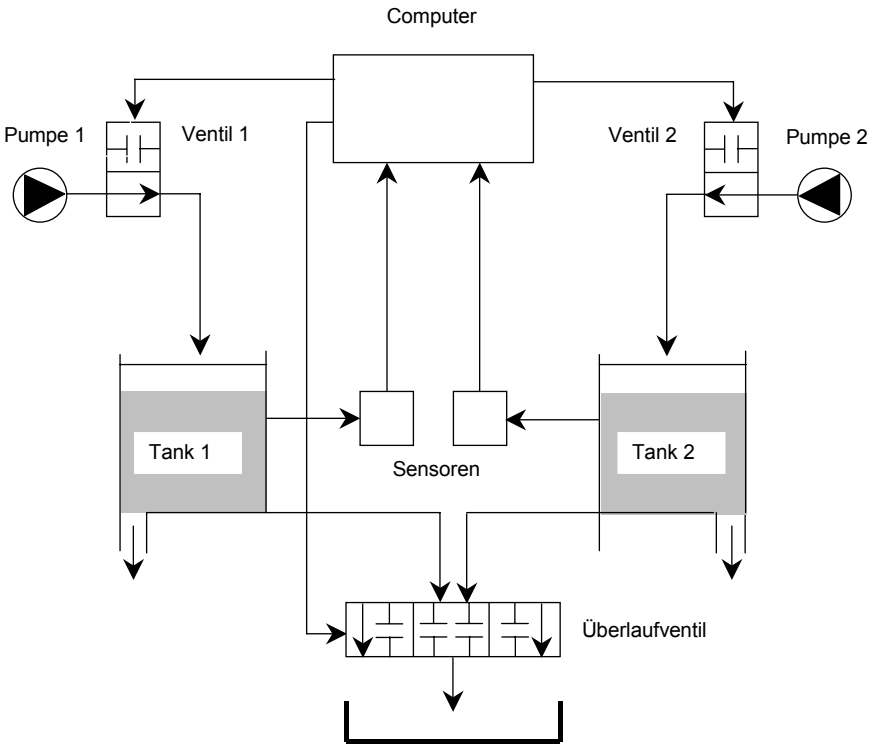


**Bild 3-5:** Tanksystem mit gebundener Redundanz [DEM 2004]

Sollte Ventil 1 nicht mehr schließen, so droht Tank 1 überzulaufen. Das Überlaufventil schaltet und sorgt dafür, dass Tank 1 nicht überläuft, sondern die Flüssigkeit in eine Auffangwanne umgeleitet wird. Würde jetzt auch noch Ventil 2 ausfallen, so kann das Überlaufventil an dieser Stelle nicht mehr als Redundanz auftreten; es ist als Redundanz für das defekte Ventil 1 gebunden.

In **Bild 3-6** ist die Komplexität mechatronischer Systeme aus Zuverlässigkeitssicht systematisiert dargestellt. Hierzu werden die gerade erläuterten Kriterien genutzt.

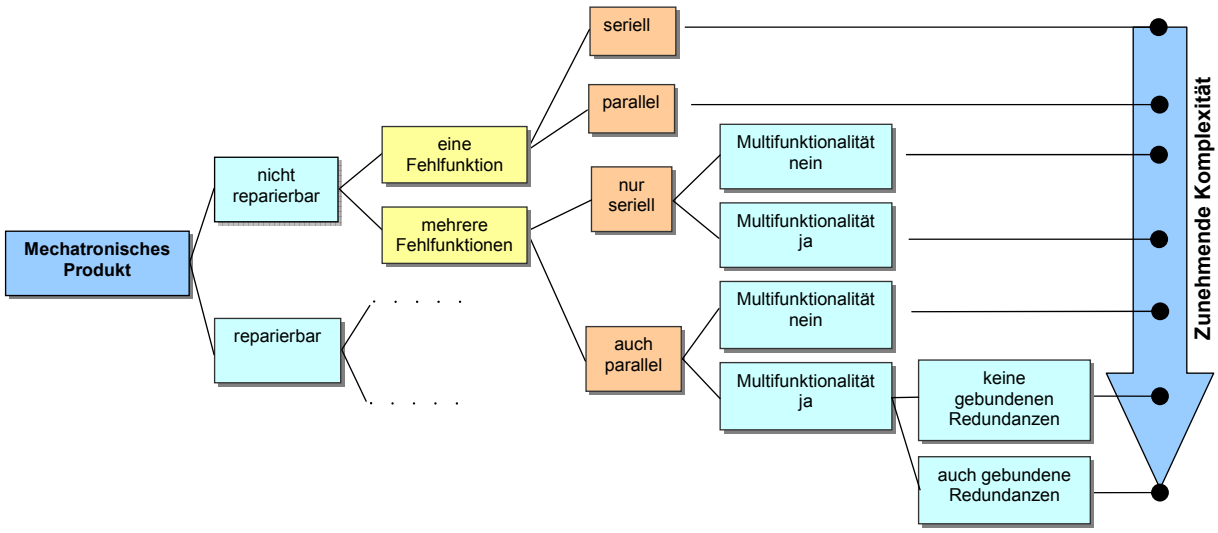


**Bild 3-6:** Zuverlässigkeitstechnische Komplexität mechatronischer Systeme [JÄG 2005a]

Welche bekannten Methoden der Zuverlässigkeitsmodellierung lassen sich auf unterschiedlich komplexe mechatronische Systeme anwenden?

Aus dem Bereich der Booleschen Systemtheorie sind die Verfahren Zuverlässigkeitsblockdiagramm und Fehlerbaummethode bekannt. Die Fehlerbaummethode ist dem Zuverlässigkeitsblockdiagramm überlegen, da sie fähig ist, eine erhöhte Systemkomplexität zu handhaben. So eignet sich das Zuverlässigkeitsblockdiagramm nicht für Systeme mit multifunktionalen Komponenten. Mittels der Fehlerbaummethode sind solche Systeme beherrschbar, weil die Fehlerbaummethode das mehrfache Auftreten desselben Systemelements berücksichtigen kann. Allerdings ist die Einsetzbarkeit auf solche Systeme begrenzt, die keine gebundenen Redundanzen aufweisen, da die Boolesche Systemtheorie von einer über den Betrachtungszeitraum fixen (statischen) Zuverlässigkeitsstruktur ausgeht.

Sollen Eigenheiten, wie z. B. gebundene Redundanzen, passive Redundanzen oder andere ereignisabhängige Systemeinflüsse modelliert werden, muss auf zustandsorientierte Verfahren zugegriffen werden. An dieser Stelle sind Markov-Graphen, nicht farbige und farbige Petrinetze, in Kombination mit ereignisorientierter Monte Carlo Simulation zu nennen. Eine Anwendung farbiger Petrinetze zur Analyse eines mechatronischen Systems wird in [MON 1998] gezeigt. Speziell für die Modellierung reparierbarer Systeme sind die zuletzt genannten Verfahren notwendig.

### 3.3.2 Berücksichtigung der hohen Funktionalität

Ein Kernelement der Zuverlässigkeitsbeschreibung mechatronischer Produkte ist die Funktionsorientierung und dementsprechend auch die unterschiedliche Wertigkeit von Funktionen bzw. Fehlfunktionen in der Wahrnehmung des Kunden. An dieser Stelle bietet sich die Nutzung von Klassierungssystemen an, wie sie z. B. in [VDA 2000] und [DIN IEC 61508] beschrieben werden. Das **Bild 3-7** zeigt das in [VDA 2000] vorgeschlagene und in der Automobilindustrie angewandte Beanstandungsklassensystem, bei dem vier Klassen unterschieden werden.

| | |
|---|---|
| **I** | **Gefährdung von Leib und Leben** |
| **II** | **Liegenbleiber mit Werkstattaufenthalt** |
| **III** | **Vorübergehender Liegenbleiber, Notbetrieb, selbständiges Anfahren einer Werkstatt** |
| **IV** | **Geringe Funktionsbeeinträchtigung** |

**Bild 3-7:** Beanstandungsklassensystem nach [VDA 2000]

Das obige Beanstandungsklassenraster ist die Schnittstelle zwischen Zuverlässigkeitsforderungen, die aus gesetzlichen Anforderungen, aus dem Markt oder der Unternehmensstrategie abgeleitet werden, und den Zuverlässigkeitsinformationen aus der Produktentwicklung. Diese Werte müssen miteinander abgeglichen werden, um z. B. Verbesserungsbedarfe für die weitere Produktentwicklung zu identifizieren.

Den einzelnen Klassen müssen Zuverlässigkeitszielwerte zugewiesen werden, wobei die Klasse I in **Bild 3-7** gesetzlichen Forderungen unterliegt. Die Zuverlässigkeitszielgröße für die einzelnen Klassen kann z. B. in Form von Summenausfallhäufigkeiten angegeben werden. Es ist zu betonen, dass es sich bei einem funktionsorientierten Ansatz kombiniert mit Beanstandungsklassen eher um Auftretenshäufigkeiten eines Fehlers einer bestimmten Klasse als um Ausfallhäufigkeiten handelt. Zu berücksichtigen ist außerdem, dass für lange Betrachtungsdauern die Reparierbarkeit von Systemen bedeutend wird. So ist es möglich, dass ein Produkt im Laufe seiner Lebensdauer eine bestimmte Ausfallart mehrfach „erlebt“. Die Ausfallwahrscheinlichkeit als Maßgröße kann diesen Umstand nicht berücksichtigen, da sie auf 100 % beschränkt ist.

Im Sinne einer funktionsorientierten Zuverlässigkeitsarbeit müssen nach der Zuweisung von Zuverlässigkeitszielwerten zu den Beanstandungsklassen diesen auch die möglichen Fehlfunktionen des mechatronischen Produkts zugewiesen werden. Ausgangspunkt hierfür sind die sog. TOP-Funktionen eines Produkts.

Da in dieser Arbeit hauptsächlich Fahrzeuggetriebe als Demonstratoren verwendet werden, sind im Folgenden TOP-Funktionen eines Stufenlosgetriebes aufgelistet, wobei kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird:

- Drehzahl/Drehmomentwandlung gewährleisten,
- geräusch- und vibrationsarmen Betrieb sicherstellen,
- Sicherheitsanforderungen gewährleisten,
- Wirtschaftlichkeit gewährleisten,
- Servicefreundlichkeit gewährleisten,
- gesetzliche Vorschriften erfüllen,
- Fahrbereichswechsel gewährleisten,
- Komfort beim Fahrbereichswechsel gewährleisten,
- Verstellung des Variators gewährleisten,
- Öldichtheit intern und nach außen gewährleisten,
- Korrosionsbeständigkeit gewährleisten,
- Fahrzeug gegen Wegrollen sichern.

Die genannten TOP-Funktionen sind die Ausgangsbasis für eine FMEA. Ziel der FMEA ist die frühzeitige und ganzheitliche Qualitätsverbesserung des Produktes. Dementsprechend erscheinen als TOP-Funktionen auch nichtfunktionale Anforderungen, wie z. B. „Servicefreundlichkeit gewährleisten“. Nichtfunktionale Anforderungen sind solche, die die Wirkungsweise des Produktes nicht direkt betreffen. Hierunter fällt z. B auch der Auflistungspunkt „Korrosionsbeständigkeit gewährleisten“. Werden nur die funktionalen Anforderungen an das CVT-Getriebe betrachtet, so reduziert sich die Liste der TOP-Funktionen auf

- Drehzahl/Drehmomentwandlung gewährleisten,
- Verstellung des Variators gewährleisten,
- geräusch- und vibrationsarmen Betrieb sicherstellen,
- Fahrbereichswechsel gewährleisten,
- Komfort beim Fahrbereichswechsel gewährleisten,
- Fahrzeug gegen Wegrollen sichern,
- definiertes Betätigungsmoment gewährleisten (Parksperrensystem) und
- Einrasten erst unter gewisser Drehzahl gewährleisten.

Aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht sind Fehlfunktionen von Interesse. Dementsprechend werden den Funktionen entprechend der FMEA-Vorgehensweise Fehlfunktionen zugeordnet. Hierzu werden sinnvolle Abstufungen bezüglich der Nichtfunktionsfähigkeit vorgenommen. Sind alle Fehlfunktionen bestimmt, werden diese den oben beschriebenen Beanstandungsklassen zugeordnet. Hierdurch wird ohne Betrachtung der konstruktiven Realisierung eines Produktes die Klassenzuverlässigkeit allgemein, d. h. für alle möglichen Produktrealisierungen, vormodelliert. Dementsprechend eignet sich dieses Vorgehen in frühen Phasen, wo die Produktbeschreibung meist nur in Form einer Anforderungsliste dokumentiert ist. Es ist zu beachten, dass die Klassenzuverlässigkeit die Wahrscheinlichkeit für das Nicht-Auftreten einer Fehlfunktion der entsprechenden Klasse darstellt.

Die Zuordnung der Fehlfunktionen zu den Beanstandungsklassen wird dabei durch die vermutete Wahrnehmung des Kunden, oder durch fest vorgegebene Klassendefinitionen, z. B. entsprechend **Bild 3-7**, vorgegeben. Ergebnis der Zuordnung ist eine vollständige Aufteilung der Fehlfunktionen auf die Beanstandungsklassen.

### 3.3.3 Nutzung der Fehlerbaummethode

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Abschnitt 3.3.1 und dem Umstand, dass es aufgrund der möglichen Vielzahl an Fehlfunktionen notwendig ist, mit einer Bean-

standungsklassensystematik zu arbeiten, wird für das weitere Vorgehen die Fehlerbaummethode ausgewählt.

Die Fehlerbaumanalyse *(engl.: Fault Tree Analysis, FTA)* wurde 1961 im Auftrag der U.S. Air Force entwickelt und wurde von Boeing bei der Entwicklung kommerzieller Flugzeuge erstmals angewandt. Seitdem findet die FTA Einsatz in verschiedensten Anwendungsfeldern [BAR 1975]. Die FTA ist eine strukturierte Vorgehensweise zur Feststellung der internen und externen Ursachen, die allein oder in Kombination zu einem definierten Zustand des Produktes führen [MAS 1994]. Dieser definierte Zustand ist für Zuverlässigkeitsbetrachtungen meist der Ausfall oder Fehlzustand eines übergeordneten Systems und wird in der FTA-Terminologie auch als TOP-Ereignis bezeichnet.

Der Aufbau eines qualitativen Fehlerbaums ist beispielhaft in **Bild 3-8** gezeigt. Das TOP-Ereignis ist in diesem Falle ein Getriebeausfall. Es ist zu erkennen, dass Hierarchieebenen eingeführt sind.

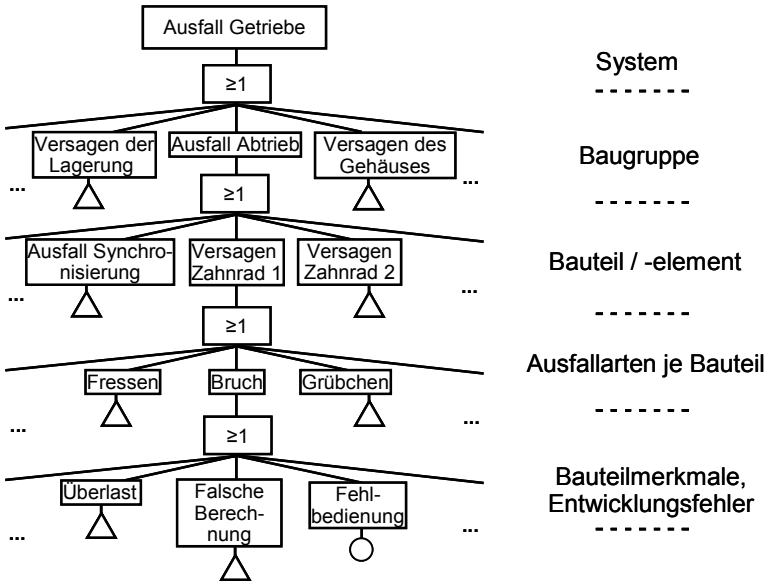


**Bild 3-8:** Fehlerbaum am Beispiel Getriebeausfall [BER 2004]

Den Ausfallarten werden mögliche Fehlerursachen zugeordnet. Für die quantitative Fehlerbaumanalyse wird ein TOP-Ereignis bis auf die Ebene der quantitativ zu beschreibenden Ausfallarten heruntergebrochen. Zur Identifikation möglicher Ausfallarten können z. B. FMEAs von Vorgängern oder Ausfallstatistiken genutzt werden.

Die Anwendung der Fehlerbaummethode auf mechatronische Systeme unter Berücksichtigung mehrerer Fehlfunktionen und einer übergeordneten Beanstandungsklassensystematik ist in **Bild 3-9** dargestellt.

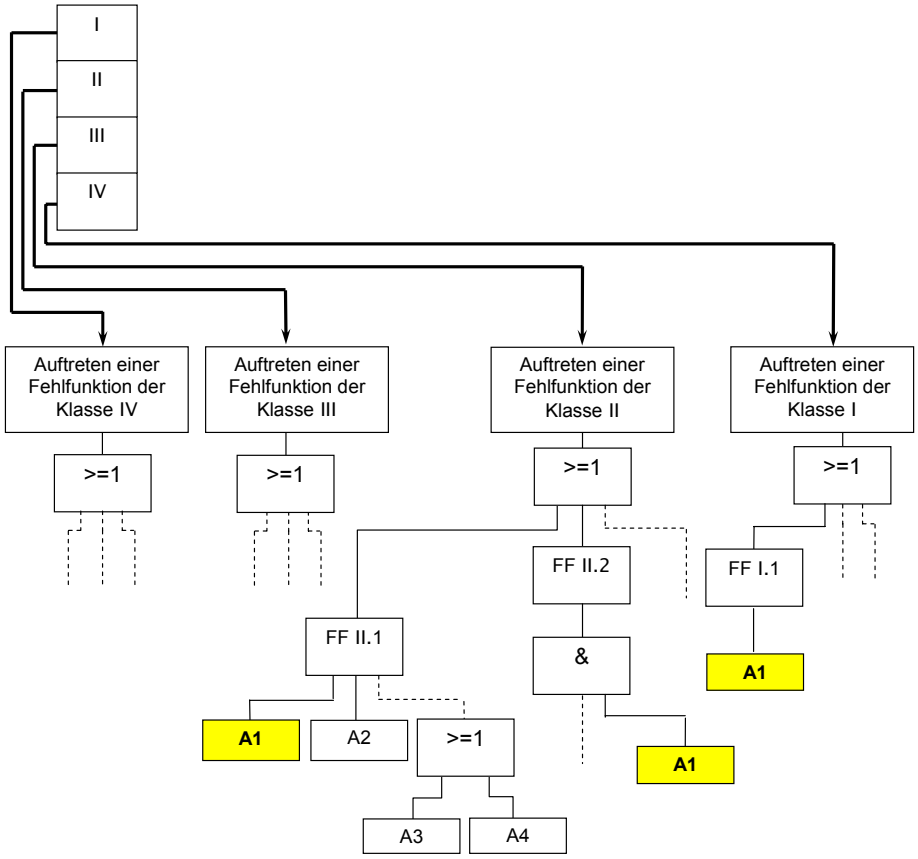


**Bild 3-9:** Beanstandungsklassenorientierte Fehlerbaumsystematik [JÄG 2005c]

Es ist zu erkennen, dass eine – in **Bild 3-9** mit „A1“ bezeichnete – Ausfallart in verschiedenen Fehlfunktionen als Eingangselement auftaucht. Dies entspricht dem oben vorgestellten Charakteristikum der Multifunktionalität. Die Fehlerbaumanalyse ermöglicht die Beherrschung dieses Umstands aufgrund der Fähigkeit, sich wiederholende Ereignisse (*engl:. Fault Trees with repeated Events*) [MAL 1994] und somit die mögliche Mehrfachbedeutung von einzelnen Ausfallarten berücksichtigen zu können.

## 3.4 Aufteilungsstrategien

Die Aufteilungsstrategie ist ein Teilaspekt der Zuverlässigkeitsplanung eines zu entwickelnden Produktes. Die Aufteilung einer Gesamtzuverlässigkeitsforderung auf Teile des Gesamtproduktes hat das Ziel, Teilentwicklungsbereichen einzelne Zuverlässigkeitsziele vorzugeben, die unabhängig vom Restsystem getestet und nachgewiesen werden können. Dies geschieht unter der Voraussetzung, dass die Gesamtheit aller Teilzuverlässigkeitsziele dem Gesamtzuverlässigkeitsziel entspricht [KEC 1991].

Der Grund für das Behandeln von Aufteilungsstrategien an dieser Stelle ist zum einen, dass es sich um ein allgemeines Verfahren der Zuverlässigkeitsarbeit handelt, aber zum anderen auch die Gefahr, dass die Vergabe von Teilzuverlässigkeitszielen auf-

grund des üblicherweise existierenden Datenmangels als einzig quantitativ abzuleistende Zuverlässigkeitsarbeit in frühen Entwicklungsphasen angesehen wird.

Die Gefahr resultiert hierbei aus dem Umstand, dass die alleinige Vergabe von Zielen nicht deren Erreichbarkeit sichert. So können mögliche Restriktionen, wie z. B. Bauraum oder Kosten die Erreichung eines gegebenen Zuverlässigkeitsziels verhindern. Leider würde diese Tatsache erst zu spät im Entwicklungsprozess registriert. Dann wären viele Entwicklungsaktivitäten – u. a. auch solche, die zur Qualitäts- und Zuverlässigkeitserhöhung dienen (QFD, FMEA, Reviews, …) – nicht effektiv, weil sie auf eine Lösungsvariante angewandt wurden, die konzeptionell das Gesamtzuverlässigkeitsziel nie erreichen konnte!

Der Umstand, dass eine weitergehende quantitative Zuverlässigkeitsarbeit in frühen Phasen notwendig ist, geht aus obiger Schilderung direkt hervor, soll durch den Einblick in verschiedene bekannte Aufteilungsstrategien und die Betrachtung deren Eignung für mechatronische Produkte allerdings noch verdeutlicht werden.

### 3.4.1 Gleichmäßige Aufteilung konstanter Ausfallraten

Die Verteilung konstanter Ausfallraten auf die Systembausteine hat zwei Nachteile. Durch die Nutzung von Ausfallraten wird ein Ausfallverhalten entsprechend einer Exponentialverteilung unterstellt. Dementsprechend kann ermüdungs- und verschleißbedingtes Ausfallverhalten nur näherungsweise berücksichtigt werden. Außerdem wird angenommen, dass die Anzahl der im System vorhandenen Komponenten bekannt ist. Diese Information ist notwendig, weil sich die den Komponenten zugewiesene Zielzuverlässigkeit in Form der Zielausfallrate

$$\lambda_{Komponente} = \frac{\lambda_{System}}{Komponentenanzahl} \tag{3.1}$$

berechnet.

Des Weiteren wird vorausgesetzt, dass es sich um eine reine Serienstruktur handelt, die bewertet werden soll. Wäre das System teilweise oder ganz redundant, so würde sich bei Anwendung von **Gleichung 3.1** eine sehr hohe Systemzuverlässigkeit ergeben, die womöglich weit über den Marktforderungen läge und somit unnötig hohe Entwicklungs- oder Bauteilkosten verursachte.

### 3.4.2 Akzentuierte Aufteilung anhand der Systemkomplexität

Bei der akzentuierten Aufteilung anhand der Systemkomplexität wird die Situation bei Neuentwicklungen berücksichtigt. Im Unterschied zur Verteilung konstanter Ausfall-

raten wird hier davon ausgegangen, dass die Bauteilanzahlen nicht bekannt sind. Eine Information, die entsprechend der Annahme dieser Vorgehensweise vorliegt, ist die Aufteilung der Systemkomplexität. Ein Beispiel soll das Vorgehen verdeutlichen.

Beispiel:

*Aus früheren Produkten ist bekannt, dass eine bestimmte Maschine aus drei Untersystemen besteht. Dies sind das Getriebe, der Motor und die Steuerung. Marktforschungen ergaben, dass für das neu zu entwickelnde Produkt eine maximale Ausfallrate von $\lambda$ zulässig ist. Für eine erste Zielvorgabe an die einzelnen Entwicklungsbereiche wird als Basis eine Schätzung der F&E-Abteilung genutzt. Die Aussage ist, dass sich die Bauteileanzahlen der Untersysteme (in diesem Fall genutzt als Komplexitätsmaß) grob im Verhältnis 2:5:3 aufteilen. Ausgehend von dieser Information steht der Getriebeentwicklungsabteilung nun eine Zielausfallrate von circa 20 Prozent der maximalen Gesamtausfallrate $\lambda$ zu.*

Auch bei dieser Strategie wird das Ausfallen der Bauteile entsprechend einer Exponentialverteilung angenommen. Besteht also seitens des Marktes z. B. die Forderung nach einer ausfallfreien Zeit oder handelt es sich um ein Produkt, das aus der Erfahrung heraus über verschleißbedingtes Ausfallverhalten verfügt, so sind die „Gleichmäßige Aufteilung konstanter Ausfallraten“ und die „Akzentuierte Aufteilung anhand der Systemkomplexität“ nur sehr eingeschränkt geeignet.

### 3.4.3 Akzentuierte Aufteilung auf Basis des Vorgängers/Wettbewerbs

Bei dieser Vorgehensweise dient der Produktvorgänger als Ausgangspunkt für die Aufteilung. Dies setzt voraus, dass das Neuprodukt eine Ähnlichkeit zum Vorgänger aufweist, und dass Informationen über die Zuverlässigkeit der Vorgänger- und/oder Wettbewerbskomponenten vorliegen. Diese Daten können mit der Marktforderung oder der Leistungsfähigkeit der Wettbewerber verglichen werden. Aus dem Soll-Ist-Abgleich können nun Entwicklungsziele, wie z. B. die Verbesserung der Zuverlässigkeit um einen bestimmten Wert, abgeleitet werden. Hierbei ist auch die Berücksichtigung von nicht-exponentiellem Ausfallverhalten möglich. Es wird allerdings die Kenntnis des Ausfallverhaltens nahezu aller Komponenten vorausgesetzt. Dies ist in der Praxis nicht immer möglich, insbesonders, wenn neue Technologien und neuartige Bauteile zum Einsatz kommen.

### 3.4.4 Aufteilung auf Basis von Pannenstatistiken

Eine weitere Möglichkeit, wettbewerbsorientiert aufzuteilen, besteht in der Nutzung von Pannenstatistiken. In [VDA 2000] wird die Nutzung dieses Werkzeugs auf Basis

von Ausfallanteilen vorgestellt. Aus Pannenstatistiken, wie sie z. B. jedes Jahr vom ADAC [ADA 2005] veröffentlicht werden, ist die Verteilung auf verschiedene Ausfallkategorien zu entnehmen. Da diese Pannenstatistik einen Querschnitt über alle Automobilmarken bildet, kann sie als Ausgangspunkt für eine wettbewerbsorientierte Zuverlässigkeitsanalyse dienen. Bei den Angaben des ADAC handelt es sich um keine Ausfallraten. Es ist über die Betrachtung der Anteile an Ausfallarten lediglich möglich, Stärken und Schwächen gegenüber dem Marktdurchschnitt zu ermitteln, um somit erfolgversprechende Felder für Zuverlässigkeitsverbesserungsmaßnahmen zu bestimmen.

Neben den Verfahren aus [VDA 2000] und weiteren sind noch die Methoden nach Karmiol [KAR 1965], Bracha [BRA 1964] und nach Birolini [BIR 2004] bekannt.

Methode nach Karmiol

Karmiols Aufteilungsmethodik beruht auf der Berücksichtigung diverser Einflussfaktoren. Diese sind

- die Komplexität (Anteil der Betrachtungseinheit an allen Abläufen während der „Mission“),
- der Stand der Technik (kritische oder unkritische Technologie),
- das „operational profile“ (Einwirkung von Umwelteinflüssen, Laufzeitanteile) und
- die Kritikalität (Bedeutung jeder Betrachtungseinheit für den „Missionserfolg“).

Diese Faktoren beschreiben Subsysteme im Hinblick auf ihre Bedeutung im Gesamtsystem. Den Faktoren werden, ähnlich einer FMEA, für jedes Subsystem Werte zwischen 1 und 10 zugewiesen. Über einen hier nicht aufgeführten Algorithmus ergibt sich für jedes Subsystem eine zugewiesene Zielzuverlässigkeit. Diese Zuverlässigkeit soll nach einer bestimmten „Missionsdauer“ mindestens erreicht werden. Die Methodik wird in [KEC 1991] auf serielle Systeme und solche angewandt, bei denen ein Serienelement redundant vorhanden ist.

Methode nach Bracha

Diese Methode basiert ebenfalls auf Einflussfaktoren, die denjenigen von Karmiol sehr ähnlich sind. Lediglich ihr Einfluss auf die Aufteilung wird anders gehandhabt. Der Umstand, dass der Einfluss bestimmter Faktoren bei Karmiol und Bracha anders berücksichtigt wird, zeigt, dass es sich bei den entsprechenden Vorgehensweisen nicht unbedingt um theoretisch beweisbare, sondern um bis zu einem bestimmten Grad empirisch-subjektive Methoden handelt.

Methode nach Birolini

Birolini definiert ähnlich wie Karmiol einen „complexity factor“ und einen „duty cycle factor“ mit Hilfe derer eine Systemausfallrate aufgeteilt wird. Diese Methodik lässt sich wiederum nur für rein serielle Systeme anwenden.

### 3.4.5 Diskussion der bekannten Aufteilungsstrategien

Die Diskussion von Aufteilungsstrategien muss vor dem Hintergrund der Zuverlässigkeitsbeschreibung mechatronischer Produkte betrachtet werden. Das Zuverlässigkeitsziel für mechatronische Produkte ist in dieser Arbeit ein beanstandungsklassenorientiertes und zudem ein fehlfunktionsorientiertes. Die Fehlfunktionsorientierung führt dazu, dass die Ausfallarten einer Komponente verschiedenen Fehlfunktionen zugeordnet werden und somit mehrfach in einem Klassenfehlerbaum auftreten können.

Es ist deshalb für ein mechatronisches Produkt mit mehr als einer Funktion nicht möglich, die Vorgehensweisen „Gleichmäßige Aufteilung konstanter Ausfallraten“ und „Akzentuierte Aufteilung anhand der Systemkomplexität“ anzuwenden. Lediglich die Methode, die auf Vorgängerinformationen basiert, ist bedingt anwendbar. Hierzu muss allerdings die funktionale Verschaltung zur Realisierung der TOP-Funktionen aus dem Vorgängerprodukt hervorgehen. Nur dann kann ein Abgleich zwischen neuem Konzept und Vorgängerprodukt erfolgen. Entsprechend der funktionalen Verschaltung der Komponenten ergibt sich dann, bei einer Verbesserung eines Bauteils im Vergleich zum Vorgängerprodukt, ein bzw. mehrere verbesserte Beanstandungsklassenwerte. Diese Vorgehensweise funktioniert allerdings nur, wenn sich vom Vorgänger- zum Nachfolgerprodukt die funktionale Verschaltung und die Art der Bauteile nicht maßgeblich ändern. Dies mag oft zutreffen, stellt aber sicherlich nicht die Regel dar.

Es kann festgestellt werden, dass keine der bekannten Aufteilungsstrategien sich universell für mechatronische Produkte eignet. Es ist insbesondere auch zu berücksichtigen, dass die Anwendung von Aufteilungsstrategien die Annahme impliziert, dass das Zuverlässigkeitsziel mit einer entsprechenden Lösungsvariante erreicht werden kann. Diese Annahme kann zu Entwicklungsschleifen führen, wenn erkennbar wird, dass gesteckte Ziele nicht oder nur mit unvertretbar hohem Mehraufwand erreicht werden können. Eine bessere Vorgehensweise ist es, den Zuverlässigkeitsaspekt mit in die Phase der Konzeptauswahl – also in einer frühen Entwicklungsphase – zu integrieren, um somit von vorn herein das Auftreten von zuverlässigkeitstechnisch bedingten Entwicklungsschleifen zu reduzieren oder gänzlich zu vermeiden. An diesem Punkt setzt diese Arbeit an.

# 4 Frühe Zuverlässigkeitsbewertung mechanischer Systemumfänge

In diesem Abschnitt wird aufgezeigt, wie bei mechanischen Systemen trotz der Datenungenauigkeit in frühen Entwicklungsphasen die Auswahl von Lösungsvarianten zuverlässigkeitstechnisch unterstützt werden kann.

## 4.1 Informationen über Mechanikaufbau in frühen Phasen

In [WÄC 1989] wird die Phase des Konzipierens als Prinzipphase beschrieben. Während dieser Phase geht es um die Bestimmung der Gesamtfunktion, der Funktionsstruktur und schließlich des technischen Funktionsprinzips. Die Darstellungsformen des zu entwickelnden Produktes in diesen frühen Phasen sind nach [WÄC 1989]

- verbale Beschreibung,
- Blockbild/Graph,
- Prinzipskizze (Strichbild),
- Prinzipschaltplan und
- materielle Muster.

Lechner [LEC 1994] nennt als Informationsquellen in frühen Produktentwicklungsphasen

- Erfahrung,
- bekannte Produkte,
- Vorentwicklungen,
- Kataloge, Richtlinien, Normen und
- Anforderungslisten.

Die aufgelisteten Informationsquellen werden durch [PAH 2003] um die Nutzung von Patent- und Literaturrecherchen ergänzt.

Die aufgelisteten Informationsquellen können aufgeteilt werden in allgemeingültige Quellen, wie z. B. Kataloge, Richtlinien und Normen, und spezifische Informationen, die nicht allgemein oder nur begrenzt zugänglich sind, wie z. B. Erfahrungswissen und Vorentwicklungskenntnisse. Die Bedeutung von Kenntnissen aus vorherigen Entwicklungen ist sehr groß, denn Neukonstruktionen machen neben Änderungs- und Anpas-

sungskonstruktionen nur einen kleinen Teil der gesamten Entwicklungstätigkeiten aus [LEC 1994].

Unterscheidungsmerkmal zwischen den genannten Konstruktionszwecken ist der Änderungsumfang. So werden bei der Neukonstruktion neue Lösungsprinzipien verwendet, während bei der Anpassungskonstruktion lediglich Einzelteile angepasst oder Dimensionen geändert, aber niemals neue Wirkungsprinzipien integriert werden. Somit kann festgestellt werden, dass im Fall von Neukonstruktionen weniger Ähnlichkeit zu Vorgängerprodukten vorliegt als bei Variantenkonstruktionen. Aber auch im Fall von Neukonstruktionen sind in einem Produkt oftmals Baugruppen und Elemente enthalten, die schon aus Vorgängerprodukten bekannt sind. Das entsprechende Wissen über den Vorgänger liegt in Form dokumentierter oder undokumentierter (Expertenwissen) Erfahrung vor und bereichert somit die zur Verfügung stehende Informationsbasis.

Von besonderer Bedeutung unter den zur Verfügung stehenden Informationen ist die Prinzipskizze des zu realisierenden Produktes, da sie eine Lösungsvariante einfach darzustellen vermag und bei der Findung von Lösungsvarianten ein Hauptkommunikationsmittel darstellt.

## 4.2 Prinzipskizzen als Informationsträger in der Konzeptphase

Ausgangspunkt für die Ermittlung von möglichen Lösungsvarianten im Rahmen der Konzeptphase sind Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt und hierbei insbesondere funktionale Anforderungen.

Ein wichtiges Kommunikationsmittel bei der Konzipierung mechanischer Strukturen sind sog. Prinzipskizzen. Anhand dieser Prinzipskizzen kann dargestellt werden, wie das spätere Produkt prinzipiell funktionieren soll. Dementsprechend finden sich in einer solchen Darstellungsform zumindest die Hauptfunktionsgruppen wieder. In **Bild 4-1** ist die Prinzipskizze eines Stufenlosgetriebes *(engl.: continuous variable transmission, CVT)* dargestellt. Zur Erläuterung sind die Hauptfunktionsgruppen bezeichnet. Solche Prinzipskizzen sind in der Literatur für verschiedenste Getriebearten zu finden [BER 1990], [BRE 2000], [LEC 1994].

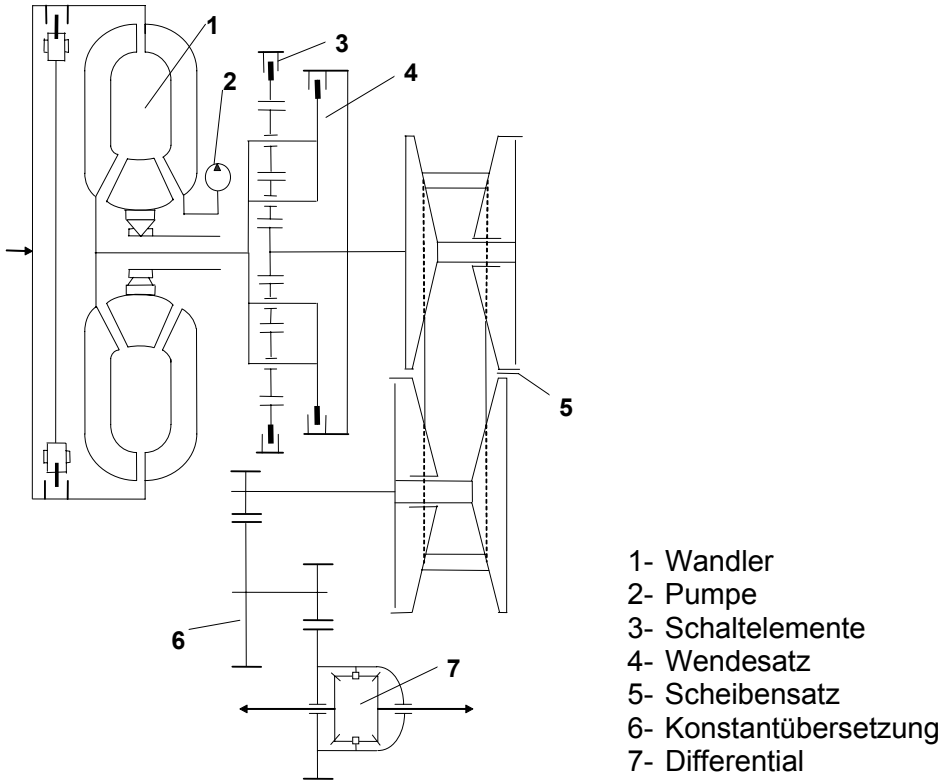


**Bild 4-1:** Prinzipskizze eines CVT [BRE 2000]

In der in **Bild 4-1** dargestellten Prinzipskizze sind Hauptelemente des zu entwickelnden Produktes zu erkennen. Als Anfahrelement wird ein Wandler mit Kupplungsüberbrückung genutzt; eine Ölpumpe dient zur Druckölversorgung. Mit einem Planetenrad-Wendesatz und den entsprechenden Kupplungen wird das Vorwärts- und Rückwärtsfahren ermöglicht. Eine Schubgliederbandanordnung gewährleistet die Drehzahl-Drehmoment-Wandlung. Eine Steuerung soll den Betriebsablauf des Getriebes regeln.

Auf Basis der Prinzipskizze und der entsprechenden verbalen Erläuterung liegen Informationen über

- den funktionellen Aufbau (Energieflüsse und Schnittstellen),
- die Art von Bauteilen und Baugruppen sowie über deren Anzahl und
- über die Baugruppenanordnung im Bauraum

vor.

In dieser Phase sind auch sämtliche Informationen aus der Anforderungsbeschreibung bekannt und können genutzt werden. Hierzu zählt u. a. auch die Vorgabe eines einzuhaltenden Gesamtbauraums.

Aus konstruktiver Sicht fehlen einer solchen Prinzipskizze im Vergleich zu einer fertig ausgearbeiteten Zeichnung hauptsächlich Informationen über

- die Art und Anzahl aller Bauteile und
- die genaue Dimensionierung und Geometrie der Bauteile.

So lässt die obige Prinzipskizze offen, welche Art von Ölpumpe zum Einsatz kommen soll. Die Anzahl der Bauteile geht bei einer ausgearbeiteten Zusammenbauzeichnung direkt aus der Stückliste hervor. Aus der in **Bild 4-1** gezeigten Prinzipskizze ist aber nicht ersichtlich, wie viele Planetenpaare in dem Planetenradsatz verbaut sind. Eine solche Information kann entweder durch Diskussion sofort erörtert werden, womit die Prinzipskizze schon konkretisiert wird, oder es bleibt diese Frage zunächst offen. Einer der Kernunterschiede zwischen Prinzipskizze und einer ausgearbeiteten Zeichnung besteht in der genauen Dimensionierung der Bauteile. In der Prinzipskizze ist lediglich die Information enthalten, dass ein solches Bauteil vorhanden sein muss. Etwaige Abmessungen innerhalb einer Prinzipskizze bzw. Größenverhältnisse zwischen verschiedenen Bauteilen sind oft nur grobe Näherungen. An dieser Stelle spielt die Erfahrung des Konstrukteurs eine bedeutende Rolle.

Ein Informationsträger, der an der Schnittstelle zwischen Konzeptphase und Entwurfsphase genutzt wird, ist die grobmaßstäbliche Zeichnung. In dieser Darstellungsform sind die meisten Bauteile vordimensioniert. Damit erlaubt eine grobmaßstäbliche Zeichnung, eine Lösungsvariante im Hinblick auf die Einhaltung eines zulässigen Bauraums zu überprüfen. Aus konstruktiver Sicht ist eine grobmaßstäbliche Zeichnung schon sehr aussagekräftig. Es sind alle Bauteile im Leistungsfluss in einer der späteren Realisierung sehr nahen Geometrie und Dimensionierung vorhanden. Der einzige Nachteil gegenüber der ausgearbeiteten Zeichnung ist, dass nicht unbedingt alle im System enthaltenen Bauteile erfasst sind. Der Anteil nicht enthaltener Teile ist allerdings im Vergleich zu Prinzipskizzen gering.

Im Folgenden wird gezeigt, welche Zuverlässigkeitsinformationen aus den geschilderten Datenträgern gewonnen werden können.

## 4.3 Zuverlässigkeitsanalyse in frühen Phasen

Von besonderer Bedeutung für die Zuverlässigkeitsarbeit in frühen Entwicklungsphasen sind die aufgrund der Informationsträger zugänglichen Eingangsdaten für die Zuverlässigkeitsbewertung von Lösungsvarianten. Es soll anhand des aus späten Entwicklungsphasen bekannten und in **Bild 4-2** dargestellten Ablaufs der Systemzuverlässigkeitsanalyse gezeigt werden, welche Aussagen das Informationsniveau in frühen Entwicklungsphasen erlaubt. Darauf aufbauend können Informationsdefizite erkannt

werden. Dies bildet den Ausgangspunkt für die Ermittlung des Bedarfs an neuen oder angepassten Methoden, um zu einer in frühen Entwicklungsphasen anwendbaren Vorgehensweise zu gelangen.

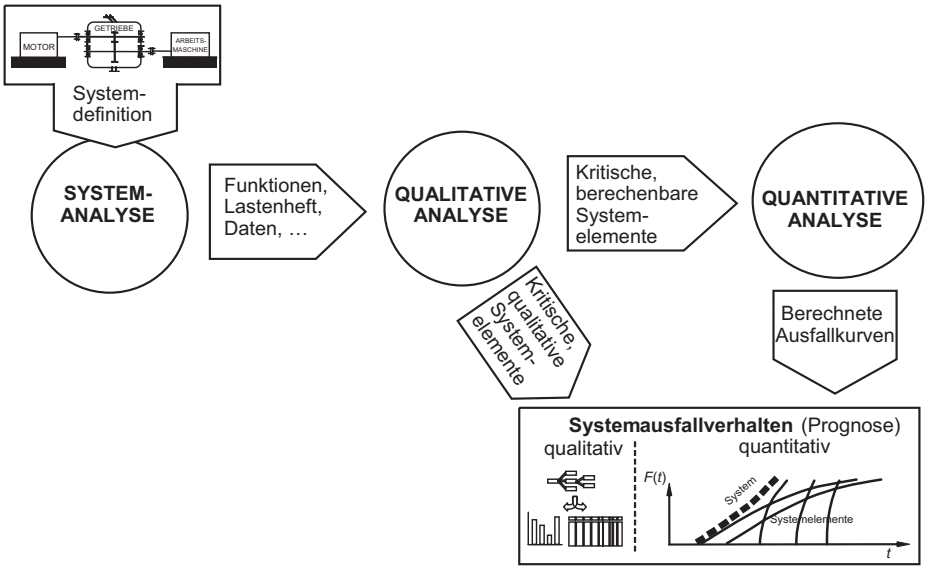


**Bild 4-2:** Ablauf der Systemzuverlässigkeitsanalyse [BER 2004]

### 4.3.1 Systemanalyse in frühen Phasen

Eine Systemanalyse auf Basis der in **Bild 4-1** gezeigten Prinzipskizze führt zu dem in **Bild 4-3** dargestellten Gliederungsbaum.

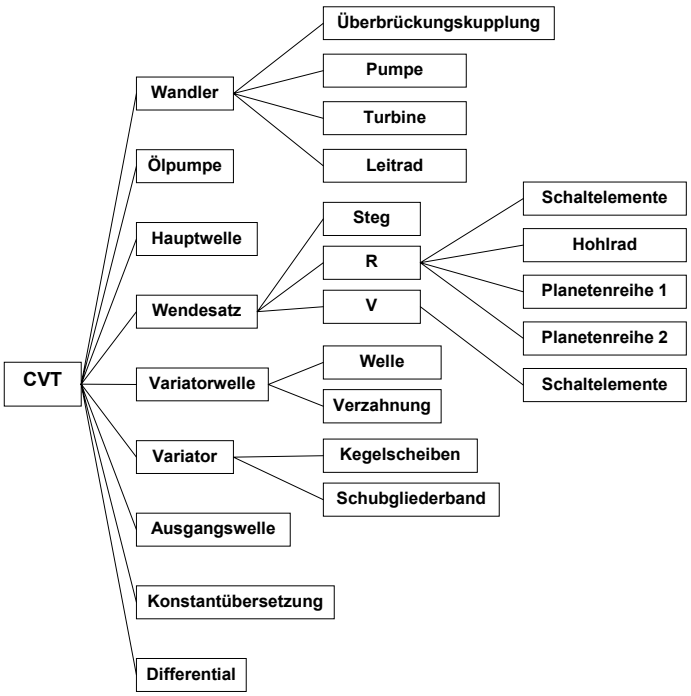


**Bild 4-3:** Gliederungsbaum eines CVT basierend auf einer Prinzipskizze

### 4.3.2 Qualitative Analyse in frühen Phasen

Für mechanische Systemumfänge hat sich aufbauend auf der Systemanalyse die sog. ABC-Analyse [BER 2004] bewährt. Mittels dieser Vorgehensweise werden Bauteile bzw. ihre Ausfallmechanismen in der jeweiligen Anwendung als zuverlässigkeitsrelevant bzw. nicht zuverlässigkeitsrelevant identifiziert. Die ABC-Analyse basiert hierbei auf der Betrachtung von Bauteilen unter dem Gesichtspunkt der Beanspruchungsart und der Möglichkeit einer gesicherten Lebensdauerberechnung. Das **Bild 4-4** illustriert den Zusammenhang. Lediglich C-Teile können für die Ermittlung der Zuverlässigkeit vernachlässigt werden. Es muss aber betont werden, dass es nicht korrekt ist, Bauteile aufgrund ihrer Art immer einer bestimmten Klasse zuzuordnen. Vielmehr hängt die Zuordnung von der jeweiligen Anwendung des Bauteils ab. Ein Beispiel hierfür sind Schaltelemente in einem Automatikgetriebe. In einem Stufenautomaten werden diese schlupfend betrieben, was zu permanentem Verschleiß führen kann. In einem CVT-Getriebe werden diese nicht schlupfend betrieben, woraus eine Zuordnung zur Klasse C folgen würde.

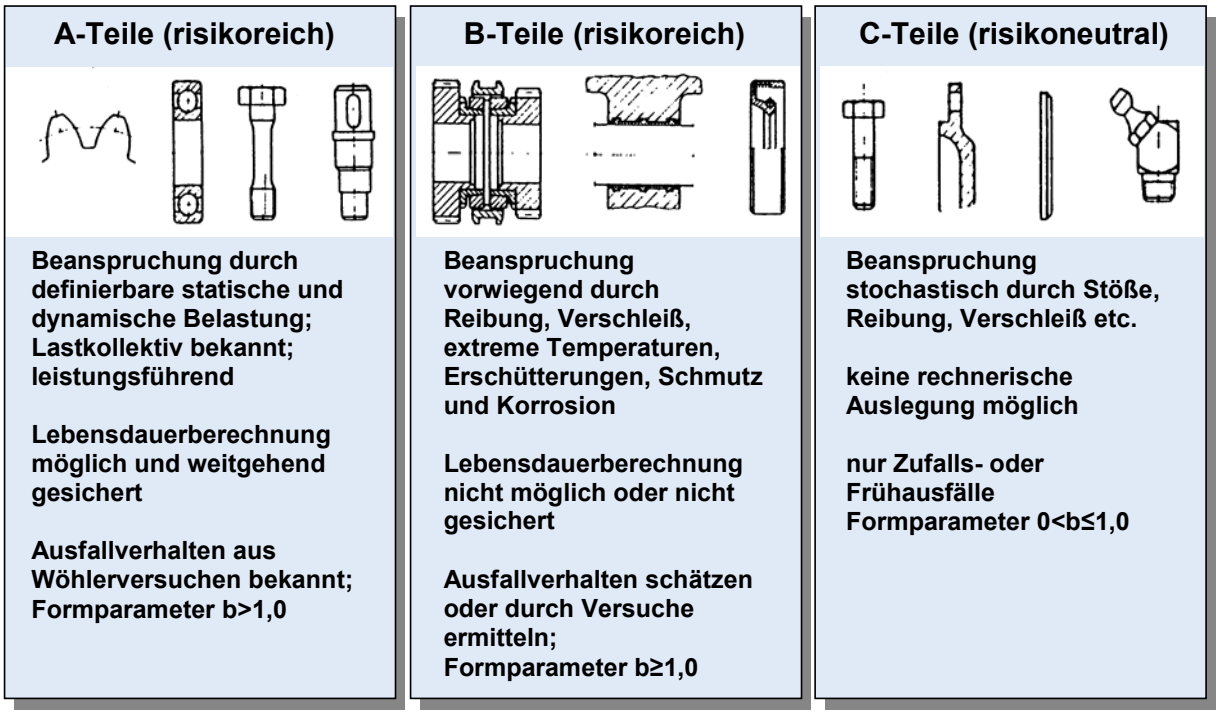


**Bild 4-4:** Grundlage der ABC-Analyse [BER 2004]

Der Nutzen der ABC-Analyse ist die mögliche Reduzierung des zu betrachtenden Systemumfangs. Im Falle der Prinzipskizze ist dies nicht das entscheidende Problem. Trotzdem könnte anhand der CVT Prinzipskizze in **Bild 4-1** ein Ergebnis der ABC-Analyse sein, dass der Steg des Planetenradsatzes sowie die Schaltelemente unter Berücksichtigung der funktionalen Nutzung als C-Teile einklassiert werden. Die ABC-Analyse ist also auch in der Konzeptphase einsatzfähig, sofern die Elemente bezüglich

ihrer funktionalen Beteiligung und der daraus folgenden Beanspruchungsart klassierbar sind. Dies ist für die meisten Mechanikumfänge der Fall.

Werden die Betrachtungen anhand von grobmaßstäblichen Zeichnungen durchgeführt, so ist der Detaillierungsgrad schon höher und es treten eventuell A- und B-Komponenten auf, die auf der Basis einer Prinzipskizze nicht erkannt werden konnten. Das Nichterkennen von Bauteilen findet seinen Eingang direkt in die Systemmodellierung und kann gravierende Folgen haben. Besäße ein nicht betrachtetes A-Teil z. B. eine geringe oder keine ausfallfreie Zeit $t_0$, so würde dies die Gesamtzuverlässigkeit des Systems stark beeinflussen. Es ist deshalb von großer Bedeutung, sich im Rahmen der Zuverlässigkeitsermittlung in frühen Phasen mit dem Risiko nicht berücksichtigter Bauteile zu befassen. Das **Bild 4-5** zeigt die Einzelteile und Baugruppen eines CVT und dokumentiert dadurch im Vergleich zur entsprechenden Prinzipskizze in **Bild 4-1** das vorhandene Risiko eindrucksvoll.

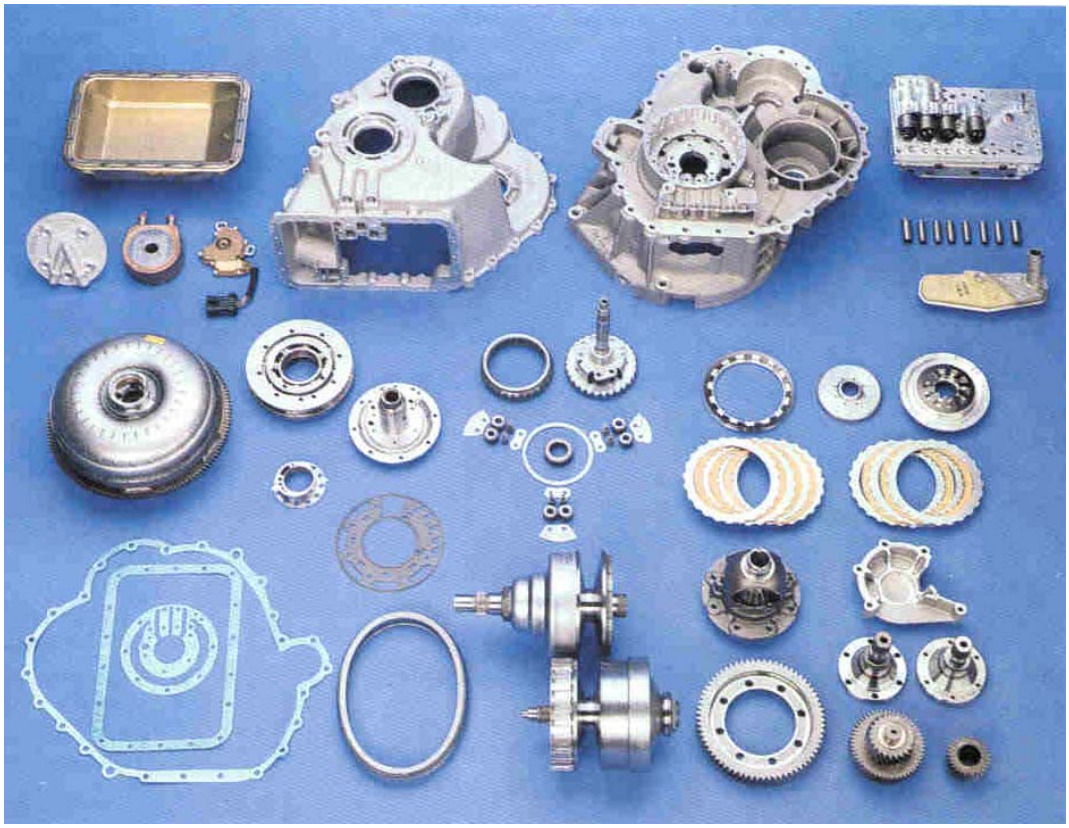

**Bild 4-5:** Die Einzelteile und Baugruppen eines CVT [BOO 1994]

In der Prinzipskizze fehlen im Vergleich zu **Bild 4-5** u. a.

- das Gehäuse,
- mehrere Lagerungen,
- die statischen und dynamischen Dichtungen sowie

- die Anzahl der Schaltelemente.

Es handelt sich bei den in der Prinzipskizze nicht enthaltenen Bauteilen teilweise um solche, die die Lebensdauer eines Systems stark beeinflussen können. So unterliegen Lagerungen und dynamische Dichtungen einem ermüdungs- und verschleißorientierten Ausfallverhalten.

Dementsprechend ist es als sehr risikoreich anzusehen, ohne weitere Betrachtungen die Konzeptdarstellung in ein Modell für die Systemzuverlässigkeit, wie z. B. einen Fehlerbaum, zu übersetzen und dieses als Ausgangspunkt für die Zuverlässigkeitsanalyse zu nutzen. Vielmehr bedarf es Vorgehensweisen, die eine bauteilmäßige Konkretisierung des zu entwickelnden Produktes in der Konzeptphase zulassen, um die Zuverlässigkeitsmodellierung realitätsnäher zu gestalten. Ansätze hierfür werden für mechanische Systeme im Folgenden vorgestellt.

Checklisten:
Checklisten ermöglichen das einfache Durchgehen und Analysieren des Konzepts. Dabei sollen die Checklisten eine möglichst große Vielfalt an möglichen gefährdeten Teilen enthalten. Jeder einzelne Punkt der Checkliste soll durchgearbeitet werden. Der Vorteil dieses Vorgehens liegt darin, dass das Expertenteam bei jedem Checkpunkt die Frage, ob ein entsprechendes Bauteil vorhanden ist, mit „Ja“ oder „Nein“ beantworten muss. Ist einmal das Vorhandensein einer Bauteilart festgestellt worden, so muss innerhalb des Teams eruiert werden, wie viele der Bauteile in welcher Ausprägung vorhanden sind. Nachteilig hierbei ist, dass in einem System mitunter sehr viele Bauteile der gleichen Art enthalten sein können. Dies kann dazu führen, dass bei großen Systemen mit zunehmender Analysedauer ungenauer gesucht wird, was Auswirkungen auf die Güte der Analyse haben kann.

Abgleich mit Vorgängerprodukten:
Eine andere Möglichkeit die Vollständigkeit der Systemelemente zu garantieren, ist die Analyse von Vorgängerprodukten. Hierin enthalten ist der Gedanke der Erweiterungskonstruktion. Je ähnlicher ein neues Produkt seinem Vorgänger ist, desto unwahrscheinlicher ist es, bei einer Bauteilanalyse des Vorgängers Bauteile des Neuproduktes nicht zu berücksichtigen. Zumindest wird dieses Risiko auf neue Baugruppen beschränkt.

Schnittstellenanalyse/ Kraft-Leistungsflussanalyse:
Ein weiterer Ansatz zur Systemkonkretisierung in frühen Phasen ist eine Analyse, die auf der Betrachtung von Komponentenschnittstellen basiert. Dieser Ansatz nutzt den Umstand, dass jedes Bauteil innerhalb eines Systems mit einem oder mehreren anderen direkt in Verbindung steht. Diese Teile haben dann eine gemeinsame Schnittstelle. Da in der Konzeptphase schon einige Bauteile direkt bekannt sind, können durch eine

Schnittstellenanalyse die jeweils angrenzenden Bauteile identifiziert werden. Auf diese Art und Weise wird das Produkt auf Basis einer Konzeptdarstellung bauteilmäßig konkretisiert. Diese Vorgehensweise wird beendet durch das Erreichen der Systemgrenze, die aus dem Lastenheft hervorgeht.

Eine weniger umfassende und einfachere Vorgehensweise stellt eine Leistungsflussanalyse dar. Grundlage dieser Art der Systemkonkretisierung ist, dass die kritischen Teile bei mechanischen Systemumfängen meistens im Leistungsfluß liegen bzw. diesen umgeben. Ermüdungs- und verschleißbedingte Ausfallarten wie Schwingbrüche, Abrieb und Ausbrüche entstehen hauptsächlich an Stellen, an denen Leistung übertragen wird. Wird konsequent die in das System eingehende Leistung verfolgt, Leistungsverzweigungen und -zusammenschlüsse sowie das Verlassen des Systems berücksichtigt, so ist zumindest abgesichert, dass die kritischsten Teile bei der Zuverlässigkeitsmodellierung berücksichtigt werden.

Funktionsrealisierungsprüfung:
Diese Vorgehensweise kann dazu dienen, die Konzeptstruktur auf die Realisierbarkeit der geforderten Funktionen hin zu überprüfen. Können diese dargestellt werden, so fehlen zumindest keine grundsätzlichen Funktionseinheiten. Es ist hierbei allerdings zu berücksichtigen, dass es sich bei der Überprüfung der Funktionsrealisierung weniger um eine Konzeptkonkretisierung als vielmehr um eine Überprüfung der Prinzipskizze handelt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass es basierend auf Prinzipskizzen eines bestimmten Aufwandes bedarf, um ein System aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht zu konkretisieren. Zudem ist anzumerken, dass es sehr vorteilhaft ist, wenn ein Vorgängerprodukt bekannt ist. Wird eine komplette Neuentwicklung durchgeführt, so bieten die genannten Methoden eine Hilfestellung; es bedarf allerdings eines sehr systematischen und zeitintensiven Vorgehens.

Liegt eine grobmaßstäbliche Zeichnung vor, so ist die Gefahr, kritische Teile bei der Modellierung nicht zu berücksichtigen, stark gemindert. Es ist allerdings zu bedenken, dass die Anfertigung einer grobmaßstäblichen Zeichnung im Vergleich zu einer Prinzipskizze sehr aufwendig ist. Somit ist es möglich, dass eine grobmaßstäbliche Zeichnung nicht angefertigt worden wäre, wenn auf Basis der entsprechenden Prinzipskizze eine nicht ausreichende quantitative Zuverlässigkeit ermittelt wurde. Es ist also aus betriebswirtschaftlicher Sicht nicht automatisch besser, die Zuverlässigkeitsbetrachtungen auf Basis der grobmaßstäblichen Darstellungsform durchzuführen. Vielmehr sollte im Einzelfall entschieden werden, welche Informationsbasis ausreichend ist. Generell ist allerdings ein Zusammenhang zwischen Komplexität des zu entwickelnden Produkts und dem Anspruch an die Informationsbasis vorhanden.

Die bisher geschilderten Zusammenhänge befassen sich maßgeblich mit der qualitativen Zuverlässigkeitsarbeit. Sie bilden die Grundlage für eine effektive quantitative Analyse, auf deren besondere informationstechnische Rahmenbedingungen in frühen Entwicklungsphasen im Folgenden eingegangen wird.

## 4.4 Informationsdefizite in frühen Phasen

Am Anfang der quantitativen Zuverlässigkeitsanalyse mechanischer Systeme steht die Ermittlung der äußeren Belastungen, die auf die einzelnen Systemkomponenten wirken. Für einfache Systeme, wie z. B. ein nicht schaltbares Übersetzungsgetriebe mit konstantem Eingangsdrehmoment und konstanter Eingangsdrehzahl, lassen sich die Belastungen einfach ermitteln. Für komplexere Systeme, wie z. B. schaltbare oder stufenlose Getriebe mit variierenden Eingangsdrehzahlen und -momenten, ist die Belastungsermittlung weitaus schwieriger. Solche Systeme können wirkungsvoll mit Simulationsprogrammen [WEI 2005] modelliert und simuliert werden. Dies erlaubt es, für die einzelnen Bauteile Verläufe der äußeren Belastung zu ermitteln. Im Falle der Getriebeentwicklung gehen viele verschiedene Parameter, wie z. B. Streckenprofile, Fahrerverhalten, Schaltstrategien und andere Daten, in eine Simulation ein. Entscheidend für die Anwendbarkeit in frühen Entwicklungsphasen ist allerdings der Umstand, dass die für eine Simulation notwendigen technischen Größen des zu bewertenden Systems oft schon frühzeitig genug abgeleitet weren können. So werden für die simulative Ermittlung von äußeren Belastungen eines Fahrzeuggetriebes Eingangsdaten, wie z. B. Übersetzungsverhältnisse, Fahrzeugmassen, Triebstrangdämpfungen und -steifigkeiten, benötigt.

Es ist trotz der typischerweise großen Undetailliertheit einer Prinzipskizze zusammen mit Angaben aus dem Lastenheft möglich, die benötigten Simulationseingangsdaten bereitzustellen. Sind z. B. die Übersetzungsverhältnisse innerhalb eines Getriebes im Lastenheft vorgeschrieben, liegen erste Informationen über das Fahrzeuggewicht vor und können bestimmte Annahmen über das Dämpfungsverhalten und die Steifigkeit des Triebstrangs gemacht werden, was aufgrund von Erfahrungswissen in vielen Fällen möglich ist, so kann mittels Simulationsprogrammen ein Lastkollektiv für die Bauteile abgeleitet werden. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass entsprechende Eingangsdaten teilweise von Ungenauigkeiten geprägt sind. Trotzdem können solche Informationen durch entsprechende mathematische Verfahren, wie z. B. eine Monte Carlo Simulation, berücksichtigt werden.

Ein kritischer Schritt bei der quantitativen Zuverlässigkeitsanalyse leistungsführender Mechanikumfänge ist der Übergang von äußeren Belastungen auf bauteilinterne Beanspruchungen. Hierfür werden sehr detaillierte Geometrieangaben, wie z. B. Zahnfuß-

radien, oder Qualitätsfaktoren für das jeweilige Bauteil benötigt. Diese liegen auf Basis der Prinzipskizze nicht vor und können auch durch eine grobmaßstäbliche Zeichnung nur sehr bedingt angegeben werden.

Nach der Beanspruchungsermittlung treten noch weitere Informationsdefizite auf. Mittels der Beanspruchungskollektive wird unter Nutzung einer Schadensakkumulationshypothese und entsprechender Wöhlerlinien eine Lebensdauer (meist die $B_{10}$-Lebensdauer) ermittelt. Dies setzt voraus, dass der entsprechende Werkstoff bekannt ist. Nach der Bestimmung der $B_{10}$-Lebensdauer kann z. B. entsprechend [BER 2004] über den Verhältnisfaktor

$$f_{tb} = \frac{t_0}{B_{10}} \tag{4.1}$$

eine ausfallfreie Zeit $t_0$ ermittelt werden. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass es sich bei dem Faktor $f_{tb}$ keinesfalls um einen deterministischen Wert handelt. Vielmehr ist dieser, insbesondere, wenn keine weiteren Informationen vorliegen, als Zufallsvariable in einem bestimmten Streubereich definiert. Ähnlich verhält es sich mit dem Weibull-Formparameter $b$, der nur für wenige Maschinenelemente, wie z. B. Wälzlager, aus Normen und Katalogen entnommen werden kann. Meist setzt dies allerdings die Einhaltung der Betriebsbedingungen voraus, auf denen die Katalogwerte basieren. Werden andere als die in den Quellen hinterlegten Betriebsbedingungen wirksam, so kann das real beobachtbare Ausfallverhalten von den hinterlegten Ausfallparametern abweichen, wie z. B. aus [JÄG 2004] zu folgern ist.

Zusätzlich hierzu ist hervorzuheben, dass die oft angenommene Konstanz des Formparameters $b$ für verschiedene Ausfallarten in Realität zumindest nicht immer gilt. Diese Tatsache kann leicht anhand der in [DIN 3990 T41] hinterlegten Wöhlerlinien für Zahnbruch und Grübchenbildung nachvollzogen werden. Die verschiedenen Ausfallwahrscheinlichkeiten zugeordneten Wöhlerlinien haben typischerweise unterschiedliche Steigungen, wobei sich die Wöhlerlinien mit sinkenden Beanspruchungen voneinander entfernen. Dieser Umstand ist u. a. in **Bild 2-1** ersichtlich. Dies führt dazu, dass bei höheren Beanspruchungen das Ausfallgeschehen zeitlich konzentrierter auftritt als bei niedrigeren Beanspruchungen. Dieser Effekt äußert sich in unterschiedlichen, beanspruchungsabhängigen $b$-Werten.

Aus der Gesamtbetrachtung der Situation in frühen Entwicklungsphasen bezogen auf das bekannte Vorgehen zur Systemzuverlässigkeitsanalyse ergibt sich, dass sowohl die vergleichsweise undetaillierte Systemdarstellung in frühen Phasen als auch existierende Ungenauigkeiten bei den Eingangsdaten von Lebensdauermodellen die Zuverlässigkeitsarbeit beeinträchtigen können. Hierbei ist die Nichtberücksichtigung von kriti-

schen Komponenten im Systemmodell als sehr bedeutend einzustufen; allerdings besteht die Möglichkeit, dieses Risiko durch die erläuterten Ansätze zu mindern.

## 4.5 Berücksichtigung von Ungenauigkeiten in frühen Entwicklungsphasen

Die quantitative Zuverlässigkeitsanalyse mechanischer Produkte leidet in frühen Phasen an dem Nachteil sehr ungenauer Bauteildimensionen. Anhand einer Prinzipskizze ist das umzusetzende Produkt ohne weitere Restriktionen beliebig skalierbar und somit, entsprechend der Stress-Strength-Inference, beliebig zuverlässig. Dementsprechend kann gefolgert werden, dass zumindest auf Basis einer nicht dimensionierten Prinzipskizze das bekannte, auf der Nutzung von Bauteilabmaßen basierende Vorgehen zur Lebensdauerberechnung nicht anwendbar ist.

Dies trifft auf die Anwendung einer grobmaßstäblichen Zeichnung nicht mehr zu, da hier die Bauteildimensionen zwar nicht exakt, aber mit vergleichsweise geringen Streubreiten vorliegen. Im Weiteren soll aber die Prinzipskizze Grundlage der Betrachtungen sein, da hiermit universellere Vorgehensweisen abgeleitet werden können.

Meist liegt zusätzlich zu einer Prinzipskizze eine Bauraumrestriktion, die z. B. aus dem Lastenheft hervorgeht, für die Produktentwicklung vor. Der Bauraum für ein Produkt wird in den drei räumlichen Dimensionen eingeschränkt. Dieser Restriktion müssen sich alle zu bewertenden Konzepte beugen und es kann unter Berücksichtigung dieser Restriktion das beste Konzept – im Sinne der höheren Systemzuverlässigkeit – ermittelt werden. Dadurch, dass sich die Lebensdauer bei diesem Vorgehen aus dem zur Verfügung stehenden Bauraum ergibt, existiert ein Unterschied zur üblichen Auslegung von Maschinenelementen. Hier werden Dimensionen in Abhängigkeit von Belastungen festgelegt; der Bauraum ergibt sich folglich.

Die im Folgenden vorgestellte Vorgehensweise nutzt festliegende Bauraumrestriktionen und Informationen über die äußere Belastung als Ausgangspunkt und ermittelt über auftretende Beanspruchungen die Lebensdauer und Zuverlässigkeit der Bauteile. Das Vorgehen soll exemplarisch anhand der folgenden Beispiel-Entwicklungsaufgabe demonstriert werden.

Es wird angenommen, dass die folgenden Anforderungen zur Entwicklung eines Getriebes vorliegen:

- Drehmomentwandlung von 200 Nm auf 400 Nm,
- Werkstoffvorgabe: 20 MoCro 4,

- Bauraumrestriktionen: $D < 25$ mm, $C < 130$ mm, $H < H_{max}$ und
- Drehrichtung am Abtrieb ist irrelevant.

Um verschiedene Szenarien zu definieren, werden drei verschiedene Unterfallbeispiele betrachtet, die sich jeweils in der zugestandenen Bauraumhöhe $H_{max}$ unterscheiden. Es werden hierbei für den Stufenradsatz die Szenarien $H_{max} = 160$ mm, $H_{max} = 180$ mm und $H_{max} = 200$ mm unterschieden. Der Planetenradsatz behält in allen drei Szenarien die identische Bauraumhöhe von 130 mm, da diese bei diesem Konzept durch die Bauraumbreite $C$ vorgegeben ist.

Ein imaginäres Entwicklungsteam habe für die oben gestellte Aufgabe zwei Lösungskonzepte ausgearbeitet. Wie in **Bild 4-6** zu sehen ist, handelt es sich hierbei um einen einfachen Stufen- bzw. Planetenradsatz. Die umhüllenden Quader stellen die von beiden Konzepten einzuhaltende Bauraumrestriktion dar.

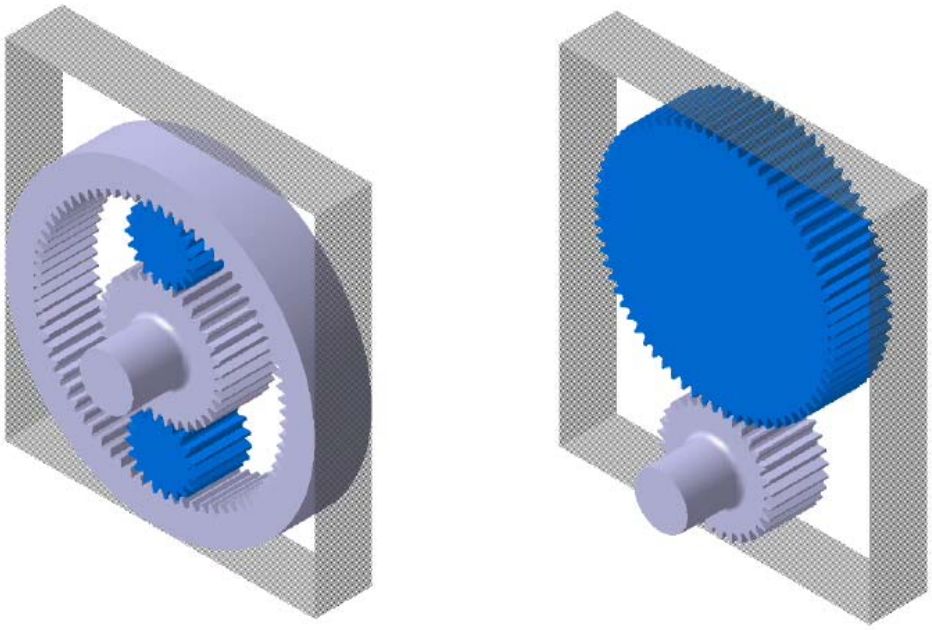

**Bild 4-6:** Die zu bewertenden Konzepte: Planeten- und Stufenradsatz [GAN 2006]

Der Planetenradsatz (Konzept 1) ist geprägt von der Belastungsaufteilung auf die Planeten, was zu geringeren Beanspruchungen führt und einen positiven Effekt auf die Lebensdauer der Komponenten hat. Der Stufenradsatz (Konzept 2) besteht lediglich aus zwei Bauteilen, Ritzel und Rad. Konzept 1 umfasst eine Sonne, ein Hohlrad, zwei Planeten und die entsprechenden Planetenlager, was zu insgesamt sieben zuverlässigkeitstechnisch relevanten Bauteilen führt.

Liegen die zu bewertenden Konzepte fest, werden die Systemelemente bestimmt, aus denen sich die Zuverlässigkeitsmodellierung, z. B. in Form eines Zuverlässigkeitsblockschaltbildes, ergibt. Bei den Zahnrädern sind Zahnbruch und Grübchenbildung

dominierende Effekte. Wälzlager fallen aufgrund Grübchenbildung aus. Dementsprechend umfasst das Blockdiagramm von Konzept 1 zwölf Systemelemente und jenes von Konzept 2 vier Systemelemente. Die zwölf Systemelemente von Konzept 1 ergeben sich wie folgt: Viermal Bruch und Grübchen der Räder plus zweimal Grübchen der Lager plus zweimal Grübchen auf der Gegenflanke der Planeten. Die bisher genutzten Informationen sind in frühen Phasen aufgrund der vergleichsweise guten Bekanntheit mechanischen Ausfallverhaltens gänzlich vorhanden. Trotz der Lastteilung entspricht das Zuverlässigkeitsblockdiagramm beider Konzepte einer reinen Serienstruktur.

Im Gegensatz zu elektronischen Produkten hat die Anzahl der Systemelemente bei mechanischen Strukturen nur eine sehr geringe Aussagekraft im Hinblick auf die zu erwartende Systemzuverlässigkeit. Dies hängt damit zusammen, dass die Zuverlässigkeit mechanischer Komponenten entsprechend der Stress-Strength-Inference stark von den äußeren Belastungen abhängt. Dementsprechend können Methoden, wie z. B. die Parts Count Method [BIR 1997], hier nicht sinnvoll angewandt werden. Eine Belastungsreduktion kann wie im Falle des Planetensatzes durch Lastteilung erfolgen und zur Folge haben, dass trotz eines Verhältnisses der konzeptbedingten Systemelemente von 3 (zwölf zu vier) der Planetenradsatz eine höhere Systemlebensdauer aufweist als der „einfache“ Stufenradsatz. Auch das eventuelle Vorhandensein von ausfallfreien Zeiten schwächt die Anwendbarkeit der Parts Count Method.

Basis für die weiteren Betrachtungen sind die in [DIN 3990 T41] hinterlegten Wöhlerlinien für Zahnräder und die in [DIN 3990 T2] und [DIN 3990 T3] dargelegten Berechnungsvorschriften für die Tragfähigkeit von Stirnrädern. Insbesondere für mechanische Bauteile sind die Berechnungstechniken sehr aussagekräftig, da sich über lange Zeit grundsätzliche und anerkannte Methoden entwickelt haben.

Zuerst werden mittels der Zusammenhänge

$$\sigma_F = \frac{F_t}{b_{Rad} \cdot m_n} \cdot Y_\beta \cdot Y_\varepsilon \cdot Y_{FS} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta} \tag{4.2}$$

und

$$\sigma_H = Z_B \cdot \sqrt{K_A \cdot K_V \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\alpha}} \cdot \left(Z_H \cdot Z_E \cdot Z_\varepsilon \cdot Z_\beta\right) \cdot \sqrt{\frac{F_t}{d_1 \cdot b_{Rad}} \cdot \frac{u+1}{u}} \tag{4.3}$$

die Beanspruchungen der Zahnflanken und -füße ermittelt. Hierbei ist zu beachten, dass viele der in den beiden obigen Gleichungen angegebenen Faktoren von Beginn an im Rahmen der Anforderungen feststehen. Hierzu zählen z. B. die Breite $b_{Rad}$ der Räder oder das Übersetzungsverhältnis $u$. Andere Faktoren basieren auf Konstrukti-

onsregeln oder Erfahrungswerten, was sie in bestimmten Grenzen vorhersagbar macht. So existieren z. B. für den auszuwählenden Verzahnungsmodul $m_n$ entsprechende Bestimmungsregeln [NIE 1989]. Wieder andere Faktoren können in der Konzeptphase nur mit Unsicherheiten angegeben werden. Hierzu sind beispielsweise die Fertigungsqualität und die endgültige äußere Belastung zu zählen. Unsicherheiten können aber z. B. durch die Definition der unsicheren Größen als Zufallsvariablen und die entsprechende Nutzung von Verteilungen gehandhabt werden.

Für den Fall, dass die äußere Belastung als Zufallsvariable und somit stochastisch verteilt beschrieben wird, führt dies zu stochastisch verteilten Beanspruchungen und unter Nutzung entsprechender Wöhlerlinien zu verteilten Lebensdauerquantilen.

In [DIN 3990 T41] sind werkstoffabhängige Wöhlerlinien für das 1 %- und das 10 %-Lebensdauerquantil bezüglich der Ausfallarten Grübchenbildung und Zahnbruch gegeben. Hiermit ist es möglich, bei einem bestimmten Beanspruchungshorizont die Parameter einer zweiparametrigen Weibullverteilung zu ermitteln, die für diese Betrachtungen als Modellannahme dienen soll. Hierzu werden die $B_1$- und die $B_{10}$-Lebensdauer in die Gleichung der Weibullverteilungsfunktion

$$F(t) = 1 - e^{\left(\frac{t}{T}\right)^{-b}} \tag{4.4}$$

eingesetzt. Dadurch ergibt sich ein Gleichungssystem mit zwei Gleichungen und zwei Unbekannten

$$0{,}01 = 1 - e^{\left(\frac{B_1}{T}\right)^{-b}} \tag{4.5}$$

$$0{,}1 = 1 - e^{\left(\frac{B_{10}}{T}\right)^{-b}}, \tag{4.6}$$

aus dessen Lösung sich die beiden gesuchten Verteilungsparameter $T$ und $b$ ergeben.

Ein entscheidendes Problem bei der Nutzung von Wöhlerlinien ist die große Sensitivität der Lebensdauer im Hinblick auf schwankende Beanspruchungen, was sich anhand von Wöhlerexponenten mit Werten von typischerweise $k > 10$ äußert. Eine um 10 % höhere Beanspruchung führt bei $k = 10$ zu einer um den Faktor 2,59 geringeren Lebensdauer. Da die Beanspruchung eines Bauteils von vielen Einflüssen abhängig ist, die in der Konzeptphase nicht exakt festzulegen sind, ist es dementsprechend als riskant anzusehen, auf Basis einer eingeschränkten Datenlage eine absolute Lebensdauer zu ermitteln und diese mit den Anforderungen zu vergleichen. Vielmehr ist es das Ziel, Ungenauigkeiten als solche in der Berechnung zu berücksichtigen.

Um die $B_1$- und die $B_{10}$-Lebensdauer zu erhalten, müssen zuerst die Beanspruchungen ermittelt werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die im Folgenden aufgelisteten, entsprechend **Gleichung 4.2** und **Gleichung 4.3** die Beanspruchung beeinflussenden Faktoren in einer frühen Entwicklungsphase nicht exakt bestimmt werden können. Es handelt sich im Rahmen dieses Beispiels um

- das Eingangsdrehmoment $M$ und die daraus folgende Tangentialkraft $F_t$,
- den Qualitätsfaktor $K_1$ und
- die Faktoren $K_{h\alpha}$, und $K_{f\alpha}$.

Neben diesen mögen in Realität auch noch weitere Faktoren von Unsicherheiten begleitet sein; für die Belange dieses Beispiels sollen die genannten allerdings genügen. Das Vorgehen wäre bei zusätzlichen als verteilt anzunehmenden Faktoren prinzipiell identisch.

Die mittels stochastischer Verteilungen beschriebenen Faktoren haben folgende konkrete Ausprägung:

- Das Drehmoment $M$ wird gleichverteilt [285 Nm; 315 Nm] beschrieben.
- $K_1$ wird in Form einer Dreiecksverteilung [8,5; Modalwert 13,6; 21,8] angegeben.
- $K_{h\alpha}$ und $K_{f\alpha}$ werden ebenfalls mittels einer Dreiecksverteilung [1; Modalwert 1,04; 1,15] beschrieben.

Mittels einer Monte Carlo Simulation, deren Grundlagen u. a. in [MAR 2002] und [SOB 1991] geschildert sind, werden in jeder Replikation für die stochastisch verteilt angenommenen Faktoren $M$, $K_{1,}$, $K_{h\alpha}$ und $K_{f\alpha}$ den Verteilungsfunktionen entsprechend zufällige Werte ermittelt. Darauf folgend werden diese Werte zusammen mit den anderen notwendigen Eingangsdaten genutzt, um entsprechend **Gleichung 4.2** und **Gleichung 4.3** die resultierenden Beanspruchungen zu berechnen. In einem weiteren Schritt werden die sich ergebenden Spannungen genutzt, um mittels der in [DIN 3990 T41] vorgegebenen Wöhlerlinien die Verteilungsparameter einer zweiparametrigen Weibullverteilung zu bestimmen. Dieser Vorgang erfolgt für alle entsprechenden Ausfallarten. So müssten für den Stufenradsatz vier Weibullparametersätze ermittelt werden. Diese Parameter werden in der jeweiligen Replikation genutzt, um die $B_{10}$-Lebensdauer des Systems zu bestimmen. Hierzu ist ein iteratives Verfahren notwendig. Es ergibt sich somit in jeder Replikation eine $B_{10}$-Lebensdauer für den Planeten- und den Stufenradsatz.

Werden diese Lebensdauern für die beiden zu vergleichenden Konzepte in Form eines Summenhäufigkeitsdiagramms aufgetragen, so ergibt sich der in **Bild 4-7** dargestellte

Graph. Es ist zu berücksichtigen, dass entsprechend der drei definierten Bauhöhenszenarien drei jeweils voneinander verschiedene Ergebnisdiagramme vorliegen. Mit steigenden zulässigen Bauraumhöhen erreicht der Stufenradsatz höhere Lebensdauern. Dies äußert sich in einer Rechtsverschiebung der Verteilungsfunktion der $B_{10}$-Lebensdauer. Der Planetenradsatz hingegen kann von einer Erweiterung der zulässigen Bauhöhe zuverlässigkeitstechnisch nicht profitieren. Hierzu müsste gleichzeitig mit der Bauraumhöhe auch die Bauraumbreite erweitert werden. Nur dann könnte der Planetenradsatz größer und somit zuverlässiger dimensioniert werden.

Auf Basis der bisherigen Betrachtung wird ein Entscheidungsinstrument definiert, das es erlaubt, eine Auswahl aus zwei oder mehreren zur Verfügung stehenden Konzepten zu unterstützen. Anhand der Graphen in **Bild 4-7** lässt sich zwar erkennen, dass bei einer Bauraumhöhe von z. B. 160 mm der Planetenradsatz dem Stufenradsatz stark überlegen ist; diese Aussage relativiert sich allerdings mit wachsenden zulässigen Bauraumhöhen. Somit ist eine quantitative Aussage über die Konzeptüberlegenheit im Hinblick auf die Lebensdauer notwendig.

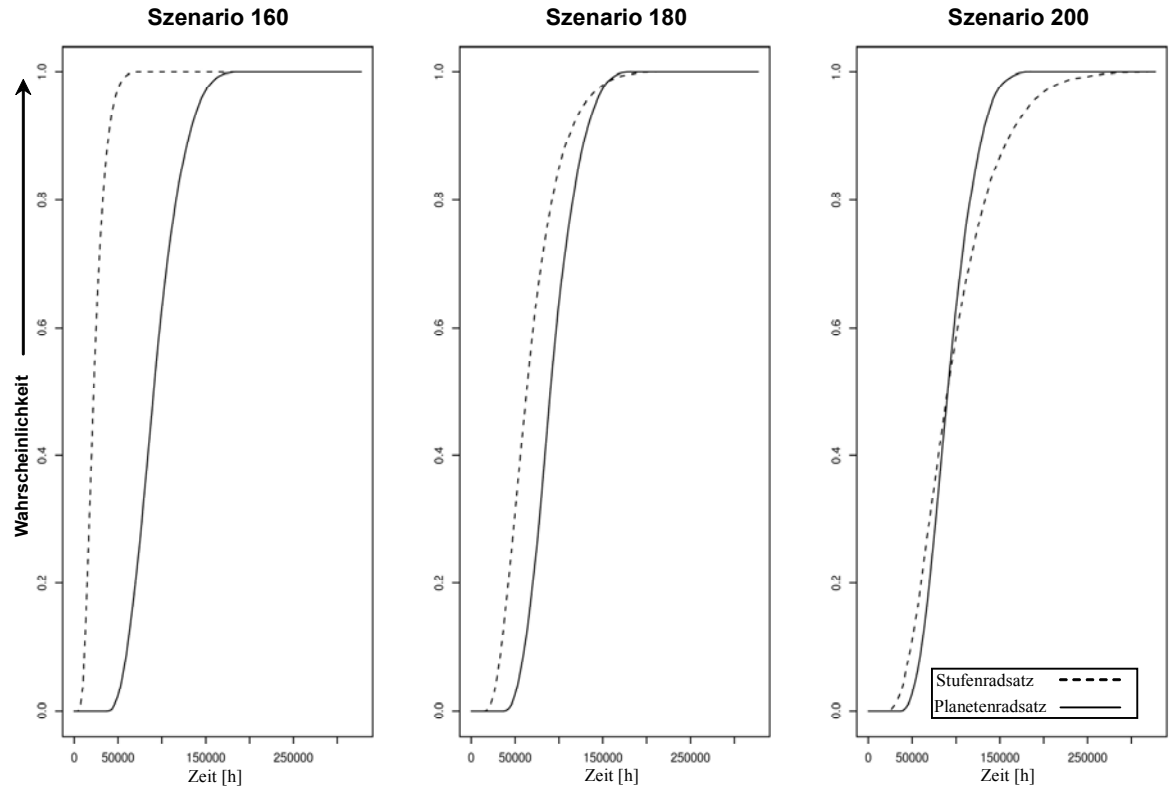


**Bild 4-7:** Verteilung des 10 %-Lebensdauerquantils der beiden Konzepte [GAN 2006]

Hierzu wird in jeder Monte Carlo Replikation festgestellt, ob die ermittelte $B_{10}$-Lebensdauer des Planetenradsatzes größer oder kleiner als diejenige des Stufenradsatzes ist. Der Quotient

$$\frac{\sum_{n=1}^{N} \delta_n}{N} \approx P(B_{10-Planetenradsatz} > B_{10-Stufenradsatz}), \tag{4.7}$$

mit

$$\delta_n = \begin{Bmatrix} 1 & falls\ B_{10-Planetenradsatz} > B_{10-Stufenradsatz} \\ 0 & falls\ B_{10-Planetenradsatz} < B_{10-Stufenradsatz} \end{Bmatrix} \text{ und}$$

$N = Replikationsanzahl$

beschreibt dann einen Schätzwert für die Überlegenheitswahrscheinlichkeit des Planetenradsatzes gegenüber dem Stufenradsatz.

In **Tabelle 4-1** sind die entsprechenden Überlegenheitswahrscheinlichkeiten auch für die Betrachtung der $B_{20}$-Lebensdauer ersichtlich.

**Tabelle 4-1:** Vergleich von $B_{q\text{-Planet}}$ und $B_{q\text{-Stufe}}$ für q = 10 % und 20 %

| $H_{max}$ | $P(B_{10-Planet} \geq B_{10-Stufe})$ | $P(B_{20-Planet} \geq B_{20-Stufe})$ |
|---|---|---|
| Szenario 160 | 1,0000 | 1,0000 |
| Szenario 180 | 0,9650 | 0,9368 |
| Szenario 200 | 0,5055 | 0,4354 |

Die in **Bild 4-7** ablesbaren Ordinatenwerte der Schnittpunkte der beiden Verteilungsfunktionen entsprechen dabei nicht den Werten in **Tabelle 4-1**. Der Grund hierfür ist, dass die Graphen die numerische Ordnung aller mittels der Monte Carlo Simulation ermittelten $B_{10}$-Lebensdauern darstellen. Entscheidend für die Ermittlung der Überlegenheitswahrscheinlichkeit ist aber der Vergleich innerhalb einer Replikation.

Für den Vergleich von Systemen eignen sich nicht nur eindimensionale Vergleiche, wie z. B. anhand eines $B_{10}$-Lebensdauerwertes, sondern auch mehrdimensionale Vergleiche, die z. B. anhand der gesamten Systemlebensdauerverteilungen die Überlegenheit eines Konzeptes gegenüber einem anderen bestimmen. In [GAN 2006] werden u. a. solche Vergleichsmethoden vorgestellt.

# 5 Beschreibung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen

Im vorigen Abschnitt wurde eine Vorgehensweise zur Zuverlässigkeitsbewertung mechanischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen vorgestellt. In diesem und dem folgenden Kapitel wird aufbauend auf dieser Vorgehensweise gezeigt, welche Aspekte bei der Zuverlässigkeitsarbeit an mechatronischen Systemen zu berücksichtigen sind und wie sich eine entsprechende Methodik zur Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme gestaltet. Hierbei hat dieses Kapitel die Aufgabe, die Systemanalyse mechatronischer Produkte als Basis der Zuverlässigkeitsanalyse zu beschreiben, während das folgende Kapitel darauf aufbauend das eigentliche Vorgehen zur Zuverlässigkeitsbewertung aufzeigt. Es wird somit auch bei mechatronischen Produkten analog zu dem in **Bild 4-2** gezeigten Analyseablauf vorgegangen, wobei anzumerken ist, dass der Schritt der qualitativen Analyse im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet wird. Hierzu ist auf [PIC 2006] zu verweisen, wo der Aspekt der qualitativen Analyse in frühen Entwicklungsphasen behandelt wird.

Generell muss sich eine Vorgehensweise für die Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Produkte an den mechatronischen Entwicklungsprozess angliedern lassen. Nur so wird gewährleistet, dass die Zuverlässigkeitsarbeit den Entwicklungsprozess begleiten kann. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist z. B., dass die Zuverlässigkeitsarbeit auf den entsprechenden Entwicklungsdokumenten basiert und keine speziellen Sondermaterialien erforderlich sind.

## 5.1 Das V-Modell

Der Ablauf des mechatronischen Entwicklungsprozesses kann mittels dem sog. V-Modell beschrieben werden. Es handelt sich hierbei ursprünglich um eine IT-Entwicklungsvorschrift des Bundes [NN 2003b]. Das **Bild 5-1** illustriert das V-Modell entsprechend der Nutzung in der VDI Richtlinie 2206 [VDI 2206]. Das V-Modell zeichnet sich hierbei durch die direkte Zuordnung von Testvorgängen (rechte Seite des V) zu den entsprechenden Spezifikationsanforderungen (linke Seite des V) aus [MAR 2004].

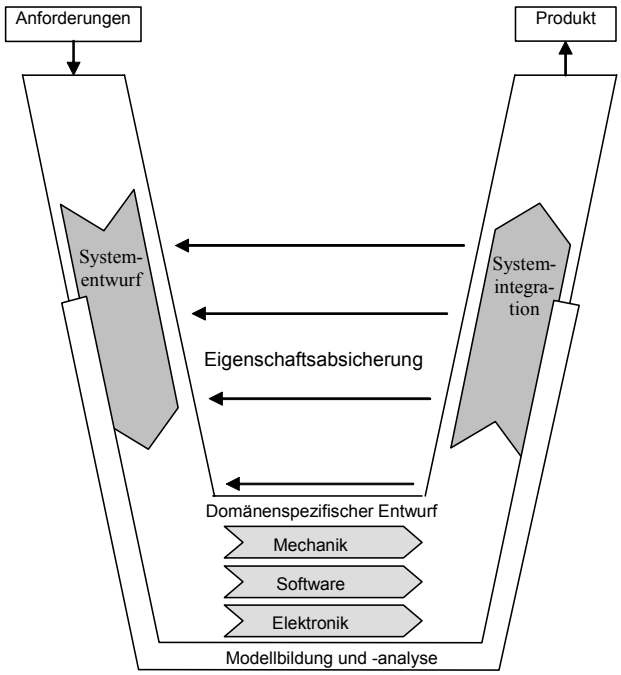


**Bild 5-1:** Das V-Modell zur Entwicklung mechatronischer Produkte [VDI 2206]

Da im Rahmen dieser Arbeit die frühen Entwicklungsphasen maßgeblich sind, muss dementsprechend diese Phase des V-Modells als Orientierungslinie dienen. Das **Bild 5-2** zeigt die Aufgaben, die in frühen Entwicklungsphasen abzuarbeiten sind.

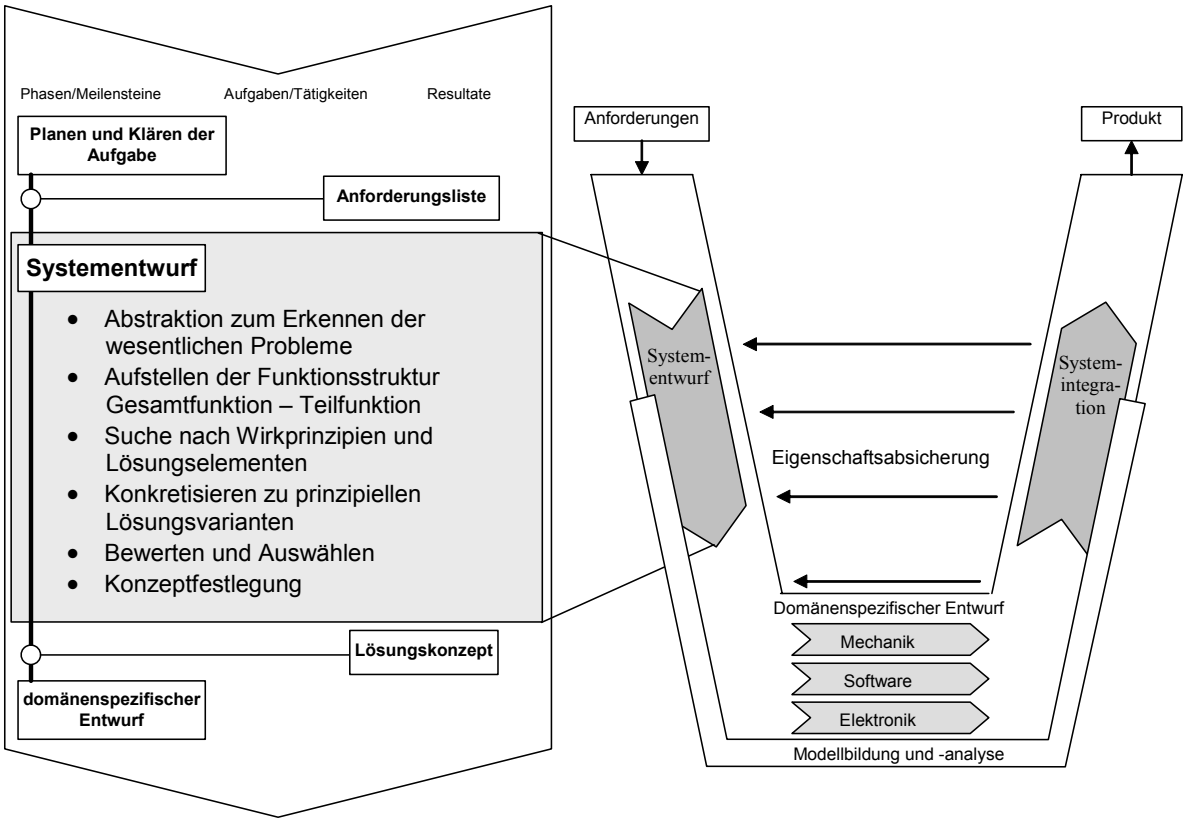


**Bild 5-2:** Vorgehen in frühen Entwicklungsphasen entsprechend dem V-Modell [VDI 2206]

Die Konzeptphase endet mit der Festlegung auf ein fachbereichsübergreifendes Lösungskonzept. Ein zu entwickelndes zuverlässigkeitstechnisches Vorgehen für mechatronische Systeme in frühen Entwicklungsphasen muss sich an die in **Bild 5-2** gezeigten Ablaufpunkte angliedern lassen, um die Entwicklungstätigkeiten und die endgültige Konzeptauswahlentscheidung unterstützen zu können.

## 5.2 Exemplarische Mechatronikentwicklung

Um darstellen zu können, wie die Zuverlässigkeitsarbeit in frühen Entwicklungsphasen ablaufen kann, wird im Folgenden eine mechatronische Beispielentwicklung aufgezeigt, die es für die weiteren Betrachtungen gestattet, begründete Annahmen zu tätigen und die Anwendbarkeit entwickelter Vorgehensweisen zu prüfen.

Als Betrachtungsobjekt für dieses Beispiel wird ein CVT und das Subsystem Wandlerüberbrückungskupplung (ÜK) genutzt.

Das mechanische Grobkonzept eines CVT enthält Elemente, die, um den Produktanforderungen zu genügen, gesteuert und geregelt werden müssen. Hierbei ist die Art und der Umfang der umzusetzenden Regelkonzepte zunächst nicht von Bedeutung. Entscheidend ist, dass die anzusteuernden Elemente das Vorhandensein von Aktoren bedingen. Dementsprechend lassen sich diese in ihrem Umfang schon in einer sehr frühen Entwicklungsphase bestimmen, wie das **Bild 5-3** verdeutlicht.

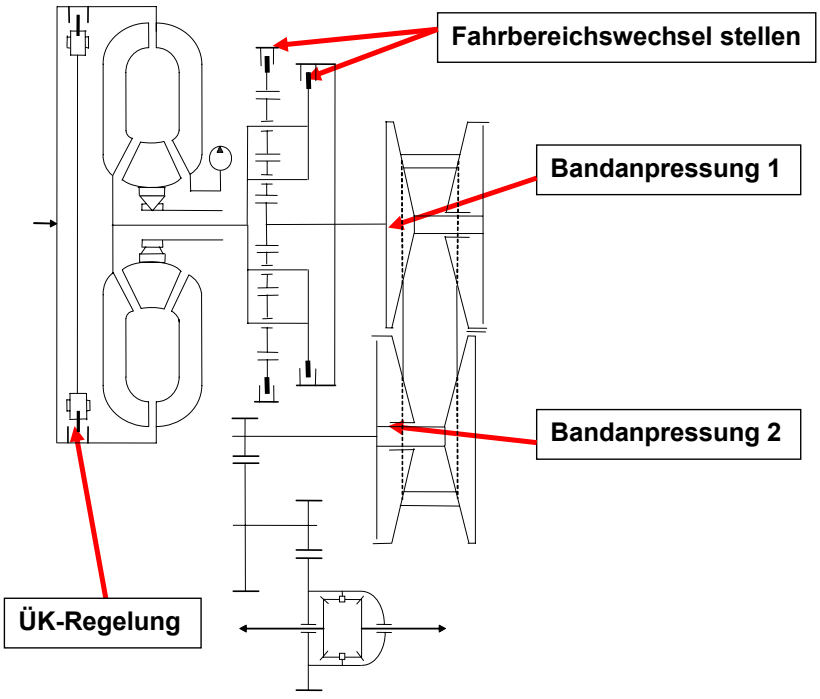


**Bild 5-3:** Mechatronisches Grobkonzept eines CVT mit Aktorenpositionen

Die Aktoren greifen in den Leistungsfluss des Systems ein. Ihre Betätigung kann mittels verschiedenster Wirkmechanismen erfolgen, die selbst wieder Einfluss auf den Systemaufbau haben. Die Steuerung und Regelung des Systems setzt einen die Aktoren kontrollierenden Algorithmus voraus, der auf der Umsetzung einer entsprechenden Spezifikation basiert. Die Umsetzung der Steuerungsalgorithmik erfolgt mittels Soft- und Hardware, deren Entwicklung ebenfalls in dieser Phase ansetzen kann.

Ein erster Schritt im Rahmen einer beispielhaften zuverlässigkeitsorientierten Mechatronikentwicklung ist die Umsetzung der funktionalen Anforderungen aus dem Lastenheft in ein normiertes Format, wenn das Lastenheft nicht schon hierauf basiert. Der Vorteil hierbei ist, dass natürlichsprachliche und unnormierte Anforderungsbeschreibungen unpräzise sein können. An dieser Stelle sind z. B. sog. Use-Cases sehr nützlich, weil sie im Hinblick auf die spätere Umsetzung den erwarteten funktionalen Ablauf exakt beschreiben. Dies begünstigt die Vermeidung von Spezifikationsfehlern. Der generelle Aufbau von Use-Cases sei in Anlehnung an [FLE 1999] im Folgenden kurz beschrieben.

| **USE CASE < No>** | **< Use Case Name >** *1* | |
|---|---|---|
| Goal | *2* | |
| Precondition | *3* | |
| Postcondition | *4* | |
| Actors | *5* | |
| Main scenario *6* | Step | Action |
| | Event | *8* |
| | 1.1 | *9* |
| | 1.2 | *9* |
| | … | |
| Scenario 2 *7* | Step | Action |
| | Event | *8* |
| | 2.1 | *9* |
| | 2.2 | *9* |
| Variations | *10* | |
| Exceptions | *11* | |
| Notes | *12* | |

**Bild 5-4:** Formblatt zur Eintragung von Use-Cases [FLE 1999]

Jeder Use-Case beschreibt das Ziel, Zielerreichungsbedingungen, Vorbedingungen und Ablaufszenarien im Falle der Aktivierung des Use-Case. Das einfache Formblatt in **Bild 5-4** liefert eine strukturierte Schreibform für Use-Cases, die nicht nur für die Erfassung der Anforderungen hilfreich ist, sondern auch die spätere Auslegung eines entsprechenden Steuerungs- und Regelungsalgorithmus unterstützt.

Im Folgenden werden die in **Bild 5-4** kursiv nummerierten Stellen näher erläutert:

1.) Eintrag eines kurzen und sinnvollen Namens.

2.) Hier wird das Ziel des Use-Case beschrieben (Goal).

3.) Es werden Bedingungen (Preconditions) angegeben, die erfüllt sein müssen, bevor ein beliebiges Szenario des Use-Case aufgerufen wird. Mehrere Voraussetzungen sind möglich und werden entsprechend nummeriert.

4.) Um festzustellen, ob das Ziel des Use-Case erreicht bzw. verfehlt wurde, werden Bedingungen (Postconditions) definiert, die dies indizieren (Postcondition Success und Postcondition Failure).

5.) Aufzählung von beeinflussenden oder beeinflussten Elementen (Actors), wie z. B. Nutzer, Maschine, Computersystem oder Softwarekomponente, die während eines Szenarios mit dem System wechselwirken können.

6.) Jeder Anwendungsfall hat nur ein Hauptszenario (Main scenario). Es ist in einer Schrittfolge hin zum Ziel des Anwendungsfalls definiert. Das Hauptszenario ist der einfachste Weg zur Erreichung dieses Ziels.

7.) Die alternativen Szenarien (Scenarios) sind nicht vorgegeben. Jeder Anwendungsfall kann kein, ein oder mehrere alternative Szenarien aufweisen. Diese alternativen Szenarien haben eine andere Schrittfolge, führen allerdings zu demselben Ziel. Normalerweise werden sie von anderen Ereignissen ausgelöst oder haben andere Voraussetzungen.

8.) Hier wird das Ereignis (Event), von dem die Schrittfolge in dem Szenario bestimmt wird, angegeben.

9.) Bezeichnung der einzelnen Schritte im Szenario.

10.) Szenarien, die sich nur sehr wenig von einem anderen Szenario unterscheiden (Variations).

11.) Das Ausnahmeszenario stellt eine Schrittfolge dar, die befolgt wird, wenn die eigentliche Aufgabe unterbrochen wird (Exceptions).

12.) Anmerkungen

Im Folgenden wird die Use-Case Methodik auf das CVT-Beispiel angewandt. Da die Funktionsbeschreibung des Gesamtsystems zu umfangreich für den Rahmen dieser Arbeit ist, wird lediglich die ÜK als Teilsystem betrachtet. In Anlehnung an [GRE 2003] soll die ÜK die folgenden Funktionalitäten umsetzen.

- Schließen der Kupplung, um den Wandler zu überbrücken.
- Öffnen der Kupplung, wenn das Fahrzeug in den Stillstand versetzt wird.
- Einregelung eines definierten Schlupfes, um Drehschwingungen des Motors zu dämpfen.
- Bei einem Kickdownsignal soll aus Komfortgründen der Kupplungsschlupf derart vergrößert werden, dass der Turbolader zu arbeiten beginnt.

Die Beschreibung der Gesamtfunktionalität wird zunächst in einem in **Bild 5-5** gezeigten Übersichtsmodell dargestellt. Hierbei symbolisiert „Start“ das Schließen der Kupplung, „Stopp“ das Öffnen der Kupplung, „Schlupf“ die Funktionalität der Drehschwingungsdämpfung und „Turbolader“ die Funktion der Leistungserhöhung durch schlupfbedingtes Aktivieren des Turboladers.

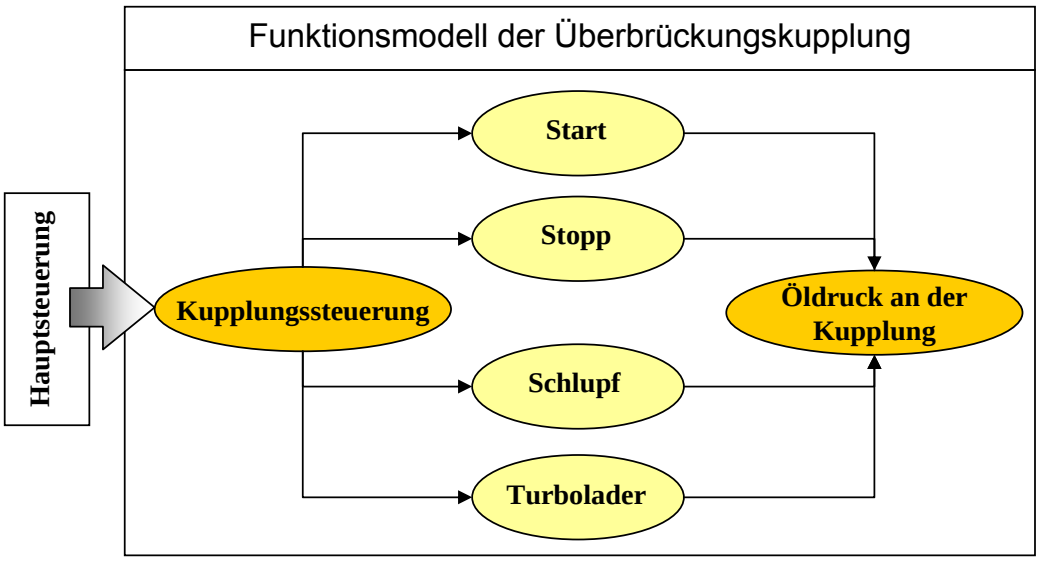


**Bild 5-5:** Use-Case Modell der Kupplungsfunktionalität [JÄG 2005a]

Es ist ersichtlich, dass die vier Funktionalitäten sämtlich den Kupplungsöldruck als zu regelnde Größe beinhalten. Die Kupplungssteuerung ist entsprechend ihrer Auslegung nicht unbedingt von der Systemumgebung unabhängig, sondern kann so ausgelegt werden, dass bestimmte Daten von der Hauptsteuerung oder anderen systemexternen Datenquellen bezogen werden.

Im Folgenden werden die Use-Cases „Start“, „Schlupf“ und „Turbolader“ in **Tabelle 5-1**, **Tabelle 5-2** und in **Tabelle 5-3** gezeigt.

**Tabelle 5-1:** Use-Case „Start“ [JÄG 2005a]

| Use Case | Start |
|---|---|
| Goal | ÜK schließen, Wandler überbrücken |
| Precondition | ÜK offen |
| Postcondition Success | Kupplungsdruck ist höher als ein bestimmter Wert (Kupplung geschlossen) |
| Postcondition Failure | Kupplungsdruck zu niedrig (Kupplung offen) |
| Actors | |
| Trigger | Positive Beschleunigung und Geschwindigkeit >= 23 km/h |
| Description | **1** Magnetventil bis zur Position 1 öffnen<br>**2** Wenn Kupplungsdruck >= konst., dann Magnetventil in Position 2 öffnen<br>**3** Übergabe an Funktionalität “Schlupf”, wenn Kupplungsdruck einen bestimmten Wert erreicht |
| Extensions | keine |
| Alternatives | keine |

Der Use-Case „Start” hat das Ziel, den Motor mit dem Getriebe über die ÜK zu verbinden. Hierzu muss die ÜK geschlossen werden. Die Vorbedingung ist, dass die ÜK geöffnet ist. Die Zielbedingung ist, dass der Kupplungsanpressdruck höher als ein bestimmter – später festzulegender – Wert ist. Es liegt ein Fehler vor, wenn der Zieldruck nicht erreicht wird. Zur Aktivierung des Use-Case „Start“ muss die Fahrzeuggeschwindigkeit größer als 23 km/h sein und es müssen ausreichend hohe Beschleunigungswerte vorliegen. Sind diese Bedingungen erfüllt, so wird das Regelventil in Position 1 geschalten, was einen bestimmten Anpressdruck erzeugt. Wenn der Anpressdruck ein bestimmtes Niveau erreicht hat, so soll das Ventil in Position 2 geöffnet werden, was den Druck noch weiter erhöht. Ist ein bestimmter Druck erreicht wird die Regelungsaufgabe an den Use-Case „Schlupf“ weitergegeben, der den Schlupf der Kupplung entsprechend **Tabelle 5-2** fahrzustandsabhängig regelt.

**Tabelle 5-2:** Use-Case „Schlupf“ [JÄG 2005a]

| Use Case | Schlupf |
|---|---|
| Goal | Drehschwingungen dämpfen |
| Precondition | Kupplungsdruck entspricht Mindestdruck |
| Postcondition Success | $\Delta n_{aktuell} \approx \Delta n_{nominal}$ |
| Postcondition Failure | $\Delta n_{aktuell} \neq \Delta n_{nominal}$ |
| Trigger | Kupplungsdruck erreicht Schwellenwert |
| Description | **1** Messung von $\Delta n_{aktuell}$<br>**2** Berechnung von $\Delta n_{nominal}$ als Funktion von Drehzahl und -moment<br>**3** Berechnung von $\Delta n_{nominal}$ - $\Delta n_{aktuell}$<br>**4** Ventilposition in Abhängigkeit von $\Delta n_{nominal}$ - $\Delta n_{aktuell}$ nachstellen.<br>**5** Wieder bei Schritt 1 beginnen |
| Extensions | **2a** im Sportmodus wird $\Delta n_{nominal}$ halbiert |
| Alternatives | **3a** wenn $\Delta n_{aktuell} >> \Delta n_{nominal}$, dann Magnetventil langsamer in Position bringen<br>**3b** im Fehlerfall wird das Magnetventil vollständig geschlossen |

Anhand der ermittelten Use-Cases wird schrittweise ein Realmodell des zu konzipierenden Systems entwickelt. Hierzu werden die Use-Cases auf Informationen bezüglich der späteren physikalischen Produktgestalt untersucht. Dieses Vorgehen kann anhand des Use-Case „Start“ nachvollzogen werden. So ist in **Tabelle 5-1** ersichtlich, dass zur Realisierung der gewünschten Funktionalität Geschwindigkeits-, Beschleunigungs-,

und Druckmesswerte und somit die entsprechende Sensorik notwendig sind. Zusätzlich dazu lässt der Use-Case „Schlupf“ in **Tabelle 5-2** erkennen, dass ein aktueller Kupplungsschlupf ermittelt werden muss, was das Vorhandensein zweier Drehzahlmesswerte und somit zweier entsprechender Sensoren impliziert. Zur Berechnung des fahrzustandsabhängig notwendigen Schlupfes $\Delta n_{nominal}$ wird ein Drehmomentsignal benötigt.

Werden die definierten Use-Cases systematisch abgearbeitet, so ergeben sich schließlich alle notwendigen Sensoren, die zur Funktionsrealisierung notwendig sind. An dieser Stelle muss im Hinblick auf die zuverlässigkeitstechnische Systemanalyse eine Vorentscheidung getroffen werden, welche Sensoren wirklich innerhalb des Systems realisiert werden und welche notwendigen Daten für die Steuerung und Regelung von externen Datenquellen bezogen werden. Diese Fragestellung wird u. a. an der Sportmodus Erweiterung beim Use-Case „Schlupf“ und anhand des notwendigen Kickdownsignals beim Use-Case „Turbolader“ in **Tabelle 5-3** deutlich.

**Tabelle 5-3:** Use-Case „Turbolader“

| | |
|---|---|
| Use Case | Turbolader |
| Goal | Leistungserhöhung durch Turboladeraktivierung infolge Schlupferhöhung |
| Precondition | $\Delta n_{aktuell} \approx 0$ (Kupplung wird im Modus “Schlupf” betrieben) |
| Postcondition Success | $n_{Turbolader}$ ist erreicht |
| Postcondition Failure | $n_{Turbolader}$ wird nicht erreicht |
| Trigger | Kickdown ist aktiviert (Signal aus Hauptsteuerung) |
| Description | **1** Erfassung des Kickdown Signals<br>**2** Wenn Kickdown aktiviert ist, Kupplung bis zu bestimmter Position öffnen<br>**3** Übergabe an Funktionalität “Schlupf”, wenn der Turbolader aktiviert ist |
| Extensions | **2a** im Sportmodus Kupplung so schnell wie möglich öffnen (Maximum 10ms) |
| Alternatives | **3a** wenn der Turbolader nicht reagiert, dann Schaltsignal an Hauptsteuerung |

Nach der Festlegung der systeminternen Sensorik kann ein erstes physikalisches Modell für das zu realisierende und zuverlässigkeitstechnisch zu bewertende System aufgestellt werden. Dieses ist für die Überbrückungskupplung in **Bild 5-6** dargestellt.

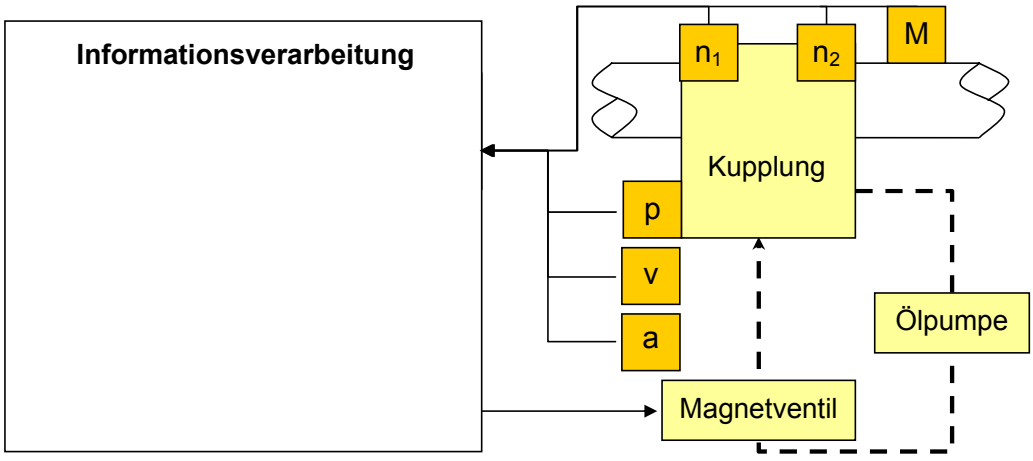


**Bild 5-6:** Erste Stufe der physikalischen Modellierung des zu bewertenden Konzeptes

In einem ersten Modellierungsschritt stellt das grundlegende technische Lösungsprinzip, welches hier aus der eigentlichen Kupplung, der Ölpumpe und einem Magnetventil besteht, den Kern der Modellierung dar. Entsprechend der Ableitung aus den Use-Cases sind auch zwei Drehzahlsensoren ($n_1$ und $n_2$), ein Drehmoment- (M), ein Druck- (p), ein Geschwindigkeits- (v) und ein Beschleunigungssensor (a) dargestellt. Sämtliche Sensordaten gehen in die Informationsverarbeitung ein und diese steuert entsprechend dem grundsätzlichen Funktionsmodell aus **Bild 5-5** das Regelmagnetventil an. Über die Gestalt der Informationsverarbeitung sowohl in physischer (Hardware) als auch rein softwaretechnischer Form kann zu diesem Zeitpunkt der Modellierung noch keine Aussage gemacht werden. Dieser Umstand und die noch nicht ausreichende Detaillierung der Kupplungsmechanik, die bisher nur symbolisch im Modell erscheint, sind aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht der Grund für eine weitergehende Konzeptkonkretisierung.

Begonnen wird mit der genaueren Darstellung der Kupplungsmechanik. Hierzu werden die schon in Abschnitt 4.2 vorgestellten Prinzipskizzen verwendet. Die Prinzipskizze für die Kupplungsmechanik wird in **Bild 5-7** gezeigt.

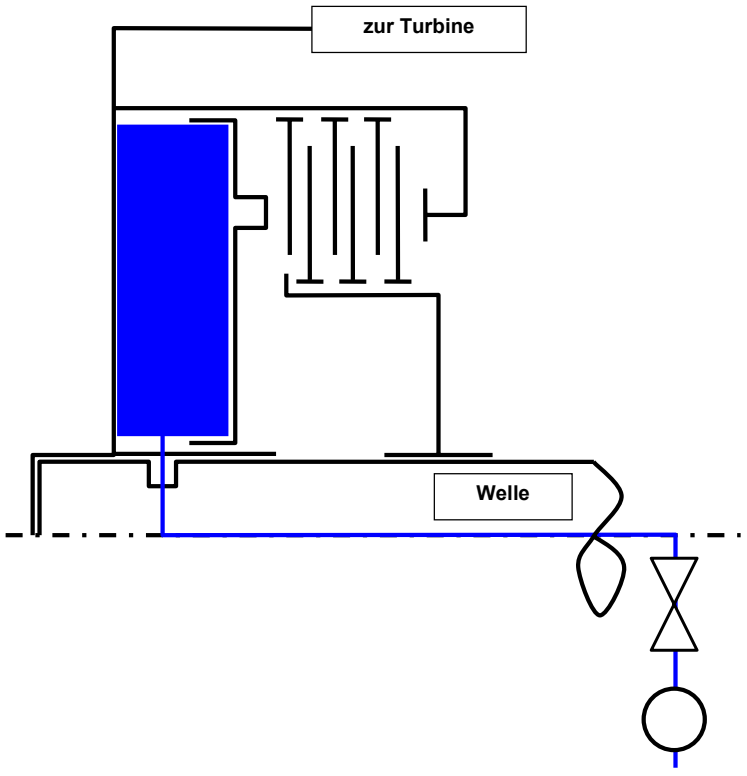


**Bild 5-7:** Prinzipskizze der Kupplungsmechanik

Grundsätzlich hat die Konkretisierung des zu entwickelnden Produktes in frühen Entwicklungsphasen, wie schon in Abschnitt 4 erläutert wurde, die Aufgabe, die Zuverlässigkeitsbewertung sicherer zu machen. Die Notwendigkeit hierfür wird auch in **Bild 5-7** deutlich. Erst durch die Prinzipskizze wird ersichtlich, dass mehrere Dicht-

stellen existieren, die zuverlässigkeitstechnisch bedeutend sind und dass die schlupfend betriebenen Kupplungslamellen ebenfalls Verschleißerscheinungen aufweisen können. Handelt es sich, wie bei der Überbrückungskupplung, um ein vergleichsweise einfaches technisches System, so ist die Wahrscheinlichkeit, alle zuverlässigkeitstechnisch relevanten Bauteile zu berücksichtigen sehr hoch. Zusätzlich können FMEAs von Vorgängern oder Schadensstatistiken zur Auffindung weiterer zuverlässigkeitstechnisch relevanter Elemente beitragen. Kritischer sind komplexere Systeme, wie z. B. ein ganzes CVT. Im Hinblick auf die Analyse des rein mechanischen Anteils kann hier allerdings die Nutzung von grobmaßstäblichen Zeichnungen anstatt einfacher Prinzipskizzen behilflich sein, wodurch sich insbesondere bei komplexen Strukturen die Bewertungssicherheit erhöhen lässt. Der Preis hierfür ist allerdings zusätzlicher – eventuell vergebener – Entwicklungsaufwand.

Nach der Konkretisierung des mechanischen Konzeptanteils ist als letzter Schritt hin zu einem realitätsnahen Modell die Informationsverarbeitung zu betrachten. Auch hierzu ist, ähnlich zum bisherigen Vorgehen, eine Antizipation späterer Entscheidungen notwendig. Im Rahmen der Entwicklung der Informationsverarbeitung wird zu einem bestimmten Zeitpunkt die Aufteilung des Steuerungs- und Regelungsalgorithmus auf elektronische Hardware und Software festgelegt. Es handelt sich hierbei um die sog. Software/Hardware-Partitionierung. Grundlage für eine solche Aufteilung ist u. a. ein sog. Kontrollflussgraph, der den Steuerungsalgorithmus formal beschreibt. Ein solcher Kontrollflussgraph lässt sich auch schon mit Hilfe von Use-Cases entwickeln, wenn diese entsprechend ausgestaltet sind. Nicht notwendig ist hierbei z. B. das wertmäßige Bekanntsein von Konstanten im Regelalgorithmus. Genaue Ausprägungen von solchen Werten können meist erst bestimmt werden, wenn das technische System sehr weit entwickelt worden ist. Für die Belange einer Konzeptkonkretisierung durch einen ersten Kontrollflussgraphen reicht es hingegen vollkommen aus, wenn z. B. bekannt ist, dass es eine Konstante gibt und welche Aufgabe sie bei der Regelung hat. **Bild 5-8** zeigt den Kontrollflussgraphen für den Steuerungsalgorithmus der ÜK in frühen Phasen.

Durch die Ableitung eines ersten Kontrollflussgraphen besteht die Basis für die notwendige zeitliche Vorwegnahme der Partitionierung. Zusätzlich hierzu existieren weitere schon bekannte Informationen, die die Partitionierung unterstützen können. Liegen besondere Anforderungen vor, wie z. B. sehr schnelle Regelzeiten, so weist dies darauf hin, dass der entsprechende Teil des Steuerungsalgorithmus als elektronische Hardware ausgeführt werden sollte. Ergebnis der Vorpartitionierung ist eine näherungsweise Festlegung der notwendigen Hardware.

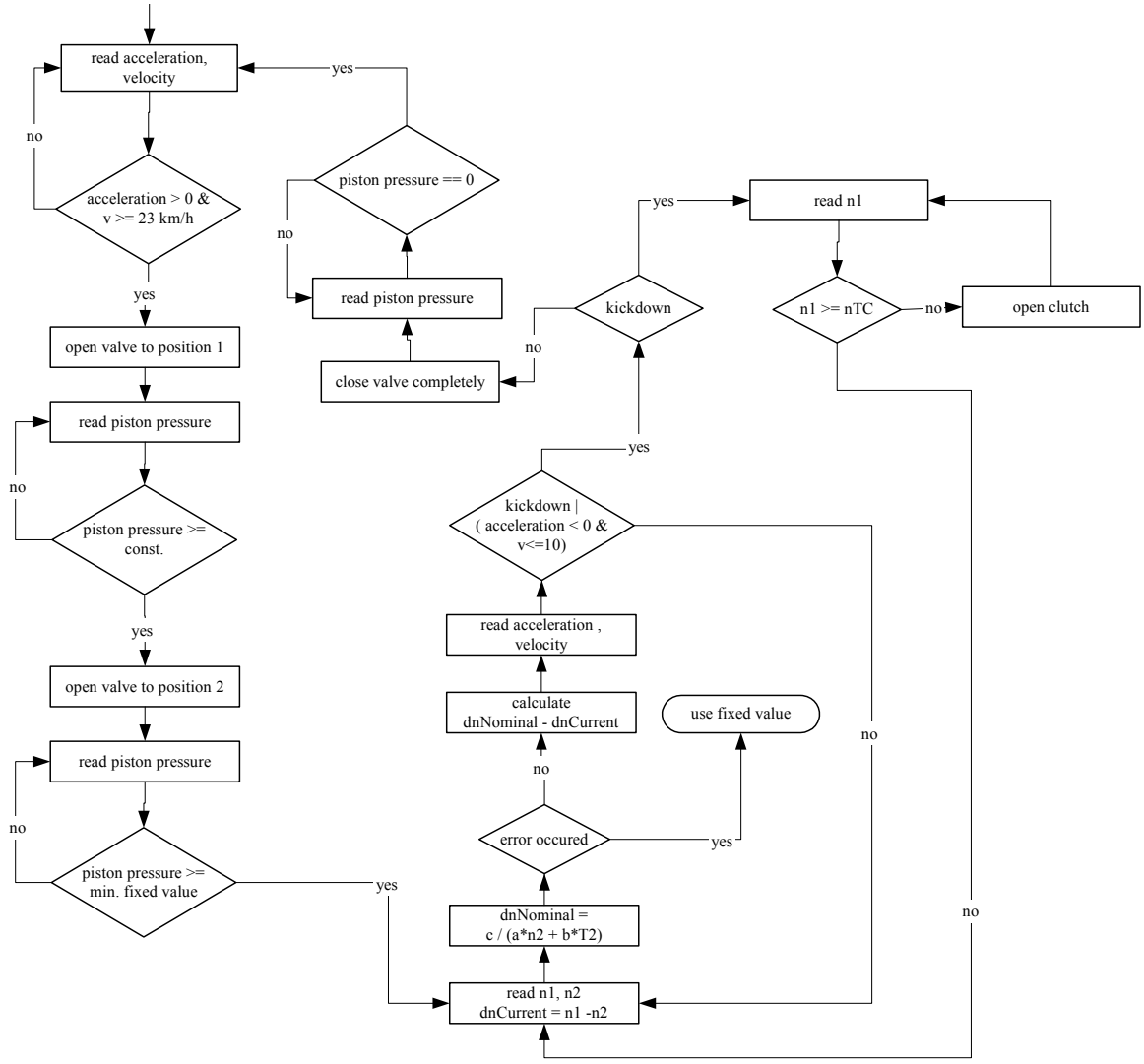


**Bild 5-8:** Der Kontrollflussgraph der Überbrückungskupplungssteuerung [JÄG 2005a]

Es ist mit diesen Informationen z. B. möglich, die notwendige Technologie und Art eines Microcontrollers zu bestimmen. Es kann dann in einem weiteren Schritt analysiert werden, welchen Aufbau die elektronische Hardware hat. So besteht beispielsweise die Möglichkeit, sämtliche A/D- und D/A-Wandler als auch den Speicher auf dem Microcontroller unterzubringen oder aber diese als externe Einheiten anzuordnen. In [JÄG 2005a] wird dieser Umstand verdeutlicht. Aufgrund der verschiedenen Realisierungsmöglichkeiten der Hardware im Hinblick auf genutzte Komponenten muss eine Festlegung erfolgen, um die Konzeptkonkretisierung weiterführen zu können.

An dieser Stelle kann aber aufgrund des hohen Standardisierungsgrades im Bereich elektronischer Komponenten sehr stark auf Katalogwerte z. B. aus [MIL 1991] zurückgegriffen werden. Zudem sind auch für neuere Komponenten Zuverlässigkeitswerte bei den Herstellern erfragbar. Somit kann die Hardwareelektronik schon teilweise voroptimiert werden. Beispielhaft kann hier angeführt werden, dass ein Microcontroller, der auch Wandler und Speicher aufnehmen kann, tendenziell höhere Aus-

fallraten besitzt als ein weniger großer Controller. Werden allerdings Wandler und Speicher ausgegliedert, so müssen dann auch die zusätzlich vorhandenen Ausfallraten der entsprechenden Komponenten berücksichtigt werden. Nicht zu vernachlässigen bei einer solchen Entscheidung ist auch die Aufbau- und Verbindungstechnik. So resultieren viele Elektronikausfälle aus entsprechenden Prozess- oder Auslegungsfehlern.

Nach der Hardwaredefinition ist die Vorkonkretisierung der physikalischen Gestalt der Überbrückungskupplung beendet. Das Resultat ist ein entsprechend der Erfordernisse detailliertes Realmodell des zu entwickelnden Systems, wie es in **Bild 5-9** dargestellt ist. Auf Basis dieses Realmodells ist es möglich, die für die Modellierung der Zuverlässigkeit notwendigen komponentenbasierten Ausfallarten zu identifizieren.

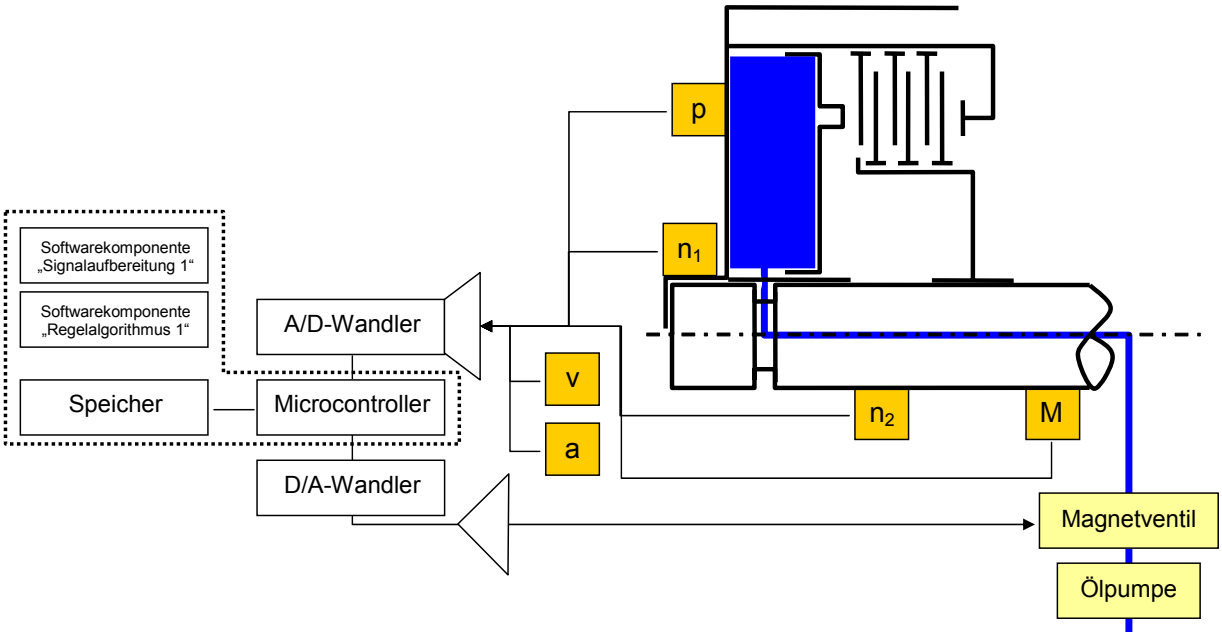


**Bild 5-9:** Realmodell der Überbrückungskupplung [JÄG 2005a]

Bisher noch nicht betrachtet wurde die Software, deren Umfang sich aus der Vorpartitionierung ergibt und die ebenfalls zuverlässigkeitsrelevant ist. Es ist in einer frühen Entwicklungsphase möglich, die Software entsprechend der Teilfunktionalitäten in Komponenten zu unterteilen [LÄN 2002]. Die Teilfunktionalitäten sind schon in frühen Phasen erkennbar. Für die ÜK könnte sich z. B. ergeben, dass die Funktionalität „Start“ und „Stop“ in Form von Software realisiert werden und die Komponenten „Schlupf“ und „Turbolader“ aufgrund ihres hohen Anspruches an zulässige Regelzeiten in Form von Hardware realisiert werden. Da die Software- und die Hardwareumsetzung gleichermaßen von Spezifikations- und Implementierungsfehlern betroffen sind, ist die genaue Aufteilung nur von sekundärer Bedeutung, z. B. bei der Auslegung des nötigen Speichers. Entsprechend sind in **Bild 5-9** die Algorithmen „Signalaufbereitung 1“ und „Regelalgorithmus 1“ dem Speicher und dem Microcontroller zugeordnet.

# 6 Frühe Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme

Nachdem im vorigen Abschnitt beschrieben wurde, wie durch eine Konzeptkonkretisierung für ein mechatronisches Produkt die Basis für quantitative Zuverlässigkeitsanalysen gelegt wurde, beschäftigt sich dieser Abschnitt mit der eigentlichen Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen.

Die in Abschnitt 4 erläuterte Vorgehensweise erlaubt es, in frühen Entwicklungsphasen trotz Datenungenauigkeiten Zuverlässigkeitsbewertungen von verschiedenen mechanischen Lösungsvarianten durchzuführen. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass für die Komponenten des betrachteten Systems ein Lebensdauermodell vorliegt. Zudem wurde festgestellt, dass die Ermittlung und Verwendung absoluter Zuverlässigkeitswerte aufgrund der in Form stochastischer Verteilungen modellierten Unsicherheiten in frühen Entwicklungsphasen nicht praktikabel ist. Vielmehr ist das Ergebnis einer Zuverlässigkeitsbewertung in frühen Phasen ein Vergleich verschiedener Konzepte und die Ermittlung einer Überlegenheitswahrscheinlichkeit im Hinblick auf ein entsprechendes Entscheidungskriterium, wie z. B. eine $B_{10}$-Lebensdauer.

Ein Problem bei der Bewertung der Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme ist, dass Modelle für die Bewertung der Software-Zuverlässigkeit erst anhand von umfangreichen bereits durchgeführten Entwicklungsprojekten oder anhand von Daten aus dem Test bereits entwickelter Software bestimmt werden müssen. Ersteres ist aufgrund keiner oder mangelhafter Dokumentation nur selten vorhanden und letzteres ist in frühen Entwicklungsphasen nicht gegeben.

In der Literatur sind etliche Modelle bekannt, die mittels verschiedener Softwaremaße, wie z. B. der Anzahl der Codezeilen, die Software-Zuverlässigkeit beschreiben. Es existieren verschiedene Software-Zuverlässigkeitsmodelle für verschiedene Einsatzbereiche, wie es unter anderem durch [NAG 2003] und [ROS 1999] bestätigt wurde. Diese Modelle sind aber weder einheitlich noch verallgemeinerbar. Dieser Umstand wird in [FEN 1999] sehr deutlich dargestellt. Die einzelnen Beschreibungsmodelle, die aus der Literatur bekannt sind, basieren oft auf vorhandenen Datensätzen und werden meist mittels Regressionsmethoden ermittelt. Die teilweise großen Unterschiede zwischen den in der Literatur aufgeführten Modellen legen den Schluss nahe, dass keine allgemein gültigen Zuverlässigkeitsmodelle für Software existieren, sondern bestenfalls entwicklungsspezifische Modelle. Dies führt zu dem Problem, dass es selbst in späten Entwicklungsphasen äußerst schwierig ist, eine quantitative Zuverlässigkeits-

aussage über ein softwareintensives mechatronisches Produkt zu tätigen, bevor Ergebnisse aus der Testphase vorliegen.

Diese Tatsache trägt dazu bei, dass nicht gewährleistet werden kann, dass ein quantitatives Zuverlässigkeitsziel systematisch erreicht wird. Ebenso wenig wird verhindert, dass in frühen Phasen eine Lösungsvariante ausgewählt wird, bei der die Erreichung des gesteckten Zuverlässigkeitsziels schwieriger ist bzw. mehr Aufwand erfordert als dies bei einer anderen Variante der Fall gewesen wäre.

Dementsprechend wird eine Vorgehensweise benötigt, um die Auswahl von Lösungsvarianten zu unterstützen. Damit soll das Risiko gesenkt werden, dass aufgrund der Auswahl einer zuverlässigkeitstechnisch unterlegenen Variante entweder zusätzliche Kosten für die Nachbesserung anfallen oder dass ein unausgereiftes Produkt mit mangelhafter Zuverlässigkeit zum Kunden gelangt. Beides führt direkt oder indirekt über Garantie- und Kulanzkosten sowie Imageschäden zu wirtschaftlichen Einbußen.

Die im Weiteren geschilderte Vorgehensweise ermöglicht trotz des Fehlens eines allgemein gültigen Softwarezuverlässigkeitsmodells den relativen Vergleich von Konzepten. Der Ansatz zur Behebung des Problems eines fehlenden universellen Modells ist, für die Software ein Modell zu verwenden, welches einen unbekannten Parameter (im Folgenden als α bezeichnet) aufweist. Grundsätzlich ist dieses Vorgehen, das heißt die Annahme eines unbekannten Parameters, nicht auf die Software beschränkt. Da jedoch die größten Probleme bei der Bewertung der Software-Zuverlässigkeit auftreten, ist es sinnvoll, diese Annahme dort zu verwenden. In der Regel ist für das Gesamtsystem ein zu erreichendes Zuverlässigkeitsziel gegeben. Man kann nun eine Schranke $\alpha_{zul}$ für den unbekannten Parameter α angeben, bei der das Zuverlässigkeitsziel gerade noch erreicht wird. Diese Schranke kann als "Entwicklungsspielraum" interpretiert werden, wobei der Entwicklungsspielraum stets auf einen einzigen, noch unbekannten Parameter abgebildet werden muss. Die Kenntnis des Entwicklungsspielraums erlaubt den Vergleich von Lösungsvarianten für das mechatronische Gesamtsystem.

## 6.1 Auswahlunterstützung für mechatronische Lösungsvarianten

Trotz der Ungenauigkeiten der Eingangsdaten und trotz eines fehlenden allgemeinen Software-Zuverlässigkeitsmodells besteht die Möglichkeit, eine Bewertung einzelner Systeme relativ zueinander vorzunehmen. Das Ziel ist dann nicht mehr die Ermittlung eines Zuverlässigkeitskennwertes, wie etwa einer $B_{10}$-Lebensdauer, sondern die Bestimmung des Spielraums zur Erreichung eines vorgegebenen Zuverlässigkeitszieles. Dieser Spielraum soll im Folgenden „Entwicklungsspielraum“ genannt werden.

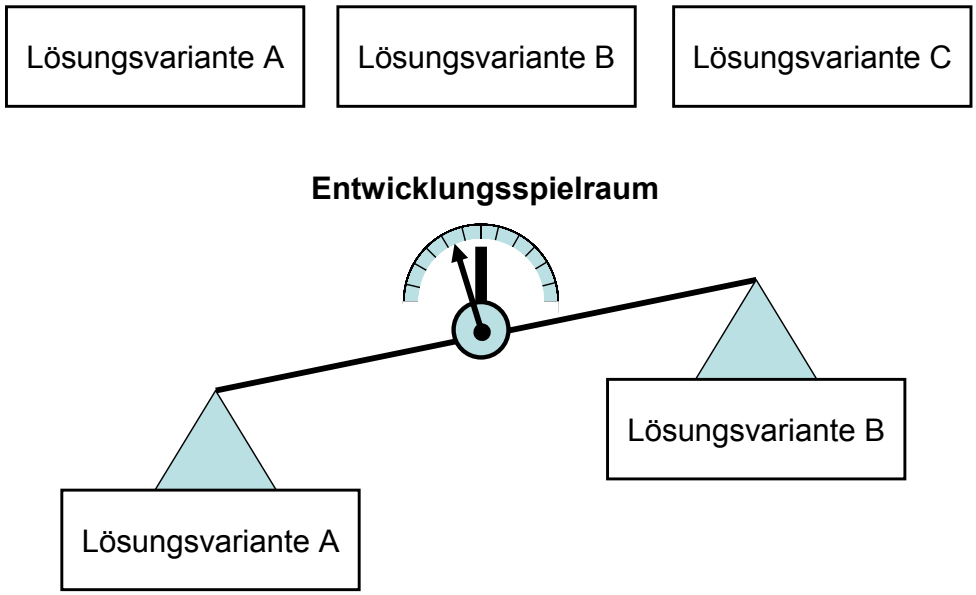


**Bild 6-1:** Auswahl einer Variante aufgrund des Entwicklungsspielraums [JÄG 2005b]

Das entsprechende Vorgehen wird im Weiteren geschildert. Es wird davon ausgegangen, dass für die Produktentwicklung ein bestimmter Kosten- und Zeitaufwand eingeplant ist und dass die geforderten Funktionen bekannt sind. Aufwand und Funktionalität sind für alle Lösungsvarianten identisch. Zu bestimmen ist die Lösungsvariante, welche den größten Entwicklungsspielraum im Hinblick auf das Erreichen eines vordefinierten Zuverlässigkeitsziels bietet.

Ein mechatronisches System besteht aus Mechanik-, Elektronik- und Softwarekomponenten. Diesem System wird eine Zielzuverlässigkeit vorgegeben, z. B. in Form einer Systemausfallrate oder eines Lebensdauerquantils. Bei der Zuverlässigkeitsmodellierung werden den Ausfallarten der Systemkomponenten Wahrscheinlichkeitsverteilungen zugeordnet, woraus sich die Systemlebensdauer berechnen ließe. Die hierfür notwendige Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Ausfall einer Softwarekomponente ist in frühen Phasen selten vorhanden. Nimmt man an, dass die Zuverlässigkeit der Software mittels einer Exponentialverteilung beschrieben werden kann, so ist es möglich, eine Schranke für die Ausfallrate der Software anzugeben, bei deren Unterschreiten das Zuverlässigkeitsziel erreicht wird. Es geht also nicht mehr darum, aus bekannten Komponentenzuverlässigkeiten eine Systemzuverlässigkeit zu ermitteln. Vielmehr sollen ausgehend vom Gesamtzuverlässigkeitsziel Rückschlüsse auf die zulässige Zuverlässigkeit bestimmter - in diesem Fall softwaretechnischer - Komponenten gezogen werden. Das Resultat ist eine implizite Aussage über die zur Erreichung des Gesamt-Zuverlässigkeitsziels notwendige Software-Zuverlässigkeit. Der folgende Abschnitt verdeutlicht das prinzipielle Vorgehen anhand eines einfachen Beispiels.

## 6.2 Prinzipielles Vorgehen

Ein mechatronisches System, bestehend aus einem Getriebe und der entsprechenden Getriebesteuerung, soll betrachtet werden. Die Getriebesteuerung teilt sich, wie aus **Bild 6-2** entnommen werden kann, in die entsprechende Elektronik (Leiterplatte, Chips, usw.) und die darauf ablaufende Software auf. Der Einfachheit halber sei angenommen, dass sowohl die Getriebemechanik, die Elektronik als auch die Software jeweils nur eine Ausfallart aufweisen. Es handelt sich hierbei beim Getriebe um einen Wellenbruch, bei der Elektronik um den Bruch einer Leiterbahn und bei der Software um ein beliebiges Versagensereignis.


**Bild 6-2:** Zuverlässigkeitsblockschaltbild des Beispielsystems

Es wird ferner angenommen, dass die Ausfallzeitpunkte der drei Ausfallarten unabhängig sind und jeweils einer Exponentialverteilung mit den Ausfallraten $\lambda_{Mechanik}$, $\lambda_{Elektronik}$ und $\lambda_{Software}$ folgen. Somit gilt, dass der Ausfallzeitpunkt des Systems ebenfalls einer Exponentialverteilung mit der Ausfallrate

$$\lambda_{System} = \lambda_{Mechanik} + \lambda_{Elektronik} + \lambda_{Software} \tag{6.1}$$

folgt.

Als Entwicklungsziel sei $\lambda_{System} \leq \lambda_{Ziel}$ vorgegeben. Um dieses Ziel zu erreichen, muss

$$\lambda_{Software} \leq \lambda_{System} - \lambda_{Mechanik} - \lambda_{Elektronik} = \lambda_{zulässig\ Software} \tag{6.2}$$

gelten, wobei $\lambda_{zulässig\ Software}$ denjenigen Wert der Ausfallrate der Software beschreibt, bei dem das Zuverlässigkeitsziel $\lambda_{System} = \lambda_{Ziel}$ gerade noch erreicht wird. Dieser Wert wird als zulässige Softwareausfallrate bezeichnet.

Diese Berechnung wird entsprechend **Bild 6-3** für zwei zu vergleichende Lösungsvarianten A und B durchgeführt. Das Ergebnis der Berechnung sind zwei zulässige Softwareausfallraten für die beiden Varianten, die miteinander verglichen werden können. Da Funktionalität und Entwicklungsaufwand für beide Varianten als identisch vorausgesetzt werden, weist eine im Vergleich höhere zulässige Softwareausfallrate auf einen größeren Entwicklungsspielraum hin. Somit wäre die Variante mit der höheren zulässigen Softwareausfallrate auszuwählen.

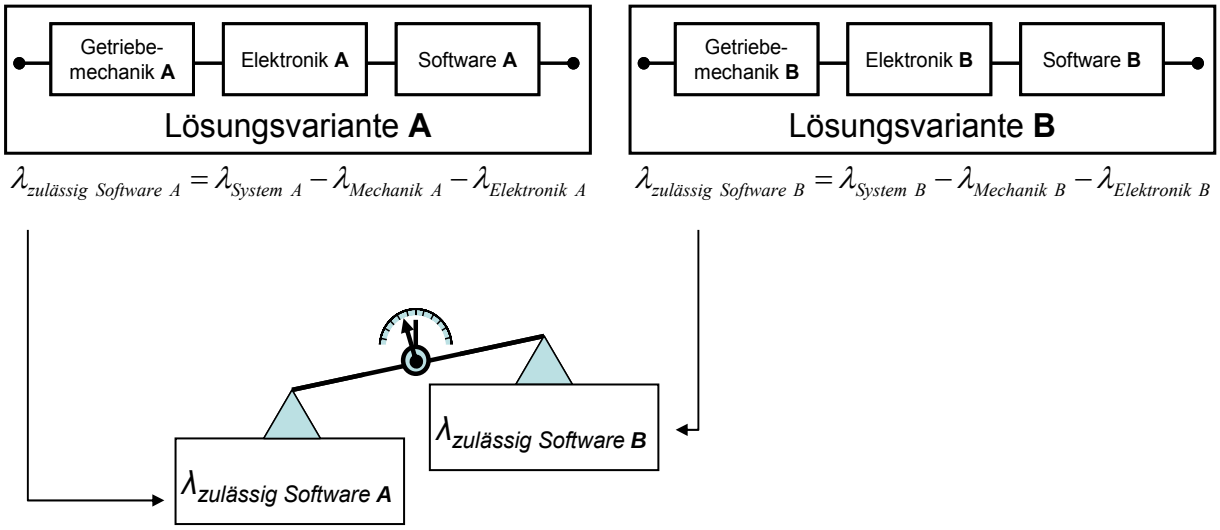


**Bild 6-3:** Vergleich zweier Lösungsvarianten [JÄG 2005b]

Um die Berechnung hier zu vereinfachen, wurde vernachlässigt, dass in realen mechatronischen Systemen die Mechanik meist entsprechend einer Weibullverteilung ausfällt und in frühen Phasen bestimmte, die Zuverlässigkeit der Komponenten beeinflussende Größen nur ungenau, z. B. in Form von Verteilungen, gegeben sind.

## 6.3 Realitätsnahe Anwendung

Mechatronische Systeme zeichnen sich oft durch eine hohe Komplexität aus. Einen wesentlichen Anteil hierzu trägt die Systemsoftware bei. Sie sollte aus Gründen der Realitätsnähe auf keinen Fall, wie im vorigen Abschnitt geschehen, als monolithischer Block, sondern entsprechend der tatsächlich zu erwartenden Struktur in Form einzelner Komponenten betrachtet werden. Dies ist erforderlich, um die unterschiedliche Bedeutung von möglicherweise mehreren Produkt-Fehlfunktionen aus Sicht des Kunden beschreiben zu können. Die Modellierung von Software als eine Kombination von Komponenten wird in [JÄG 2005b] aufgegriffen und soll hier nicht weiter thematisiert werden. Bei der Definition von Softwarekomponenten ist zu berücksichtigen, dass die Funktionsstruktur lediglich einen Anhaltspunkt für die spätere Gestaltung der Software vorgibt. Es sind aber viele weitere Gesichtspunkte für die Strukturierung vorhanden, wie z. B. die Umgebung, in welcher die Software ablauffähig sein muss, oder nichtfunktionale Gesichtspunkte, wie z. B. die Wartbarkeit. In frühen Entwicklungsphasen können Softwarekomponenten identifiziert werden, welche die geforderten Funktionen grob abbilden. Weiter sind die grundlegenden Abhängigkeiten innerhalb der Software sowie zu anderen Komponenten des mechatronischen Systems bekannt. Dies ist die Voraussetzung für die Modellierung der Gesamtzuverlässigkeit. Der Nachteil beim Vorliegen mehrerer Softwarekomponenten ist jedoch, dass sich diese durch Aufbau,

Komplexität, Nutzungsdaueranteil und somit schließlich auch in ihrer Ausfallrate unterscheiden.

Ein weiterer Punkt, der im Hinblick auf die praktische Anwendbarkeit der Methodik zu beachten ist, stellt die Berücksichtigung von ungenauen Informationen dar. Da die Zuverlässigkeitsbewertung in frühen Phasen – wie sich insbesondere bei den noch folgenden Anwendungsbeispielen zeigen wird – zu großen Anteilen auf dem Mitwirken von Fachexperten beruht, ist nahezu sicher von Informationen auszugehen, die aufgrund des Erfahrungscharakters derselben z. B. von Wertebereichen oder best and worst case Aussagen geprägt sind. Dies setzt die Verwendung eines Verfahrens voraus, mit dem stochastisch verteilte Informationen kombiniert werden können. An dieser Stelle wird wieder die Monte Carlo Methode genutzt.

Bei mechatronischen Systemen ist es nicht realitätsnah, lediglich Ausfallraten als Zuverlässigkeitsmaß zu nutzen, da damit das bekanntermaßen verschleißorientierte Ausfallverhalten mechanischer Komponenten nicht repräsentiert werden kann. Mittels der Monte Carlo Methode können aber Verteilungen beliebiger Art kombiniert werden, was auch dieses Problem behebt.

Im Folgenden werden die methodischen Grundlagen beschrieben, die es ermöglichen, auch komplexe mechatronische Strukturen mit mehreren Softwarekomponenten zuverlässigkeitstechnisch zu berücksichtigen. Das **Bild 6-4** zeigt beispielhaft eine solche Struktur.

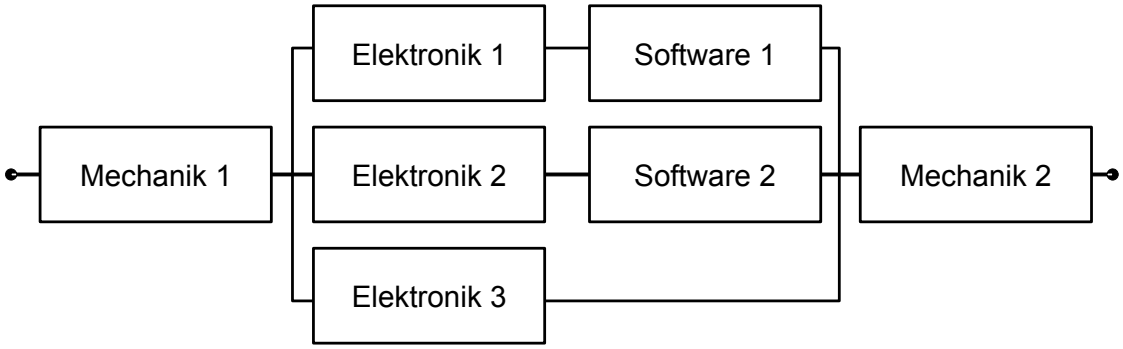


**Bild 6-4:** Komplexe mechatronische Zuverlässigkeitsstruktur

Wird jeder Komponente nur eine Ausfallart zugeordnet und sind diese unabhängig voneinander, so ergibt sich die Systemzuverlässigkeit $R_{System}$ für das Beispielsystem aus **Bild 6-4** entsprechend der Zuverlässigkeiten der Mechatronikkomponenten aus Mechanik ($R_{M1}$, $R_{M2}$), Elektronik ($R_{E1}$, $R_{E2}$, $R_{E3}$) und Software ($R_{S1}$, $R_{S2}$) zu

$$R_{System} = R_{M1} R_{M2} \left[1 - \left(1 - R_{E1} R_{S1}\right)\left(1 - R_{E2} R_{S2}\right)\left(1 - R_{E3}\right)\right]. \tag{6.3}$$

Um einen Wert für die Systemzuverlässigkeit ermitteln zu können, müssen die Einzelzuverlässigkeiten mathematisch beschrieben werden. Während für Mechanik und Elektronik häufig geeignete Zuverlässigkeitsmodelle vorliegen, muss für Softwarekomponenten ein geeignetes Zuverlässigkeitsmodell ausgewählt werden. Hierbei ist der Unterschied der verschiedenen Softwarekomponenten im Hinblick auf die Zuverlässigkeit zu berücksichtigen. Zudem ist zu beachten, dass in frühen Phasen zwar entsprechende Größen bekannt sind, welche die Zuverlässigkeit beeinflussen (z. B. Komplexität), aber nicht deren exakter Einfluss. Somit kann keine vollständige Modellparametrisierung vorgenommen werden.

### 6.3.1 Berücksichtigung mehrerer Softwarekomponenten

Nach den Überlegungen im vorherigen Abschnitt werden folgende Annahmen über das Ausfallverhalten der einzelnen Softwarekomponenten gemacht. Der Ausfallzeitpunkt der Softwarekomponenten ist unabhängig und folgt je einer Exponentialverteilung. Die Ausfallrate der *i*-ten Softwarekomponente ist gegeben durch eine einfache Gleichung der Form

$$\lambda_i = \alpha \cdot Einflussgröße_i . \tag{6.4}$$

Hierbei stellt der Faktor $\alpha$ einen grundlegenden Zusammenhang zwischen in frühen Phasen bestimmbaren Eigenschaften einer Softwarekomponente und deren Ausfallrate her. Es wird keinerlei Kenntnis über $\alpha$ vorausgesetzt. Die Größe $Einflussgröße_i$ steht für Eigenschaften der *i*-ten Komponente, für die in frühen Phasen eine stochastische Verteilung angegeben werden kann.

### 6.3.2 Defektdichte als Maß für die Software-Zuverlässigkeit

Die Defektdichte stellt das Verhältnis zwischen der Anzahl der Fehler und der Größe der untersuchten Software dar. Sie ist ein wichtiges Maß für die Software-Zuverlässigkeit [NAI 1998] und bietet sich daher als geeignete Einflussgröße für **Gleichung 6.4** an. Nach [EBE 1996] ist die Defektdichte interessanter als die absolute Zahl der Fehler, wobei die Größe eines Softwareprodukts durch die Zahl der Quellcodezeilen beschrieben werden kann.

In der Praxis auftretende Defektdichten sind beispielsweise nach [MCG 1994] Werte zwischen ungefähr 0,1 und 9 Fehler pro tausend Zeilen Quellcode (KLOC). In [HOL 2001] wird ein Fehler/KLOC als eine typische Zielgröße für die Softwareentwicklung genannt. Ein weiteres Beispiel mit Bezug zum Automobilbereich ist das Betriebssystem OSEK turbo, für welches laut Herstellerangaben Werte bis zu 0,07 Fehler/KLOC

erreicht werden. In [BIN 1997] werden weitere Anhaltswerte für Defektdichten aus verschiedenen Industrie- und Anwendungsbereichen genannt.

### 6.3.3 Abschätzung der Defektdichte

In [FEN 1999] wird vorgeschlagen, die Defektdichte mit Hilfe von Bayesian Belief Nets (BBN) in Abhängigkeit der Einflussgrößen Komplexität des umzusetzenden Problems sowie Programmier- und Testaufwand zu bestimmen. Meist liegt in den Unternehmen undokumentiertes Wissen in Form von subjektiven Entscheidungsabläufen vor, die u. a. auf langjährigem Erfahrungswissen basieren. Dieses Wissen kann mittels eines BBN formalisiert werden. Dabei handelt es sich um ein Netz aus Knoten und Kanten, in dem jeder Knoten eine bestimmte Einflussvariable repräsentiert, welche entweder einen diskreten oder einen kontinuierlichen Wertebereich aufweist. Abhängigkeiten zwischen Variablen können mittels gerichteter Kanten zwischen den Knoten dargestellt werden. Der Wert eines Knotens folgt einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, die bedingt auf die Werte seiner Vorgänger gegeben ist. Konkret wird in [FEN 1999] ein prototypisches BBN vorgestellt, welches sich als Beispiel für die Abschätzung der Defektdichte sehr gut eignet und in **Bild 6-5** etwas verkürzt dargestellt ist.

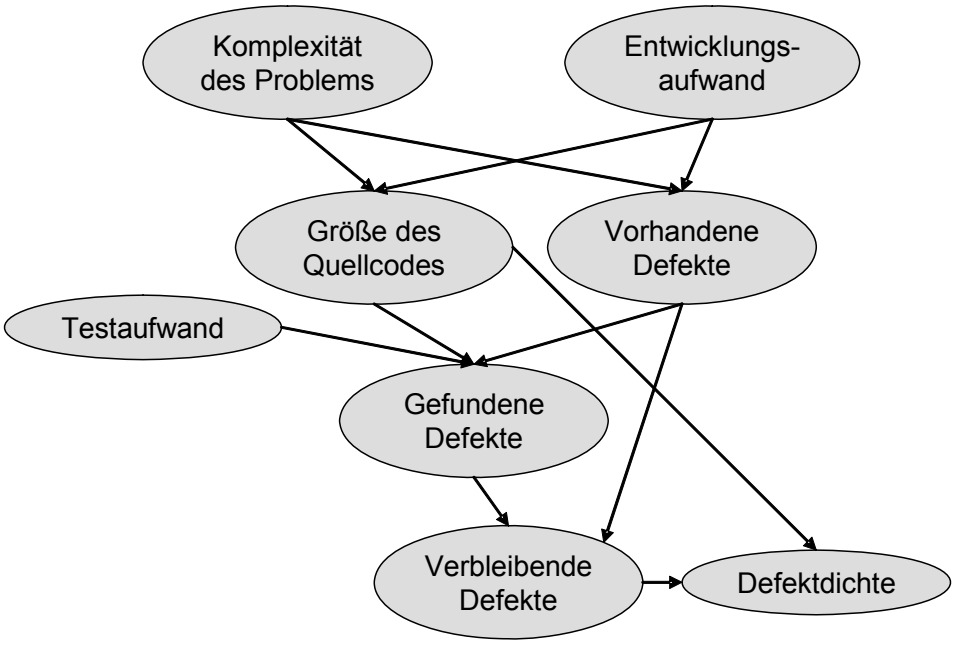


**Bild 6-5:** Beispiel für ein Bayesian Belief Net zur Ermittlung der Defektdichte [FEN 1999]

In diesem Beispiel haben die in frühen Phasen abschätzbaren Einflussfaktoren wie Problemkomplexität, Entwicklungs- und Testaufwand, Größe des Quellcodes usw. Auswirkungen auf die Defektdichte. Dieses einfache Beispiel kann nun beliebig verfeinert und an die spezifischen Bedürfnisse einer Anwendung angepasst werden. Der

Einfluss eines Knotens auf einen anderen über die gerichteten Kanten wird in Form von Tabellen angegeben. Die Werte in diesen Tabellen basieren auf dem Expertenwissen der jeweiligen Anwender. Ebenso können weitere Einflussfaktoren und deren Abhängigkeiten berücksichtigt werden, was eine firmenspezifische Ausprägung der Modellierung erlaubt.

Aus **Bild 6-5** ist ersichtlich, dass sich alle modellierten Einflussfaktoren auf die Zielgröße „Defektdichte“ fokussieren. Auf diese Art und Weise könnten auch noch weitere die Softwareausfallrate beeinflussende Größen modelliert werden. In [FEN 1999] werden Ansätze mit mehreren Einflussgrößen jedoch kritisch beleuchtet, da ein Softwarezuverlässigkeitsmodell bereits ab wenigen Einflussfaktoren eine ausreichende Korrelation zum realen Verhalten aufweist und jede zusätzliche Dimension eine immer geringere Verbesserung der Korrelation bewirkt [DEN 2002]. Weiter wird in [MUN 1990] darauf hingewiesen, dass eine einzelne Maßzahl mehrere Einflussfaktoren abbilden kann. Ein Mittel hierzu sind BBN. Dementsprechend kann man viele der in frühen Phasen vorhandenen Informationen über Softwarekomponenten in ihrer Auswirkung auf die Defektdichte modellieren, was zu Aussagen über die Defektdichten der einzelnen Softwarekomponenten führt. Dementsprechend wird die Defektdichte in dieser Arbeit als zentrale entwicklungsseitige Einflussgröße betrachtet. Entsprechend gilt

$$\lambda_i = \alpha \cdot dd_i , \tag{6.5}$$

wobei $dd_i$ die Defektdichte der Softwarekomponente $i$ bezeichnet.

### 6.3.4 Modellierung weiterer Einflussfaktoren

Eine direkte Berechnung der Systemzuverlässigkeit ist auf dieser Basis aber noch nicht darstellbar, da im Falle von **Gleichung 6.4** der Modellparameter $\alpha$ unbekannt ist. Zusätzlich zu dieser Problematik muss berücksichtigt werden, dass es neben der Defektdichte auch noch Einflussfaktoren gibt, die sich erst beim Einsatz einer Komponente auf die Zuverlässigkeit auswirken können. So spielt beispielsweise die unterschiedliche Nutzungsintensität von Softwarekomponenten – in diesem Zusammenhang wird oft der Begriff „*operational profile“* genutzt – eine Rolle.

Eine notwendige Bedingung für das Auftreten eines Softwarefehlers ist, dass die fehlerhafte Stelle ausgeführt wird. Somit weist eine Komponente, die nur während 10 % der Systembetriebszeit genutzt wird, ein geringeres Ausfallrisiko auf, als wenn sie permanent betrieben würde. Um diesen Umstand in der Zuverlässigkeitsmodellierung zu berücksichtigen, wird das Modell aus **Gleichung 6.5** zu einem verfeinerten Modell der Form

$$\lambda_i = \alpha \cdot dd_i \cdot op_i \tag{6.6}$$

weiterentwickelt.

Der Faktor $op_i$ wird hierbei wiederum aus Erfahrungswissen bestimmt. Aufgrund der schon mehrfach beschriebenen Datenungenauigkeiten in frühen Entwicklungsphasen sind auch die Defektdichte und der Faktor $op_i$ eventuell davon beeinflusst. Auf Basis des bisher Gezeigten ist es also möglich, fast allen Größen für die Bestimmung der Systemzuverlässigkeit einen quantitativen Wert zuzuordnen. Diese Werte können deterministisch sein oder durch eine stochastische Verteilung beschrieben werden. Lediglich der Faktor $\alpha$ ist noch unbekannt, da man ihn nicht direkt aus Entwicklungsdaten heraus bestimmen kann.

Somit stellt der Faktor $\alpha$ bei der Bestimmung der Zuverlässigkeit der verschiedenen Lösungsvarianten den letzten verbleibenden Freiheitsgrad dar. Diese Gegebenheit erlaubt es, diesen Faktor als Vergleichsmaßstab für den Entwicklungsspielraum zu nutzen. Zu berücksichtigen ist hierbei die Voraussetzung, dass der Faktor $\alpha$ für alle Softwarekomponenten eines Konzeptes als konstant angenommen wird. Dies ist zulässig, da zunächst davon ausgegangen wird, dass sich alle Softwarekomponenten bei Auftreten eines Fehlers gleich verhalten, wie oben bereits beschrieben wurde. Falls dies nicht ausreichend ist, können – wie bereits für den Faktor *op* dargestellt – weitere komponentenspezifische Einflussfaktoren im Modell berücksichtigt werden. Der Ansatz lässt sich aber nicht ohne weiteres auf ein mehrdimensionales $\alpha$ erweitern.

Es ist an dieser Stelle zu verdeutlichen, dass die Voraussetzung für das geschilderte Vorgehen die Anwendung eines einparametrigen Modells für die Software-Zuverlässigkeit ist. Würde ein Modell mit mehreren Parametern genutzt, so bestünden Unklarheiten bei der relativen Gewichtung der einzelnen Parameter. Die Anwendung eines nur einparametrigen Modells ist aber aus den bereits beschriebenen Gründen gerechtfertigt. Von besonderer Bedeutung ist hierbei allerdings der Umstand, dass die Defektdichte bereits mittels eines Bayes'schen Modells mit mehreren Einflussgrößen modelliert wurde. Dem verbleibenden Faktor $\alpha$ kommt in der beschriebenen Vorgehensweise die Aufgabe der Berücksichtigung aller durch die restliche Modellierung unberücksichtigten, die Ausfallrate erhöhenden, Einflüsse zu.

## 6.4 Einbindung der Gesamtmethode in den V-Prozess

In Kapitel 5 wurde bereits beschrieben, dass der V-Prozess die zu berücksichtigende Maßgabe für eine zu entwickelnde Methodik ist. Sämtliche Methodenschritte müssen in ihrem Inhalt und der zeitlichen Anordnung mit den Arbeitsphasen im V-Prozess kompatibel sein. Auf diese Art und Weise wird verhindert, dass eine Methodik z. B.

aufgrund von Zusatzarbeiten, die stark über den normalen im Rahmen des V-Prozesses vorgesehenen Arbeitsaufwand hinausgehen, nicht praktisch angewandt wird. Das **Bild 6-6** zeigt, wie sich die verschiedenen in Kapitel 3, Kapitel 5 und Kapitel 6 beschriebenen Arbeitsschritte an den Ablauf der Systementwurfsphase des V-Prozesses angliedern lassen.

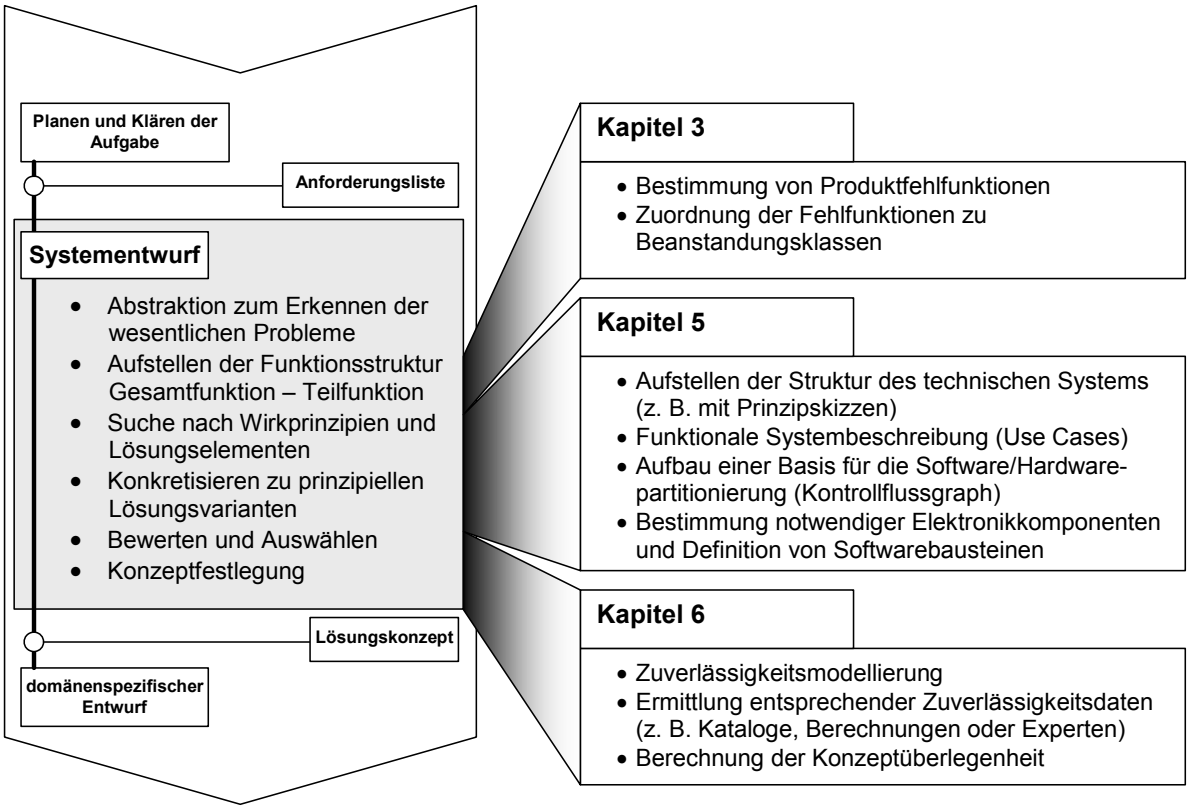


**Bild 6-6:** Zuordnung der Methodenschritte zu der Arbeitsfolge des V-Prozesses

Die in Kapitel 3 aufgezeigte Zuordnung von Fehlfunktionen zu Beanstandungsklassen basiert zu großen Teilen auf den im Rahmen der Produktentwicklung abgeleiteten Produktfunktionen. Die in Kapitel 5 gezeigten Möglichkeiten zur frühzeitigen Systembeschreibung sind größtenteils identisch mit Darstellungsformen, die im Rahmen der eigentlichen Produktentwicklung genutzt werden. Die Bestimmung der Konzeptüberlegenheit trägt schlussendlich zum Konzeptauswahlprozess bei.

# 7 Anwendungsbeispiele

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Gesamtmethodik zur zuverlässigkeitstechnischen Bewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen soll anhand zweier Beispiele verdeutlicht werden. In einem ersten Beispiel wird das allgemeine Vorgehen gesamtheitlich aufgezeigt. Hierzu kommt wieder die bereits thematisierte Überbrückungskupplung zum Einsatz. In einem zweiten Beispiel werden Besonderheiten der entwickelten Methodik gezeigt. In diesem Beispiel sind zwei mögliche Lösungen für die Entwicklung eines PKW-Automatikgetriebes mit drei Gangstufen zu bewerten.

## 7.1 Entwicklung einer Überbrückungskupplung

Die funktionalen Anforderungen an eine Überbrückungskupplung seien diejenigen, die bereits in Abschnitt 5.2 beschrieben wurden. In einem ersten Schritt werden Fehlfunktionen in ein Beanstandungsklassensystem entsprechend [VDA 2000] eingeteilt. So wird u. a. die Fehlfunktion „Kupplung öffnet nicht beim Anhalten“ als eine Fehlfunktion der Beanstandungsklasse II eingestuft. Das **Bild 7-1** zeigt das Vorgehen.

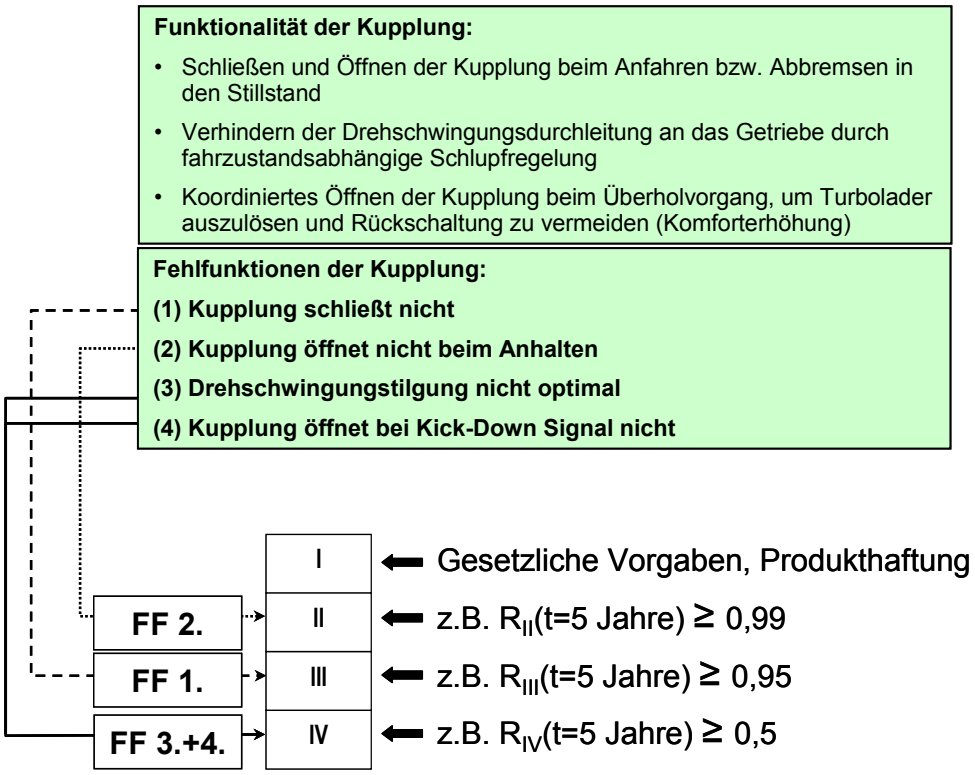


**Bild 7-1:** Ermittlung und Einteilung von Fehlfunktionen in Beanstandungsklassen

Würde diese Fehlfunktion auftreten, so würde dies zum Absterben des Motors führen. Den einzelnen Klassen werden Zuverlässigkeitszielwerte zugewiesen, die sich u. a. aus marketingstrategischen Überlegungen ergeben.

Für die Realisierung einer Überbrückungskupplung stehen zwei Alternativen zur Diskussion. Es handelt sich hierbei um eine ÜK mit hydraulischer und alternativ einer piezoelektrischen Ansteuerung, wie **Bild 7-2** verdeutlicht.

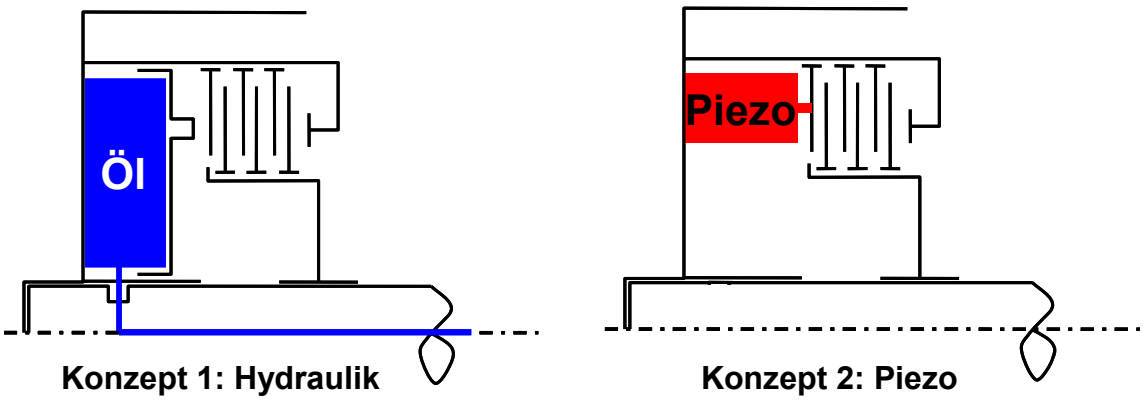


**Bild 7-2:** Zwei Konzepte zur Realisierung einer Überbrückungskupplung

Es wird angenommen, dass für beide Konzepte die in Kapitel 5 beschriebene Systemanalyse in frühen Entwicklungsphasen durchgeführt wurde. Hierbei ergibt sich zusätzlich zu dem in **Bild 5-9** dargestellten Realmodell der hydraulischen Realisierung das in **Bild 7-3** gezeigte Realmodell für das piezobasierte Konzept. Es ist im Vergleich zu Konzept 1 festzustellen, dass die Ölpumpe und das Magnetventil fehlen. An die Stelle des Drucksensors ist nun ein Kraftmesser getreten. Entsprechend der veränderten physikalischen Gestalt des Konzeptes ändert sich im Vergleich zu Konzept 1 auch der Regelungsalgorithmus.

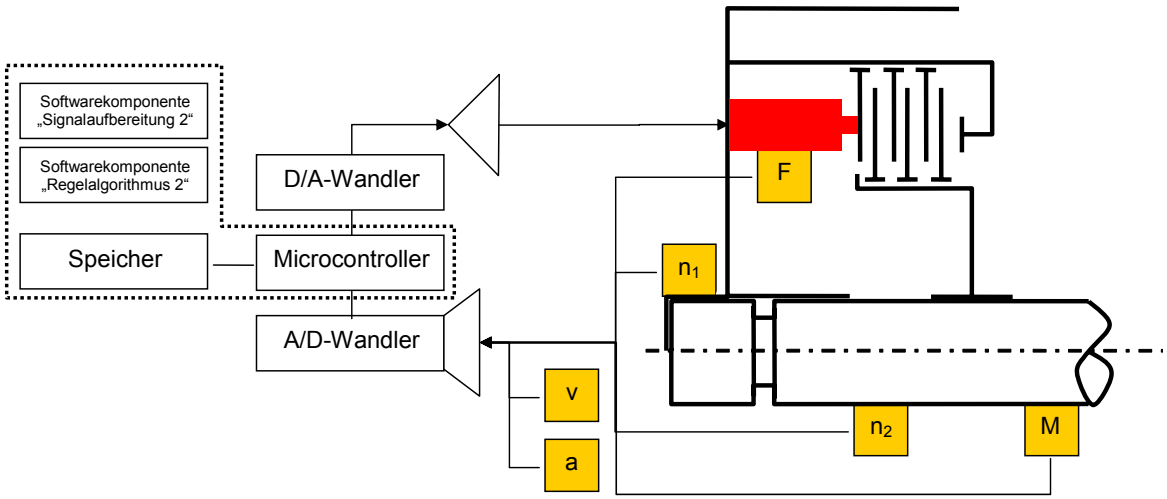


**Bild 7-3:** Realmodell des piezobasierten Konzeptes

Es soll an dieser Stelle noch einmal betont werden, dass es für die Konzeptbewertung in frühen Phasen im Hinblick auf die Regelungsalgorithmik unerheblich ist, ob und welche Teile in Software oder Hardware ausgeführt werden, da in beiden Fällen Spezifikations- und Implementierungsfehler auftreten können.

Nach der Systemanalyse wird die Zuverlässigkeit modelliert. Hierzu wird, wie in Abschnitt 3.3.3 beschrieben, die Fehlerbaummethode genutzt. Es wird ein Fehlerbaum für jede Beanstandungsklasse definiert.

In diesem Beispiel wird die Zuverlässigkeit bezüglich der Beanstandungsklasse II modelliert. Hierbei ist lediglich die Fehlfunktion „Kupplung öffnet nicht beim Anhalten“ zu berücksichtigen. Der entsprechende Fehlerbaum ist in **Bild 7-4** dargestellt. Es handelt sich hierbei um die Beschreibung für das piezobasierte Konzept.

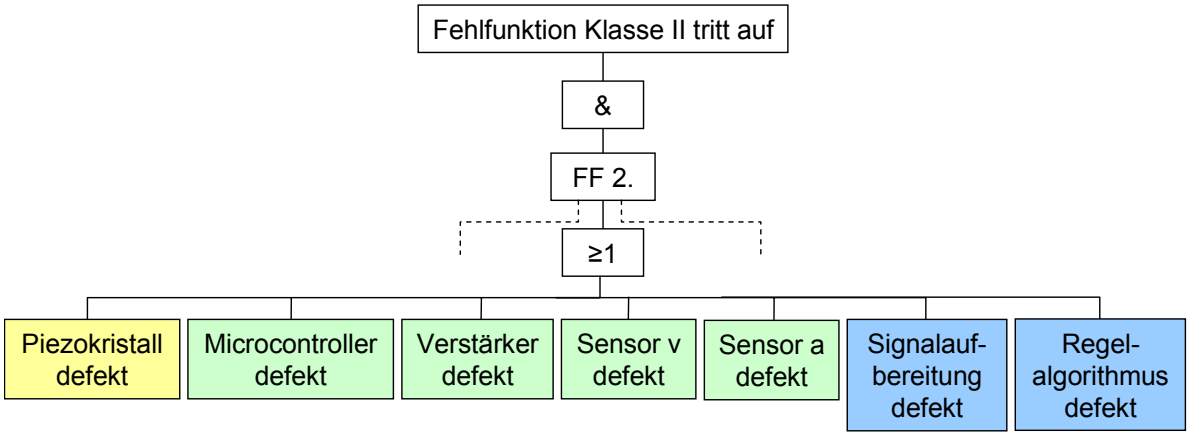


**Bild 7-4:** Fehlerbaum für Beanstandungsklasse II des piezobasierten Konzeptes

Es ist darauf hinzuweisen, dass der Detaillierungsgrad eines Fehlerbaums speziell in frühen Phasen sehr stark von dem Wissen der beteiligten Experten abhängig ist. Besonders bei Produkten mit Ähnlichkeiten zu Vorgängern können hier u. a. aus FMEAs und Testberichten Informationen gewonnen werden.

Analog zu **Bild 7-4** wird der Fehlerbaum für Konzept 1 aufgestellt. Somit ist die Zuverlässigkeitsmodellierung als notwendiger Schritt für die Bewertung beendet. Auf Basis eines solchen Zuverlässigkeitsmodells lässt sich eine Modellgleichung für die Zuverlässigkeit ableiten. Für Konzept 2 lautet diese

$$R_{II}(t) = e^{-t\cdot(\lambda_{Piezo}+\lambda_{Microcontroller}+\lambda_{Verstärker}+\lambda_{Sensor1}+\lambda_{Sensor2}+\lambda_{Logik1}+\lambda_{Logik2})}. \qquad (7.1)$$

Es wird in diesem Beispiel angenommen, dass sämtliche Komponenten ein exponentiell beschreibbares Ausfallverhalten aufweisen. Diese Annahme ist allerdings keine notwendige Voraussetzung für die Anwendbarkeit der entwickelten Vorgehensweise.

Entsprechend der Ansiedlung in frühen Entwicklungsphasen sind die im Folgenden in **Gleichung 7.1** einzusetzenden Ausfallraten der Konzeptkomponenten als teilweise nicht exakt bestimmbar angenommen. Diese Annahme spiegelt die reale Situation in frühen Entwicklungsphasen sehr gut wider. Generell wird die Anwendbarkeit der Methode durch die Berücksichtigung ungenauer Informationen erweitert. So ist es bei mechanischen Komponenten, wie in Kapitel 4 gezeigt wurde, selten möglich, schon in frühen Phasen genaue Verteilungsparameter abzuleiten.

Für das Piezokonzept wird angenommen, dass für die Komponenten Verstärker, Beschleunigungs- und Geschwindigkeitssensor sowie für den Microcontroller die Ausfallrate aus Katalog- und Herstellerwerten genau bestimmbar ist. Die Ausfallrate soll für diese Komponenten jeweils einen Wert von 0,0003 Ausfällen pro Jahr annehmen. Die Datengewinnung für den Piezokristall liefert basierend auf Expertenschätzungen lediglich einen gleichverteilten Wertebereich und keinen exakten Wert. Die Grenzwerte der Gleichverteilung lauten 0,0001 und 0,0002 Ausfälle pro Jahr.

Für die beiden Logikkomponenten müssen entsprechend **Gleichung 6.6** die Größen Defektdichte und Nutzungsintensität bestimmt werden. Die Defektdichte wird hierbei mittels eines Bayes'schen Netzes bestimmt. Es wird angenommen, dass sich für die Defektdichten bestimmte Dreiecksverteilungen und für die Nutzungsintensitäten wiederum Gleichverteilungen ergeben, deren quantitative Beschreibung an dieser Stelle nicht weiter verfolgt wird, da sie zur Erläuterung des weiteren Vorgehens nicht nötig ist.

Werden die gesammelten Daten in **Gleichung 7.1** eingesetzt, so ergibt sich der Zusammenhang

$$R_{II}(t) = e^{-t\cdot(\lambda_{Piezo}+4\cdot 0{,}0003+\alpha\cdot dd_{Logik1}\cdot op_{Logik1}+\alpha\cdot dd_{Logik2}\cdot op_{Logik2})}. \tag{7.2}$$

Zusätzlich ist das vorgegebene Zuverlässigkeitsziel für Beanstandungsklasse II zu berücksichtigen. Wird dieses in **Gleichung 7.2** eingesetzt, so ergibt sich

$$R_{II}(t=5) \geq 0{,}99 \;\Leftrightarrow\; 0{,}99 \leq e^{-5\cdot(\lambda_{Piezo}+0{,}0012+\alpha\cdot dd_{Logik1}\cdot op_{Logik1}+\alpha\cdot dd_{Logik2}\cdot op_{Logik2})}. \tag{7.3}$$

Um das Zuverlässigkeitsziel gerade noch zu erreichen, darf der Modellparameter α einen zu bestimmenden Schrankenwert $\alpha_{zul}$ nicht überschreiten. Wird diese Information berücksichtigt, so folgt

$$0{,}99 = e^{-5\cdot(\lambda_{Piezo}+0{,}0012+\alpha_{zul}\cdot dd_{Logik1}\cdot op_{Logik1}+\alpha_{zul}\cdot dd_{Logik2}\cdot op_{Logik2})}. \tag{7.4}$$

Die einzig verbleibende Unbekannte in **Gleichung 7.4** ist der Schrankenwert $\alpha_{zul}$. Durch Umstellen der **Gleichung 7.4** nach $\alpha_{zul}$ ergibt sich

$$\alpha_{zul} = \frac{\frac{ln\,0{,}99}{-5} - \lambda_{Piezo} - 0{,}0012}{dd_{Logik1} \cdot op_{Logik1} + dd_{Logik2} \cdot op_{Logik2}}. \qquad (7.5)$$

Da einige der Größen in **Gleichung 7.5** stochastisch verteilt sind, ist auch $\alpha_{zul}$ eine stochastisch verteilte Größe. Aufgrund der Vielzahl möglicher als Zufallsvariablen zu betrachtender Einflussgrößen ist $\alpha_{zul}$ nur selten analytisch bestimmbar.

An dieser Stelle kommt die Monte Carlo Methode zum Einsatz, mit der die Verteilung von $\alpha_{zul}$ beliebig genau angenähert werden kann. Für die Bestimmung einer Konzeptüberlegenheit ist analog zu dem Vorgehen in Abschnitt 4.5 in jeder Monte Carlo Replikation die Differenz der konzeptspezifischen Faktoren $\alpha 1_{zul}$ und $\alpha 2_{zul}$ nötig. Ergibt sich ein positiver Wert, so ist das Konzept 1 überlegen und vice versa. Werden die Differenzen $\alpha 1_{zul}$ - $\alpha 2_{zul}$ über alle Replikationen hinweg in einem Summenhäufigkeitsdiagramm aufgetragen, so ergibt sich ein in **Bild 7-5** dargestellter Graph. Aus **Bild 7-5** kann gefolgert werden, dass in 91 % aller Monte Carlo Replikationen die hydraulische Lösungsvariante (Konzept 1) der piezoelektrischen (Konzept 2) überlegen ist. Bei einer entsprechend hohen Anzahl an Replikationen ist dies ein guter Schätzwert für die reale Überlegenheitswahrscheinlichkeit.

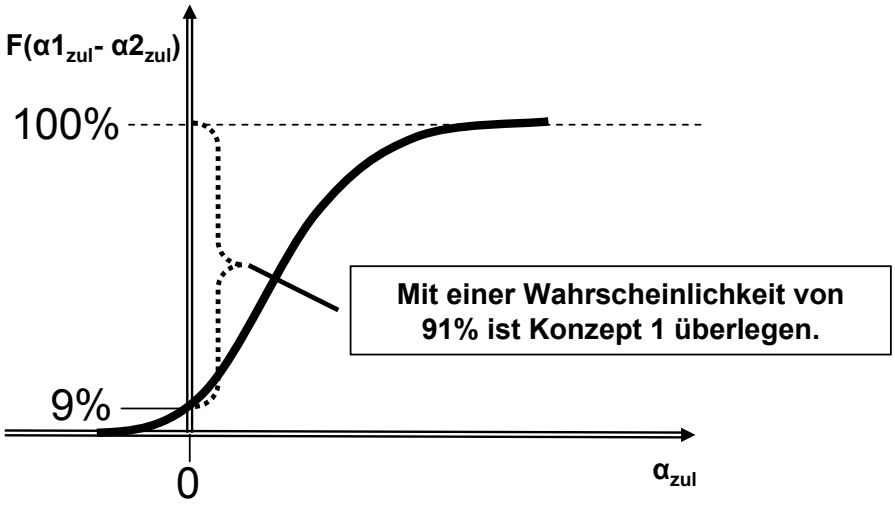


**Bild 7-5:** Bestimmung der Überlegenheitswahrscheinlichkeit

## 7.2 Entwicklung eines Automatgetriebes

Das zweite Anwendungsbeispiel betrachtet die Entwicklung eines Automatgetriebes. In diesem Beispiel werden besonders die praktische Anwendung Bayes'scher Netze und die Eigenschaften von Softwarekomponenten bei der Zuverlässigkeitsmodellierung berücksichtigt.

### 7.2.1 Mögliche Lösungsvarianten

In diesem Beispiel ist die Grundlage der Betrachtungen die Entwicklung eines Automatgetriebes mit drei Gangstufen. Es liegt eine Bauraumrestriktion vor, die von beiden Konzepten eingehalten werden muss. Für die Entwicklung werden ansonsten keine weiteren Einschränkungen vorgegeben.

Die in der Konzeptphase erarbeiteten Lösungsvorschläge sind in **Bild 7-6** dargestellt. Es handelt sich einerseits um ein CVT mit einem Wandler als Anfahrelement. Mittels der Getriebesteuerung können die geforderten drei festen Übersetzungen dargestellt werden. Das Alternativkonzept ist ein 3-Gang-Stufenautomat, ebenfalls mit Wandleranfahrelement und mit Lamellenkupplungen.

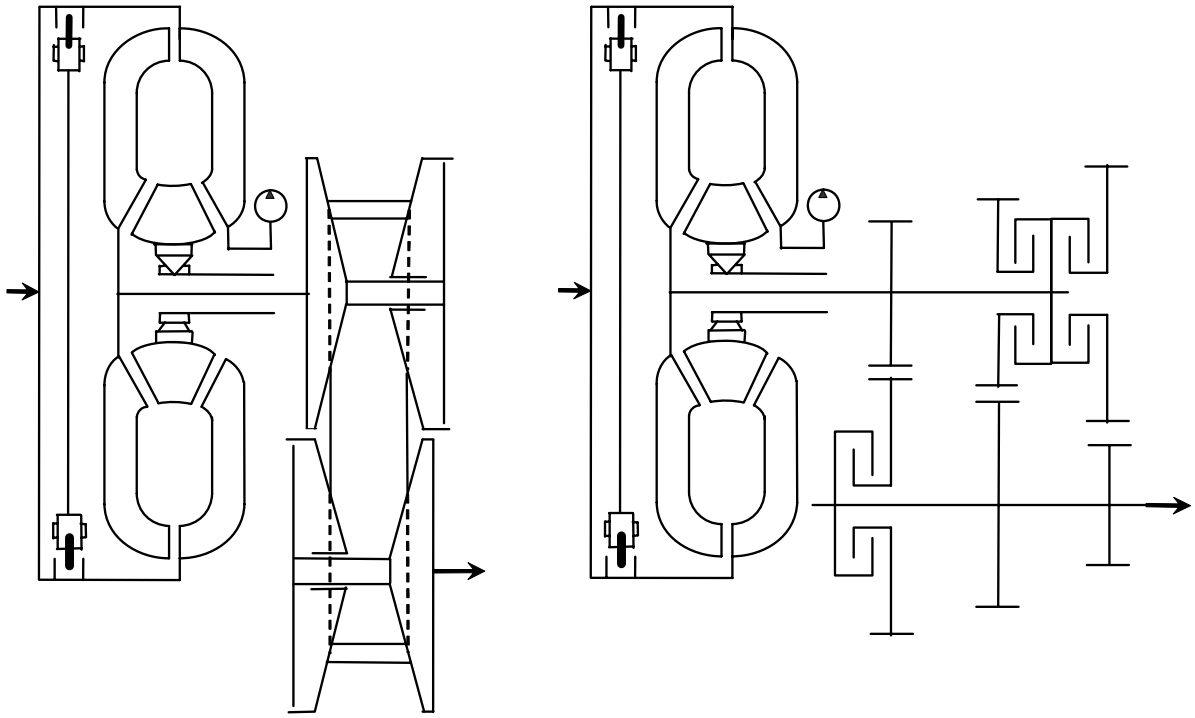

**Bild 7-6:** Zu vergleichende Konzepte CVT (links) und Stufenautomat (rechts) [JÄG 2005b]

Die im Rahmen dieses Beispiels genutzten Beschreibungen und Daten sind künstlich und nicht vollständig beschrieben. Die im Folgenden angegebenen Werte und Annahmen haben hauptsächlich die Aufgabe, ein Szenario darzustellen, wie es in frühen Phasen sehr gut existieren könnte.

### 7.2.2 Vorhandene Informationen

Das Getriebeeingangsmoment kann aufgrund noch existierender Planungsunsicherheiten lediglich in Form einer Gleichverteilung angegeben werden und ist für beide Konzepte identisch. Die Gangstufen der beiden Getriebe sollen die Übersetzungen 2,9 (1.

Gang), 2,0 (2. Gang) und 1 (3. Gang) liefern. Die Laufzeitanteile des Wandlers sowie der drei Gänge gemessen in Umdrehungen der Getriebeeingangswelle werden als bekannt vorausgesetzt. Es wird ferner davon ausgegangen, dass das Getriebeeingangsmoment als konstant vorausgesetzt werden kann. Andernfalls müsste mit Lastkollektiven gearbeitet werden.

Zunächst muss für die Konzepte die mechanische Struktur zuverlässigkeitstechnisch analysiert werden.

Es ergeben sich hierbei für das CVT die kritischen Komponenten

- Axiallager im Wandler,
- Ölpumpe,
- Lauffläche des oberen Kegelscheibensatzes und
- die Lauffläche des unteren Kegelscheibensatzes.

Bei dem Stufenautomaten wird der identische Wandler und somit auch dasselbe Axiallager verbaut, was bei annahmegemäß identischer Belastung zu gleichem Ausfallverhalten führt. Die Ölpumpe im CVT ist baugleich mit derjenigen im Stufenautomaten, wird dort aber weniger stark belastet. Das Hauptunterscheidungsmerkmal zwischen CVT und Stufenautomat sind die Zahnradsätze des Stufenautomaten. Mit dem Vorhandensein von Zahnrädern gekoppelt ist die Berücksichtigung der Ausfallarten Zahnbruch und Grübchenbildung.

Im Rahmen einer quantitativen Zuverlässigkeitsanalyse müssen die verschiedenen Ausfallarten quantitativ beschrieben werden. Insbesondere in frühen Entwicklungsphasen ist dies jedoch nur eingeschränkt möglich. Manche der Parameter, welche die Verteilung der Ausfallarten beschreiben, sind nur näherungsweise bekannt. Diese Unsicherheit kann dadurch berücksichtigt werden, dass den entsprechenden Parametern statt eines festen Zahlenwertes eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zugeordnet wird. Die folgende Datenbeschreibung spiegelt dies wider.

Bei dem Wandler-Axiallager wird von Weibull verteiltem Ausfallverhalten ausgegangen. Aufgrund von Vorgängerinformationen wird eine $B_{10}$-Lebensdauer angenommen. Diese beträgt 800 Mio. Umdrehungen bei einem Eingangsdrehmoment von 130 Nm. Basierend auf Literaturangaben wird ein Weibullformparameter von $b = 1{,}1$ gewählt.

Für die Ölpumpe wird entsprechend der nicht von Ungenauigkeiten beeinflussten Verteilungsparameter $t_0$, $b$ und $B_{10}$ ein dreiparametriges Weibull-Ausfallverhalten angenommen. Dabei gibt $t_0$ die ausfallfreie Zeit an.

Bei den Laufflächen der Kegelscheibensätze ist festzustellen, dass der obere motornahe Scheibensatz aufgrund der geringeren Anpressradien höhere flächenspezifische Anpressungen auf die Kette aufzubringen hat als der untere Satz, was zu einem verschärften Oberflächenverschleiß des oberen Satzes führt.

Da die Scheibensätze ein vergleichsweise neues Produkt sind, bestehen über das Ausfallverhalten in einer frühen Entwicklungsphase entsprechend große Datenunsicherheiten. So sind für die Scheibensätze Vorversuche durchgeführt worden. Es liegen $B_{50}$-Lebensdauerwerte des motornahen Scheibensatzes für die einzelnen Gänge in Höhe von 300 Mio. Umdrehungen für den 1. Gang und 360 Mio. Umdrehungen für den 2. Gang vor. Im dritten Gang traten in den Vorversuchen keine Ausfälle auf. Aufgrund einer Wöhlerlinienüberlegung kombiniert mit einer Spannungsanalyse wird eine gleichverteilte $B_{50}$-Lebensdauer des 3. Ganges angenommen. Diese wird auf den Abtriebsscheibensatz übertragen.

Für die Formparameter $b$ der einzelnen Gänge können aufgrund der geringen Versuchsumfänge keine sicheren Werte angegeben werden. Zur Beschreibung dieser Unsicherheiten wird ebenfalls wieder eine Gleichverteilung herangezogen.

Beim Stufenautomatikgetriebe wird dieselbe Ölpumpe wie beim CVT eingesetzt, nur wird diese weniger stark belastet. Die entsprechend angepassten Verteilungsparameter $t_0$, $b$ und $B_{10}$ werden teilweise stochastisch beschrieben, weil die vergleichsweise geringere Belastung in ihrer Auswirkung auf die Lebensdauerverteilung bisher nicht genau berechnet werden konnte.

Da es sich bei den im Stufenautomaten verwendeten Zahnrädern um Bauteile handelt, die schon sehr lange im Hinblick auf Lebensdaueraspekte untersucht werden, existieren etablierte Vorgehensweisen, wie z. B. die DIN 3990. Auf Basis der Bauraumrestriktion erfolgt eine Vordimensionierung der Zahnräder zur Bestimmung näherungsweiser Geometriegrößen. Wie schon in Abschnitt 4.5 gezeigt, gehen in die Berechnungsvorschriften nach [DIN 3990] etliche – in frühen Phasen mit Ungenauigkeiten gekoppelte – Parameterwerte ein. Diese werden durch geeignete Verteilungen beschrieben und in die Berechnung einbezogen.

### 7.2.3 Aufbau der Steuerungsarchitektur der beiden Getriebe

Als Beispiel für die Steuerungsarchitektur des CVT wurde eine vereinfachte Architektur basierend auf [GRE 2004] verwendet, wie sie übersichtsweise in **Bild 7-7** wiedergegeben ist. Die Steuerung wird nachfolgend aus der Sicht des Kenntnisstandes in frühen Phasen und im Hinblick auf die Zuverlässigkeitsbetrachtung beschrieben. Für

das Beispiel des Stufenautomaten wird auf entsprechende Änderungen der Steuerung im Vergleich zum CVT hingewiesen.

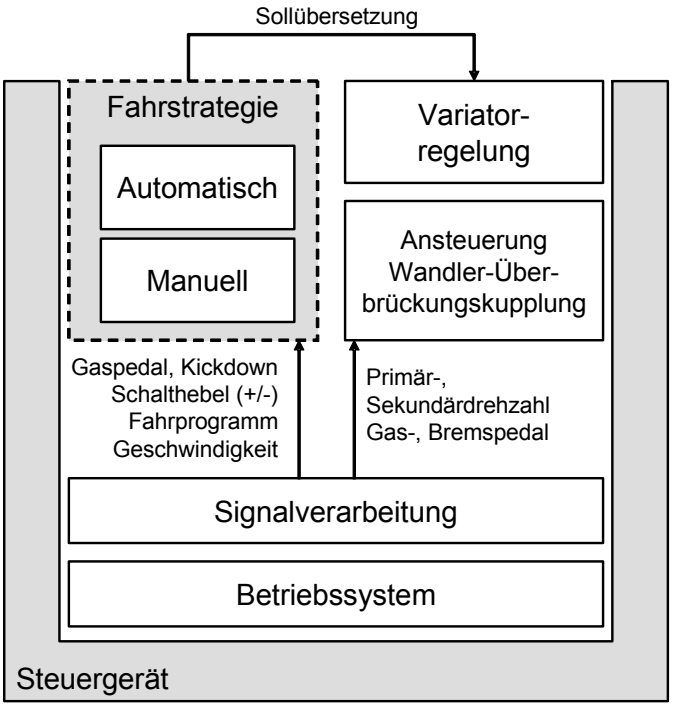


**Bild 7-7:** Steuergerät mit Softwarekomponenten und Signalen [JÄG 2005b]

### 7.2.4 Steuergerät

Das Steuergerät soll aus einem Mikrocontroller sowie der entsprechenden Software bestehen. Es wird angenommen, dass auf dem Controller Speicher sowie Schnittstellen für Feldbusse (z. B. CAN) und andere Ein- und Ausgangssignale untergebracht sind. Sensoren zur Erfassung von Signalen (z. B. Drehzahlsensor) und Aktoren zur Beeinflussung der eigentlichen physikalischen Prozessgrößen (z. B. Öffnen oder Schließen von Ventilen) sollen der Einfachheit halber nicht betrachtet werden. Sie können aber als weitere Komponenten in das Modell eingefügt werden. Die Software zur Getriebesteuerung soll die Komponenten

- Betriebssystem,
- Signalverarbeitung,
- Fahrstrategie (Automatisch/Manuell),
- Regelung der Hydraulik zur Einstellung des Getriebes (Variatorregelung) und
- Ansteuerung der Wandler-Überbrückungskupplung

umfassen.

Die genannten Komponenten werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Betriebssystem:

Auf dem Steuergerät stellt ein Betriebssystem grundlegende Basisdienste zur Verfügung. Hierzu zählt u. a. das Aktivieren und Beenden verschiedener Tasks. Fällt das Betriebssystem aus, so stehen diese Basisdienste nicht mehr zur Verfügung und das gesamte Getriebe funktioniert nicht mehr wie erwartet.

Umwelterkennung / Signalverarbeitung:

Hier werden die erfassten Signale aufbereitet und den anderen Komponenten als Eingabe zur Verfügung gestellt. Manche Signale, wie z. B. die Aktivität des Fahrers, werden dabei erst aus mehreren Sensorwerten durch die Umwelterkennung berechnet. Da diese Komponente in dem gezeigten Beispiel nicht weiter verfeinert wird, wird angenommen, dass das Getriebe nicht mehr ordnungsgemäß funktioniert, sobald ein Fehler auftritt und damit falsche Signale ausgegeben werden. Eine mögliche Verfeinerung wären Fehlertoleranzmaßnahmen, wie z. B. die Einführung einer Plausibilitätsprüfung.

Fahrstrategie:

Durch die Fahrstrategie wird die optimale Übersetzung für den aktuellen Fahrzustand bestimmt. Der Fahrer kann wählen, ob er manuell schalten möchte oder ob der Schaltvorgang automatisch gesteuert werden soll. Beim CVT müssen im manuellen Fahrbetrieb feste virtuelle Übersetzungen vorgegeben werden, zwischen denen gewählt werden kann. Da sowohl manuelles wie auch automatisches Schalten die Funktionalität des Getriebes gewährleisten, wird angenommen, dass beide Komponenten ausfallen müssen, damit auch das Gesamtsystem Getriebe ausfällt. Es liegt somit bezüglich der Fahrstrategie eine Redundanz vor.

Variatorregelung:

Diese Komponente ist für die Regelung des Drucks verantwortlich, mit dem das Schubgliederband an den Variator angepresst wird. Je nach geforderter Übersetzung wird die Verstellung des Variators so durchgeführt, dass ein Durchrutschen des Bandes stets vermieden wird. Ein Ausfall dieser Komponente ist als sehr kritisch einzustufen, da dadurch das Getriebe nachhaltig beschädigt werden kann. Diese Komponente entfällt beim Stufenautomaten, da hier kein Schubgliederband vorhanden ist, sondern Zahnradstufen eingesetzt werden. Die Hydraulik muss lediglich so angesteuert werden, dass der korrekte fest vorgegebene Gang angewählt wird.

Ansteuerung der Wandler-Überbrückungskupplung:

Der Wandler ermöglicht das Anfahren und Anhalten des Fahrzeugs. Bei höheren Geschwindigkeiten soll die Wandler-Überbrückungskupplung geschlossen werden, um so den Verlust durch Wärmebildung möglichst gering zu halten. Es wird angenommen, dass diese Komponente sowohl für das CVT wie auch für den Stufenautomaten identisch ist. Fällt die Überbrückungskupplung aus, so wird davon ausgegangen, dass damit die Funktion des gesamten Getriebes stark beeinträchtigt wird.

### 7.2.5 Zuverlässigkeitsblockschaltbild

Aus den obigen Schilderungen ergibt sich das in **Bild 7-8** dargestellte Zuverlässigkeitsblockschaltbild für die Getriebesteuerung des CVT. Da sowohl der automatische wie auch der manuelle Schaltvorgang das Funktionieren des Gesamtsystems gewährleisten, bilden diese beiden Komponenten eine Redundanz. Im Fall des Stufenautomaten entfällt, wie oben beschrieben, die Variatorregelung.

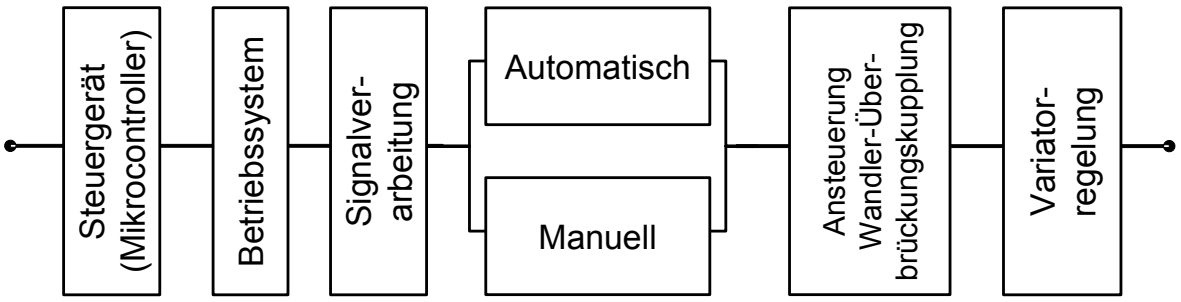


**Bild 7-8:** Zuverlässigkeitsblockschaltbild der CVT-Getriebesteuerung [JÄG 2005b]

### 7.2.6 Bestimmung der Defektdichte für die Softwarekomponenten

Anhand eines geeigneten Modells bzw. dessen firmenspezifischer Ausprägung muss nun zunächst die Defektdichte der einzelnen Softwarekomponenten abgeschätzt werden. Basierend auf dem Vorgehen entsprechend des Bayesian Belief Nets aus **Bild 6-5** wird im Rahmen dieses Beispiels angenommen, dass die Komplexität des softwaretechnisch umzusetzenden Problems sowohl die Größe des Quellcodes wie auch die Zahl der vorhandenen Defekte erhöht. Auf der anderen Seite sinken diese beiden Werte mit wachsendem Entwicklungsaufwand. Somit gilt in Form einer Funktionsbeschreibung

$$Vorhandene\,Defekte = f_1\left(Problemkomplexität, Entwicklungsaufwand, \varepsilon_1\right) \text{ und} \tag{7.6}$$

$$Quellcodegröße = f_2\left(Problemkomplexität, Entwicklungsaufwand, \varepsilon_2\right). \tag{7.7}$$

Je nach Testaufwand und der Größe des Quellcodes kann ein bestimmter Anteil der vorhandenen Defekte gefunden werden, woraus sich die Formulierung

$$Gefundene\ Defekte = f_3\left(Vorhandene\ Defekte, Quellcodegröße, Testaufwand, \varepsilon_3\right) \tag{7.8}$$

ergibt.

Um zu modellieren, dass die beschriebenen Zusammenhänge nicht deterministisch sind, werden zusätzlich zu den eigentlichen Einflussgrößen in den **Gleichungen 7.6** bis **7.8** die Zufallsvariablen $\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$ und $\varepsilon_3$ eingeführt, welche als Störgrößen fungieren. Für diese Zufallsvariablen werden stochastische Verteilungen angenommen. Schließlich verbleiben im Quellcode diejenigen Defekte, welche nicht beim Testen aufgefunden werden konnten. Die eigentliche Defektdichte ist der Quotient aus der Zahl der verbleibenden Defekte und der Größe des Quellcodes.

$$Verbleibende\ Defekte = Vorhandene\ Defekte - Gefundene\ Defekte\,. \tag{7.9}$$

$$Defektdichte = \frac{Verbleibende\ Defekte}{Größe\ des\ Quellcodes\ [\,KLOC\,]}\,. \tag{7.10}$$

Auf eine Beschreibung der genauen Form von $f_1$, $f_2$ und $f_3$ wird an dieser Stelle verzichtet. Die verwendete Wahl dieser Funktionen ergibt ein Bayessches Modell. Zur Aufstellung der Funktionen $f_1$, $f_2$ und $f_3$ können verschiedene Methoden zum Einsatz kommen. Eine Möglichkeit ist die Verwendung von Wahrscheinlichkeitstabellen im Rahmen der Methode der Bayesian Belief Nets. Eine andere Möglichkeit wäre aber auch die Anwendung der Fuzzy Technik, bei der ebenfalls Einflussvariablen definiert und entsprechend einem Regelwerk kombiniert werden können. Die Anwendung der Fuzzy Technik zur Erstellung von Prognosemodellen kann beispielhaft u. a. in [MAR 2003] nachvollzogen werden.

Um das grundlegende auf der Nutzung von Bayes'schen Netzen und Wahrscheinlichkeitstabellen basierende Verfahren nachvollziehen zu können, wird im folgenden Abschnitt ein entsprechender Exkurs durchgeführt.

### 7.2.7 Bayes'sche Netze zur Formalisierung von Expertenwissen

Die Formalisierung von Expertenwissen basiert im Rahmen Bayes'scher Netze auf zwei Teilschritten. Einerseits muss die grundlegende Modellstruktur festgelegt werden, was zu einem Ergebnis entsprechend **Bild 6-5** führen kann. In einem zweiten Schritt ist es notwendig, die Modellstruktur zu präzisieren. Dies kann je nach Anspruch an das Ergebnis und unter Berücksichtigung der vorhandenen Datensituation mehr oder weniger umfangreich erfolgen.

Eine sehr einfache Vorgehensweise besteht darin, rein qualitative Informationen zu verwenden. So könnten den Eingangsdaten Problemkomplexität, Entwicklungsaufwand und Testaufwand die Attribute „niedrig“, „mittel“ und „hoch“ zugewiesen werden. Dementsprechend muss auch der Aufbau des Netzes mittels Zuweisungstabellen gestaltet sein. Das **Bild 7-9** zeigt, wie der Knoten „Vorhandene Defekte“ in Form einer Zuweisungstabelle aufgebaut sein kann.

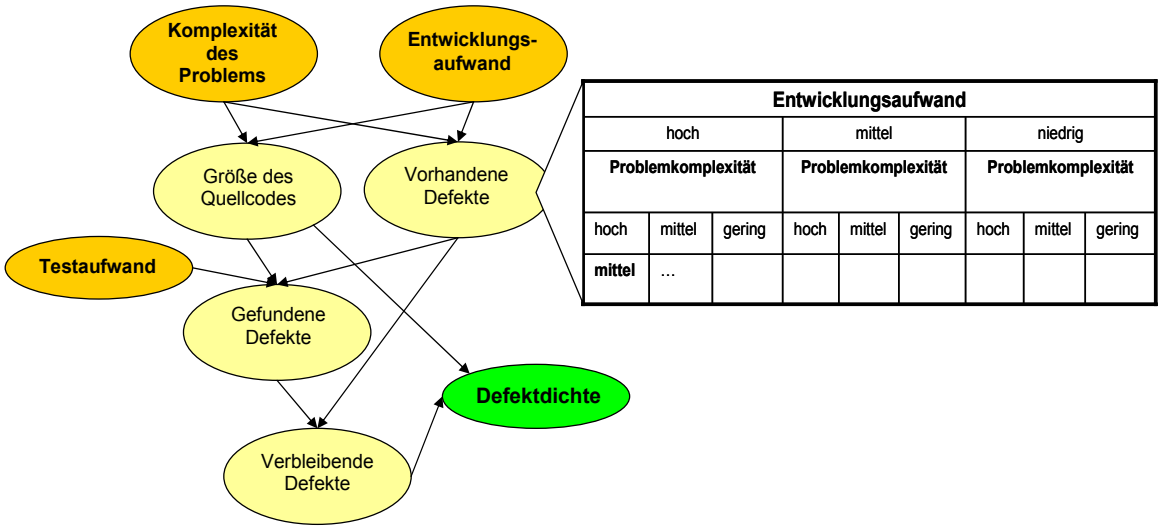


**Bild 7-9:** Präzisierung Bayes’scher Netze mittels qualitativer Zuweisungstabellen

Würde der Entwicklungsaufwand als hoch eingeschätzt und die Problemkomplexität ebenfalls als hoch erachtet, so würden sich entsprechend **Bild 7-9** vorhandene Defekte in einer mittleren Größenordnung ergeben. Würden für die restlichen Knoten ebenfalls solche Tabellen vorliegen, so wäre es möglich, einen qualitativen Wert für die Defektdichte abzuleiten.

Der Nachteil an dem gerade beschriebenen Vorgehen ist, dass sich die Experten, wenn sie eine Softwarekomponente anhand der Zuweisungstabellen einordnen, auf ein Attribut je Bewertungsgröße einigen müssen. Es wird hierbei vernachlässigt, dass es Komponenten gibt, die entsprechend dem Expertenempfinden z. B. genau zwischen zwei Klassen liegen. Bei der Zuordnung zu einer Klasse ergibt sich somit zu einem bestimmten Maß eine Fehlbewertung. Um dieses Problem zu beheben, kann die Anzahl an Attributklassen erhöht werden, was zu einer Aufwandserhöhung bei der Methodenanwendung führt.

Noch aufwendiger wird das Vorgehen, wenn, wie z. B. in [FEN 1998] beschrieben, den aus Zuweisungstabellen resultierenden Größen nicht ein einziges Ergebnisattribut zugewiesen wird, sondern den möglichen Attributen Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden. Die **Tabelle 7-1** verdeutlicht das entsprechende Vorgehen. Es handelt sich

hierbei um eine sog. Knoten-Wahrscheinlichkeitstabelle (*engl.: node probability table*).

**Tabelle 7-1:** Beispielhafte Knoten-Wahrscheinlichkeitstabelle

| Entwicklungsaufwand | niedrig | | | mittel | | | hoch | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Problemkomplexität | niedrig | mittel | hoch | niedrig | mittel | hoch | niedrig | mittel | hoch |
| Vorhandene Defekte | | | | | | | | | |
| niedrig | **0,1** | **0,2** | **0,4** | **0,2** | **0,3** | **0,5** | **0,5** | **0,3** | **0,7** |
| mittel | **0,2** | **0,3** | **0,3** | **0,3** | **0,4** | **0,3** | **0,3** | **0,4** | **0,2** |
| hoch | **0,7** | **0,5** | **0,3** | **0,5** | **0,3** | **0,2** | **0,2** | **0,3** | **0,1** |

Werden solche Wahrscheinlichkeitstabellen angewendet, so folgt aus der Komponententypologisierung anhand der Kriterien Entwicklungsaufwand und Problemkomplexität nicht ein einziges Ergebnisattribut, sondern es werden den möglichen Ergebnisattributen entsprechende Wahrscheinlichkeiten zugeteilt, die sich in Summe zu 100 % ergänzen müssen. Dementsprechend ergibt sich bei diesem Vorgehen für die Zielgröße „Defektdichte“ eine Wahrscheinlichkeitsgewichtung der drei möglichen Attribute. Es ist aus Sicht der Anwendbarkeit in frühen Entwicklungsphasen allerdings fraglich, ob Experten fähig sind, entsprechende Wahrscheinlichkeitstabellen mit Daten zu versehen.

### 7.2.8 Anwendung der methodischen Vorgehensweise

In diesem Abschnitt werden die Auswertungen für den Beispielvergleich zweier Fahrzeuggetriebevarianten dargestellt. Das betrachtete Modell der zwei Lösungsvarianten beinhaltet verschiedene, die Zuverlässigkeit beeinflussende, Parameter $p_1,...,p_k$ die bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilungen folgen. Hieraus resultiert eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Schranken für $\alpha$, die mit $\alpha_{zul,CVT}$ für das CVT und mit $\alpha_{zul,Stuf}$ für den Stufenautomaten bezeichnet werden. Einige der Parameter $p_1,...,p_k$ beeinflussen sowohl das CVT als auch den Stufenautomaten. Deswegen sind $\alpha_{zul,CVT}$ und $\alpha_{zul,Stuf}$ nicht unabhängig. Die stochastische Verteilung von $\alpha_{zul,CVT}$ und $\alpha_{zul,Stuf}$ kann mit Hilfe der Monte Carlo Methode ermittelt werden.

Es werden $N$ unabhängige Wiederholungen (Replikationen) durchgeführt, in denen jeweils die Parameter $p_1,...,p_k$ entsprechend den angenommenen Verteilungen gezogen werden. In jeder Wiederholung wird $\alpha_{zul,CVT}$ und $\alpha_{zul,Stuf}$ berechnet. Die sich hieraus ergebenden empirischen Verteilungen werden als Näherung der exakten Verteilungen

verwendet. Durch eine Erhöhung der Anzahl der Wiederholungen kann man die Verteilung von $\alpha_{zul,CVT}$ und $\alpha_{zul,Stuf}$ beliebig gut annähern.

Im Beispiel ist das Zuverlässigkeitsziel eine Schranke für den $B_{10}$-Lebensdauerwert des jeweiligen Gesamtsystems. Im Gegensatz zu dem einfachen auf Exponentialverteilungen beruhenden Beispiel aus Abschnitt 7.1 kann hier $\alpha_{zul,CVT}$ und $\alpha_{zul,Stuf}$ nicht explizit berechnet werden. Diese Berechnung erfordert den Einsatz einer eindimensionalen numerischen Nullstellensuche.

Im Folgenden wird die Monte Carlo Methode stets mit $N = 1000$ Replikationen durchgeführt. Trägt man die sich ergebenden empirischen Verteilungsfunktionen von $\alpha_{zul,CVT}$ und $\alpha_{zul,Stuf,}$ auf, so ergibt sich das Diagramm in **Bild 7-10**. Es suggeriert, dass der Stufenautomat mehr Entwicklungsspielraum aufweist als das CVT. Die Verteilungsfunktion von $\alpha_{zul,CVT}$ liegt „links“ von der Verteilungsfunktion von $\alpha_{zul,Stuf}$. Es lässt sich aus **Bild 7-10** allerdings nicht schließen, dass $\alpha_{zul,CVT} \leq \alpha_{zul,Stuf}$ immer (d. h. mit Wahrscheinlichkeit 1) gilt.

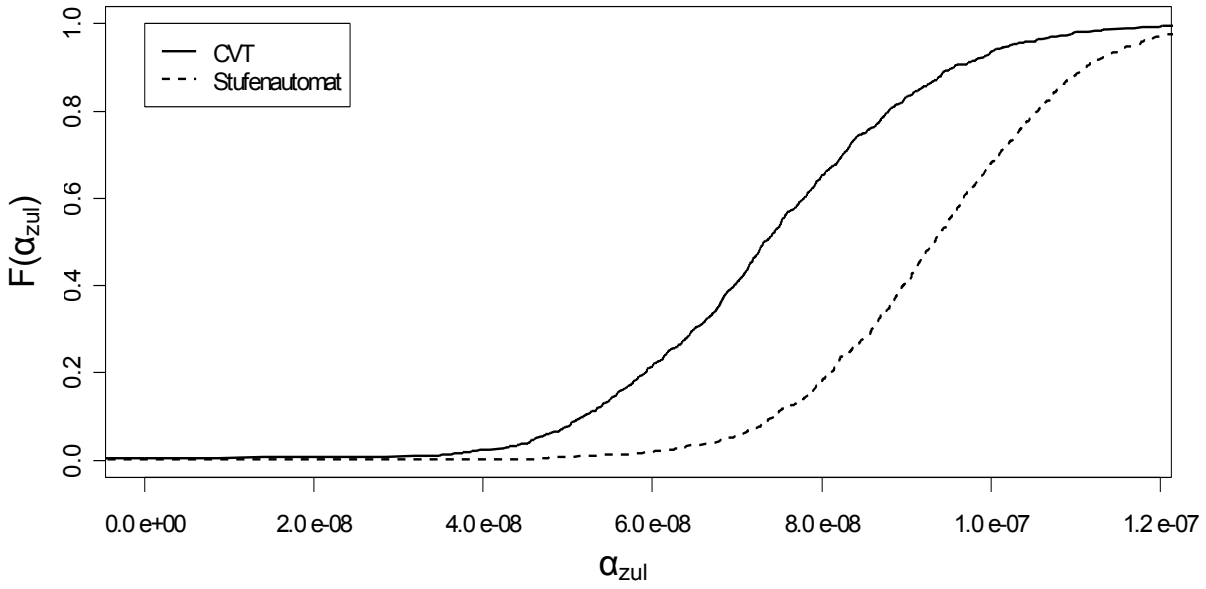


**Bild 7-10:** Verteilungsfunktion von $\alpha_{zul,CVT}$ und $\alpha_{zul,Stuf}$ [JÄG 2005b]

Es kann aber die Wahrscheinlichkeit der Gültigkeit von $\alpha_{zul,CVT} \leq \alpha_{zul,Stuf}$ angegeben werden. Aus der in **Bild 7-11** gezeigten Verteilungsfunktion von $\alpha_{zul,CVT}$ - $\alpha_{zul,Stuf}$ lässt sich diese Wahrscheinlichkeit direkt ablesen. Es handelt sich hierbei um den Schnittpunkt der Kurve der Verteilungsfunktion mit der Ordinate. Im vorliegenden Beispiel ergibt sich, dass $\alpha_{zul,CVT} \leq \alpha_{zul,Stuf}$ mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 80% gilt. Somit weist mit einer Wahrscheinlichkeit von 80 % der Stufenautomat einen höheren Entwicklungsspielraum auf als das CVT.

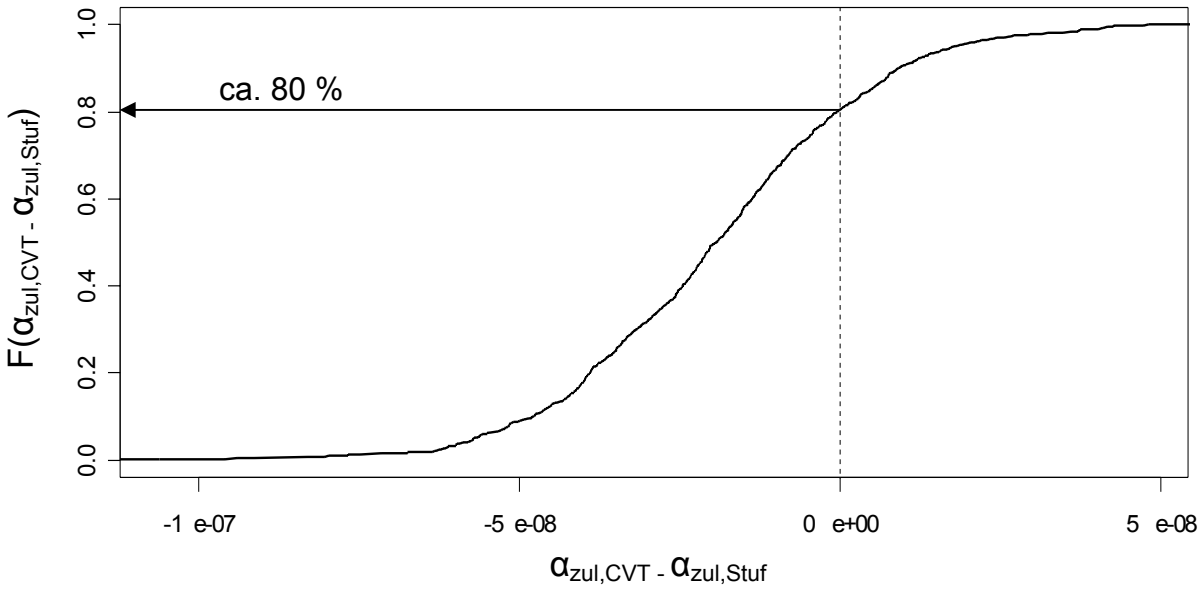


**Bild 7-11:** Verteilung der Differenz der Werte $\alpha_{zul}$ beider Lösungsvarianten [JÄG 2005b]

Bei der Berechnung von $\alpha_{zul,CVT}$ und $\alpha_{zul,Stuf}$ kann der Fall auftreten, dass kein $\alpha \geq 0$ existiert, mit dem das Ziel erreicht wird. Anders formuliert kann man in einem solchen Fall das Ziel selbst mit perfekter Software nicht erreichen. Falls dieser Fall eintritt, so wird $\alpha_{zul,CVT} = -\infty$ bzw. $\alpha_{zul,Stuf} = -\infty$ gesetzt. Verschärft man im Vergleich der beiden Getriebevarianten die Anforderung an einen $B_{10}$-Systemlebensdauerwert von mindestens $0{,}5 \cdot 10^8$ Umdrehungen der Eingangswelle auf $1{,}5 \cdot 10^8$ Umdrehungen, so ergibt sich das zu **Bild 7-10** analoge **Bild 7-12** der Verteilungsfunktionen von $\alpha_{zul,CVT}$ und $\alpha_{zul,Stuf}$. Mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 35 % verfehlt das CVT das Zuverlässigkeitsziel.

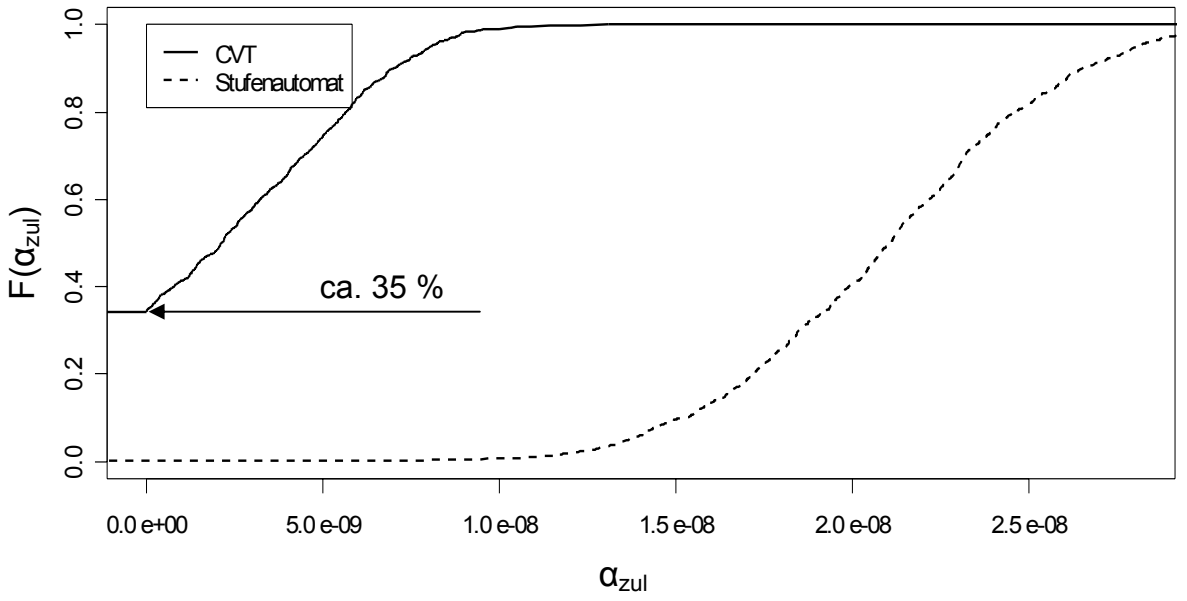


**Bild 7-12:** Verteilungsfunktionen von $\alpha_{zul,CVT}$ und $\alpha_{zul,Stuf}$ bei einem erhöhtem Zuverlässigkeitsziel [JÄG 2005b]

# 8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorgelegten Arbeit wird beschrieben, wie mechatronische Systeme schon in frühen Entwicklungsphasen quantitativ zuverlässigkeitstechnisch untersucht werden können. Eine besondere Bedeutung hierbei hat die Berücksichtigung der typischerweise sehr schlechten Datenlage in frühen Entwicklungsphasen. Diese führt bei rein mechanischen Produkten dazu, dass kein deterministisches Lebensdauerquantil mehr ermittelbar ist, sondern sich stochastisch verteilte Lebensdauerkennwerte ergeben. Ein sicherer Abgleich mit einem Entwicklungsziel ist somit nicht mehr unbedingt möglich. Es bieten sich allerdings relative Vergleiche von verschiedenen Systemvarianten an. Hiermit können in frühen Entwicklungsphasen verschiedene Lösungskonzepte im Hinblick auf die erreichbare Lebensdauer miteinander verglichen werden. Als Ergebnis einer solchen Berechnung ergibt sich die Wahrscheinlichkeit, dass ein Konzept dem anderen überlegen ist. Eine Information dieser Art kann im Rahmen der Konzeptphase, die schließlich die Auswahl eines weiter zu verfolgenden Konzeptes zum Ziel hat, angewendet werden.

Wird von der Betrachtung rein mechanischer Systeme auf mechatronische Systeme übergegangen, so sind Zuverlässigkeitsaussagen, wie z. B. Lebensdauerquantile, auch in stochastisch verteilter Form nicht mehr möglich. Der Grund hierfür liegt im Wesen der Software, für die noch keine allgemein gültigen Zuverlässigkeitsmodelle existieren. Trotzdem ist es möglich, Lösungsvarianten miteinander im Hinblick auf die Erreichbarkeit eines vorgegebenen Zuverlässigkeitsziels zu vergleichen. Somit kann die Entwicklung mechatronischer Produkte aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht wirksam und systematisch schon in frühen Entwicklungsphasen unterstützt werden. Hierbei trägt die entwickelte Methodik zur Vermeidung unnötiger Entwicklungsschleifen und somit zur Einhaltung von Entwicklungszeiten bei.

Die entwickelte Methodik ist nicht zwangsläufig an das Vorhandensein keiner oder ungenauer Daten gebunden. Vielmehr ist sie anpassungs- und wandlungsfähig. Dies erlaubt auch die Berücksichtigung präziser Daten. Zusätzlich dazu ist festzustellen, dass die im Rahmen der Gesamtmethodik verwendeten Vorgehensweisen, wie z. B. die Nutzung von Use-Cases, nicht statisch vorgegeben, sondern durch andere – eventuell besser geeignete – Vorgehensweisen ersetzbar sind.

Mithin bleibt zu erwähnen, dass die Einbindung der vorgestellten Methodik in die Abläufe eines real wirtschaftenden Unternehmens die Vernetzung mit anderen Unternehmensbereichen erforderlich macht. An dieser Stelle sei nur an die Vorgabe von

Zuverlässigkeitszielen erinnert. Es handelt sich hierbei um strategisch bedeutende Entscheidungen, die über den wirtschaftlichen Erfolg eines Unternehmens mitentscheiden.

Eine Eingliederung dieser oder einer ähnlichen Methodik in den realen Entwicklungsprozess würde der Zuverlässigkeitstechnik im Rahmen des Entwicklungsprozesses diejenige Bedeutung einräumen, die die Zuverlässigkeit aktuell am Markt als Kaufentscheidungskriterium erfährt.

# Literaturverzeichnis


**ADA 2005** ADAC-Pannenstatistik. Internetquelle: http://www.adac.de/Auto_Motorrad/pannen_und_maengel/pannenstatistik_2004/ Stand 10.10.2005.

**AVI 2000** Avizienis, A.; Laprie, J.-C.; Randell, B.: Fundamental Concepts of Dependability. Proceedings of the 3rd IEEE Information Survivability Workshop, Boston (MA), USA, 2000.

**BAJ 1999** Bajenescu, T.I.; Bazu, M.I.: Reliability of Electronic Components. Berlin, Heidelberg, Springer, 1999.

**BAR 1975** Barlow, R.E.; Fussel, J.B.; Singpurwalla, N.D.: Reliability and Fault Tree Analysis. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 1975.

**BEC 1989** Becker, G.: Softwarezuverlässigkeit: Quantitative Modelle und Nachweisverfahren. Berlin, New York, De Gruyter, 1989.

**BER 1990** Bernhard, W.; Heidemeyer, P.: Auswahl und Strukturen stufenloser PKW-Getriebe. VDI-Berichte 803 Drehzahlvariable Antriebe. Düsseldorf, VDI, 1990.

**BER 2004** Bertsche, B.; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer, 2004.

**BIN 1997** von Binder, R.: Can a Manufacturing Quality Model Work for Software? Software, IEEE. Vol. 14 (5), pp. 101-102&105, September 1997.

**BIR 1997** Birolini, A.: Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen. 4. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer, 1997.

**BIR 2004** Birolini; A.:Reliability Engineering. Theory and Practice. 4. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer, 2004.

**BOO 1994** Boos, M.; Krieg, W.-E: Stufenloses Automatikgetribe Ecotronic von ZF. ATZ 96 (1994-6).

**BRA 1964** Bracha, V.J.: The Methods of Reliability Engineering. Machine Design, pp. 70-76, July 1964.

**BRE 2000** Braess, H.-H.; Seiffert, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Braunschweig, Wiesbaden, Vieweg, 2000.

**BRO 1995** Brodbeck, P.; Dörr, C.; Lechner, G.: Lebensdauerversuche an Zahnrädern – Einfluss unterschiedlicher Betriebsbedingungen. DVM-Berichte 121: Maschinenelemente und Lebensdauer, S. 137-147, 1995.

**CHO 1987** Cho, C.-K.: Quality Programming. John Wiley & Sons Inc., USA, 1987.

**DEM 2004** Demmou, H.; Khalfaoui, S.; Guilhem, E.; Valette, R.: critical scenarios derivation methodology for mechatronic systems. Reliability Engineering and System Safety 84 (2004).

**DEN 1995** Denson, W.; Chandler, G.; Crowell, W.; Clark, A.; Jaworski, P.: Nonelectronic Parts Reliability Data. Reliability Analysis Center, Department of Defense, 1995.

**DEN 2002** Denaro, G., Morasca, S., Pezzè, M.: Deriving Models of Software Fault-Proneness. SEKE ’02, Ischia, Italy, 2002.

**DIE 1992** Dietmann, H.: Einführung in die Elastizitäts- und Festigkeitslehre. 3. Auflage, Stuttgart, Kröner, 1992.

**DIN 3990 T1** DIN 3990-1, Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern; Einführung und allgemeine Einflussfaktoren. Beuth, 1987.

**DIN 3990 T2** DIN 3990-2, Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern; Berechnung der Grübchentragfähigkeit. Beuth, 1987.

**DIN 3990 T3** DIN 3990-3, Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern; Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit. Beuth, 1987.

**DIN 3990 T41** DIN 3990-41, Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern; Anwendungsnorm für Fahrzeuggetriebe. Beuth, 1990.

**DIN 40041** DIN 40041: Zuverlässigkeit: Begriffe. Beuth, 1990.

**DIN 55350** DIN 55350-11, Begriffe zu Qualitätsmanagement und Statistik - Teil 11: Begriffe des Qualitätsmanagements. Beuth, 1995.

**DIN IEC 61508** DIN IEC 61508: Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic safety related systems, 1998.

**EBE 1996** Ebert, C., Dumke, R.: Software-Metriken in der Praxis. Berlin, Springer, 1996.

**EHL 1986** Ehlers, K.: Automobilelektronik-Start gelungen, wie geht es weiter? Strategische Überlegungenfür die nächste Dekade. VDI-Berichte Nr. 612. Düsseldorf, VDI, 1986.

**FEN 1998** Fenton, N.; Littlewood, B.; Neil, M.; Strigini, L.; Suttcliffe, A.; Wright, D.: Assessing dependability of safety critical systems using diverse evidence. In: IEE Proceedings Software Engineering, vol. 145(1), pp. 35-39, 1999.

**FEN 1999** Fenton, N.E., Neil, M.: A Critique of Software Defect Prediction Models. Software Engineering, 25 (1999), 5, S. 675-689.

**FLE 1999** Fleisch, W.: Applying Use-Cases to the Requirements Validation of Component-Based Real-Time Software. In: Proc. 2nd IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC '99), 2-5- Mai 1999, Saint-Malo, Frankreich.

**FOT 1995** Foth, J.; Jauch, F.: Betriebsfestigkeit von Torsionsbelasteten Wellen für Automatgetriebe. DVM-Bericht 121, S. 161-173, 1995.

**GAN 2006** Gandy, A.; Jäger, P.; Jensen, U.; Bertsche, B.: Berücksichtigung von Ungenauigkeiten bei Zuverlässigkeitsanalysen in frühen Entwicklungsphasen. Eingereicht für einen Beitrag in der Zeitschrift „Konstruktion", Springer VDI, 2006.

**GAU 2003** Gausemeier, J.; Möhringer, S.: Die neue Richtlinie VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI Berichte 1753. Düsseldorf, VDI, 2003.

**GER 1991** Gerpott, T.J.: Verkürzung von Produktentwicklungszeiten. Integriertes Technologie- und Innovationsmanagement, Booz, Allen & Hamilton, 1991.

**GRE 2003** Greiner, J.; Wachter, J.; Wüst, R.; Wunsch, B.: The Powertrain of the all-new Maybach - Comfort and Driving Performance on the Highest Level. 20 SAE-Paper 2003-01-0597 2003. Transmission and Driveline Systems Symposium, 2003.

**GRE 2004** Greiner, J.; Kiesel, J.; Veil, A.; Strenkert, J. 2004. Front-CVT Automatikgetriebe (WFC280) von Mercedes-Benz. VDI Berichte 1827 Getriebe in Fahrzeugen. Düsseldorf, VDI, 2004.

**HAI 1989** Haibach, E.: Betriebsfestigkeit. Düsseldorf, VDI, 1989.

**HAR 1996** Harashima, F.; Tomizuka, M.; Fukuda, T.: Mechatronics - „What is it, Why, and How?“ An Editorial. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 1, No. 1, 1996.

**HAS 1995** Health and Safety Executive (GB): Out of Control. Why control systems go wrong and how to prevent failure. HSE Books, 1995.

**HOL 2001** Holzmann, G.J.: Economics of Software Verification. Proc. Workshop on Program Analysis for Software Tools and Engineering, Snowbird, Utah, USA, June 2001.

**IEV 1995** Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch IEV: Kapitel 191-02: 1995, Nr. 191-02-03.

**INT 2004** Budke, W.; Lux, K.-F.; Waldminghaus, S.: Megatrends der Automobilindustrie. www.intra-ub.de/docs/publikationen/. Stand 2004.

**JÄG 2004** Jäger, P.; Bertsche, B.: A New Approach to Gathering Failure Behavior Information About Mechanical Components Based on Expert Knowledge. Proc. RAMS 2004 (Annual Reliability and Safety Symposium), Los Angeles, California, January 26th - 29th, 2004.

**JÄG 2005a** Jäger, P.; Arnaout, T.; Bertsche, B.; Wunderlich, H.-J.: Frühe Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme. VDI-Berichte 1884. 22. Tagung Technische Zuverlässigkeit. Düsseldorf, VDI, 2005.

**JÄG 2005b** Jäger, P.; Wedel, M.; Gandy, A.; Bertsche, B.; Göhner, P.; Jensen, U.: Zuverlässigkeitsbewertung softwareintensiver mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen. VDI-Berichte 1892.2. Mechatronik 2005. Düsseldorf, VDI, 2005.

**JÄG 2005c** Jäger, P.; Bertsche, B.: An approach for early reliability evaluation of mechatronic systems. Proc. ESREL 2005 (European Safety and Reliability Conference), Gdansk, Poland, June 27th - 30th, 2005.

**JES 2005** Jeske, D. R.; Zhang, X.: Some successful approaches to software reliability modeling in industry. The Journal of Systems and Software, Vol. 74, 2005, S. 85-99.

**KAR 1965** Karmiol, E.D.: Reliability Apportionment, Preliminary Report EIAM-5, Task II, General Electric, Schenectady, N.Y., pp. 10-22, 1965.

**KBA 2005** Homepage des Kraftfahrtbundesamtes: www.kba.de. Stand 28. Dezember 2005.

**KEC 1991** Kececioglu,D.: Reliability Engineering Handbook. Vol. 2. Prentice Hall PTR, 1991.

**KOC 2004** Kochs, H.-D.; Petersen, J.: A Framework for Dependability Evaluation of Mechatronic Units. Proceedings of the ARCS 2004 Conference, Augsburg, Germany, 26th March 2004.

**KÖS 2004** Köster, Klaus: Immer mehr Autos mit Elektronik-Pannen. In: Stuttgarter Nachrichten, Ausg.: 30. Aug. 2004.

**LEC 1994** Lechner, G.; Naunheimer, H.: Fahrzeuggetriebe. Berlin, Springer, 1994.

**LEH 1994** Lehmann, G.; Wunder, B.; Selz, M.: Schaltungsdesign mit VHDL. Poing, Franzis', 1994.

**LIO 1996** Lions, J.L.: Ariane 5 - Flight 501 Failure, Centre National d'Etudes Spatiales & European Space Agency, Paris, 1996.

**LÄN 2002** Längst, W.; Lapp, A.; Knorr, K.; Schneider, H.-P.; Schirmer, J.; Kraft, D.; Kiencke, U.: CARTRONIC-UML Models: Basis for Partially Automated Risk Analysis in Early Development Phases. Proc. UML'02-Workshop, Dresden. Technische Universität München, Institut für Informatik, 2002.

**MAL 1994** Malhorta, M.; Trivedi, K. S.: Power-Hierarchy of Dependability Model Types. IEEE Transactions on Reliability, No. 3, Vol. 43. 1994.

**MAR 2002** Marseguerra, M.; Zio, E.: Basics of the Monte Carlo Method with Application to System Reliability. Hagen, LiLoLe, 2002.

**MAR 2003** Marseguerra, M.; Zio, E.; Bianchi, M.: A fuzzy model for the estimate of the accident rate in road transport of hazardous materi-

als. Proceedings ESREL 2003, Maastricht, Netherlands, 15th-18th June 2003.

**MAR 2004** Martinus, M.A.: Funktionale Sicherheit von mechatronischen Systemen bei mobilen Arbeitsmaschinen. Dissertationsschrift, München, 2004.

**MAS 1994** Masing, W.: Deutsche Gesellschaft für Qualität. DGQ Schrift 11-19. Einführung in die Qualitätslehre. Frankfurt am Main, DGQ, 1994.

**MCG 1994** McGarry, F., Pajerski, R., Page, G., Waligora, S., Basili, V.R., and Zelkowitz, M.V.: Software Process Improvement in the NASA Software Engineering Laboratory. Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, Technical Report CMU/SEI-94-TR-22 , Dezember 1994.

**MEN 2003** Menzies, T.; Di Stefano, J.S.; Chapman, M.; McGill, K.: Metrics That Matter. In: Proceedings of the 27th Annual NASA Goddard/IEEE Software Engineering Workshop, 2003.

**MIL 1991** Department of Defense, "Reliability Prediction Of Electronic Equipment", MIL-HDBK-217F, Washington, DC., Notice 1, December 1991.

**MIN 1945** Miner, M. A.: Cumulative damage in fatigue. J. Appl. Mech. 12 (1945), S. 159/64.

**MON 1998** Moncelet, G.; Christensen, C.; Demmou, H.; Paludetto, M.; Porras, J.: Analysing a mechatronic system with coloured Petri nets. INT J STTT, 1998.

**MÜL 1986** Müller, K.-H.: Zuverlässigkeit und Funktionseffektivität komplizierter technischer Systeme. Aus der Reihe „Beiträge zur Forschungstechnologie" Berlin, Akademie Verlag, 1986.

**MUN 1990** J.C. Munson and T.M. Khoshgoftaar, "Regression Modelling of Software Quality: An Empirical Investigation," Information and Software Technology, vol. 32, no. 2, pp. 106-114, 1990.

**MUS 1990** Musa, J.D., Iannino A., Okumoto K.: Software reliability: measurement, prediction, application. Software Engineering Series, 1990.

**MUS 1995** Musa, J.D.: An Overview of Software Reliability Engineering. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Current Issues and Challenges in the Reliability and Maintenance of Complex Systems, Kemer-Antalya, Turkey, June 12th -22th, 1995.

**MUT 2000** Muthanna, S.; Kontogiannis, K.; Ponnambalam, K.; Stacey, B.: A Maintainability Model for Industrial Software Systems Using Design Level Metrics. Proc. of the 7th Working Conference on Reverse Engineering (WCRE), 2000.

**NAG 2003** Nagappan, N., Williams, L., Vouk, M.: Towards a Metrics Suite for Early Reliability Assessment. 14. IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering, (ISSRE), Fast Abstract, 2003.

**NAI 1998** Naixin Li, Yashwant K. Malaiya, Jason Denton: Estimating the Number of Defects: A Simple and Intuitive Approach. International Symposium of Software Reliability Engineering, Deutschland, 1998.

**NIE 1989** Niemann, G.; Winter, H.: Maschinenelemente. Band 2 - Getriebe allgemein, Zahnradgetriebe-Grundlagen, Stirnradgetriebe. 2. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer, 1989.

**NN 2003a** N.N.: Die Hightech-Falle. In: Capital, Ausg.: 20/2003.

**NN 2003b** N.N.: Das V-Modell – Planung und Durchführung von IT-Vorhaben – Entwicklungsstandard für IT-Systeme des Bundes: http://www.v-modell.iabg.de. München, IAB GmbH, 2003.

**NYS 1999** Nystedt, S.; Sandros, C.: Software Complexity and Project Performance. Master Thesis, Department of Informatics, School of Economics and Commercial Law, University of Gothenburg, 1999.

**OCO 2002** O'Connor, P.D.T.: Practical Reliability Engineering. Chichester, Wiley, 2002.

**OMA 1994** Oman, P.; Hagemeister, J.: Construction and Testing of Polynomials Predicting Software Maintainability. In Journal of Systems Software, Vol. 24, 1994.

**PAH 2003** Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. 5. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer, 2003.

**PAL 1924** Palmgren, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern. VDI-Z 58 (1924), S. 339/41.

**PAU 1997** Pauli, B.: Zuverlässigkeitsprognosen für elektronische Steuergeräte im Kraftfahrzeug: Modellbildung und deren praktische Anwendung. Dissertationsschrift, Wuppertal, 1997.

**PIC 2006** Pickard, K.; Müller, P.; Bertsche, B.: Reliability Related Concept Comparison and Derivation of a Risk Analysis in Early Design Stages. Proc. RAMS 2006 (Annual Reliability and Safety Symposium), Newport Beach, California, January 23$^{th}$ -26$^{th}$, 2006.

**RAD 2003** Radaj, D.: Ermüdungsfestigkeit. 2.Aufl., Berlin, Heidelberg, New York, Hongkong, London, Springer, 2003.

**RAK 2002** Rakowsky, U.K.: System-Zuverlässigkeit. Hagen, LiLoLe, 2002.

**ROD 2002** Rodriguez Dapena, P.: Software Safety Verification in Critical Software Intensive Systems. Dissertationsschrift, Eindhoven, 2002.

**ROM 1993** Reliability Engineer's Toolkit, The Rome Laboratory, 1993.

**ROS 1999** Rosenberg, L., Hammer, T., Shaw, J.: Software Metrics and Reliability. 9th International Symposium on Software Reliability Engineering, Deutschland 1999.

**SCE 2001** Scheiber, S.F.: Building a Successful Board-Test Strategy. 2. Aufl., Boston, Butterworth Heinemann, 2001.

**SCL 2004** Schloske, Alexander: FMEA für meachstronische systeme. In: Interaktiv – Zeitschrift des Fraunhofer IPA Nr. 3, 2004.

**SHO 1984** Shooman, M.L.: Software reliability: A historical Perspective, IEEE Transactions on Reliability. 1984.

**SIM 1990** Simon, E.: Serienerfahrungen mit dem CTX-Getriebe-Automaten im Ford Fiesta. In VDI-Berichte 803 Drehzahlvariable Antriebe. Düsseldorf, VDI, 1990.

**SIN 1995** Singpurwalla, N.D.; Soyer, R.: Assessing the Reliability of Software: An Overview. Proceedings of the NATO Advanced Study

Institute on Current Issues and Challenges in the Reliability and Maintenance of Complex Systems. Kemer-Antalya, Turkey, June 12th -22th, 1995.

**SOB 1991** Sobol, I.M.: Die Monte-Carlo-Methode, 4. überarb. und erw. Aufl., Berlin, Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1991.

**TZU 1986** Technische Zuverlässigkeit. Messerschmitt Bölkow-Blohm (Hrsg.), Berlin, Heidelberg, Springer, 1986.

**VDA 2000** VDA Band: Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie: Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten. 3. Aufl., 2000.

**VDI 2206** VDI Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. 2004.

**VDI 4004** VDI Richtlinie 4004 Blatt 2: Zuverlässigkeitskenngrößen: Überlebenskenngrößen. 1986.

**WÄC 1989** Wächter, K.: Konstruktionslehre für Maschineningenieure. Berlin, Verlag Technik, 1989.

**WEI 2005** Weidler, A.: Ermittlung von Raffungsfaktoren für die Getriebeentwicklung. Dissertationsschrift, Stuttgart, 2005.

**ZIM 2004** Zimmer, E; Göhner, P.; Arnaout, T., Wunderlich, H.J. 2004. Reliability Considerations for Mechatronic Systems on the Basis of a State Model. Proc. ARCS'04-Conference, Augsburg, 23th-26th March 2004.

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

| | |
|---|---|
| Name: | Patrick Wolfgang Jäger |
| Geburtsdatum, -ort: | 20.09.1976 in Tuttlingen |
| Staatsangehörigkeit: | Deutsch |
| Familienstand: | verheiratet, zwei Kinder |

## Schulbildung

| | |
|---|---|
| 1983-1987: | Grundschule Schwandorf und Neuhausen ob Eck |
| 1987-1996: | Martin Heidegger Gymnasium Meßkirch |

## Zivildienst

| | |
|---|---|
| 1996-1997: | Jugendherberge Burg Wildenstein bei Leibertingen |

## Studium

| | |
|---|---|
| 1997-2002: | Studiengang Maschinenbau an der Universität Stuttgart mit den Hauptfächern Lasertechnik und Konstruktionslehre |
| 2002-2005: | Studiengang der technisch orientierten BWL an der Universität Stuttgart mit den Hauptfächern Industriegütermarketing und Finanzwirtschaft |

## Berufstätigkeit

| | |
|---|---|
| 2002-2005: | Wissenschaftlicher Mitarbeiter<br>Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart |
| Jan. 2006: | Gründungsgesellschafter der technischen Beratungsgesellschaft Jäger, Hitziger & Partner |