

# Frühe Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme

## Early Reliability Analysis for Mechatronic Systems

**P. Jäger**, IMA Universität Stuttgart

**B. Bertsche**, IMA Universität Stuttgart

**T. Arnaout**, ITI Universität Stuttgart

**H.J. Wunderlich**, ITI Universität Stuttgart

### 1. Einleitung

Mechatronische Systeme sind heutzutage allgegenwärtig. Durch die Kombination aus Mechanik und moderner Informationsverarbeitung (Elektronik und Software) kann die Leistungsfähigkeit von Produkten deutlich gesteigert werden. Ein Beispiel hierfür sind CVT-Getriebe. Die ersten Getriebe dieser Bauart waren weitgehend mechanisch/hydraulische Strukturen [1]. Modernere CVT-Getriebe, wie das ZF Ecotronic [2] oder das Front-CVT der Mercedes-Benz A-Klasse [3] verfügen über eine elektronische Steuerung, die die Leistungsfähigkeit des Getriebes zu steigern vermag aber auch zu Unzuverlässigkeiten führen kann. In diesem Beitrag soll das Thema der Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme aufgegriffen werden und insbesondere vor dem Hintergrund der Zuverlässigkeitsarbeit in frühen Entwicklungsphasen diskutiert werden, da namentlich die Konzeptphase durch die Auswahl des richtigen Konzeptes für den endgültigen Produkterfolg hauptverantwortlich ist. Hierzu wird speziell das Thema der Informationsgewinnung in frühen Phasen thematisiert, da der Erfolg der Zuverlässigkeitsarbeit maßgeblich von der Daten- und Informationslage abhängig ist.

### 2. Zuverlässigkeitsmodellierung mechatronischer Systeme

Unter mechatronischen Systemen wird heutzutage die Symbiose aus Mechanik, Elektronik und Software verstanden. Die Eigenheiten dieser drei Fachbereiche spiegeln sich auch bei der Anwendbarkeit von Zuverlässigkeitsmethoden wider. Bekannte Zuverlässigkeitsmethoden müssen auf ihre Anwendbarkeit für mechatronische Systeme überprüft werden. Bild 1 zeigt einen Charakterisierungsbaum mechatronischer Systeme im Hinblick auf die Zuverlässigkeitstechnik.

Die genutzten Systematisierungsdimensionen sind

- Betrachtung der Reparierbarkeit (ja/nein),

- Anzahl möglicher Fehlfunktionen,
- Zuverlässigkeitsstruktur/Verschaltungsart (seriell/parallel oder auch gemischt),
- Multifunktionalitäten bestimmter Komponenten und
- Vorhandensein gebundener Redundanzen.

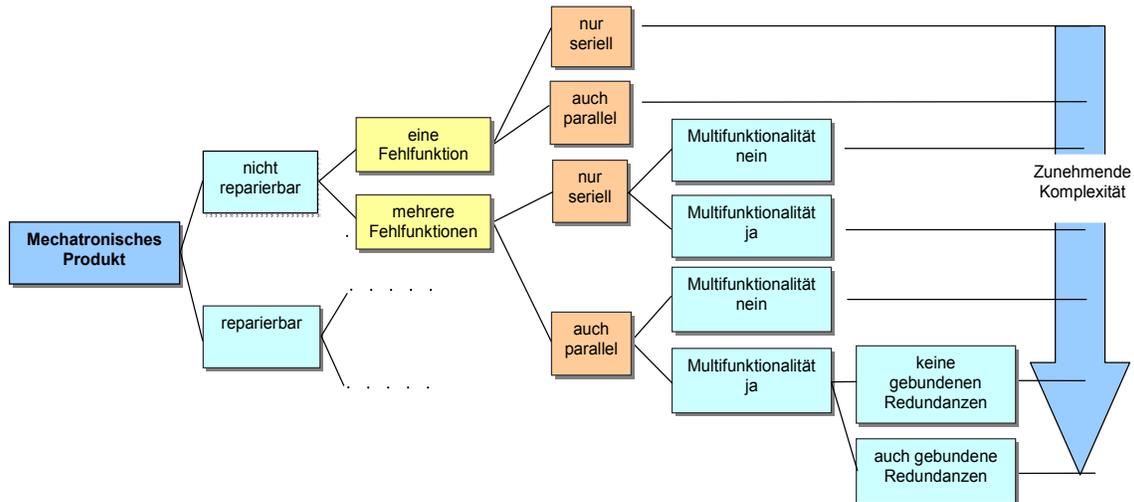


Bild 1: Zuverlässigkeitstechnische Komplexität mechatronischer Systeme

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 überführt werden. 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.

Eine weitere Systematisierungsdimension ist die Anzahl der Fehlfunktionen. Mechatronische Produkte zeichnen sich durch eine große mögliche Fülle an Funktionalitäten aus. Dementsprechend sind Vorstellungen von einem Zuverlässigkeitsblockdiagramm für ein Produkt nicht mehr anwendbar. Vielmehr besteht für jede Funktion des mechatronischen Produktes die Notwendigkeit der Bestimmung der Zuverlässigkeit. Die Zuverlässigkeit ist dann nicht mehr als Wahrscheinlichkeit für den Nichtausfall des Systems zu verstehen sondern als Wahrscheinlichkeit für den Erhalt einer Systemfunktion. Dies bedingt im Hinblick auf die Zuverlässigkeitsstruktur evtl. mehrere funktionspezifische Zuverlässigkeits-blockschaltbilder.

Die Multifunktionalität kann als eine der Kerncharakteristika mechatronischer Systeme verstanden werden. Sie bezeichnet die Eigenschaft mancher Komponenten an mehreren Systemfunktionen beteiligt zu sein. Insbesondere für Hardware ist dies ein entscheidender Punkt. Eine zentrale Recheneinheit ist z.B. an sehr vielen, nämlich den meisten mit Informationsverarbeitung behafteten, Funktionen beteiligt. Auch im Hinblick auf Hardwareentwicklung ist die Überlegung der Multifunktionalität von Bedeutung. Betrachtet man das System auf Modulebene, so hängt es stark von der Architektur ab, ob Multifunktionalitäten vorliegen oder nicht. Als Beispiel kann ein Addierer dienen, der sämtliche Additionsaufgaben übernimmt. Versagt dieser, so sind sämtliche abhängigen Funktionen davon beeinflusst. Bei einer dezentralen Architektur, bei der jeder Baustein seinen eigenen Addierer hätte, 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 eines oder mehrerer entsprechender Fehlerelemente (z.B. Zahnradbruch und -grübchen) im Fehlerbaum bemerkbar machen.

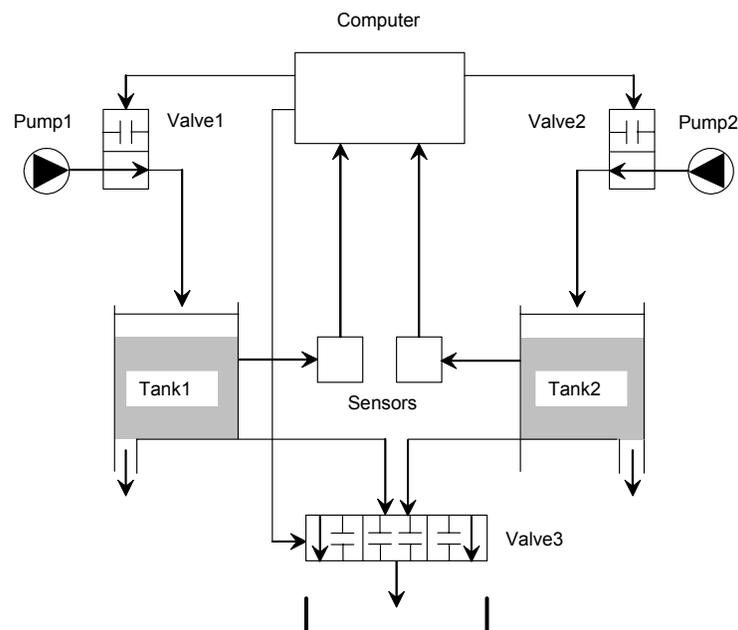


Bild 2: Tanksystem zur Verdeutlichung gebundener Redundanz [5]

Das Vorhandensein gebundener Redundanzen stellt die letzte Systematisierungsdimension dar und beschreibt die Möglichkeit, dass eine Komponente an zwei Systempositionen eine Redundanzfunktion einnehmen kann; nach der Zuweisung zu einer Position allerdings an dieser gebunden ist und nicht auch noch die zweite Position einnehmen kann. Ein Beispiel [4] verdeutlicht dies. In dem in Bild 2 dargestellten Tanksystem erfüllt das Überlaufventil die Eigenschaft der gebundenen Redundanz. Sollte Ventil 1 nicht mehr schließen, so droht Tank 1 überzulaufen. Das Redundanzventil (Valve 3) schaltet und sorgt dafür, dass er nicht überläuft, sondern in eine Auffangwanne umgeleitet wird. Würde jetzt auch noch der Tank 2 überlaufen, so kann das Ventil seine Position nicht ändern; es ist gebunden.

Welche bekannten Zuverlässigkeitsmethoden lassen sich nun auf verschiedene komplexe Systeme anwenden?

Aus dem Bereich der booleschen Systemtheorie sind die Verfahren Zuverlässigkeitsblockdiagramm und Fehlerbaummethode bekannt. Die Fehlerbaummethode ist dem Zuverlässigkeitsblockdiagramm überlegen, da das letztere aus dem ersteren abgeleitet werden kann. So eignet sich das Zuverlässigkeitsblockdiagramm nicht für Systeme mit multifunktionalen Komponenten, da dann im Blockdiagramm evtl. Mehrfachnennungen auftreten, die intuitiv nicht klar sind. Mittels der Fehlerbaummethode sind Systeme beherrschbar, die über Multifunktionalitäten verfügen. Allerdings ist die Einsetzbarkeit auf solche Systeme begrenzt, die keine gebundenen Redundanzen aufweisen, da die Boolesche Systemtheorie von einer über den Betrachtungszeitraum fixen Zuverlässigkeitsstruktur ausgeht.

Sollen Eigenheiten wie z.B. gebundene Redundanzen, passive Redundanzen oder andere ereignisabhängige Systemeinflüsse modelliert werden, muss auf zustandsorientierte Verfahren, wie Markov Graphen, nicht farbige und farbige Petrinetze in Kombination mit ereignisorientierten MC Simulationen zurückgegriffen werden. Speziell für die Modellierung reparierbarer Systeme sind die zuletzt genannten Verfahren notwendig.

### **3. Aufteilungsstrategien**

Aufteilungsstrategien sind ein Werkzeug des entwicklungsbegleitenden Zuverlässigkeitsmanagements. Sie haben die Aufgabe den Untersystemen eines Gesamtproduktes Zuverlässigkeitsziele so zuzuordnen, dass das Gesamtprodukt die Systemzuverlässigkeitsforderung erfüllt. Verschiedene Aufteilungsstrategien sind in [5] dargestellt. Hauptannahme der Methoden

- Aufteilung konstanter Ausfallraten und
- Komplexitätsorientierte Aufteilung

ist, dass alle Systemkomponenten exponentielles Ausfallverhalten besitzen und dass die Systemzuverlässigkeit in Form eines rein seriellen Zuverlässigkeitsblockdiagramms beschrieben werden kann. Diese Annahmen sind für mechatronische Systeme nicht haltbar, weswegen obige VDA-Methoden unbrauchbar sind. Die Methodiken von Bracha [6] und Karmiol [7] leiden unter einer nicht allgemeinen Verwendbarkeit und basieren teilweise auf subjektiven Eingangsdaten. Resultat der Aufteilungsmethodik sind zeitpunktbezogene Zuverlässigkeitswerte. Es darf angezweifelt werden, ob die echte Entwicklung gesamtmechatronischer Produkte zuverlässigkeitstechnisch so begleitet werden kann.

Mechanische Systemanteile, und natürlich auch das Gesamtprodukt, unterliegen meist der Forderung nach gewissen Bauraumrestriktionen. Hierbei besteht die Möglichkeit, dass das zu entwickelnde System, z.B. aufgrund extrem harter Bauraumforderungen, das vorgegebene Ziel nie erreichen kann, weil die Zuverlässigkeit mechanischer Systemumfänge bei gegebenen Belastungen dimensionierungsabhängig ist. Allein dieser Grund legt es nahe, bei mechanischen sowie mechatronischen Systemen vor einer eventuellen Zuweisung von Teilentwicklungszielen (entsprechend einer bestimmten Aufteilungsstrategie) die Realisierbarkeit zu überprüfen. Dies muss in frühen Entwicklungsphasen geschehen, um den Produkterfolg nicht zu gefährden.

#### **4. Frühe Entwicklungsphasen bei mechanischen Produkten**

Frühe Entwicklungsphasen sind durch eine im Vergleich zu späteren Phasen schlechte Datensituation gekennzeichnet. Dies liegt zum Einen daran, dass das Produkt selbst noch nicht exakt konkretisiert ist und zum Anderen, dass notwendige Zuverlässigkeitsdaten nicht, unvollständig oder mit Unsicherheiten behaftet vorliegen. Im Folgenden soll zuerst für den mechanischen Systemanteil und anschließend für die gesamte Mechatronik gezeigt werden, wie Zuverlässigkeitsarbeit in frühen Phasen ablaufen kann, um Entwicklungsentscheidungen zu unterstützen.

##### **4.1 Qualitative Zuverlässigkeitsarbeit an mechanischen Systemumfängen in frühen Phasen**

Bild 3 zeigt eine Konzeptskizze eines CVT. Konzeptskizzen sind in der Konzipierungsphase mechanischer Produkte Hauptinformationsträger.

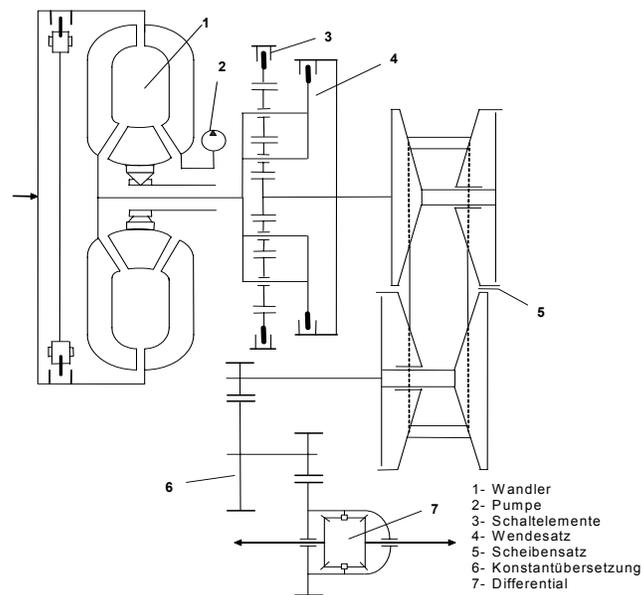


Bild 3: Konzeptskizze für den Mechanikanteil eines CVT-Getriebes

Die Konzeptskizze in Bild 3 ist im Entwicklungsablauf die erste Entscheidungsstufe. Auf Basis dieser Skizze werden einige Konzepte aufgrund verschiedener Kriterien schon frühzeitig verworfen. Eines dieser Kriterien ist die Zuverlässigkeit. Wenn auf dieser ersten Entscheidungsstufe ein Konzept aufgrund mangelnder Zuverlässigkeit als nicht weiter verfolgenswert erkannt wird, so steigert dies die Entwicklungseffizienz.

Anders als bei elektronischen Standardkomponenten, über die schon in frühen Phasen aufgrund von Katalogwerten Zuverlässigkeitsinformationen vorliegen, ist die Zuverlässigkeit bei mechanischen Komponenten eine Funktion von Belastung und Belastbarkeit. Während Erste schon sehr früh im Entwicklungsprozess z.B. durch Simulationen ausreichend bekannt ist, ist die Belastbarkeit u.a. von der Dimensionierung der Bauteile oder Fertigungsqualitäten abhängig. Bei relativ einfachen Systemen wie einem Stufenradsatz oder einem Planetenradsatz ist es möglich, auf Basis der vorhandenen Bauraumrestriktion, der auftretenden Belastung und einem entsprechenden Berechnungsmodell (z.B.: DIN 3990) trotz Unsicherheiten bei den eingehenden Größen Zuverlässigkeitsaussagen zu machen [8]. Allerdings sind die Aussagen - bedingt durch eingehende Datenunsicherheiten - von einer teils erheblichen Streuung beeinträchtigt, was die Chance verringert, sichere Aussagen über die Eignung oder das Verwerfen eines Konzeptes zu treffen. Wohl aber sind relative Aussagen zwischen verschiedenen Konzepten möglich, was den Auswahlprozess unterstützen kann.

Sind komplexere Anordnungen, wie das in Bild 3 gezeigte CVT zu untersuchen, so treten Optimalitätsprobleme auf. Obiges CVT besteht in seiner Längsanordnung aus hintereinander geschalteten Komponenten. So wird die Bauraumdimension Länge hauptsächlich durch die axiale Ausdehnung der Baugruppen Wandler, Wendesatz und Variator bestimmt. Um Konzepte untereinander oder mit einem Ziel vergleichen zu können, muss gewährleistet sein, dass die konzeptionell vorgegebene Gestalt des Produktes durch richtige relative Dimensionierung der Teile und Baugruppen zueinander zu einer maximal konzeptbedingten Zuverlässigkeit führt. Diese optimale Dimensionierung ist bei komplexeren Strukturen auf Basis der ersten Konzeptskizze nicht oder nur selten ermittelbar. Erst durch eine Vordimensionierung, die dann zu den bereits genannten grobmaßstäblichen Zeichnungen führt, wird dies in einer ersten Näherung getan. Dies führt dazu, dass es nur bei einfachen Strukturen möglich ist, bereits in der Phase der Konzeptzeichnungen quantitative Aussagen zu machen.

Nur wenn von vornherein klar ist, dass das neue Produkt zu großen Teilen aus bereits bekannten Komponenten aufgebaut wird, kann den Konzeptkomponenten schon ein Zuverlässigkeitswert zugewiesen werden. Für mechanische Strukturen bedeutet dies aber, dass für die jeweiligen Komponenten ein Berechnungsmodell vorliegt, das geänderte Belastungen und Betriebsbedingungen berücksichtigen kann.

Bei der Zuverlässigkeitsanalyse in frühen Entwicklungsphasen tritt noch eine weitere Herausforderung auf. Aufgrund eines im Vergleich zur Ausarbeitungsphase noch geringen Detaillierungsgrades besteht über das Problem der Zuverlässigkeitsdatenermittlung hinaus noch das der Nichtberücksichtigung von Bauteilen.

Dieser Effekt kann fatal sein, wenn ein oder mehrere Bauteile mit sehr systemkritischen Zuverlässigkeitseigenschaften, wie z.B. sehr niedrigen ausfallfreien Zeiten, vorliegen. Anhand von Bild 3 wird dies schnell deutlich. In der Konzeptzeichnung des CVT fehlen etliche Lager; dynamische und statische Dichtungen sind u.a. aufgrund des Fehlens des Gehäuses nicht enthalten.

Folgende Methoden sollen die Auffindung aller kritischen Komponenten in frühen Phasen unterstützen. Ziel dieser Methoden ist die Produktkonkretisierung in der Entwurfs- und Ausarbeitungsphase aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht zu antizipieren, um die Auswahl eines speziellen Konzeptes auf ein sichereres Fundament zu stellen.

#### *a.) 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 das 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.

#### *b.) Abgleich mit Vorgängerprodukten*

Eine andere Möglichkeit die Vollständigkeit der Systemelemente zu garantieren, ist die Analyse von Vorgängerprodukten. Hierin steckt der Gedanke der Erweiterungskonstruktion.

#### *c.) Schnittstellenanalyse/ Kraft-Leistungsflussanalyse*

Ein sehr abstrakter Ansatz zur Ermittlung von Systemelementen in frühen Phasen ist die Schnittstellenanalyse. Sie basiert auf dem Gedanken, 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 konkretisiert. Diese Vorgehensweise wird beendet durch das Erreichen der Systemgrenze, die aus dem Lastenheft hervorgeht. Eine weniger umfassende und einfachere Methode stellt die Leistungsflussanalyse dar. Hinter dieser Methodik steckt die Idee, dass die kritischen Teile bei mechanischen Systemumfängen meistens im Leistungsfluß liegen bzw. diesen umgeben. Ausfallarten wie (Schwing)Brüche, Oberflächenverschleiß, Abrieb und Risse können oft nur dort entstehen, wo Leistung übertragen wird. Wird also konsequent die in das System eingehende Leistung verfolgt und Leistungsabzweigungen und Zusammenschlüsse sowie das Verlassen des Systems berücksichtigt, so ist zumindest abgesichert, dass die meisten kritischen Teile berücksichtigt werden.

#### *d.) Funktionsrealisierungskonzept*

Dieses Konzept soll dazu dienen, die Konzeptstruktur auf die Realisierbarkeit der geforderten Funktionen hin zu überprüfen. Können diese dargestellt werden, so fehlen zumindest keine grundsätzlichen Funktionseinheiten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es basierend auf Konzeptskizzen eines gewissen Aufwandes bedarf, bis das System aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht konkretisiert ist. Es muss kritisch abgewogen werden zwischen dem Aufwand einer Konkretisierung in dieser Phase (die arbeitsaufwändiger ist, als z.B. in der Phase der grobmaßstäblichen Zeichnung) und dem Nutzen (ein frühzeitiges Erkennen eines nicht ausreichend zuverlässigen Konzeptes). In der Phase grobmaßstäblicher Skizzen sind aber z.B. die Methode der Vorgängeranalyse (z.B. Stücklisten) bei ähnlichen Produkten und die Methode der Schnittstellenanalyse eher bei Neuprodukten unterstützende Werkzeuge.

#### 4.2 Quantitative Zuverlässigkeitsbewertung in frühen Phasen

Nach der Systemkonkretisierung besteht die Notwendigkeit, Zuverlässigkeitsaussagen über die Lösungskonzepte zu tätigen, wozu entsprechende Zuverlässigkeitsdaten über die Konzeptkomponenten benötigt werden. Hierbei ist die Berücksichtigung der entsprechenden Ungenauigkeiten von großer Bedeutung. In [8] wurde gezeigt, dass es trotz bestimmter Unsicherheiten in den Eingangsdaten möglich ist, quantitative Zuverlässigkeitsaussagen zu tätigen. Diese sind dann selbst mit entsprechenden Streuungen verbunden. Trotzdem kann, wie in Bild 4 gezeigt, die Lage der ermittelten Systemlebensdauer  $B_{10}$  zu einer geforderten Lebensdauer aber auch im Vergleich zu einem anderen Konzept betrachtet werden.

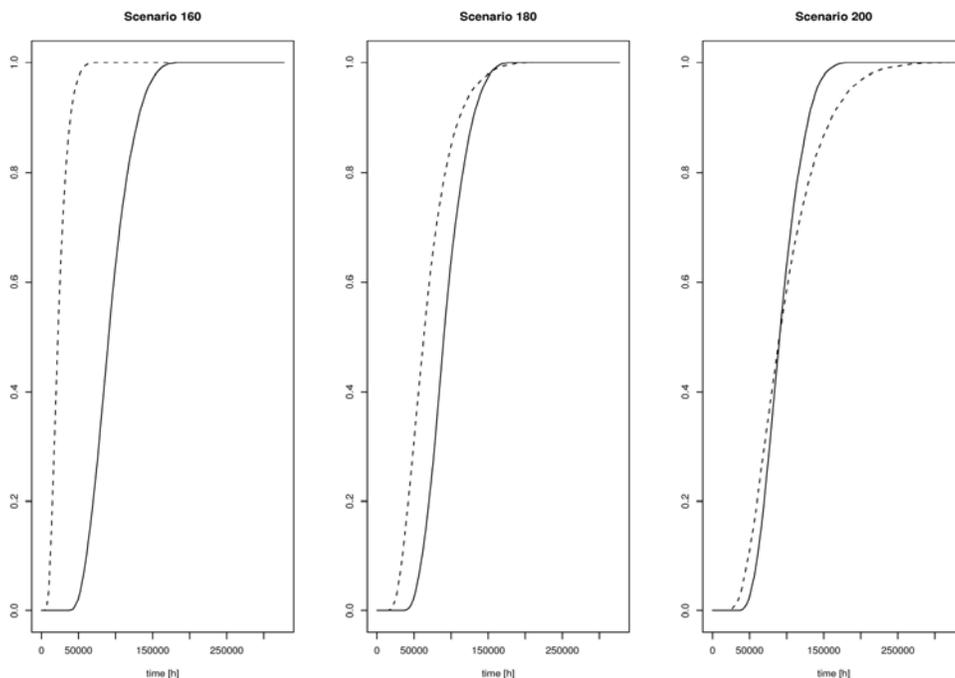


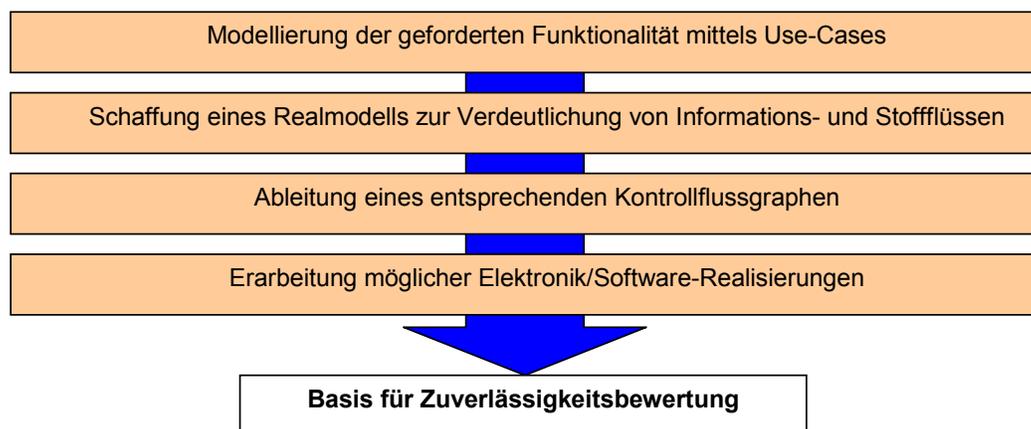
Bild 4: Streuung der  $B_{10}$  Lebensdauer zweier verschiedener Konzepte (Stufenradsatz --- und Planetenradsatz \_\_ ) bei verschiedenen Bauraumhöheszenarien

Bei einer Bauraumhöhe von 160 mm ist der Planetenradsatz dem Stufenradsatz eindeutig überlegen. Bei 180 mm Bauraumhöhe ist die Überlegenheit nicht vollkommen (Verteilungslinien schneiden sich) [8]. Solche Gegenüberstellungen erlauben es, die Auswahl verschiedener Konzepte zu unterstützen. Es ist selbstverständlich, dass bei komplexeren Strukturen, wie einem CVT, mehr Komponenten und somit mehr mit Unsicherheiten behaftete Variablen in die Berechnung mit eingehen. Um die Unsicherheiten so gering wie möglich zu halten, ist es notwendig, alle erdenklichen Informationsquellen zu nutzen. Hierzu zählt auch die Nutzung von Expertenwissen, dessen Nutzbarkeit in [9] verdeutlicht wurde.

Generell bestehen bei der Nutzung dieser Art von Wissen die Herausforderung der Transformierbarkeit auf das neue Produkt. Liegen keine entsprechenden Berechnungsmodelle, wie die DIN 3990 für Zahnräder vor, so sind die Anwendungsmöglichkeiten stark eingeschränkt. Ein Beispiel hierfür sind Dichtungen, z.B. in Form eines RWDR. Wenn derselbe RWDR an einer anderen Einbaustelle verwandt wird, so sind quantitative Aussagen über sein neues Ausfallverhalten im Vergleich zum bisher beobachteten nur schwer möglich.

## 5. Gesamtmechatronische Informationslage in frühen Phasen

Für die Zuverlässigkeitsanalyse in frühen Entwicklungsphasen stellt die Informationslage auch im Bereich der Software und Elektronik eine entscheidende Bedingung dar. Elektronik und Software ergeben sich meist aus der Festlegung des mechanischen Konzeptes. Da für die Zuverlässigkeitsbestimmung der Elektronik die Kenntnis über Art und Menge verwendeter Komponenten notwendig ist und die Software wiederum maßgeblich vom gewählten Software/Hardware Codesign abhängt, ist es nötig, neben dem mechanischen Konzept eines für die Informationsverarbeitung zu entwickeln, auf Basis dessen erste Zuverlässigkeitsaussagen möglich sind. Wir schlagen hierzu folgende Vorgehensweise vor:



Anhand des Beispiels einer Überbrückungskupplung (ÜK) für ein Automatgetriebe soll das Vorgehen verdeutlicht werden.

In Anlehnung an [10] soll die ÜK folgende Funktionalitäten aufweisen:

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

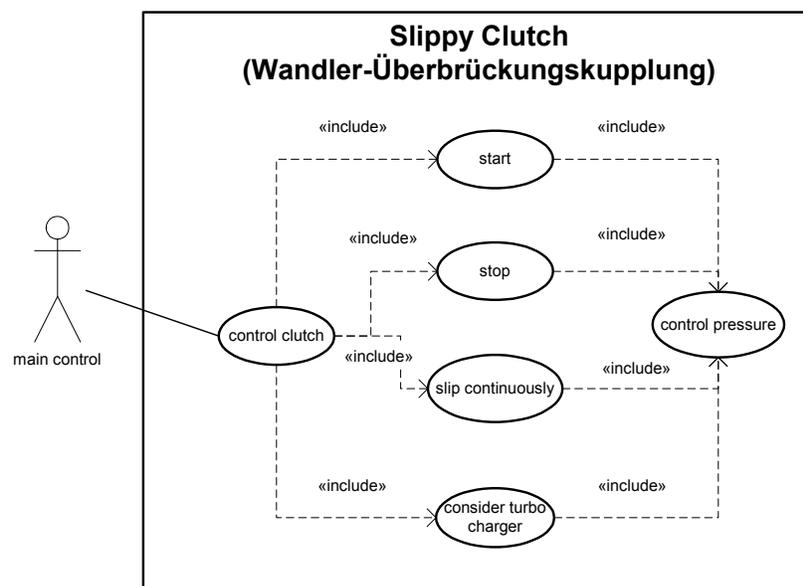


Bild 5: Use-Case Modell der Kupplungsfunktionalität

Bild 5 zeigt das übergeordnete Use-Case Modell für die Regelung der ÜK. Kernobjekt der Steuerung ist der Öldruck, der die Kupplungslamellen zusammenpresst und somit den Schlupf und das übertragbare Drehmoment regelt. Mittels der Use Cases „start“, „stop“, „slip continuously“ und „consider turbo charger“ wird die geforderte Funktionalität dargestellt. Die Kupplungsregelung steht in enger Verbindung zu der Hauptsteuerung, da bestimmte Kupplungsaktivitäten in Abstimmung mit anderen Prozessen stattfinden müssen.

In Bild 6 und 7 werden die Use Cases „start“ und „consider turbo charger“ gezeigt und anschließend erläutert.

Use Case	start
Goal	get the car moving, connect the engine with the transmission
Precondition	clutch open
Postcondition Success	piston pressure is higher than a given constant (clutch closed)
Postcondition Failure	piston pressure too low (clutch still open)
Actors	--
Trigger	positive acceleration and $v \geq 23$ km/h
Description	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 open valve to position 1</li> <li>2 if piston pressure <math>\geq</math> const. then open valve to position 2</li> <li>3 hand over to slip continuously after piston pressure is at minimum fixed value</li> </ol>
Extensions	none
Alternatives	none

Bild 6: Der Use Case "start"

Der Use Case „start“ hat das Ziel, das Fahrzeug anzufahren indem der Motor mit dem Getriebe verbunden wird. Die Vorbedingung ist, dass die Kupplung geöffnet ist. Die Zielbedingung ist, dass der Kupplungsanpressdruck höher als ein bestimmter konstanter Wert ist. Es liegt ein Fehler vor, wenn der Druck 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 geschaltet, was einen gewissen Anpressdruck erzeugt. Wenn der Anpressdruck ein gewisses Niveau erreicht hat, soll das Ventil in Position 2 geöffnet werden, was den Druck noch weiter erhöht. Ist ein gewisser Druck erreicht wird die Steuerungsaufgabe an den Use Case „slip continuously“ weitergegeben, der den Schlupf der Kupplung entsprechend Bild 7 fahrzustandsabhängig regelt.

Use Case	slip continuously
Goal	protect the gear from discontinuous forces
Precondition	piston pressure is at minimum fixed value
Postcondition Success	$\Delta n_{\text{Current}} \approx \Delta n_{\text{Nominal}}$
Postcondition Failure	$\Delta n_{\text{Current}} \neq \Delta n_{\text{Nominal}}$
Trigger	piston pressure reached minimum fixed value
Description	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 measurement of <math>\Delta n_{\text{Current}}</math></li> <li>2 computation of <math>\Delta n_{\text{Nominal}}</math>: <math>p(n, T) = \alpha n + \beta T</math>, <math>\Delta n_{\text{Nominal}} \sim 1/p</math></li> <li>3 compute the difference <math>\Delta n_{\text{Nominal}} - \Delta n_{\text{Current}}</math></li> <li>4 go back to step 1</li> </ol>
Extensions	<b>2a</b> in sport mode $\alpha_s = 1,15 * \alpha$
Alternatives	<b>3a</b> if $\Delta n_{\text{Current}} \gg \Delta n_{\text{Nominal}}$ then ensure slower increase of pressure <b>3b</b> in case of an error set the valve to a fixed position

Bild 7: Der Use Case "slip continuously"

Anhand der ermittelten Use Cases wird in einem zweiten Schritt ein Realmodell des zu konzipierenden Systems entwickelt. Dieses ist für den Fall der Überbrückungskupplung in Bild 8 dargestellt.

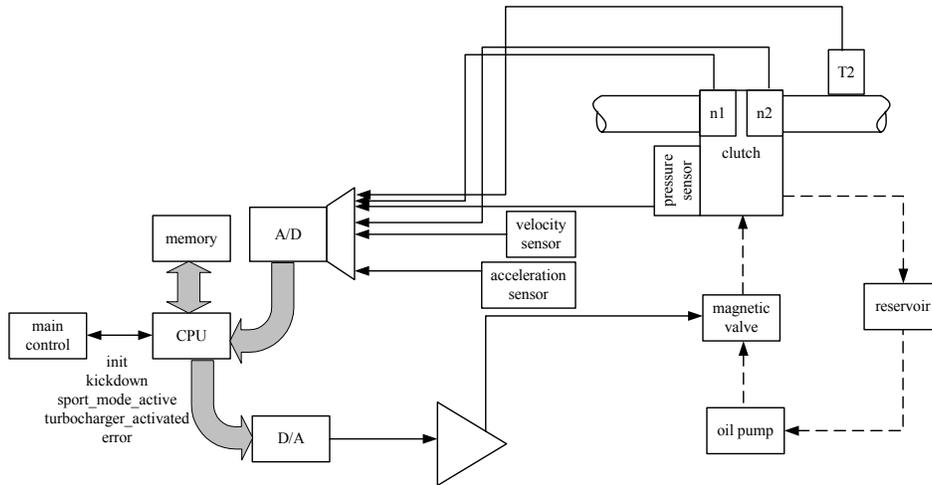


Bild 8: Das Realmodell der Überbrückungskupplung

Das Realmodell enthält sämtliche Komponenten, die aufgrund der Use Cases nötig sind, um das System in der geforderten Art zu betreiben. Da dieses Realmodell hauptsächlich auf die Belange der Steuerungskonzeption ausgerichtet ist, sind mechanische Bauteile und Baugruppen nur schematisch abgebildet. Das Konzept der Kupplungsmechanik kann ebenfalls in dieser Darstellung erfolgen.

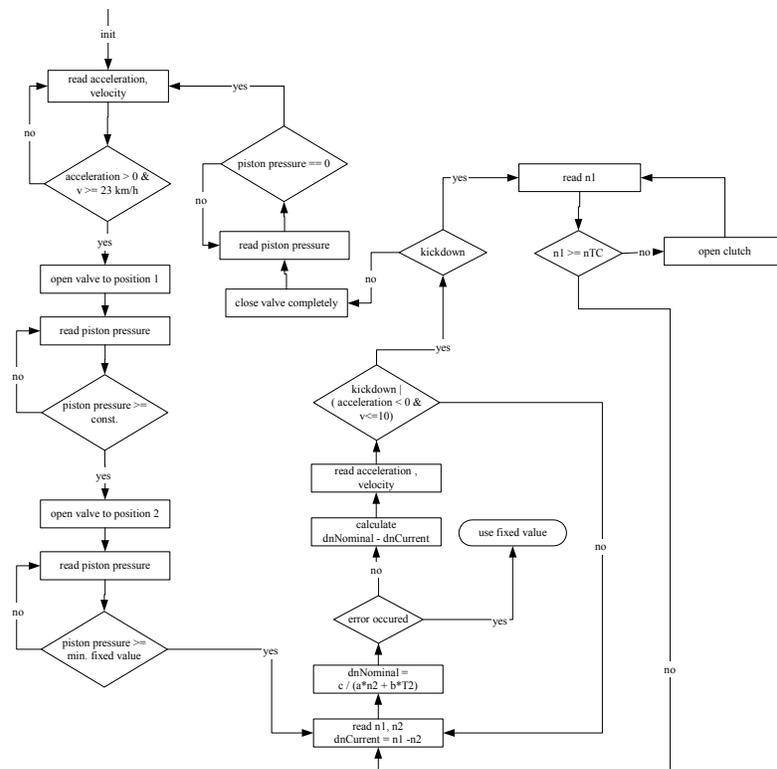


Bild 9: Der Kontrollflussgraph der Überbrückungskupplungssteuerung

Nach dem Aufbau des Realmodells erfolgt die Ableitung des in Bild 9 gezeigten Kontrollflussgraphen, der die Steuerungs- und Regelungsabläufe zeigt und somit wesentliche Ausgangsbasis für die Ermittlung von Steuerungskonzepten darstellt.

Auf Basis des gezeigten Informationsmaterials können nun verschiedene Realisierungskonzepte für die Informationsverarbeitung ermittelt werden. So wäre es beispielsweise möglich, den kompletten Regelungsalgorithmus vollkommen auf einem Microcontroller zu realisieren, wie es in Bild 10 dargestellt ist, oder aber einige Funktionalitäten (z.B. Speicher oder Wandler) auf gesonderte Elemente auszugliedern, wie aus Bild 11 entnommen werden kann.

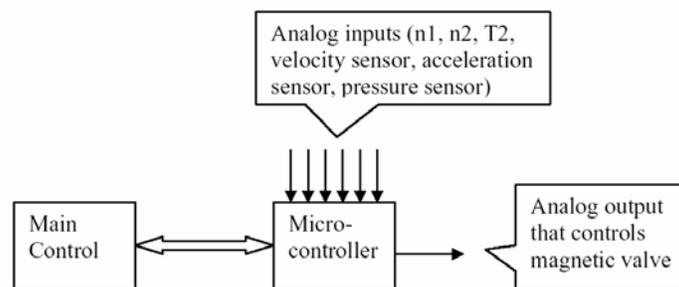


Bild 10: Alle Steuerungs- und Regelungsfunktionalität auf einem Microcontroller

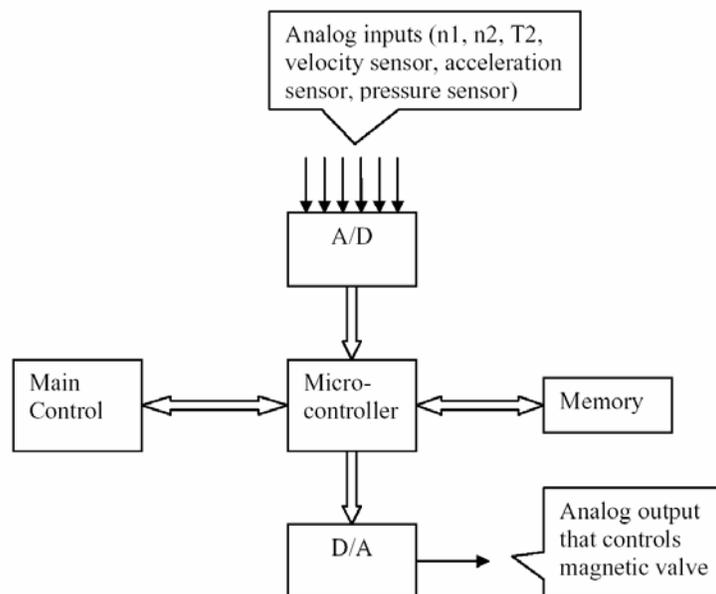


Bild 11: Teile der Informationsverarbeitung werden ausgliedert

Auf Basis des vorhandenen Informationsmaterials ist es möglich, die Elektronikkomponenten zu bestimmen, die für die Realisierung der ÜK-Regelung notwendig sind. Im gleichen Maße

liegt dann auch der in Software zu implementierende Regelungsumfang vor. Da die Elektronikkomponenten sehr stark standardisiert sind und auch entsprechende Zuverlässigkeitsinformationen vorliegen, ist schon in dieser Phase eine vergleichsweise sichere Zuverlässigkeitsaussage möglich.

Weniger sicher sind die Zuverlässigkeitsaussagen, die bezüglich der Software gemacht werden können. Die frühzeitige Bewertung der Zuverlässigkeit von Software leidet an dem Nicht-Vorhandensein eines allgemeinen Berechnungsmodells. Es sind im Bereich der Softwarezuverlässigkeit etliche Ansätze vorhanden [11], die zeigen, welchen Einflüssen die Softwarezuverlässigkeit unterliegt und auf Basis derer auch Modelle entwickelt wurden. Der Nachteil ist, dass diese Modelle nicht einheitlich sind, und dass, gegeben ein zu implementierender Algorithmus liegt vor, nicht gesagt werden kann, welches oder ob überhaupt eines der bekannten Modelle richtige Aussagen über die entsprechende Zuverlässigkeit macht. Es ist aus diesem Grund festzustellen, dass für die erfolgreiche Arbeit in frühen Entwicklungsphasen eine unternehmensinterne Datenarchivierung von unbedingter Wichtigkeit ist. Nur, wenn über die Softwareentwicklungen der vergangenen Jahre ein protokolliertes Ausfallverhalten vorliegt, können effiziente und für den jeweiligen Einsatzfall passende Modelle entwickelt werden, die es erlauben frühe Zuverlässigkeitsaussagen zu machen.

Solche Aussagen müssten trotzdem maßgeblich auf Expertenwissen basieren, mit dem entsprechende Modelle beschickt werden. So könnte es ein Modell der Form

$$Reliability = 0,669 + 1,586 \cdot \frac{\text{number of test cases}}{\text{lines of code}} + \frac{\text{number of test cases}}{\text{number of requirements}} \dots, \quad (1)$$

wie es in [12] vorgestellt wird, nötig machen, Vorabinformationen über die geschätzte Programmgröße (lines of code), den Umfang der geforderten Funktionalität (number of requirements) und andere Größen zu geben. Da solche Informationen in einer frühen Entwicklungsphase z.B. auf Basis der gezeigten Use-Case Überlegung nur selten exakt angegeben werden können, wird das Ergebnis aufgrund mit Unsicherheiten behafteter Expertenaussagen wiederum nicht diskrete, sondern eher verteilte Zuverlässigkeitsindikatoren liefern. Mit diesen wäre es aber möglich, Systeme relativ zueinander bezüglich der Über- oder Unterlegenheit zu bewerten.

## 6. Zusammenfassung

Aufgrund der teils großen Datenungenauigkeiten in frühen Entwicklungsphasen ist es sehr schwierig, Aussagen über konkrete Zuverlässigkeitswerte zu machen. Vielmehr führen die erwähnten Ungenauigkeiten in einem entsprechenden Modell zu relativen Aussagen über mehrere zu vergleichende Systeme. Dies setzt allerdings voraus, dass es Modelle gibt, die aufgrund exakter Systemdaten entsprechende Zuverlässigkeitswerte ermitteln können, wie es z.B. bei der Zahnrad- oder Lagerberechnung möglich ist. Bei Elektronikkomponenten liegen aufgrund des hohen Grades der Standardisierung schon bei bloßem Wissen über das Vorhandensein einer Komponente in einer Systemrealisierung katalogisierte und somit vergleichsweise genaue Zuverlässigkeitswerte vor. Beim Vorhandensein von Software in einem Systemkonzept muss für die Konzeptbewertung ein geeignetes Softwarezuverlässigkeitsmodell vorliegen. Dieses kann fast nur über die Nutzung firmeneigener Daten generiert werden. Auf Basis der beschriebenen Informationslage in frühen Entwicklungsphasen können dann Systeminformationen genutzt werden, um zum Einen Systemkonzepte relativ zueinander zu vergleichen, aber auch, um die - eventuell stark streuenden - Zuverlässigkeitswerte mit einem Zuverlässigkeitsziel abzugleichen.

## Literatur

- [1] Bernhard, W.; Heidemeyer, P.: Auswahl und Strukturen stufenloser PKW-Getriebe. In VDI-Berichte 803, 1990 Drehzahlvariable Antriebe. VDI Verlag
- [2] Boos, M.;Krieg, W.-E: Stufenloses Automatikgetriebe Ecotronic von ZF. ATZ 96 (1994-6)
- [3] Greiner, J.; Kiesel, J.; Veil, A.; Strenkert, J. 2004. Front-CVT Automatikgetriebe (WFC280) von Mercedes-Benz. VDI Berichte 1827. Getriebe in Fahrzeugen 2004.
- [4] Demmou, H.; Khalfaoui, S.; Guilhem, E.; Valette, R.: critical scenarios derivation methodology for mechatronic systems. Reliability Engineering and System Safety 84 (2004).
- [5] N.N.: VDA Band Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie. Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten. 3. Aufl., 2000.
- [6] Bracha, V.J.: The Methods of Reliability Engineering. Machine Design, pp. 70-76, July 1964
- [7] Karmioli, E.D.: Reliability Apportionment, Preliminary Report EIAM-5, Task II, General Electric, Schenectady, N.Y., pp. 10-22, 1965.
- [8] Jäger, P.; Gandy, A.; Bertsche, B.; Jensen, U. 2004. Decision Support in Early Development Phases – A Case Study form Machine Engineering. *Submitted to International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering (IJRQSE)*.

- [9] 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), January 26<sup>th</sup> -29<sup>th</sup>, 2004, Los Angeles, California.
- [10] 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.
- [11] Fenton, N.E.; Neil, M.:A Critique of Software Defect Prediction Models. IEEE Transactions on Software Engineering Vol. 25, No. 5, September/October 1999.
- [12] Nachiappan, N.; Williams L.; Vouk, M.: Towards a Metric Suite for Early Software Reliability Assessment. 14<sup>th</sup> ISSRE Conference 17<sup>th</sup> - 20<sup>th</sup> November 2003, Denver, CO. [www. Chillarege.com/fastabstracts/issre](http://www.Chillarege.com/fastabstracts/issre) 2003