UNI STUTTGART

Berichte aus dem

Institut für Maschinenelemente

Antriebstechnik • CAD • Dichtungen • Zuverlässigkeit

Heiko Ruppert

CAD-integrierte Zuverlässigkeitsanalyse und -optimierung

Bericht Nr. 102

D 93
ISBN 3 - 936100 – 02 - 0

Institut für Maschinenelemente
Antriebstechnik • CAD • Dichtungen • Zuverlässigkeit

Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
Tel. (0711) 685 – 6170

Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche, Institutsleiter

CAD-integrierte Zuverlässigkeitsanalyse und -optimierung

Von der Fakultät

Konstruktions- und Fertigungstechnik

der Universität Stuttgart

zur Erlangung der Würde eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Heiko Ruppert

geboren in Heilbronn

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

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. K.-H. Hirschmann

Tag der Einreichung: 23. Januar 2002

Tag der mündlichen Prüfung: 20. September 2002

Institut für Maschinenelemente

2002

Meiner Familie gewidmet

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart. Sie wurde im Rahmen des Schwerpunktprogrammes „Innovative rechnerunterstützte Konstruktionsprozesse“ von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche, Leiter des Instituts für Maschinenelemente, für die Ermöglichung der Arbeit, das entgegengebrachte Vertrauen und für die stete fachliche und menschliche Unterstützung im Rahmen dieser Arbeit.

Herrn Professor Dr.-Ing. Karl-Heinz Hirschmann, Leiter des Instituts für Antriebstechnik und Mechatronik der Universität Rostock, danke ich für die kritische Durchsicht der Arbeit, die Anregungen sowie für die Übernahme des Mitberichts.

Bei allen Mitarbeitern des Instituts möchte ich mich für die kollegiale, bereichsübergreifende und freundschaftliche Zusammenarbeit bedanken.

Danken möchte ich auch allen ehemaligen und aktiven Kolleginnen und Kollegen, Studien- und Diplomarbeitern sowie Wissenschaftlichen Hilfskräften des „Zuverlässigkeitsteams“, die zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Nicht zuletzt danke ich meiner Frau und meiner Familie für ihre Unterstützung und Verständnis.

Fellbach, im September 2002 Heiko Ruppert

Inhalt

Abkürzungen ..... **iv**

Formelzeichen ..... **vi**

Abstract ..... **vii**

1 Einleitung **1**

2 Ausgangssituation, Ziele und Aufbau der Arbeit **3**

2.1 Ausgangssituation 3
2.2 Ziele dieser Arbeit 4
2.3 Aufbau der Arbeit 5

3 Stand der Forschung und Technik **7**

3.1 Methodisches Vorgehen im Konstruktionsprozeß 7
3.2 Qualitative Methoden der Zuverlässigkeits- und Qualitätstechnik 10
3.2.1 Quality Function Deployment 10
3.2.2 Design Review 12
3.2.3 Qualitätsbewertung 14
3.2.4 Systemanalyse 17
3.2.5 ABC-Analyse 17
3.2.6 Fehler-Möglichkeits- und Einflußanalyse 18
3.2.7 Qualitative Fehlerbaumanalyse 25
3.2.8 Ereignisablaufanalyse 27
3.2.9 Checklisteneinsatz 29
3.2.10 Methoden aus anderen Branchen 31
3.3 Quantitative Methoden der Zuverlässigkeitstechnik 33
3.3.1 Statistische Beschreibung des Ausfallverhaltens 33
3.3.2 Boolesche Theorie 39
3.3.3 Quantitative Fehlerbaumanalyse 41
3.3.4 Markoff-Methode 42
3.3.5 Monte-Carlo-Simulation 46
3.4 Rechnerunterstützung im Konstruktionsprozeß und Datentechnik 47
3.4.1 Computer Aided Design 47
3.4.2 Produkt-Daten-Management-Systeme 51
3.4.3 Objektorientierte Programmiertechniken 52
3.5 Kosten der Zuverlässigkeit 55

4 Analyse und Entwurf eines CAD-integrierten Zuverlässigkeitsinformationssystems 58

4.1 Ausgangspunkt CAD-System 58
4.1.1 Das CAD-System Solid Edge 58
4.1.2 Daten des CAD-Systems 59
4.1.3 Programmierschnittstelle des CAD-Systems 62
4.1.4 Verwendung einer gemeinsamen Datenbasis 66
4.2 Analyse der Konstruktionsphasen 67
4.2.1 Phasenabbildung im CAD-System 67
4.2.2 Kopplung von Zuverlässigkeitsanalysen mit Entwicklungsphasen 71
4.3 Analyse der notwendigen Zuverlässigkeitsdaten 76
4.3.1 Zuverlässigkeitsziel und -anforderungen im Lastenheft 76
4.3.2 Zuverlässigkeitsdaten aus der Verifikationsphase 83
4.3.3 Zuverlässigkeitsdaten aus der Nutzungsphase 86
4.3.4 Zuverlässigkeitsdaten aus Datenbanken 90
4.4 Analyse der CAD-integriert anwendbaren Zuverlässigkeitsmethoden 91
4.5 Entwurf der Programmodule 92
4.5.1 Der Lebensdauermanager KOSYMA 92
4.5.2 Der Systemeditor SYSEDIT 94
4.5.3 Gesamtanordnung des Systems 95

5 Phasenbezogene, durchgängige Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen 98

5.1 Anlegen der Zuverlässigkeitsdaten in der Konzeptphase 98
5.1.1 Datenkopplung in der Konzeptphase 98
5.1.2 Durchgängigkeit der Daten in der Konzeptphase 100
5.2 Entwurfsphase 101
5.3 Ausarbeitungsphase 102
5.4 Weibullbasierte Kostenanalyse 105
5.4.1 Vorgehensweise 105
5.4.2 Beispiel 106

6 Beispielhafte Umsetzung 109

6.1 Anwendungsbeispiel EKS als komplexes technisches System 109
6.2 Durchgängige CAD-integrierte Fehlerbaumanalyse 111
6.2.1 CAD in frühen Konzept-Phasen 111
6.2.2 Kopplung mit Zuverlässigkeitsdaten und -analysen 111
6.2.3 Modifikationen in der Konzeptphase 113

6.2.4 Fehlerbaumanalysen in Entwurfs- und Ausarbeitungsphasen 115
6.3 Durchgängige CAD-integrierte Anwendung der Booleschen Methode 119
6.3.1 Boole in Konzeptphasen 119
6.3.2 Übernahme der Ergebnisse in Entwurfsphasen 120
6.3.3 Zuverlässigkeitsberechnung in der Ausarbeitungsphase 121
6.3.4 Anwendung des Boole-Markoff-Modells 121
6.4 CAD-integrierte Anwendung qualitativer Zuverlässigkeitsmethoden 122
6.4.1 CAD-integriertes QFD 123
6.4.2 CAD-integrierte ABC-Analyse 123
6.4.3 CAD-integrierte FMEA 124
6.5 Weibullbasierte Kostenreduzierung des EKS 128

7 Zusammenfassung und Ausblick 133

Literatur 135

Abkürzungen

ANSI	American National Standards Institute
API	Application Programming Interface
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASI	American Supplier Institute
CAD	Computer Aided Design
CAQ	Computer Aided Quality
CDK	Cost Design Kit
CLSID	Class Identifier
COM	Component Object Model
CORBA	Common Object Request Broker Architecture
CSV	Comma Separated Value
DBMS	Datenbankmanagementsysteme
DCE	Distributed Computing Environment
DCOM	Distributed Component Object Model
DDE	Dynamic Data Exchange
DLL	Dynamic Link Library
DMU	Digital Mock-up
DR	Design Review
DTD	Document Type Description
EBA	Ereignisbaumanalyse
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EKS	Elektromechanisches Kupplungssystem
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
ETA	Event Tree Analysis (Ereignisbaumanalyse)
EXE	Executable, d.h. ausführbar (Dateieigenschaft)
FEM	Finite Elemente Methode
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis (Ausfallarten und –folgenanalyse) oder Fehler-Möglichkeits- und Einfluß-Analyse
FMECA	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis
FBA	Fehlerbaumanalyse
FTA	Fault Tree Analysis
GUID	Globally Unique Identifier
HALT	Highly Accelerated Life Testing
HTML	Hyper Text Markup Language
HSIA	Hardware/Software-Interaktionsanalyse
I	Interface
IDL	Interface Definition Language
IID	Interface Identifier
IGES	Initial Graphics Exchange Standard
ISO	International Standardization Organization
MFC	Microsoft Foundation Class

MDI	Multiple Document Interface
MS	Microsoft
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OBJ	Vom Compiler übersetzte Objektdatei *.obj
ODBC	Open Database Connectivity
OLE	Object Linking and Embedding
OLE for D&M	Object Linking and Embedding for Design and Modelling
OOA	Objektorientierte Analyse
OOD	Objektorientierter Entwurf (Design)
OOP	Objektorientierte Programmierung
PDM	Produkt-Daten-Management-Systeme
PPM	Parts Per Million
PSA	Probabilistic Safety Assessment
QB	Qualitätsbewertung
QFD	Quality Function Deployment
RC	Ressourcenskriptdatei
RES	Ressourcendatei
RPZ	Risikoprioritätszahl
RTF	Rich Text Format
SDK	Software Development Kit
SET	Standard d'Exchange et de Transfert
SGML	Standard Generalized Markup Language
SQL	Standard Query Language
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
VB	Visual Basic
VC++	Visual C++
VDA	Verein der Automobilhersteller
VDA-FS	Verein der Automobilhersteller - Flächenschnittstelle
VDA-PS	Verein der Automobilhersteller - Prozedurale Schnittstelle
WCA	Worst Case Analysis
WMF	Word Metafile
UDT	Uniform Data Transfer
UGS	Unigraphics Solutions
UUID	Universal Unique Identifier
WWW	World Wide Web
ZSB	Zusammenbau

Formelzeichen

A_D	Dauerverfügbarkeit
$A(t)$	Verfügbarkeit, engl.: Availability
b	Formparameter der Weibullverteilung
B_x	Lebensdauer bei x% Ausfallwahrscheinlichkeit
C	Dynamische Tragzahl, Konstante
$E(t)$	Erwartungswert
$f(t)$	Dichtefunktion
$F(t)$	Ausfallwahrscheinlichkeit (engl.: Failure)
i	Laufparameter
j	Laufparameter, Rangzahl
K	Komponente
L_V	Lebensdauerverhältnis
m	Prüflosgröße
MTBF	Mean Time Between Failure (Mittelwert der ausfallfreien Zeiten oder auch mittlerer Ausfallabstand)
MTTFF	Mean Time To First Failure (Mittlere Lebensdauer bis zum ersten Ausfall bei reparierbaren Systemen)
MTTF	Mean Time To Failure (Mittelwert der Lebensdauer vom Ende der Reparaturzeit bis zum nächsten Ausfall)
MTTR	Mean Time To Repair (Mittelwert der Reparaturzeit bzw. die Instandsetzungszeit)
n	Anzahl der Systemkomponenten
P	Dynamisch äquivalente Lagerbelastung
P_A	Aussagewahrscheinlichkeit
$P(t)$	Wahrscheinlichkeit (engl.: Probability)
p	Exponent der Lebensdauergleichung für Lager
q	Index für eine bestimmte Ausfallwahrscheinlichkeit
$R(t)$	Überlebenswahrscheinlichkeit, Zuverlässigkeit (engl.: Reliability)
t	Statistische Variable (Beanspruchungszeit, Lastwechsel, Betätigungen, etc.)
t_0	Ausfallfreie Zeit der Weibullverteilung
T	Charakteristische Lebensdauer der Weibullverteilung, Lageparameter
$U(t)$	Nichtverfügbarkeit, engl.: Unavailability
Z	Zustandsindikator
$\Gamma(\bullet)$	Gammafunktion
$\lambda(t)$, λ	Ausfallrate
$\mu(t)$, μ	Reparaturrate
τ	Zufallsvariable
ξ	Zufallszahl

Abstract

CAD-integrated Reliability Analysis and Optimisation

The reliability is defined as the probability of a technical system to perform a required function under specified conditions for a certain period of time. The reliability directly describes the operativeness of a product. In this way the reliability can be regarded as the dynamical part of the quality, which is a decisive criterion for sales under the pressure of competition. In order to develop reliable products under severe conditions, such as larger complexity, greater functionality, etc., reliability methods must be utilized.

Customers specify the functional properties of a product by their demands. Almost exclusively design engineers realize these properties. Even though the methodology of design is sophisticated, only a development process, which is supported by reliability techniques, will lead to highly reliable products.

However, the determination of the reliability of systems and its components is often full of imperfections. The investigation of the reliability is performed late in the computer aided design process. Moreover the methods of CAD and of reliability are applied isolated from each other. The advantage of an early CAD-integrated and design-stage oriented reliability analysis is obvious. In this way, the present work will contribute.

Based on state-of-the-art design methodology and its application in a CAD system, the qualitative and quantitative methods of reliability analysis were investigated during the development process. Starting with the conceptual design stage in the CAD system, the relevant reliability data can be added to the geometrical objects by means of a lifetime manager and a database. Current reliability methods, such as fault tree analysis, Boolean model, etc., can be performed based on this data. The application of CAD and reliability analysis is executed interactively. So an early reliability analysis can be updated and improved according to the progress of the design. Thus the required and specified reliability of a product will be reached earlier in the development process and additionally more exactly, compared with a reliability analysis, which is separated from the design process.

In order to store the relevant reliability data according to the design stages, the software module KOSYMA has been developed. KOSYMA illustrates the lifetime man-

ager. Already the conceptual design of a product can be pictured in the sketch modus of the CAD system and linked with the lifetime manager. Reliability data is assigned to the geometrical objects, which were created in the CAD surrounding. Reliability analysis will be performed on this basis and stored according to the design stages in a database. In the following stages of the development process, these results can be utilized for further investigations. With this proceeding, the reliability data and its analysis are provided continuously during the CAD system. Using the fault tree analysis, the Boolean model as well as the Failure Mode Effects and Criticality Analysis this approach is presented and verified. The possibility and procedure of cost reduction measures based on a CAD-integrated Weibull analysis is also shown. The practical implementation of the approach in the software tools is demonstrated using the practical example of an electromechanical clutch actuator.

Future work on this subject will focus on the uncertainty of reliability data and the confidence interval. It is of particular interest how the uncertainty of reliability data of the single component affects the reliability analysis of the whole system. The different design stages should be considered for this aspect, too.

There should be further investigations based on cost reduction measures. A step in this direction could be cost reduction based on a CAD-integrated Weibull analysis at earlier design stages.

1 Einleitung

Der Begriff Zuverlässigkeit wird eingeordnet in den Bereich des Qualitätsmanagements. Dabei wird die Zuverlässigkeit definiert als die Wahrscheinlichkeit dafür, daß ein Produkt oder ein Prozeß über eine bestimmte Betrachtungszeit seine zuvor definierte Aufgabe unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen erfüllt [1], [2]. Als Teil der Qualität, die ein Produkt zu einem bestimmten Zeitpunkt beurteilt, untersucht die Zuverlässigkeit die Funktionserfüllung über einen definierten Zeitraum.

Die Technik im eigentlichen Sinne ist davon geprägt ein Produkt zu erzeugen. Die „Macher“ des Produkts sind von dessen Funktion vorerst überzeugt. Bei der Betrachtung der Zuverlässigkeit wird diese Funktion jedoch in Frage gestellt. Die Zuverlässigkeit untersucht die „Nicht-Funktionsfähigkeit“ eines Produkts und damit seinen Ausfall, d.h. sein Versagen. Die Zuverlässigkeitstechnik umfaßt die Methoden, um die Zuverlässigkeit zu analysieren und zu ermitteln.

Bild 1.1: Schlagzeilen der Pannenstatistik 2000 des ADAC [3]

Im Fahrzeugbau beispielsweise werden umfangreiche „Pannenstatistiken“ veröffentlicht, in denen die Zuverlässigkeit als Anzahl unplanmäßiger Werkstattaufenthalte oder Anzahl der „Liegenbleiber“ pro Zeitintervall (Jahr, Monat) ausgedrückt wird, Bild 1.1. Produkthaftung, Gewährleistung, Kulanzfälle und Imageverlust sind wesentliche Folgen einer unzureichenden Produktzuverlässigkeit. Durch den frühen Einsatz analytischer Zuverlässigkeitsmethoden läßt sich die Produktzuverlässigkeit erhöhen.

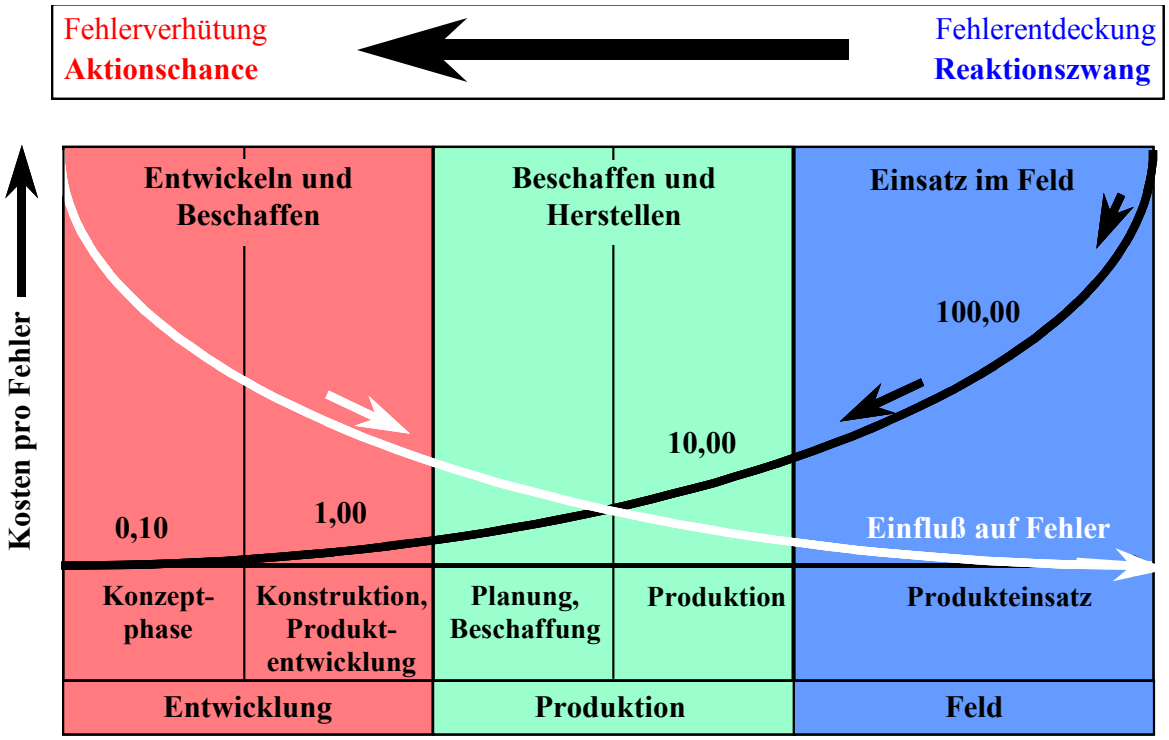


Bild 1.2: „Verzehnfachungsregel“ [4]

Die sogenannte „Zehnerregel“ bringt die Vorteile eines frühen Einsatzes der Zuverlässigkeitstechnik deutlich zum Ausdruck, Bild 1.2. Die Folgekosten unentdeckter Fehler sind wesentlich höher als der verstärkte und frühe Einsatz von Zuverlässigkeitsmethoden. Ein weiterer wesentlicher Mangel ist der von der rechnerunterstützten Konstruktion (CAD) isolierte Einsatz der Zuverlässigkeitsmethoden. Konstruktive Änderungen aufgrund mangelnder Zuverlässigkeit werden umso aufwendiger, je später sie erfolgen. Mit einer Kopplung der Methoden der Konstruktion und der Zuverlässigkeitstechnik ließen sich die Anforderungen an das Produkt früher und treffsicherer realisieren. Die sich verschärfenden Randbedingungen der Produktentwicklung zwingen die Hersteller geradezu, sich in diese Richtung zu bewegen [5].

Mit dieser Arbeit soll ein Beitrag zur Integration der Zuverlässigkeitsermittlung und rechnerunterstützten Gestaltung (CAD) geleistet werden. Ein Schwerpunkt der Abhandlung ist die CAD-Integration von qualitativen und quantitativen Zuverlässigkeitsmethoden. Auf die durchgängige und frühe Anwendung der Methoden („frühe Konstruktionsphasen“) wurde besonders geachtet. Nach Abschluß der Zuverlässigkeitsanalyse kann darauf aufbauend eine Kostenreduzierung der „zuverlässigsten“ Bauteile erfolgen.

2 Ausgangssituation, Ziele und Aufbau der Arbeit

2.1 Ausgangssituation

Die höhere Funktionalität, die größere Zuverlässigkeit und die gestiegenen Qualitätsanforderungen technischer Produkte stellen neue Herausforderungen an die technische Produktentwicklung [5]. In der Vergangenheit wurde die Systemzuverlässigkeit ausschließlich durch konstruktive Methoden sichergestellt. Zusätzlich zum klassischen Weg über ausgereifte Konstruktionsmethoden lassen sich die gestiegenen Forderungen an ein Produkt nur mit der Anwendung analytischer Zuverlässigkeitsmethoden erfüllen. Dabei existieren grundsätzlich zwei Wege: Berechnungen liefern quantitative Ergebnisse, qualitative Resultate werden durch systematische Untersuchungen und Methoden wie FMEA, FTA, Ereignisablaufanalyse u.a. erzielt. In Bild 2.1 sind die grundsätzlichen Möglichkeiten zur Sicherstellung der Systemzuverlässigkeit aufgeführt.

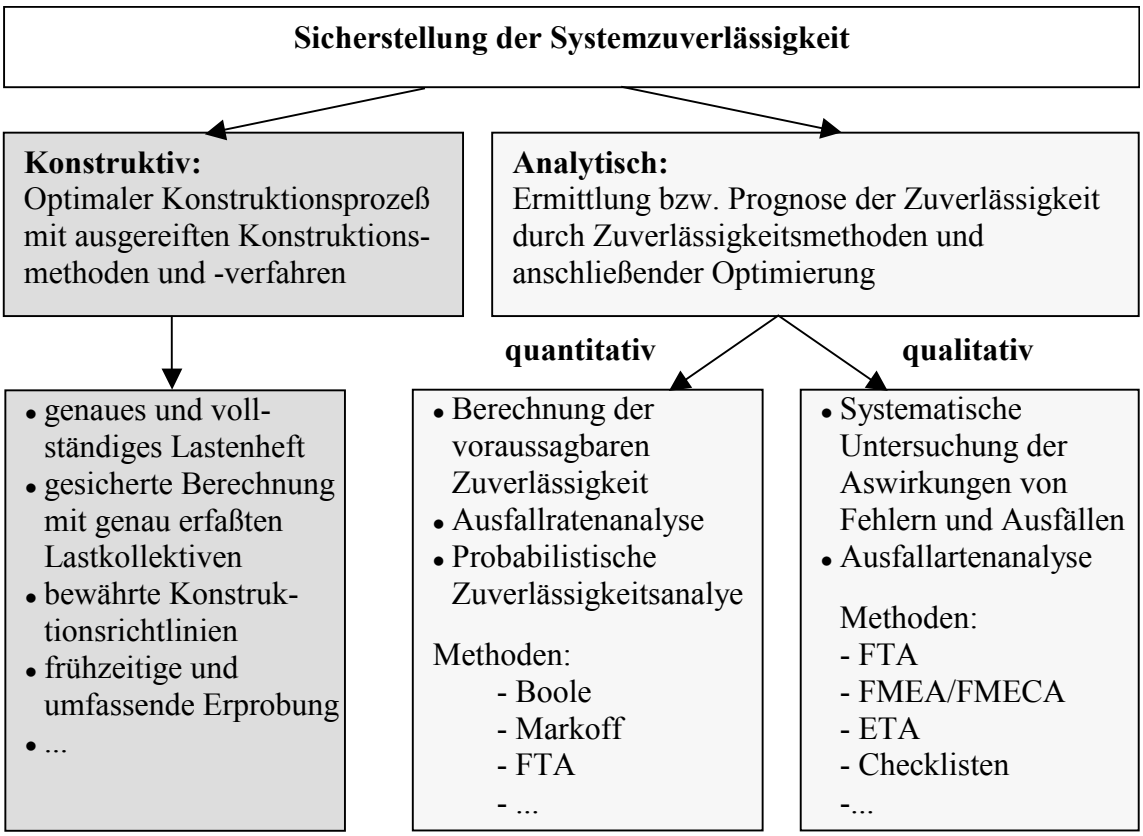


Bild 2.1: Grundsätzliche Möglichkeiten zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit [5]

Die analytischen Methoden der Zuverlässigkeitstechnik werden oftmals isoliert vom rechnerunterstützten Konstruktionsprozeß angewendet, so daß die gewonnenen Ergebnisse nicht direkt weiterverarbeitet werden können. Ein weiterer Nachteil ist die punktuelle, nicht durchgängige Anwendung der analytischen Methoden sowie eine lückenhafte Fortschreibung der gewonnenen Ergebnisse. Eine Rückkopplung der Ergebnisse in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozeß fehlt völlig. Zusätzlich werden die Zuverlässigkeitsmethoden erst in „späten“ Entwicklungsphasen angewendet, womit ein rechtzeitiges Steuern der Zuverlässigkeitskennwerte und eine frühe Änderung der Konstruktion erschwert wird.

2.2 Ziele dieser Arbeit

Im Sinne der Integration von Gestaltung und Berechnung ist das Ziel dieser Arbeit, den Einsatz der rechnergestützten Konstruktion und die Prognose bzw. Berechnung der Zuverlässigkeit über den Entwicklungsprozeß hinweg zu betrachten. Mit einer CAD-gekoppelten Zuverlässigkeitsermittlung kann das geforderte Zuverlässigkeitsziel schneller und genauer erreicht werden. Dabei sind sowohl qualitative als auch quantitative Methoden der Zuverlässigkeitstechnik parallel zum rechnerunterstützten Konstruktionsprozeß anzuwenden.

In der Vorgängerarbeit wurde ausschließlich die quantitative Berechnung der Systemlebensdauer mittels des Booleschen Modells in der späten Entwicklungsphase, d.h. der Ausarbeitungsphase und Kopplung zum CAD-System betrachtet [6]. Darauf aufbauend, konzentriert sich die vorliegende Arbeit auf

- die Implementierung zusätzlicher quantitativer Methoden (z.B. FTA),
- die Integration von qualitativen Zuverlässigkeitsmethoden (z.B. FMEA),
- die durchgängige, phasenübergreifende Anwendung der analytischen Methoden (z.B. Boole) im CAD-Prozeß,
- die frühen Phasen des Entwicklungsprozesses (Konzept, Entwurf) und
- die Kostenreduzierung auf Basis einer Weibullanalyse.

Weitere **quantitative Zuverlässigkeitsmethoden**, wie z.B. Fehlerbaumanalysen, Markoff, u.a., sollen gekoppelt zum rechnerunterstützten Konstruktionsprozeß durchgeführt werden. Damit wird die CAD-Integration der Systemzuverlässigkeitsberechnung nach Boole [6] ergänzt.

Die **qualitativen Zuverlässigkeitsmethoden**, die als Basis für die Berechnung dienen, sollen parallel zu den frühen Phasen des Konstruktionsprozesses eingesetzt und verwendet werden. Bereits die Zuverlässigkeitsziele aus dem Lastenheft sollen in eine Zuverlässigkeitsdatenbank eingetragen werden. Dem Anwender, d.h. dem Konstrukteur, soll somit die Möglichkeit gegeben werden, produktspezifische Zuverlässigkeitsdaten zu Beginn des rechnergestützten Entwicklungsprozesses in eine Datenbank ein-

zupflegen. Während des CAD-Konstruktionsprozesses sollen die Daten weiter aktualisiert werden.

Während des gesamten rechnergestützten Konstruktionsprozesses kann der Anwender zwischen dem CAD-Programm und der Zuverlässigkeitsanalyse wechseln. Vorhandene Zwischenergebnisse bezüglich der Lebensdauer sollen direkt im geometrischen Modell des CAD-Programms sichtbar werden. So daß der Konstrukteur bereits in **frühen Entwicklungsphasen** steuernd in die Zuverlässigkeitsentwicklung eingreifen kann. Das spezifizierte Zuverlässigkeitsziel soll damit früher und exakter erreicht werden.

Zusätzlich soll die **Durchgängigkeit** der Zuverlässigkeitsinformationen sichergestellt werden. Zuverlässigkeitsanalysen und -ergebnisse sollen phasenbezogen und strukturiert in einer Datenbank abgelegt werden, so daß in den folgenden Konstruktionsphasen darauf aufgebaut werden kann.

Abschließend soll eine **Kostenbetrachtung** mit in die Zuverlässigkeitsanalyse der Detailkonstruktion einfließen. Aufbauend auf einer Weibullanalyse eines technischen Produkts sollen die zuverlässigsten Bauteile hinsichtlich ihres Kosteneinsparpotentials untersucht werden.

Die gesamte Vorgehensweise wird anhand eines Beispiels verdeutlicht.

2.3 Aufbau der Arbeit

Bei der Entwicklung eines Konzepts zur CAD-integrierten Zuverlässigkeitsanalyse und -optimierung ergeben sich die in Bild 2.2 dargestellten Arbeitsschwerpunkte.

Ausgangsbasis ist der Stand der Technik der Zuverlässigkeits- und Konstruktionsmethodik sowie deren Rechnerunterstützung (Kapitel 3). Aus den Defiziten ergeben sich die Ziele der Arbeit (Kapitel 2).

Die Analyse und der Entwurf eines CAD-integrierten Zuverlässigkeitssystems beschäftigt sich, ausgehend vom CAD-System, mit der Analyse der Konstruktionsphasen, den notwendigen Zuverlässigkeitsdaten sowie den durchgängig anwendbaren Zuverlässigkeitsmethoden. Kapitel 4 schließt mit dem Entwurf der Programmodule ab.

Die Durchführung einer phasenbezogenen, durchgängigen Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen erfolgt in Kapitel 5. Die beispielhafte Umsetzung in Kapitel 6 schließt die Arbeit ab.

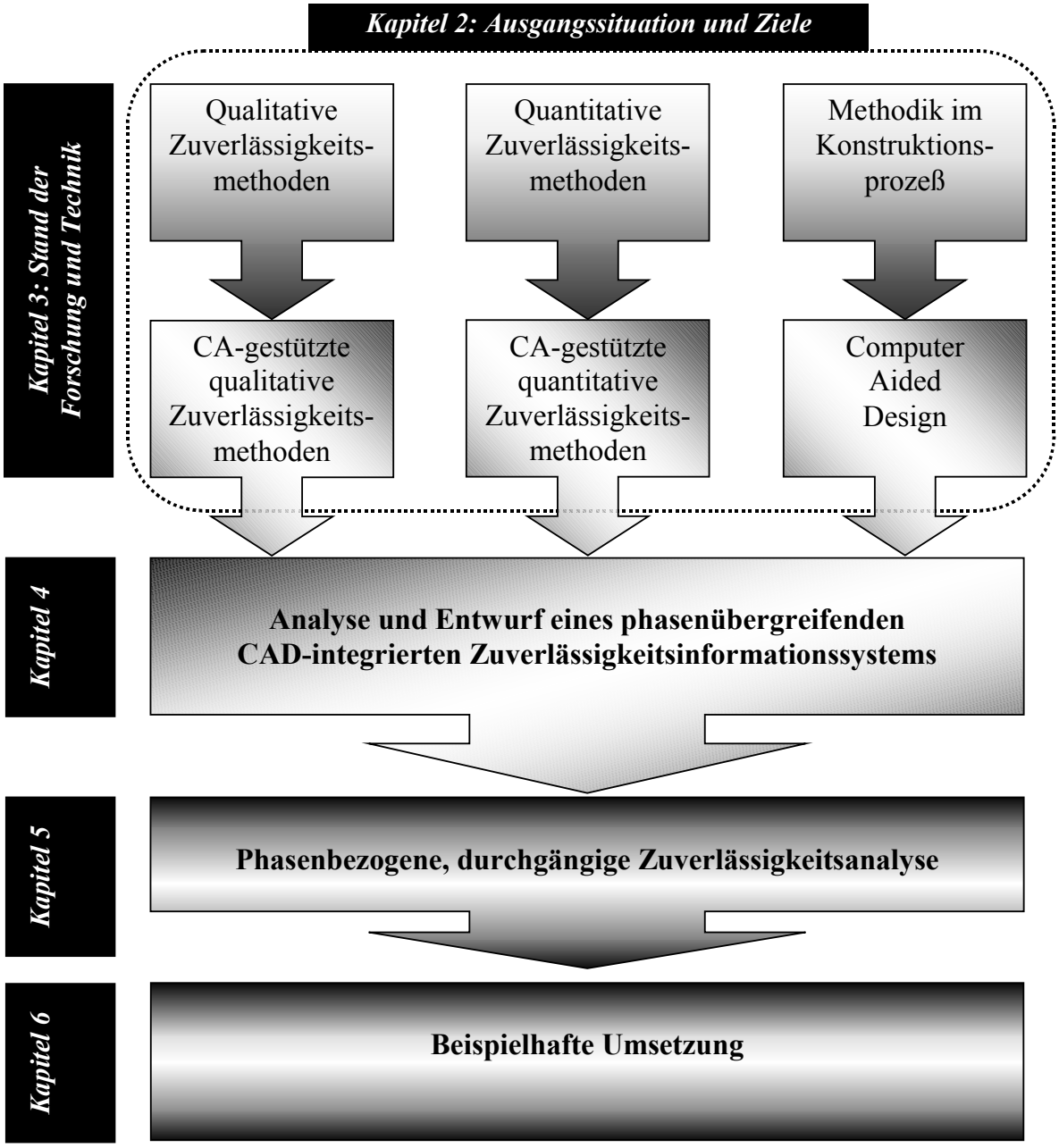


Bild 2.2: Aufbau der Arbeit

3 Stand der Forschung und Technik

Dieses Kapitel beschreibt zunächst das methodische Vorgehen im Konstruktionsprozeß (Kapitel 3.1). Anschließend wird der Stand der Forschung und Technik sowohl der qualitativen als auch der quantitativen Methoden der Zuverlässigkeitstechnik beschrieben (Kapitel 3.2 und 3.3). Der Stand der Rechnerunterstützung im Konstruktionsprozeß und der Datentechnik schließen das Kapitel ab (Kapitel 3.4).

3.1 Methodisches Vorgehen im Konstruktionsprozeß

Um ein schrittweises, logisches Vorgehen im Konstruktionsprozeß unabhängig von Berufserfahrung, Informationsdichte und Tagesverfassung des Konstrukteurs zu gewährleisten, wurden die verschiedenen Arbeitsschritte in einzelne Prozeßphasen zusammengefaßt und die Inhalte folgerichtig aneinandergereiht [7]. Ziel dieses allgemein anwendbaren Vorgehens ist, Zusammenhänge zu strukturieren und eine produktunabhängige Methodik zur Systematisierung der meist intuitiven Arbeit des Konstrukteurs zu erhalten. Für das Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte sind zahlreiche Vorgehensmodelle von Pahl/ Beitz [8], Rodenacker [9], Roth [10], Koller [11], Ehrlenspiel [12] entwickelt worden, die in den VDI-Richtlinien 2221 [13] und 2222 [14] zusammengeführt wurden. Die Richtlinien definieren phasenorientierte Arbeitsschritte und zugehörige Ergebnisse, die sich in vier Hauptarbeitsschritte gliedern: Planen und Klären der Aufgabenstellung, Konzipieren sowie Entwerfen und Ausarbeiten, Bild 3.1. Die ersten beiden Arbeitsschritte werden als frühe Phasen bezeichnet, die letzten beiden als späte Phasen. Variierend mit der Aufgabenstellung (Neu-, Varianten-, Anpassungskonstruktion) werden die Phasen zeitlich und logisch nur teilweise oder mehrmals iterativ durchlaufen. Vor- und Rücksprünge auf einzelne Phasen können gegebenenfalls möglich sein.

Pahl/ Beitz haben die vier Hauptarbeitsschritte verfeinert und konkretisiert, Bild 3.2. Ausgehend von den drei Faktoren Markt, Unternehmen und Umfeld ergibt sich die Aufgabenstellung. Der Einfluß des Faktors Markt wird bestimmt durch:

- die technische und wirtschaftliche Stellung,
- die Änderung der Marktwünsche,
- die Anregung bzw. Kritik vom Kunden und
- die technischen bzw. wirtschaftlichen Vorteile der Wettbewerber.

Der Impuls im eigenen Unternehmen resultiert aus:

- Ideen und Eigenforschungsergebnissen,
- neuen Funktionen zur Erweiterung oder Befriedigung des Absatzgebiets,
- der Einführung neuer Fertigungsverfahren,
- Rationalisierungsmaßnahmen in der Produktpalette und der Fertigungsstruktur,
- Beteiligungsmöglichkeiten sowie höherem Diversifikationsgrad.

Substitution durch neue Technologien und Forschungsergebnisse, Umweltauflagen und Recycling bei bestehenden Produkten prägen den Faktor Umfeld.

Die einzelnen Bearbeitungsschritte und Teilaufgaben, welche die Hauptphasen beinhalten, sind in Bild 3.2 stichwortartig aufgeführt.

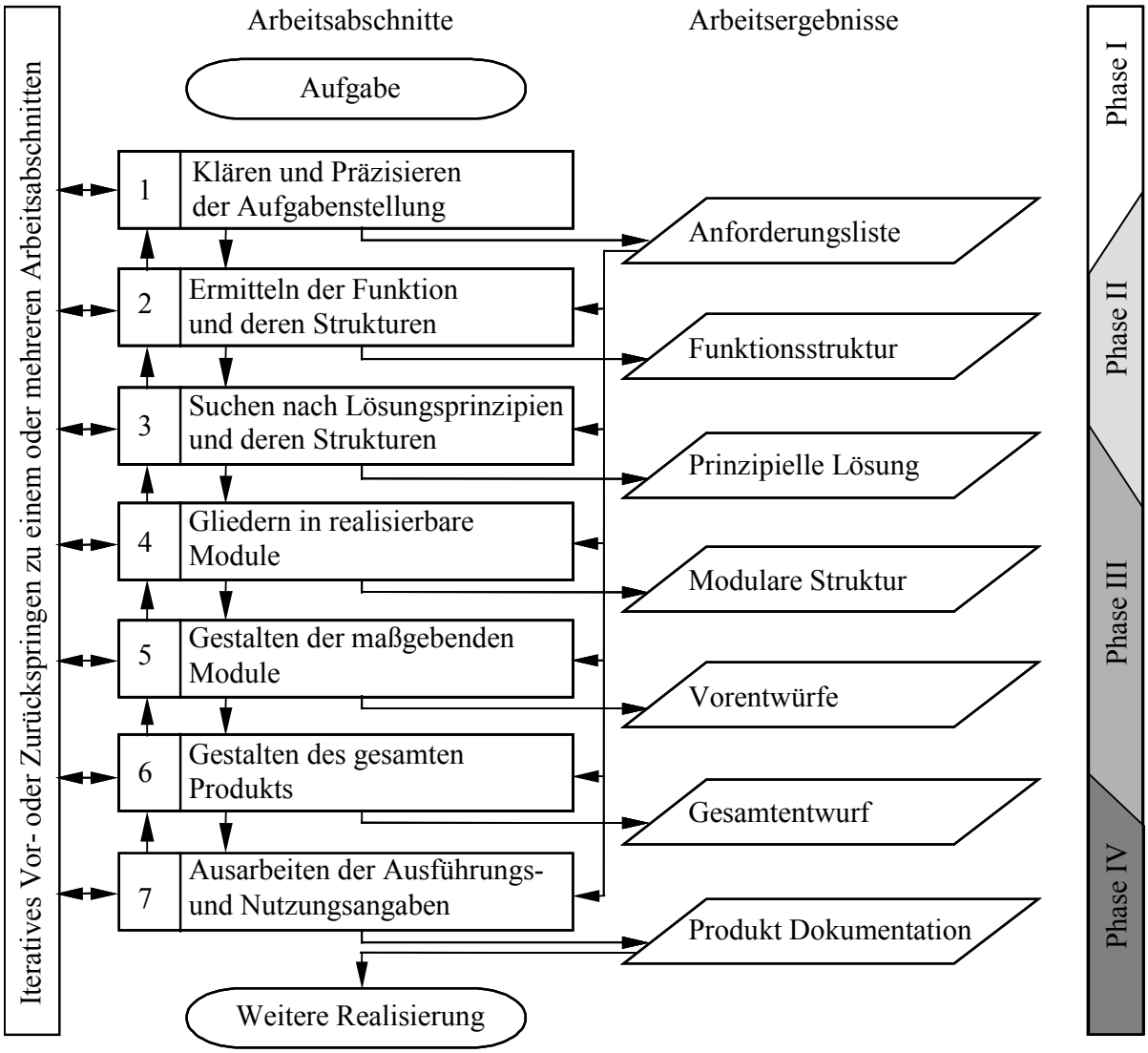


Bild 3.1: VDI-Richtlinie 2221 - Methodik zum Entwickeln technischer Systeme und Produkte [13]

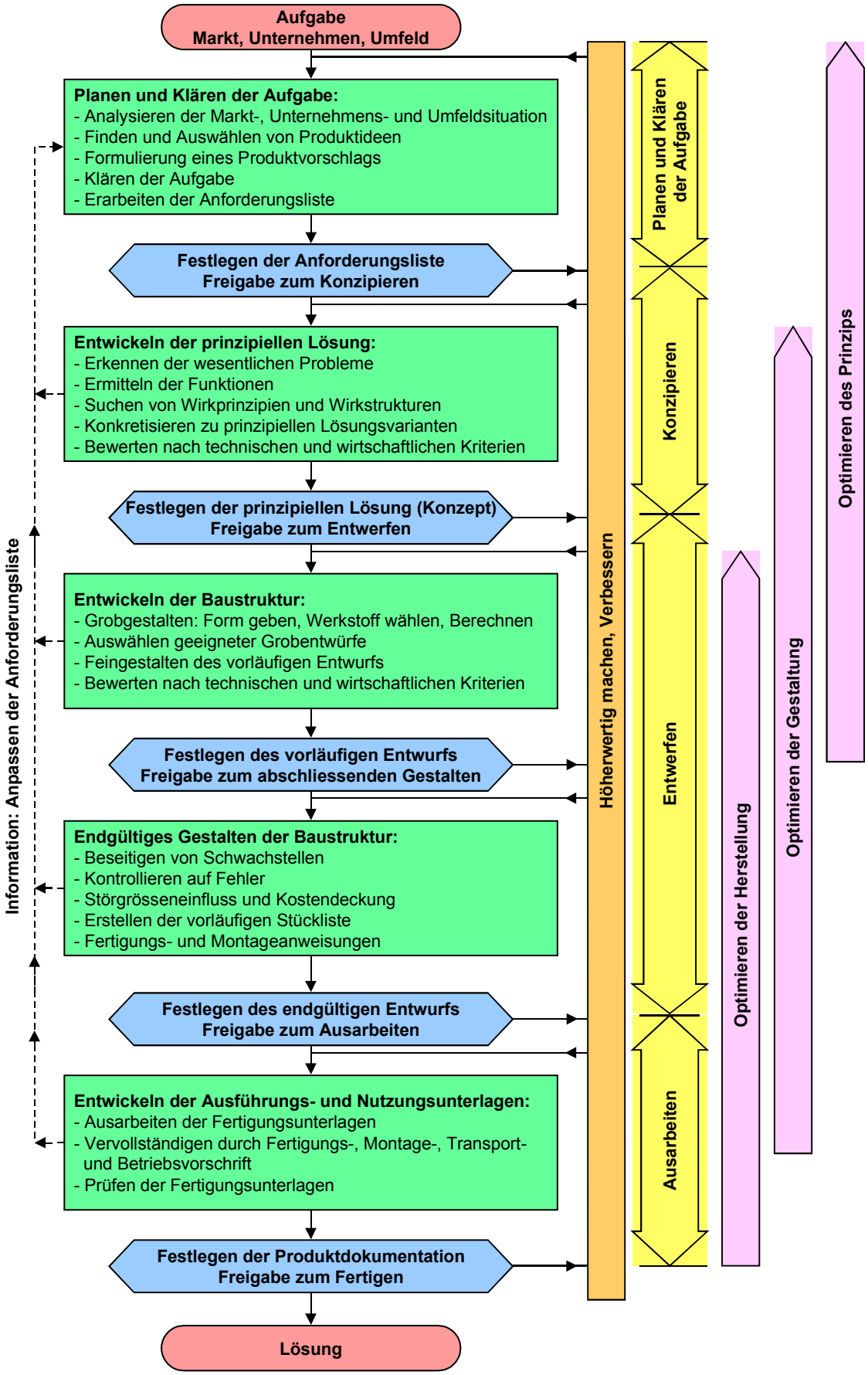


Bild 3.2: Arbeitsschritte beim Planen und Konstruieren nach Pahl/ Beitz [8]

3.2 Qualitative Methoden der Zuverlässigkeits- und Qualitätstechnik

In diesem Unterkapitel werden die qualitativen Methoden sowohl der Zuverlässigkeitstechnik als auch der Qualitätstechnik beschrieben. Die Reihenfolge der weiteren Untergliederung richtet sich nach der zeitlichen Abfolge der Anwendung der Methoden im Produktentstehungsprozeß. Ein Teil dieser Methoden wird CAD-integriert angewendet.

3.2.1 Quality Function Deployment

Das Quality Function Deployment (QFD) ist eine durchgängige Planungsmethodik bei der Herstellung von Produkten. Der QFD-Prozeß beginnt bei der Ermittlung der Kundenbedürfnisse und endet bei der Umsetzung der für die Produktion notwendigen Prozesse. Maßnahmen und Funktionen des Qualitätsmanagements (Quality Function) kommen zum Einsatz (Deployment). Das QFD zeichnet sich durch eine systematische Erhebung und Bewertung der Kundenwünsche sowie deren Umsetzung im Unternehmen in Produkte aus.

Zu Beginn des QFD-Prozesses steht die Erhebung und Gewichtung der Kundenanforderungen. Geeignete Marktforschungsmethoden zur Aufdeckung potenzieller Chancen und Risiken werden benötigt, um die Basis für weitere Schritte zu sichern. Nachfolgend werden einige dieser Methoden erläutert [15]:

- Den Zweck der Zielgruppenbestimmung verfolgt eine **standardisierte Befragung.** Angaben wie z.B. Wichtigkeit der verschiedenen Produktmerkmale dienen als Input für eine Clusteranalyse.
- Die **Conjoint-Analyse** (conjoint = gemeinsam, verbunden) beruht auf einem Ansatz, bei dem davon ausgegangen wird, daß aus einem erhobenen monetären Gesamtnutzen eines Produkts anteilige Teilnutzenwerte der jeweiligen Ausprägungen eines Produktmerkmals berechnet werden können.
- Die **Clusteranalyse** dient dazu, eine Menge von Objekten derart in Gruppen (= Cluster) zu unterteilen, daß die Objekte einer Gruppe hohe Ähnlichkeit aufweisen. Innerhalb der Gruppen sollten die Gruppenmitglieder möglichst homogen bezüglich der Clusterbildung sein. Die einzelnen Gruppen sollten dagegen möglichst heterogen sein, um Merkmalsüberschneidungen und damit verfälschte Ergebnisse zu vermeiden.
- Ziel einer **Delphi-Befragung** ist es, die Einschätzung der Marktchancen eines neuen Produkts durch Experten verschiedener Bereiche zu erheben. Dabei werden zufällig ausgewählte Experten entlang der Handelskette interviewt.
- Individuell angepaßte Datenerhebung.

Die Ergebnisse der verschiedenen Methoden sind nicht deckungsgleich bzw. homogen. Die Durchführung einer einzigen Methode kann zu nicht treffenden Aussagen

führen, so daß ein auf den Daten einer einzigen Methode aufbauendes QFD zwangsläufig zu fragwürdigen Ergebnissen kommen müßte [15].

Der simultane Ansatz aller oben erläuterten Marktforschungsmethoden ist geeignet, um Entscheidungen über das Leistungs- und Zuverlässigkeitsniveau eines neuen Produkts im Sinne eines beginnenden „QFD-0 Schritts“ auf eine breitere Wissensbasis zu stellen. Da sich die Erkenntnisse der unterschiedlichen Methoden gegenseitig ergänzen, können so potentielle Problemfelder oder interessante Marktsegmente besser identifiziert werden als bei der Anwendung einer einzigen Methode.

Das grundlegende Prinzip des QFD ist es, die Kundenorientierung eines modernen Qualitätsmanagements in allen Phasen der Produktentwicklung zu verankern. Die Erwartungen und Wünsche des Kunden oder des Anwenders führen den gesamten Entwicklungsprozeß und stellen die Grundparameter für die Entwicklung dar. Der Ingenieur wird als Mittler zwischen den Kundenanforderungen und dem technisch Machbaren verstanden. Das Ziel ist nicht, alle technisch möglichen, sondern nur genau die vom Kunden bzw. Weiterverarbeiter gewünschten Merkmale im Produkt zu realisieren. Dabei sind es oft die nicht genannten, impliziten Anforderungen der Kunden, die in das Produkt umgesetzt werden müssen. Zu diesem Zweck führt QFD systematisch und schrittweise unterschiedliche Unternehmensbereiche, wie z.B. Produktentwicklung und Qualitätssicherung, zusammen. Anhand von Bild 3.3 wird das Vorgehen und die Dokumentation beim QFD erläutert. Aufgrund der Form der Matrix wird die Methode auch als „House of Quality“ bezeichnet [16].

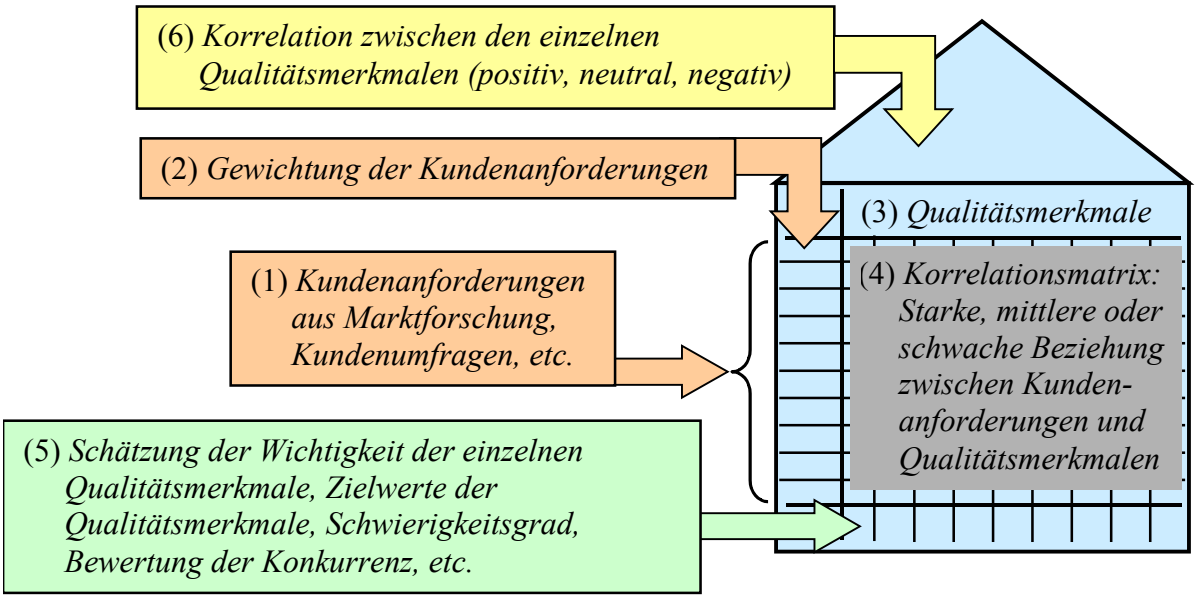


Bild 3.3: Schema und Vorgehen von QFD

Der QFD-Prozeß startet mit der Ermittlung der Anforderungen, die der Kunde an das Produkt stellt (1). Nach der Sammlung der Kundenanforderungen werden diese in Kategorien eingeteilt, in das Formblatt eingetragen und ihrer Bedeutung entsprechend

gewichtet (2). Für jede dieser Anforderungen werden im Team Qualitätsmerkmale, d.h. technische Funktionen, erarbeitet und in das QFD-Chart eingetragen (3). Die Korrelationen zwischen den Kundenanforderungen und den Qualitätsmerkmalen werden in der Beziehungsmatrix des QFD-Charts mit Symbolen (z.B. starke, mittelstarke oder schwache Beziehung) dokumentiert und gewichtet. Dabei können zur Erfüllung einer Kundenanforderung mehrere Qualitätsmerkmale verschieden große Beiträge liefern. Eine multiplikative Abschätzung der Bedeutung der verschiedenen Qualitätsmerkmale kann nachfolgend aus dem Gewicht des Kunden und der Stärke der Korrelation erfolgen (4). Danach werden Zielgrößen und Schwierigkeitsgrad der jeweiligen Qualitätsmerkmale eingestuft. Zusätzlich kann das Produkt unter technischen Gesichtspunkten mit Konkurrenzprodukten verglichen werden (5). Im „Dach“ des House of Quality untersucht man die positiven oder negativen Korrelationen zwischen den einzelnen Qualitätsmerkmalen (6).

Die Vorgehensweise des QFD ist vom American Supplier Institute genormt [17]. Ein systemtechnischer Ansatz von QFD wird in [18] vorgestellt. Das QFD wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Ermittlung der Zuverlässigkeitsziele eingesetzt.

3.2.2 Design Review

Das Design Review (DR) ist eine formale und systematische Methode zur Überprüfung eines Entwicklungsergebnisses, um Problembereiche und Unzulänglichkeiten festzustellen. In der Produktplanung wird zum einen das Produkt und zum anderen der Produktentwicklungsprozeß geplant. Es wird ein Zeitplan festgelegt, nach dem die entsprechenden Entwicklungsstadien und Eigenschaften des Produkts zu bestimmten Zeitpunkten erreicht werden müssen. Zu vordefinierten Zeitpunkten, sogenannten Meilensteinen oder Quality Gates, die sich z.B. an den Phasen des Produktentstehungsprozesses nach VDI 2221 [13] orientieren können, werden Design Reviews durchgeführt. Dabei werden die Entwicklungsergebnisse auf die Erfüllung der in der Produktplanung definierten Anforderungen hinsichtlich Funktion und Eigenschaften untersucht. Darüber hinaus werden Korrekturmaßnahmen festgelegt und eingeleitet, um sicherzustellen, daß das Produkt mit möglichst wenigen Fehlern und Risiken in die nächste Entwicklungsphase übergeht und der weitere Prozeß zielkonform fortläuft.

Je nach Dauer, Komplexität und Neuheit des Produkts ist die Häufigkeit dieses Soll-Ist-Vergleichs (Design Review) festzulegen. Ein zu großer zeitlicher Abstand zwischen den Design Reviews bewirkt, daß Abweichungen vom geplanten Prozeß und den geplanten Produkteigenschaften zu groß werden können. Deren Korrekturen verursachen wegen des größeren Zeitverzugs einen hohen Aufwand und hohe Kosten. Werden die Zeitintervalle zu kurz gewählt, werden die Design Reviews sehr kostspielig, da in kurzen Zeiträumen nur sehr wenige Eigenschaften festgelegt werden können und noch keine gesicherten Aussagen getroffen werden können. Design Reviews wer-

den von interdisziplinären Teams durchgeführt, da die Zusammenarbeit von Fachleuten aus verschiedenen Bereichen höhere Erfolgsaussichten im Auffinden von Schwächen und Fehlern sowie im Erarbeiten von Abhilfemaßnahmen haben.

Das DR wird durch einen Projektleiter durchgeführt. Die Zusammensetzung der Reviewteams ergibt sich durch die Aufgabenstellung, das Objekt und die Entwicklungsphase, wobei auch auf eine gleichmäßige Berücksichtigung aller wesentlichen Schnittstellen zu achten ist. Für eine kritische und effektive Durchführung des Reviews ist es wichtig, daß die Teilnehmer, mit Ausnahme des Projektleiters, nicht direkt am Erstellungsprozeß des Objektes beteiligt sind und dadurch als unabhängige Sachverständige fungieren können. Die grundsätzliche Vorgehensweise eines Reviews läßt sich, unabhängig von der Durchführungsart, in fünf Schritte untergliedern: Planung, Vorbereitung, Durchführung, Nacharbeit und Freigabe. Basis des DRs ist eine geeignete Checkliste. In Bild 3.4 ist am Beispiel einer Pumpe der Aufbau einer Reviewcheckliste mit dem Schwerpunkt Zuverlässigkeit dargestellt. Bild 3.5 zeigt die Vorgehensweise beim Design Review.

Firma	**Review-Checkliste**		Stand: 12/98	
	Ausarbeitungsphase		Objekt: Pumpe	
	Produkt: Modell X/7		Ident.-Nr.:4711	
Nr.	Checkpunkt	i.0.	n.i.0.	Bemerkung
1	Wird die maximale Fördermenge erreicht?			
2	Werden Verunreinigungen ausreichend gefiltert?			
3	Ist der Dauerbetrieb gewährleistet?			
4	Ist die Pumpe leicht austauschbar?			
5	Wird die geforderte B_{10}-Lebensdauer erreicht?			
6	Entspricht die charakteristische Lebensdauer den Anforderungen?			
7	Werden die Ausfallraten lt. Lastenheft erreicht?			
8	Wurde eine FMEA im Konzeptstadium durchgeführt?			
9	Wurden Maßnahmen zur Fehlervermeidung durchgeführt?			
10	Sind Lastkollektive bekannt?			
	...			

Bild 3.4: Ausschnitt aus einer Review-Checkliste für eine Pumpe

In der Praxis werden grundsätzlich zwei Arten von Design Reviews unterschieden, die je nach Komplexität, Entwicklungsphase und Umfang des Reviewobjekts eingesetzt werden: Das Review in der Sitzungstechnik und in der Kommentartechnik. Für besonders komplexe und umfangreiche Objekte hat sich auch eine Kombination beider Techniken bewährt [16].

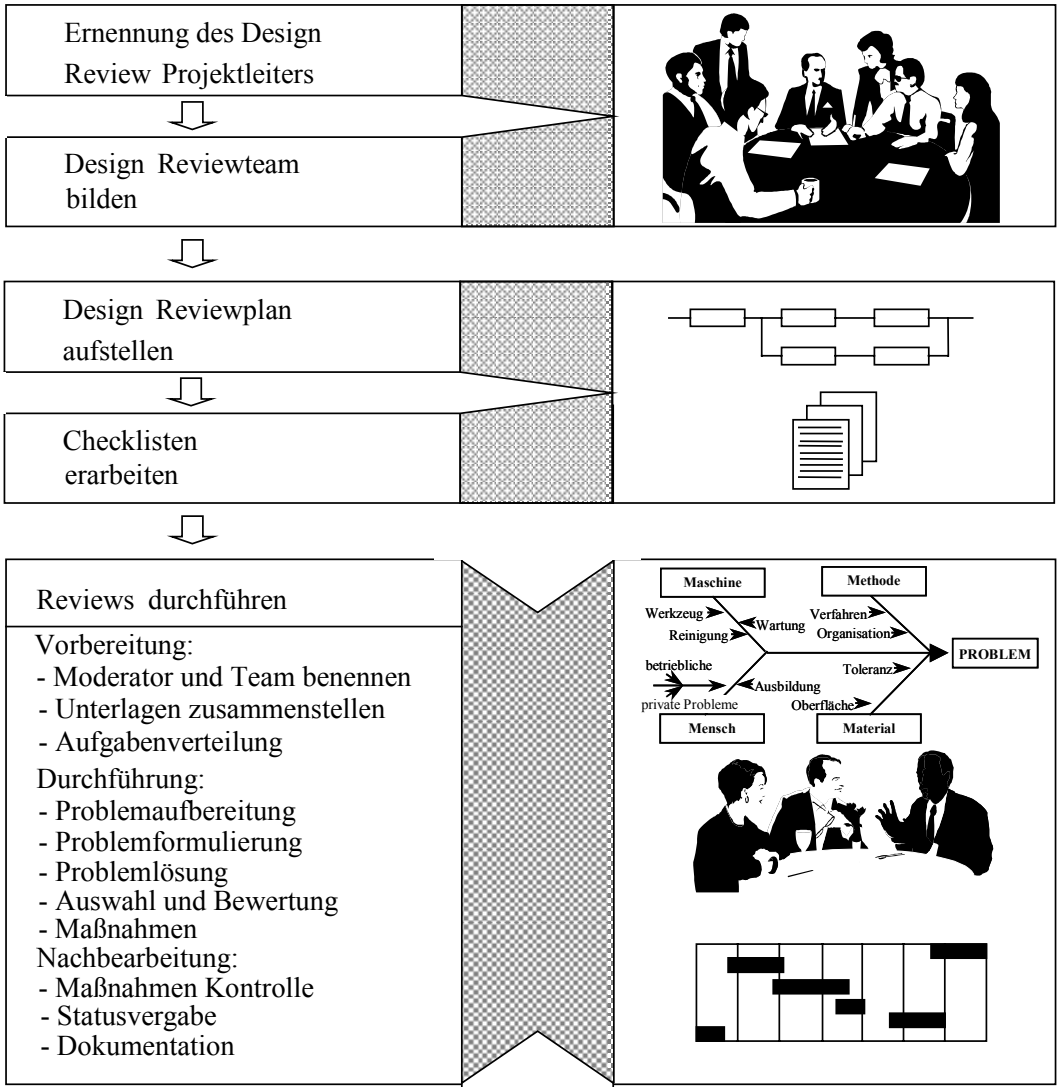


Bild 3.5: Vorgehensweise Design Review [16]

3.2.3 Qualitätsbewertung

Die Qualitätsbewertung (QB) begleitet in ihren unterschiedlichen Stufen die Entwicklung eines Produkts beginnend mit dem Entwurf bis hin zur Freigabe für die Serienphase. Durch systematisches Abfragen der an der Produktentstehung beteiligten Unternehmensbereiche verfolgt die QB das Ziel, etwaige Schwachstellen, welche die angestrebte Qualität des neuen Erzeugnisses beeinträchtigen könnten, rechtzeitig vor Serienfreigabe aufzudecken und zu bewerten. Die Befragung der beteiligten Unternehmensbereiche erfolgt mittels erzeugnisspezifischer Checklisten.

Der Ablaufplan für die Durchführung der QB entlang der Produktentstehungsphase ist in Bild 3.6 dargestellt. Am Anfang steht dabei immer die Fragestellung, ob eine Qualitätsbewertung erforderlich ist. Gründe, die eine Qualitätsbewertung erforderlich machen, sind:

- Veränderte Einsatzbedingungen bestehender Erzeugnisse,

- ein zu erwartendes erhöhtes Qualitäts- oder Zuverlässigkeitsrisiko,
- eine grundsätzlich von der Charakteristik her neue Entwicklung,
- der Einsatz neuer Werkstoffe bzw. der Einsatz neuer Fertigungsverfahren oder
- eine Produktentwicklung, die dokumentationspflichtige Teile beinhaltet.

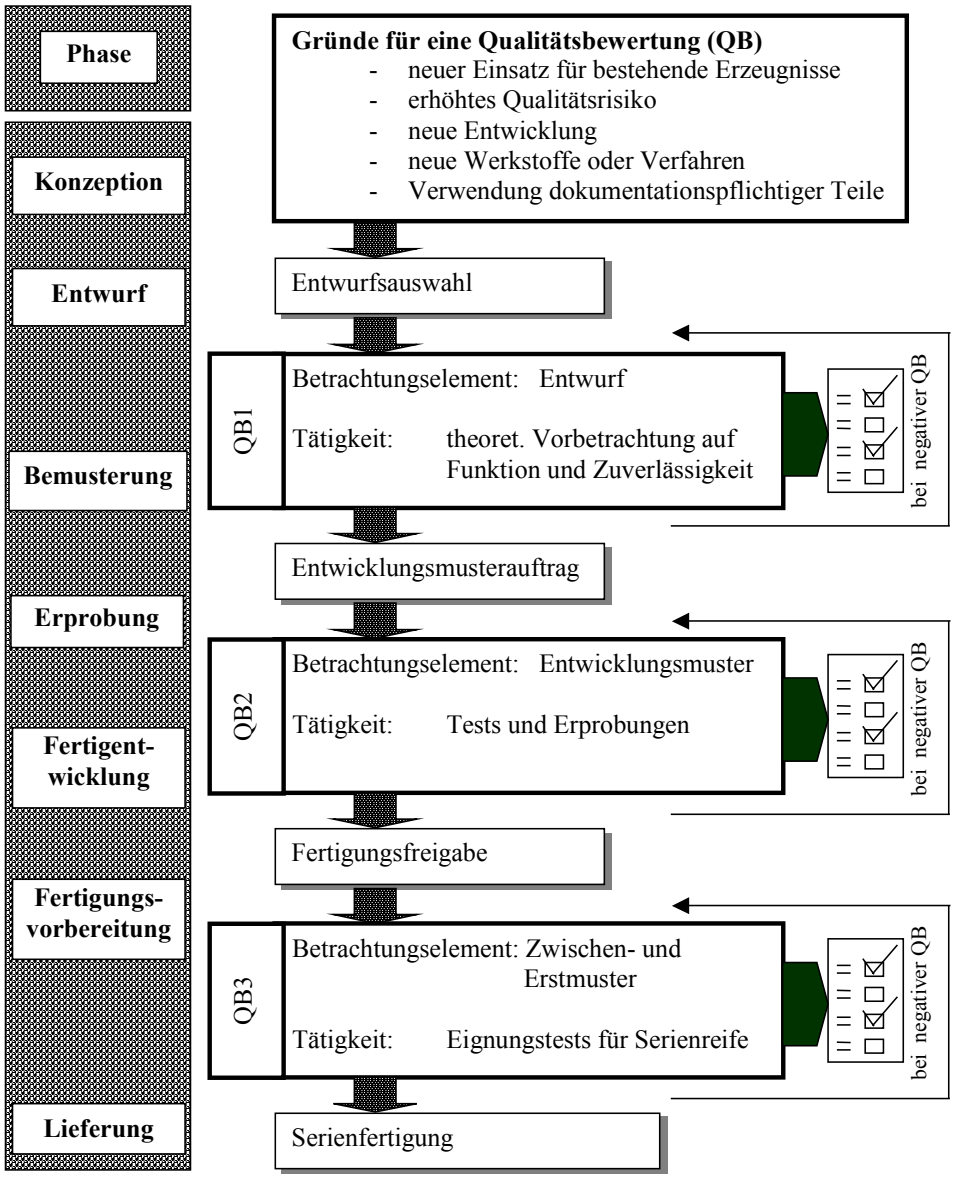


Bild 3.6: Ablauf der Qualitätsbewertung [16]

Wird die Notwendigkeit für eine Qualitätsbewertung festgestellt, erfolgt die Bewertung in drei chronologisch aufeinander folgenden Stufen, die bei negativem Ergebnis jeweils die Möglichkeit einer Rückkopplungsschleife vorsehen, Bild 3.6. In der ersten Stufe der Qualitätsbewertung erfolgt eine theoretische Vorbetrachtung des Entwurfs bezüglich der Verwirklichung von Funktion und Zuverlässigkeit, auch im Vergleich mit anderen Erzeugnissen. Nach einem positiven Abschluß erfolgt in der zweiten Stufe

die Begutachtung eines Entwicklungsmusters (Prototyp). Auch hier wird die Funktion und Zuverlässigkeit des geplanten Erzeugnisses bewertet, diesmal auf Basis von Erprobungen und Tests an Entwicklungsmustern. Nach positivem Abschluß dieser Bewertungsstufe wird in der dritten und letzten Bewertungsstufe das Erzeugnis bezüglich seiner Eignung für eine Serienfertigung bewertet. Hierzu werden nicht nur Entwicklungs- und Erprobungsmuster herangezogen, sondern auch Muster, die unter Bedingungen der späteren Serienfertigung entstanden sind.

Qualitätsbewertung (QB)			
Einzelbewertung	QB 1 (Entwurf)	QB 2 (Entwickl.-Muster)	QB 3 (Serien-anlauf)
1 Funktion			
1.1 Gesetzliche Vorschriften, Normen	+ 1/3	+ 1	+ 1
1.2 Kundenanforderungen	⊕ 1/3	+ 5	+ 5
...			
2 Zuverlässigkeit			
2.1 Statistische und dynamische Festigkeit	⊗ 1	⊕ 5	+ 5
2.2 Dauer (lauf) verhalten	⊕ 1	⊕ 5	⊕ 5
...			
3 Besondere Eigenschaften			
3.1 Wartung	⊕ 1	+ 3	+ 5
3.2 Reparaturfreundlichkeit	⊕ 1	+ 3	+ 5
...			
4 Qualitätsvorschau Prognose der Ausfallquote im Feld in % der Liefermenge		0,02 %	0,02 %
- während der Garantiezeit		0,02 %	0,02 %
- nach der Garantiezeit			
...			
5 Gesamtbewertung Das Ergebnis entspricht den gestellten Forderungen			
- in vollem Umfang			☐
- mit Einschränkung, Verbesserung möglich			☒
- ungenügend			☐
...			

Symbole

+ unproblematisch, wird mit Sicherheit erfüllt

⊕ { noch keine positive Aussage möglich / aber wahrscheinlich unproblematisch

⊗ { noch keine positive Aussage möglich / aber möglicherweise problematisch

– sehr problematisch, noch keine Aussicht auf Erfolg

Kennziffer:
1 Theoretische Betrachtung
2 Funktionsmuster
3 Versuchsmuster
4 Erstmuster
5 Eigene Erprobung

Bild 3.7: Checkliste für die Qualitätsbewertung [16]

In den Checklisten, die einer Qualitätsbewertung zugrunde gelegt werden, sind die betrachteten Merkmale und Eigenschaften des Erzeugnisses nach dem zu erwartenden Schwierigkeitsgrad bei der Realisierung klassifiziert, Bild 3.7. Dadurch lassen sich Problemschwerpunkte ermitteln, die einer detaillierten Untersuchung unterzogen werden müssen. Durch die mehrmalige, zeitlich versetzte Anwendung können rechtzeitig vor Serienfreigabe etwaige Schwachstellen am Erzeugnis erkannt und Abstellmaßnahmen eingeleitet werden. Die Dokumentation der erforderlichen Aktivitäten in der Checkliste unterstützt dabei die Verfolgung der Abstellmaßnahmen.

Zusätzlich zu der Klassifizierung der Merkmale und Eigenschaften des geplanten Erzeugnisses wird in jeder Bewertungsstufe festgelegt, welche Unterlagen zur Erfüllung der einzelnen Aufgaben benötigt werden und damit vorliegen müssen. Nach Abschluß aller drei Bewertungsstufen wird eine Qualitätsvorschau erstellt. Diese prognostiziert die Ausfallquote, die in der Serie während eines zu definierenden Zeitraums zu erwarten ist. Die Qualitätsvorschau wird in der Phase der Serienfertigung zu Vergleichszwecken herangezogen und hilft, Unregelmäßigkeiten in der Fertigung oder in der Qualitätsbewertung selbst aufzudecken [16].

3.2.4 Systemanalyse

Bei der Systemanalyse sind die folgenden Arbeitsschritte zu durchlaufen:

1. Systemdefinition,
2. Funktionsbeschreibung,
3. Lastenheft, technische Daten,
4. Bau- und Funktionsgruppen und
5. Funktionsblockdiagramm.

Das Ergebnis der Systemanalyse ist das Funktionsblockdiagramm und die daraus abgeleitete Funktionsliste. In der Funktionsliste sind alle erforderlichen Daten, wie Bauelemente (Bauteil, Schnittstelle) und zu erfüllende Funktionen für die nachfolgende qualitative Analyse enthalten [19].

3.2.5 ABC-Analyse

Die verschiedenen Systemelemente erfüllen unterschiedliche Funktionen und leisten damit auch einen unterschiedlichen Beitrag zur Systemzuverlässigkeit. Es ist daher nicht sinnvoll, alle Systemelemente als gleichwertig anzusehen. Eine Klassifizierung der Systemelemente nach zuverlässigkeitsrelevanten und zuverlässigkeitsneutralen Teilen sollte deshalb durchgeführt werden. Des weiteren ist zu unterscheiden, ob die Teile einer definierbaren Belastung unterliegen oder ob sich die Beanspruchung nur schlecht erfassen läßt. Eine unter diesen Gesichtspunkten entwickelte ABC-Einteilung der Systemelemente zeigt Bild 3.8.

Während das Ausfallverhalten der zuverlässigkeitskritischen A-Systemelemente berechnet werden kann, ist man bei den ebenfalls zuverlässigkeitskritischen B-Systemelementen auf Erfahrungswerte oder Versuche angewiesen.

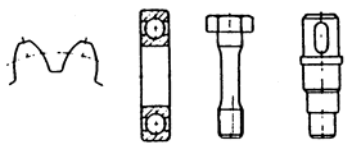
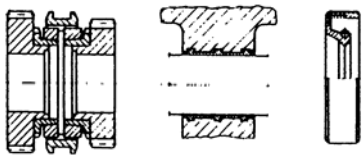
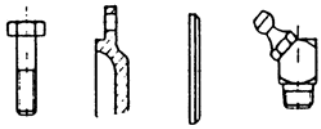
A-Teile (risikoreich)	B-Teile (risikoreich)	C-Teile (risikoneutral)
z.B. 	z.B. 	z.B. 
Beanspruchung durch definierbare statische Belastung; Lastkollektiv bekannt; leistungführend Lebensdauerberechnung möglich und weitgehend gesichert Ausfallverhalten aus Wöhlerversuchen bekannt; Formparameter $b > 1{,}0$	Beanspruchung vorwiegend durch Reibung, Verscheiß, extreme Temperaturen; Erschütterungen, Schmutz und Korrosion Lebensdauerberechnung nicht möglich oder nicht gesichert Ausfallverhalten schätzen oder durch Versuche ermitteln; Formparameter $b \geq 1{,}0$	Beanspruchung stochastisch durch Stöße, Reibung, Verschleiß etc. rechnerische Auslegung nur bedingt möglich bzw. irrelevant nur Zufalls- und Frühausfälle; Formparameter $0 < b \leq 1$

Bild 3.8: ABC-Klassifizierung von Systemelementen [2]

Die zuverlässigkeitsneutralen C-Systemelemente werden bei der Berechnung nicht weiter berücksichtigt. Die ABC-Analyse ist eine vereinfachte Form einer FMEA, und eignet sich als alleiniges Analyseverfahren nur für kleine und überschaubare Systeme. Bei umfangreichen und neuen Systemen sollten die zuverlässigkeitskritischen Elemente mit einer vollständigen FMEA ermittelt werden. Mit der ABC-Analyse kann jedoch eine Vorauswahl der zuverlässigkeitskritischen A- und B-Systemelemente vorgenommen werden [2], [19].

3.2.6 Fehler-Möglichkeits- und Einflußanalyse

Den häufigsten Einsatz in der Zuverlässigkeitsmethodik findet die FMEA als bekanntester Vertreter der qualitativen Methoden. Die Abkürzung FMEA bedeutet „Failure Mode and Effects Analysis“, häufig auch als „Fehler-Möglichkeits- und Einfluß-Analyse“ übersetzt. Da der Begriff „Failure“ jedoch einen Ausfall oder ein Versagen bezeichnet, kann eine FMEA am besten mit „Ausfall-Arten und Ausfall-Auswirkungsanalyse“ übersetzt werden. Unter der Bezeichnung „Ausfalleffektenanalyse“ ist die Methode nach DIN genormt [20]. Beim VDA ist 1986 die Richtlinie „System-FMEA“ erschienen [21].

Im angelsächsischen Sprachgebrauch wird oft der Begriff FMECA verwendet: „Failure Mode, Effects and Criticality Analysis“ (FMEA mit einer Risikobewertung). In der

deutschsprachigen Literatur wird selten zwischen FMEA und FMECA unterschieden. Meistens enthält eine FMEA bereits eine Risikobewertung.

Die FMEA wurde Mitte der sechziger Jahre in den USA von der NASA (National Aeronautics and Space Administration) für das Apollo-Projekt entwickelt. Danach erfolgte die allgemeine Anwendung der Methode in der Luft- und Raumfahrttechnik. Als grundlegende Literatur ist der Militär-Standard MIL-STD-1629A der USA anzusehen, auf den sich die meisten Veröffentlichungen stützen [22]. Die Entwicklungs- und Anwendungsgebiete der FMEA im zeitlichen Verlauf zeigt Bild 3.9.

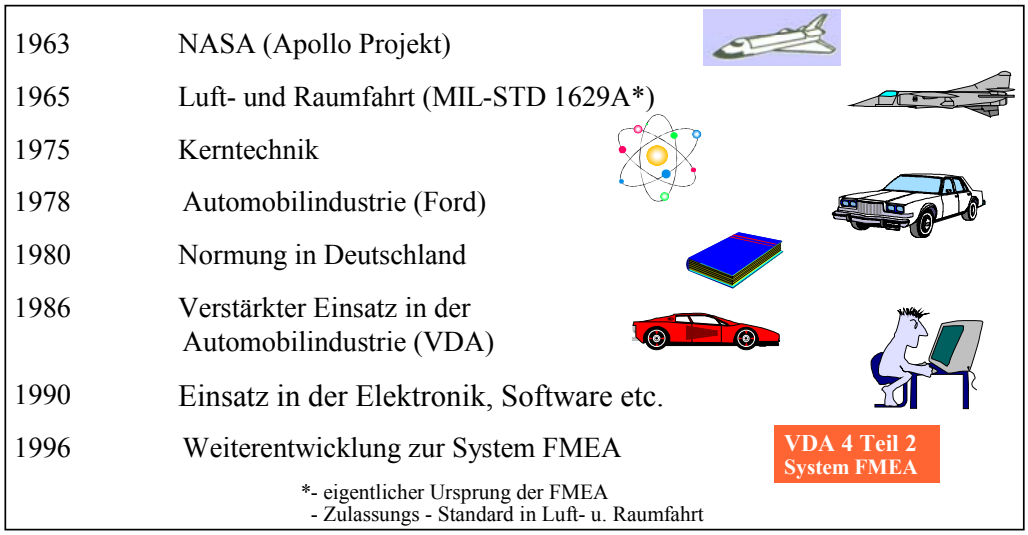


Bild 3.9: Ursprünge der FMEA [23]

Die FMEA nach VDA ist eine Methode, um für Bau- oder Systemteile mögliche Ausfall-Arten, mögliche Ausfall-Folgen und mögliche Ausfall-Ursachen aufzuzeigen, zu bewerten und Maßnahmen zur Optimierung festzulegen. Die 5 Schritte der FMEA sind in Bild 3.10 dargestellt.

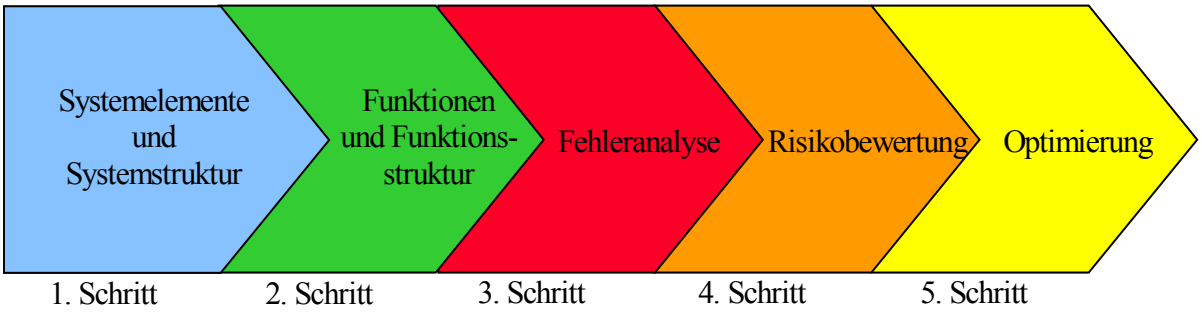


Bild 3.10: Hauptarbeitsschritte einer FMEA

Kommerzielle rechnergestützte FMEA-Systeme

Nachfolgend werden verschiedene rechnergestützte FMEA-Systeme vorgestellt und nach bestimmten Merkmalsausprägungen untersucht. In Bild 3.11 ist die grundsätzli-

che Einteilung der rechnergestützten FMEA-Systeme ersichtlich [24]. FMEA-Textsysteme sind einfach und bieten keine graphischen Optionen für die Ausarbeitung der Ergebnisse. Expertensysteme sind meist starr in CAQ-Systeme integriert und somit für den beabsichtigten Zweck einer flexiblen Anbindung an ein CAD-System nicht geeignet. Somit orientieren wir uns an EDV-Systemen, welche die Vorteile der Expertensysteme aufweisen (z.B. Unterstützung durch strukturiertes Wissen, Checklisten), jedoch als „Stand-alone"-Version verfügbar sind.

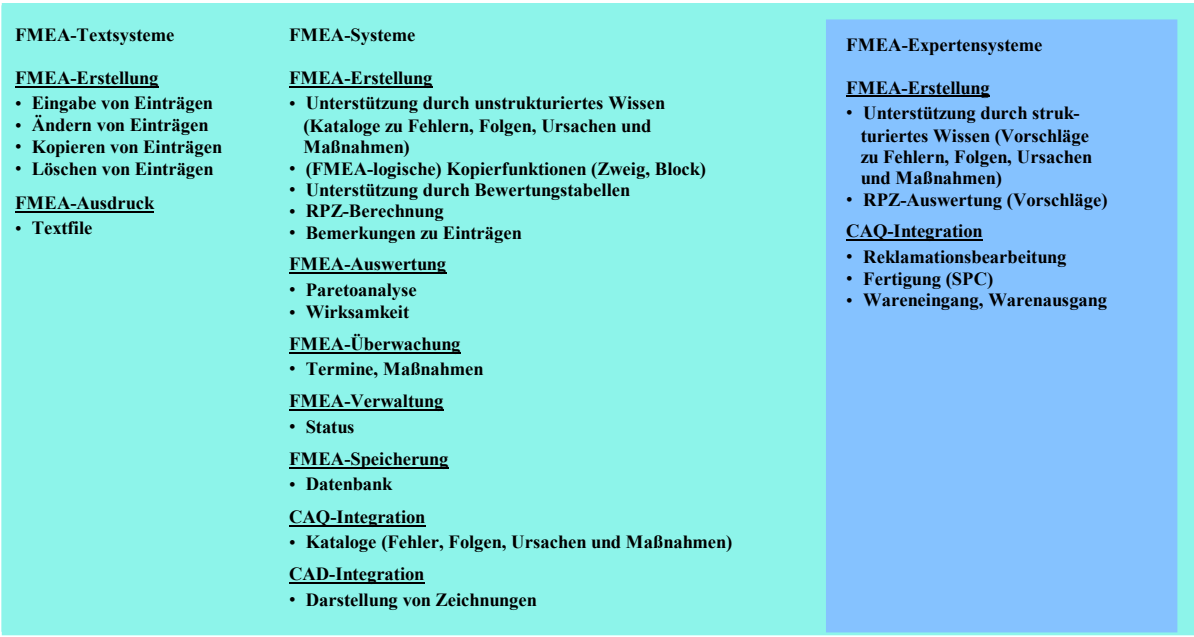


Bild 3.11: Einteilung der FMEA-Software-Systeme [24]

Vorteile der EDV-Unterstützung der FMEA

Die Erstellung einer Fehler-Möglichkeits und Einfluß-Analyse (FMEA) ist auch in der Entwicklungsphase eines Produkts eine komplexe und arbeitsintensive Angelegenheit. Eine manuelle Anwendung ohne EDV-Unterstützung ist sehr schwierig und nicht vorstellbar. Durch den Einsatz von FMEA-Software lassen sich FMEAs einfacher erstellen und pflegen. Hauptvorteil ist die Wiederverwendung bereits durchgeführter FMEAs bei z.B. Anpassungskonstruktionen und Änderungen vorhandener Konstruktionen. Die EDV bietet eine gute Unterstützung des Moderators und sie läßt eine einfache Überwachung der Termine, der beschlossenen Maßnahmen und der Verantwortlichen zu. In Verwendung mit einem Video-Projektor lassen sich Strukturbaum und Formblätter für das FMEA-Team visualisieren und online erstellen.

Am Markt verfügbare Systeme

Nach einer Marktbefragung des Instituts für Produktionstechnik und Automatisierungstechnik der Fraunhofer Gesellschaft bieten ca. 50 Unternehmen EDV-Systeme an, die oft Bestandteile eines CAQ-Systems sind. Überwiegend sind die Programme auf Personal Computern unter Windows lauffähig. In Bild 3.12 sind die am Markt ver-

fügbaren Systeme dargestellt, wobei diese Auflistung nicht den Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Die Firmen Apis (IQ-FMEA) und Plato (FMEA-System) haben zusammen einen Marktanteil von über 50%. Einen Vergleich der beiden FMEA-Systeme bezüglich der Merkmale Vorgehensweise, Auswertemöglichkeiten, Kunden und Schnittstellenanbindung zeigt Bild 3.13.

• IQ-FMEA	APIS Informationstechnologien
• FMEA-System	Plato GmbH
• QS-FMEA	CAT GmbH
• FMEA-PRO	CDE Software & Systems GmbH
• FMEA/WIN	CS Informatik GmbH
• copro-FMEA	CYTEC Datensysteme GmbH
• FMEA^{Plus}	GFQ Software
• QSYS-FMEA	IBS GmbH
• i/FMEA	IMC
• Queen -FMEA	Kistner Messtechnik
• RQM-FMEA	Pickert & Partner GmbH
• QSi-FMEA	SINIC Computertechnik GmbH
• SIT-FMEA	SIT
.....	

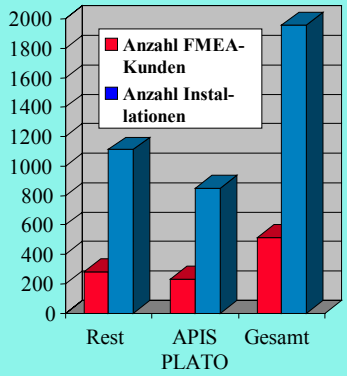


Bild 3.12: Am Markt verfügbare Systeme und FMEA-Software Befragung [24]

Anbieter / *Merkmale*	**Fa. APIS Programm IQ-FMEA**	**PLATO** Π Λ Α Τ Ο
Vorgehen	**VDA-konform, Strukturbaum**	**Nach VDA-Formblatt**
Auswertung	**Statistikeditor**	**Risikolandschaft**
Größte Kunden	**BMW, Daimler- Chrysler , INA, MAN, Hella , ...**	**ABB, Opel, Conti , DASA, MTU, VW, ...**
Schnittstelle	**SGML-Schnittstelle um Daten ein- und auszulesen**	**OLE/ COM - fähig**
Kosten	**Hochschulversion zu reduziertem Preis von € 100,-**	**€ 1.500,- für Hochschulversion**
Demoversion	**www .fmea .de**	**www .plato .de**

Bild 3.13: Vergleich von IQ-FMEA und Plato

Algedri und Frieling (1998) haben eine Nutzwertanalyse für am Markt verfügbare FMEA-Systeme durchgeführt [25]. Der Kriterienkatalog wurde von sechs verschiedenen Unternehmen aus Dienstleistung und Maschinenbau hinsichtlich der Praxisrelevanz überprüft. Insgesamt 9 EDV-Systeme wurden mit der Nutzwertanalyse untersucht. Beim Gesamtnutzwert lag IQ-FMEA von APIS vor dem FMEA-System von Plato. Da jedoch nur IQ-FMEA die FMEA-Methodik nach dem Verband der Automo-

bilhersteller (VDA) Band 4.2 unterstützt, werden im folgenden ausschließlich die Kopplungsmöglichkeiten dieses EDV-Systems mit dem CAD-Programm untersucht. Das FMEA-System von Plato unterstützt die Darstellung im Formblatt nach QS9000, die sich von der VDA-Norm in der Anordnung der Spalten und durch fehlenden Bezug zu einer Systemstruktur unterscheidet.

Merkmale von IQ-FMEA

Das Programm arbeitet bei jedem der 5 Schritte der FMEA-Methodik mit Editoren. Zuerst erfolgt im sogenannten Struktur-Editor eine hierarchische Gliederung des betrachteten Systems (Produkt, Prozeß) in Systemelemente (Baugruppen, Bauteile oder Prozeßschritte). In der Funktions- und Fehleranalyse werden die Aufgaben der einzelnen Baugruppen und Bauteile durch das Definieren von Funktionen festgelegt. Des weiteren werden für jede Funktion die möglichen Fehlfunktionen beschrieben. Es besteht die Möglichkeit der Einblendung der Funktionen (grün) und der Fehlfunktionen (rot) als Liste oder in einer graphischen Darstellung, Bild 3.14.

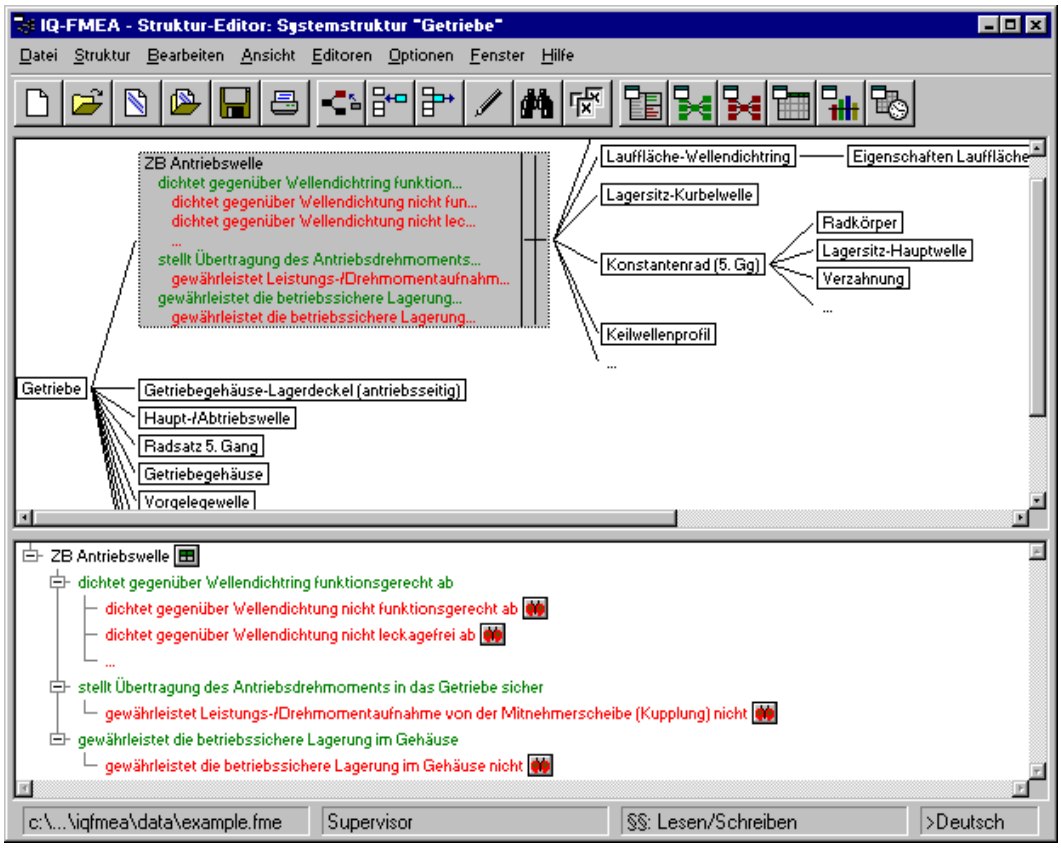


Bild 3.14: Struktur-Editor von IQ-FMEA

Der Funktionsnetz-Editor dient zum Modellieren der funktionalen Zusammenhänge der einzelnen Strukturelemente. Teilfunktionen, die in der Summe eine Funktion beschreiben, werden in der zugeordneten Funktionsstruktur untereinander logisch verknüpft, Bild 3.15. Analog werden im Fehlernetz-Editor für die möglichen Fehler die Fehlerfolgen und Fehlerursachen bestimmt.

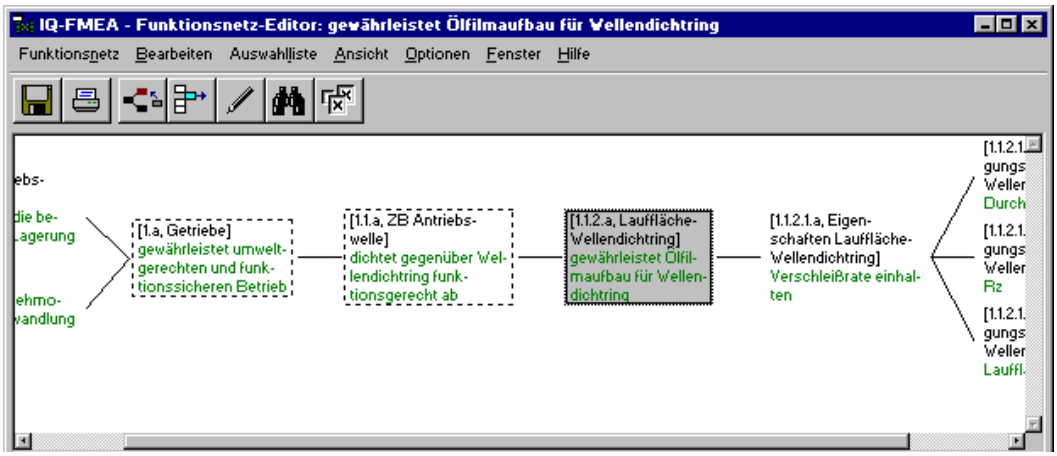


Bild 3.15: Funktionsnetz-Editor von IQ-FMEA

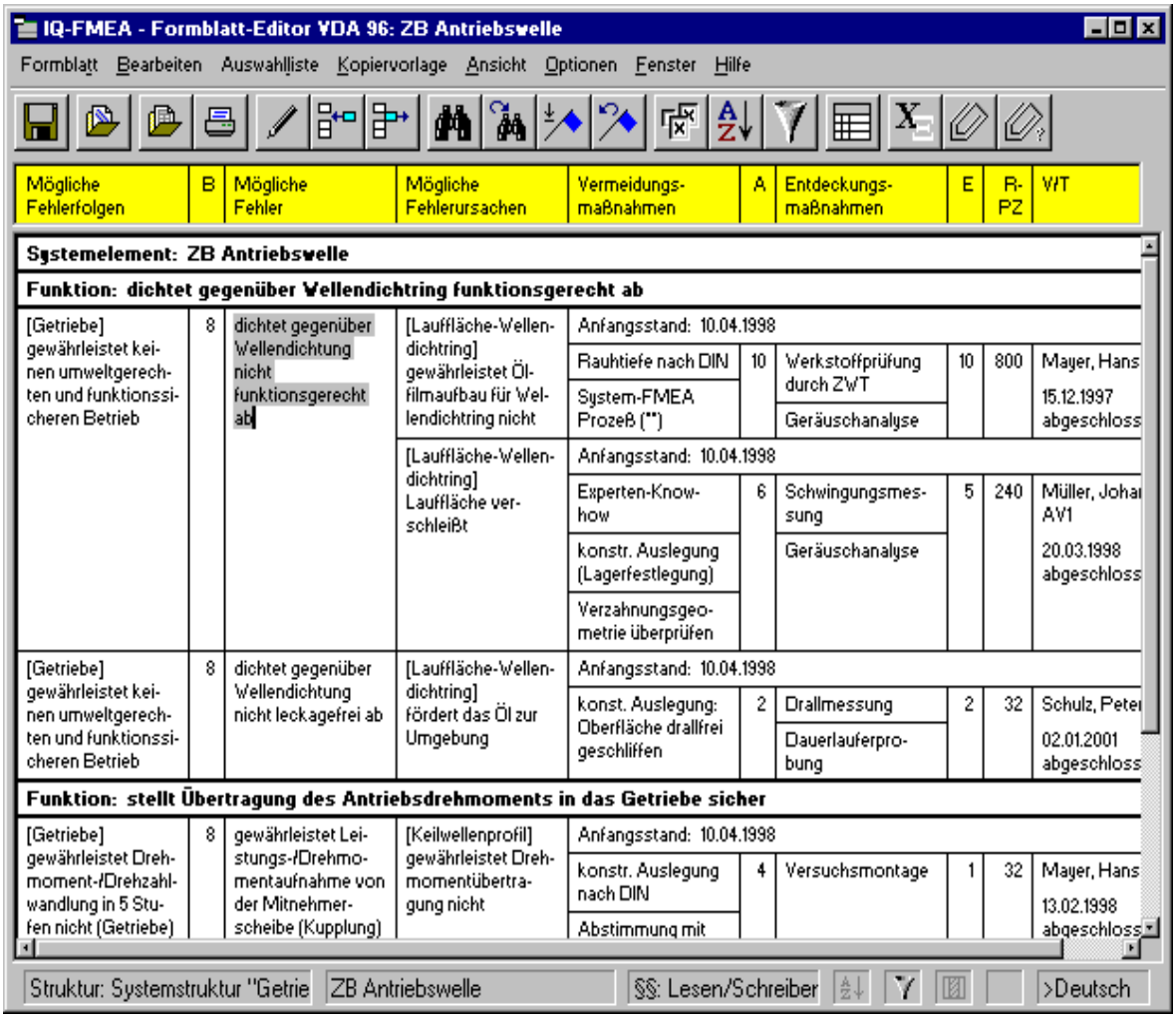


Bild 3.16: Der Formblatt-Editor von IQ-FMEA

Im Formblatt-Editor erfolgt die Bewertung des aktuellen Entwicklungsstandes. Die im Fehlernetz-Editor erstellte Information wird zum automatischen Ausfüllen der Spalten (Fehlerfolge, Fehler, Fehlerursachen) genutzt. Die Bedeutung der Fehlerfolgen sowie

die Bewertungszahlen für Auftreten und Entdeckung werden festgelegt. Die daraus berechenbare Risikoprioritätszahl RPZ hilft Risikoschwerpunkte ausfindig zu machen.

Der Formblatt-Editor unterstützt Vorlagen nach VDA 96, VDA 86 und QS9000.

In der Terminverfolgung werden die Termine und der Abarbeitungsgrad der jeweiligen Maßnahme, in Verbindung mit dem Verantwortlichen, für eine Struktur oder Datenbank in übersichtlicher Weise dargestellt, sortiert und gefiltert. Der Statistik-Editor bietet Möglichkeiten zur graphischen Aufbereitung der FMEA-Daten. Die Häufigkeitsanalyse visualisiert die Verteilung und Häufigkeiten der Risikoprioritätszahlen, Bild 3.17.

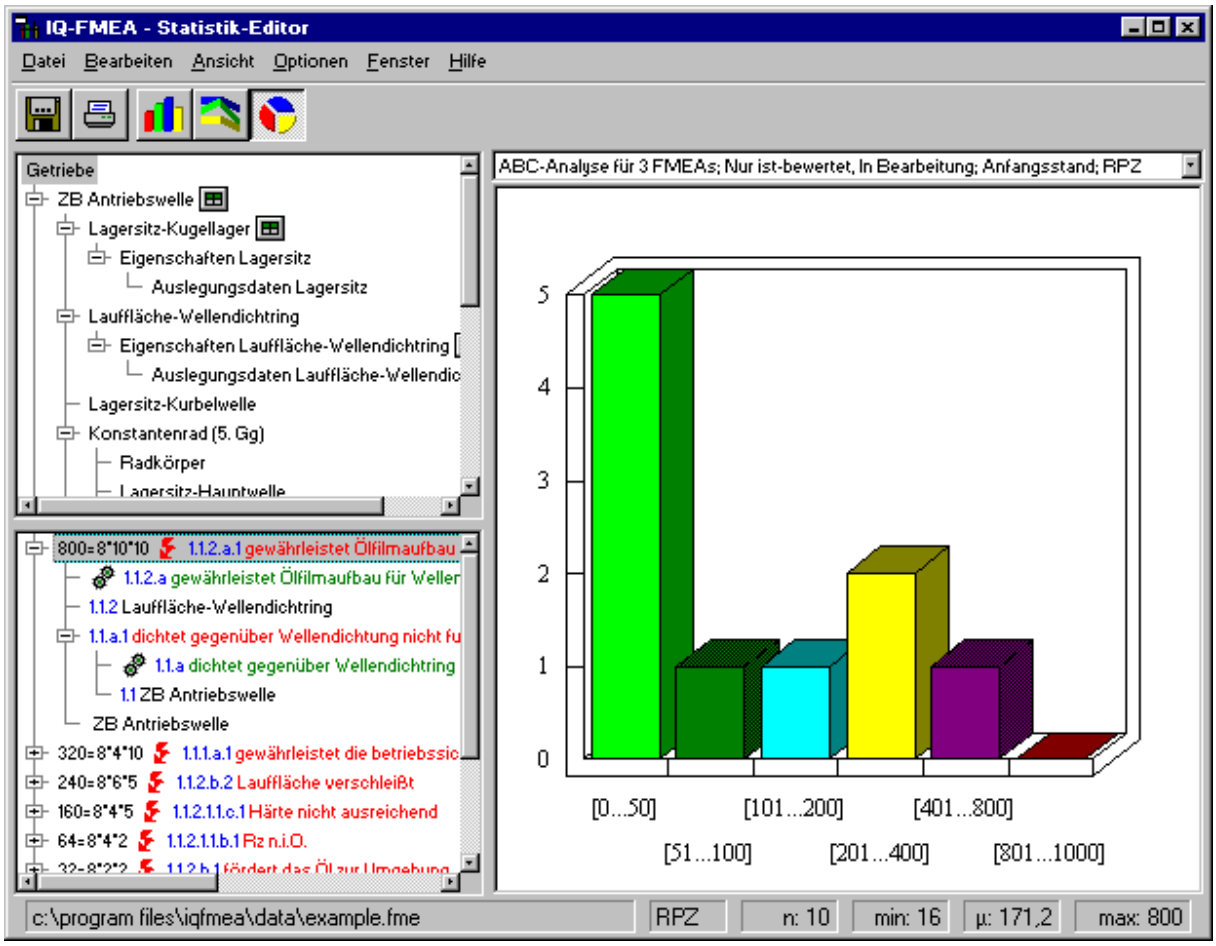


Bild 3.17: Statistikeditor von IQ-FMEA

Importmöglichkeiten

Nach der offiziellen Beschreibung bietet IQ-FMEA vielfältige Möglichkeiten des Datenaustauschs: Datenbanken der Promis-FMEA 3.3 (Promis GmbH München) werden importiert und vollständig in das Datenmodell von IQ-FMEA integriert. Jedoch ist dies die einzige vollständige Importmöglichkeit im Programm. Die einfachste Möglichkeit besteht darin, Text über die Zwischenablage in IQ-FMEA einzufügen. Aus Checklisten für z.B. Fehlerursachen können bereits vorhandene Fehlerursachen im ASCII-

Format in das Programm übernommen werden. Es besteht momentan nicht die Möglichkeit, eine Strukturstückliste, die z.B. in einem CAD-Programm generiert werden kann, in IQ-FMEA zu importieren. Aus der Struktur könnte dann automatisiert ein hierarchischer Baum generiert werden, der als Grundlage für die eigentliche FMEA, d.h. die folgenden 4 Schritte dient.

Exportmöglichkeiten

Laut Hersteller können alle Formblätter als HTML-Dateien für das Intra- oder Internet exportiert werden. Komplette Datenbanken von IQ-FMEA können als SGML-Datei (Standard Generalized Markup Language nach ISO 8879) exportiert werden. Dadurch werden die Daten in genormter Weise anderen Applikationen zugänglich. Gegenwärtig geschieht das mit einer proprietären Document Type Description (DTD), die den Aufbau einer SGML-Datei beschreibt. In der Entwicklung befindet sich eine Integration in die DTD eines Konsortiums, bestehend aus verschiedenen Unternehmen der Automobilindustrie, das eine umfangreiche Standardisierung industrieller Entwicklungs-, Produktions- und Dokumentationsverfahren anstrebt. Darüber hinaus existieren zahlreiche Möglichkeiten, bestimmte Daten in Formate (ODBC, RTF, WMF, oder CSV) zu exportieren.

Für die rechnerunterstützte Anwendung der FMEA innerhalb des Produktentstehungsprozesses finden sich in der Literatur zahlreiche Beispiele [26] - [37]. Eine Analyse und einen Vergleich kommerzieller FMEA-Software wurde im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt. Die Auswahl beschränkte sich auf IQ-FMEA, Plato und RELEX [38].

3.2.7 Qualitative Fehlerbaumanalyse

Die Fehlerbaumanalyse (FBA), engl.: Fault Tree Analysis (FTA), ist im Gegensatz zur Fehler- Möglichkeits- und Einflußanalyse eine deduktive Methode (Top-Down-Analyse) zur Prognose der Zuverlässigkeit und anschließender Optimierung. Sie geht vom Gesamten zum Einzelnen, wohingegen die FMEA vom Einzelnen zum Gesamten führt, Bild 3.18. Eine mögliche Verbindung zwischen FMEA und FBA wird in [39] erwähnt.

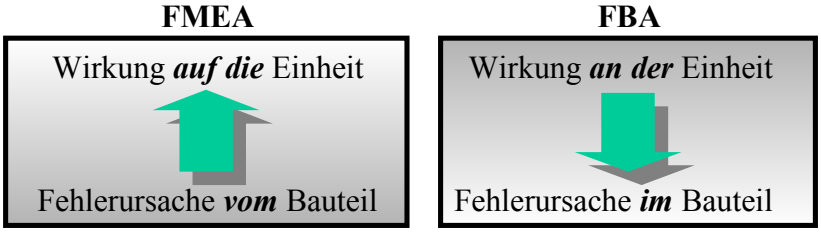


Bild 3.18: Vergleich FMEA mit FBA

Die FBA ist in DIN 25424 genormt [40]. Sie kann sowohl als qualitative wie auch als quantitative Methode angewendet werden. Die FBA findet bei Systemen aller Art in der Reaktortechnik, Luft- und Raumfahrt, Nachrichtentechnik sowie in der Automo-

bilindustrie Anwendung, da sowohl die Sicherheit eines technischen Systems als auch die Funktion während des Betriebs untersucht werden kann. Die FBA bietet eine strukturierte Vorgehensweise zur Feststellung der internen oder externen Ursachen, die allein oder in Kombination zu einem definierten Zustand des Produkts (meist Fehlzustand) führen.

Die FBA ist ein analytisches Verfahren, um die Schwachstellen in einem Systemkonzept zu finden. Ihre Ergebnisse werden graphisch in einem Fehlerbaum dargestellt, Bild 3.19. Sie dient zur Aufdeckung von Ausfallursachen und zur Ermittlung von fehlfunktionalen Zusammenhängen der Ausfälle bis hin zur physikalischen Ausfallursache.

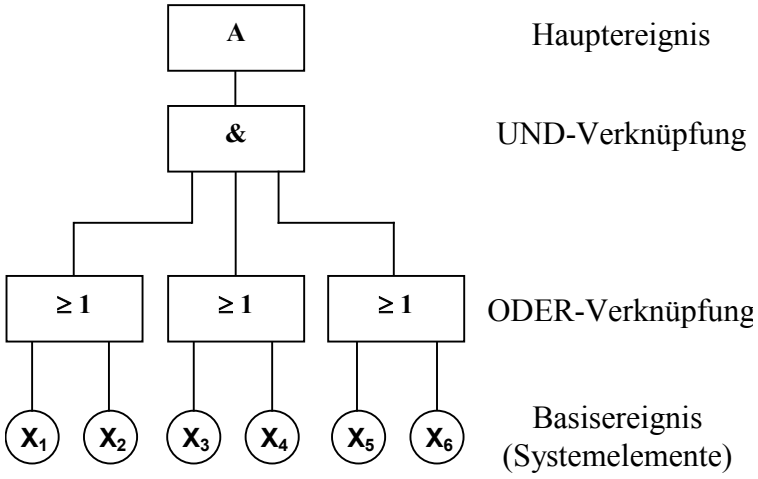


Bild 3.19: Fehlerbaumanalyse nach DIN [40]

Ausgehend von einem vorgegebenen, unerwünschten Hauptereignis (Systemausfall), werden alle dazugehörenden Basisereignisse (Systemelemente) gesucht. Das Ziel der Fehlerbaumanalyse ist es, nicht nur die Ausfallarten bzw. Ausfallursachen eines Systems aufzudecken, sondern vor allem die funktionalen Zusammenhänge der Ausfälle herzustellen und die Auswirkung auf das System zu beschreiben. Die Zusammenhänge zwischen den Ausfällen werden über ODER-/ UND-Verknüpfungen dargestellt [40].

Die Struktur eines Fehlerbaums für ein einfaches Getriebe ist in Bild 3.20 auszugsweise dargestellt. Das Hauptereignis ist hierbei „Getriebe nicht funktionsfähig“. Die nächst tiefere Stufe ergibt sich aus der gewählten Unterteilung des Beispielgetriebes in die drei Baugruppen Antrieb, Abtrieb und Gehäuse und den darin enthaltenen Bauelementen.

Zusätzlich kann das Getriebe, außer daß der Antrieb, der Abtrieb oder das Gehäuse "nicht funktionsfähig" sind, auch durch das Zusammenwirken mehrerer Baugruppen ausfallen. Ein Beispiel hierfür ist der Ausfall der Funktion „Lagerung Ausgangswelle“, die sich aus dem Zusammenwirken von Abtrieb (Rollenlager, Abtriebswelle) und Ge-

häuse (links, rechts), z.B. durch Fluchtungsfehler, Wellen- oder Gehäuseverformungen, ergeben kann. Dieses Zusammenwirken von verschiedenen Elementen kann auf allen Ebenen auftreten und wurde hier nur beispielhaft auf der Baugruppenebene gezeigt.

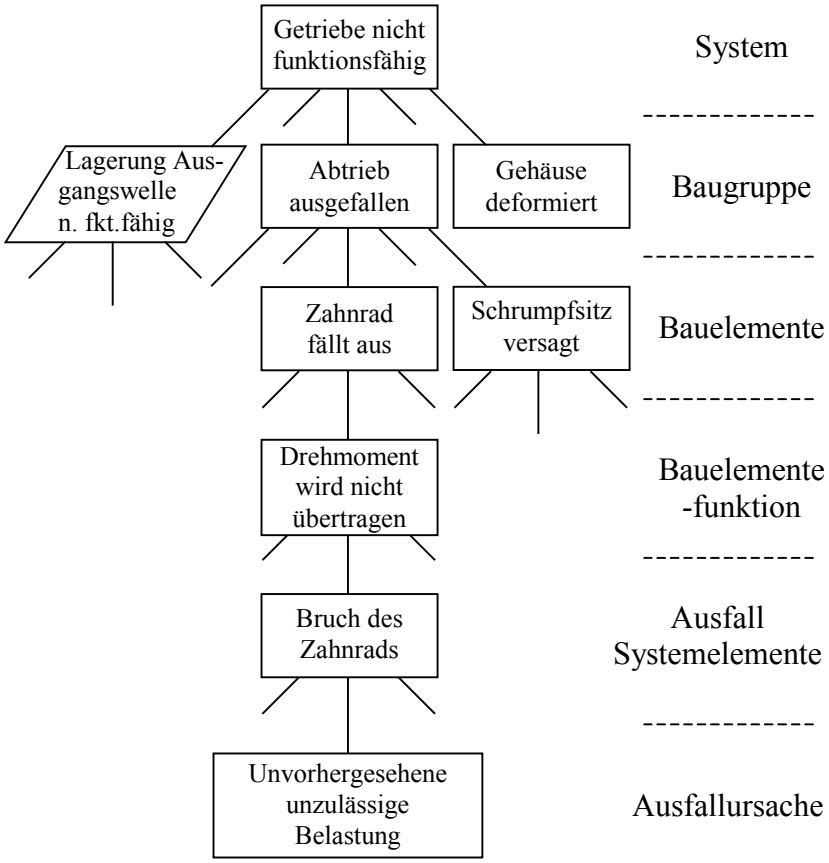


Bild 3.20: Beispiel: Fehlerbaumstruktur eines Getriebes [19]

Aus dem Ereignis „Abtrieb nicht funktionsfähig“ ergeben sich z.B. die Ereignisse "Zahnrad nicht funktionsfähig", aber auch „Schrumpfsitz nicht funktionsfähig", d.h. bei den Bauelementen müssen Bauteile und Schnittstellen berücksichtigt werden. Das Versagen der Bauteilfunktion "Drehmoment übertragen“ kann sich z.B. durch einen Ausfall des Zahnrades infolge Bruch ergeben. Die Ursache für diesen Ausfall könnte eine "unvorhergesehene, unzulässige Belastung“ sein. Bei diesem Fehlerbaum wird nicht zwischen UND-/ ODER-Verknüpfungen unterschieden, da ausschließlich ODER -Verknüpfungen auftreten. Dies bedeutet, daß alle Einzelteile des Beispielgetriebes benötigt werden, um eine einwandfreie Getriebefunktion sicherzustellen.

3.2.8 Ereignisablaufanalyse

Die Ereignisablaufanalyse nach DIN 25419 oder Ereignisbaumanalyse (EBA), engl.: Event Tree Analysis (ETA), kann zur Beschreibung und Bewertung von Abläufen aller

Art verwendet werden [41]. Sie wird vor allem zur Untersuchung von Störungen und Störfällen technischer Systeme verwendet.

Die Ereignisabläufe mit ihren möglichen Verzweigungen lassen sich einfach und übersichtlich in Form eines Ereignisbaums darstellen und analysieren. Die dazu verwendeten graphischen Symbole dienen der Darstellung der logischen Zusammenhänge und liefern gleichzeitig ein Schema zur Berechnung der Wahrscheinlichkeiten von Ereignisabläufen. Ziel dieser Methode ist es, eine graphische, nachvollziehbare und einheitliche Darstellung von Ereignisabläufen zu erreichen.

Die Ereignisablaufanalyse ist eine induktive Analyse, d.h. man geht von einem Anfangsereignis aus und ermittelt die Folgeereignisse bis zu den möglichen Endzuständen der Betrachtungseinheit und ihr Verhalten bei analysierten Ereignissen.

Das Anfangsereignis kann z.B. ein Komponentenausfall oder eine Fehlbedienung in einem technischen System sein. Es wird durch ein Rechteck im Ereignisablauf gekennzeichnet. Das Anfangsereignis induziert eine Wirkung auf die Betrachtungseinheit, die symbolisch durch eine Linie dargestellt wird. Wenn kausale Folgeereignisse eintreten, wie das Versagen einer weiteren Komponente, so sind diese Wirkungen enthalten. Die Reaktion der Betrachtungseinheit auf die Wirkung ist festzustellen. Hierfür wird die zuerst angeforderte Funktion abgefragt und unterschieden, ob die Funktion erfüllt ist oder nicht. An dieser Stelle verzweigt sich die Wirkung des Anfangsereignisses in die verschiedenen Folgeereignisse. Das Verzweigungssymbol ist nur dann erforderlich, wenn der weitere Verlauf der Wirkung nicht eindeutig zu entscheiden ist. Mit den Folgeereignissen wird analog zum Anfangsereignis weiter verfahren. Somit können in einem Ereignisablaufdiagramm mehrere Verzweigungen hintereinander auftreten. Die Wirkungen sind soweit zu verfolgen, bis die angeforderten Funktionen der Betrachtungseinheit abgefragt sind. Die Endzustände dieser Analyse sind die jeweiligen Ausgänge der letzten Verzweigung.

Treten in einem Diagramm Linien gleicher Wirkung auf, so können diese zur Vereinfachung über ein ODER-Symbol verkettet werden. Da eine Verkettung erst nach einer Verzweigung auftreten kann, handelt es sich dabei wegen der sich ausschließenden Zustände der Verzweigung stets um ein ausschließendes ODER. Mit dem Ereignisablaufdiagramm liegt zunächst ein logisches Modell vor. Dieses gibt die Bedingungen an, unter denen ein Anfangsereignis über bestimmte Ereignisabläufe zu bestimmten Endzuständen führt. Ebenfalls kann auf Grund des Diagramms eine Wahrscheinlichkeitsauswertung vorgenommen werden. Voraussetzung dafür ist die Verzweigungswahrscheinlichkeit. Dabei sind sämtliche, in den vorher durchlaufenen Verzweigungen, gesetzliche Bedingungen zu berücksichtigen. Die Verzweigungswahrscheinlichkeiten können z.B. mit einer FBA bestimmt werden. So lassen sich bei einer gegebenen Häufigkeit für den Ausgangszustand sämtliche Häufigkeiten der Zwischen- und Endzustände berechnen. Endzustände werden aber zweckmäßiger einer Bewertungs-

funktion unterzogen. Das Ergebnis ist dann die Häufigkeits- oder Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zustände. Die Ereignisablaufanalyse läßt sich auch im Rahmen von Risikostudien einsetzen.

3.2.9 Checklisteneinsatz

Eine entwicklungsbegleitende Untersuchung der Produktentstehung mittels Checklisten soll durch die Einbindung einer Datenbasis auf Grundlage von Microsoft Access oder Microsoft Excel ermöglicht werden. Jedoch sollte die Unterstützung durch Checklisten methodenspezifisch erfolgen.

Checklistenunterstützung der FMEA und der FBA

In der Methodikanalyse der FMEA, siehe Kapitel 3.2.6, wurde deutlich, daß eine Unterstützung durch Checklisten die Durchführung einer FMEA effektiver gestaltet.

übergeordnete Begriffe

Geometrie	**Größe, Höhe, Breite, Länge, Durchmesser, Raumbedarf, Anzahl, Anordnung, Anschluß, Ausbau und Erweiterung**
Kinematik	**Bewegungsart, Bewegungsrichtung, Geschwindigkeit, Beschleunigung**
Kräfte	**Kraftgröße, Kraftrichtung, Krafthäufigkeit, Gewicht, Last, Verformung, Steifigkeit, Federeigenschaften, Stabilität, Resonanzen**
Energie	**Leistung, Wirkungsgrad, Verlust, Reibung, Ventilation, Zustandsgrößen wie Druck, Temperatur, Feuchtigkeit, Erwärmung, Kühlung, Anschlußenergie, Speicherung, Arbeitsaufnahme, Energieumformung**
Stoff	**Physikalische und chemische Eigenschaften des Eingangs- und Ausgangsprodukts, Hilfsstoffe, vorgeschriebene Werkstoffe (Nahrungsmittelgesetz), Materialfluß und -transport**
Signal	**Eingangs- und Ausgangssignale, Anzeigeart, Betriebs- und Überwachungsgeräte, Signalform**
Sicherheit	**Unmittelbare Sicherheitstechnik, Schutzsysteme Betriebs-, Arbeits- und Umweltsicherheit**
Ergonomie	**Mensch-Maschine-Beziehung, Bedienung, Bedienungsart, Übersichtlichkeit, Beleuchtung, Formgestaltung**
Fertigung	**Einschränkung durch Produktionsstätte, größte herstellbare Abmessung, bevorzugtes Fertigungsverfahren, Fertigungsmittel, mögliche Qualität und Toleranzen**
Kontrolle	**Meß- und Prüfmöglichkeiten, besondere Vorschriften (TÜV, ASME, DIN, ISO, AD-Merkblätter)**
Montage	**Besondere Montagevorschriften, Zusammenbau, Einbau, Baustellenmontage, Fundamentierung**
Transport	**Begrenzung durch Hebezeug, Bahnprofil, Transportwege nach Größe und Gewicht, Versandart**
Gebrauch	**Geräuscharmut, Verschleißrate, Anwendung und Absatzgebiet, Einsatzort (Tropen, ..)**
Instandhaltung	**Wartungsfreiheit bzw. Anzahl und Zeitbedarf der Wartung, Inspektion, Austausch und Instandsetzung, Anstrich, Säuberung**
Recycling	**Wiederverwendung, Wiederverwertung, Entsorgung, Endlagerung, Beseitigung**
Kosten	**Max. zulässige Herstellkosten, Werkzeugkosten, Investition und Amortisierung**
Termin	**Ende der Entwicklung, Netzplan für Zwischenschritte, Lieferzeit**

Bild 3.21: Leitlinie für eine Anforderungsliste nach Pahl/ Beitz [8]

In Bild 3.21 ist eine Leitlinie aus Pahl/ Beitz entnommen, welche die Funktionsanalyse verbessern kann. Des weiteren stellen Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 eine Auflistung typischer Fehlerarten und Fehlerursachen auf Bauteilebene dar. Durch die Bildung geeigneter bzw. unternehmensspezifischer Rubriken kann die Anwendung der FMEA-Methodik effizienter gestaltet werden.

Tabelle 3.1: Typische Fehlerarten

– Ermüdung (Setzen)	– Aufnahme zum Gegenteil falsch	– Reibung zu hoch/ niedrig
– Bruch	– falscher Winkel	– fällt ab
– Anriß	– ungenügendes Zeitstandverhalten	– fällt ein
– Zahnbruch	– seitenverkehrte Montage	– Leistungsabfall
– korrodiert	– deformiert, verformt, verbeult	– abgezogen
– gelockert, lose	– überdehnt	– zu hoher Widerstand
– ablöst	– durchgebogen, durchhängend	– Farbunterschied
– verbrannt	– beschädigt	– Fluchtungsfehler
– verschmort	– frühzeitig verschlissen	– Ausrichtungsfehler
– Kurzschluß	– Berührung mit Nachbarteilen	– falsche Lage
– unterbrochen	– klemmt, schwergängig	– falsch montiert
– Drift	– ausgeschlagen	– nicht verwertbar
– Funktionsfehler	– Teilungsfehler	– Schmutz-, Wassereintritt
– blockiert	– Rundlauffehler	– dejustiert, verdreht, verstellt
– vibriert	– splittert ab	– vertauscht
– schwingt	– falsche Beschleunigung	– falsches Teil
– verunreinigt	– Resonanzen	– Teil fehlt
– verstopft	– falsche Federeigenschaften	– maßlich abweichend
– undicht	– falsches Gewicht	– falsche Oberflächenhärte
– geplatzt	– schlechter Wirkungsgrad	– falsche Oberflächenrauheit
– drucklos	– überhitzt	– falsche Anordnung
– Druck falsch	– zu laut	– falsche Geschwindigkeit
– zu wartungsintensiv	– schlecht austauschbar	– zu teuer
– Geräusch	– verrottet, zersetzt sich	– ...

Tabelle 3.2: Typische Fehlerursachen auf Bauteilebene

– falsche Materialwahl	– fehlerhafte Geometrie	– Montagefehler
– unvorhergesehene, unzulässige Belastung	– falscher Reibwert	– Transportfehler
– Materialfehler	– falsche Federkennlinie	– Schweißfehler
– Dimensionierungs-, Auslegungsfehler	– Öleinflüsse	– Verjüngung
– falsche Oberflächenhärte	– Temperatureinflüsse	– Werkzeug verschlissen
– zu hohe Betriebstemperatur	– falsche Bedienung	– falsche Wärmebehandlung
– Schmiermittelmangel	– Kupplungseinflüsse	– Porösität
– Korrosion	– falsche Montage	– Gradbildung
– falsche Toleranzwahl	– überhöhter Verschleiß	– vor Montage korrodiert
– Dichtfläche beschädigt	– Fressen	– ungeeignetes Konstruktionsprinzip
– undicht	– zu hohes Schleppmoment	– unzureichende Verpackung
– Verschluß	– Fertigungsfehler	– unzureichende Wartung
– Ermüdung	– Schwingungseinleitung	– Zeichnungsfehler
– falscher Einbau	– exzentrisch	– Material verwechselt
– ungenügende Erprobung	– falsches Bauteil	– falsche Materialdicke
– fehlende Kontrolle	– falsches Drehmoment	– überdehnt
– fehlt	– falsche Lage	– Verformungsrisse
– Fluchtungsfehler	– fehlende Transportsicherung	– falsche Verbindungstechnik
– Maßfehler	– Unwucht	– ...

Ähnlich der Unterstützung der FMEA, kann eine strukturierte Sammlung physikalischer Ausfallarten das Vorgehen bei der Fehlerbaumanalyse effektiver gestalten. Ins-

besondere sollen die Checklisten Schwierigkeiten und Hemmnisse bei der Teamarbeit abbauen, die entstehen, wenn keine adäquaten Beispiele vorhanden sind. Oftmals werden auch sogenannte Ishikawa- oder „Fischgrätdiagramme“ eingesetzt. Bild 3.22 zeigt ein Beispiel [16].

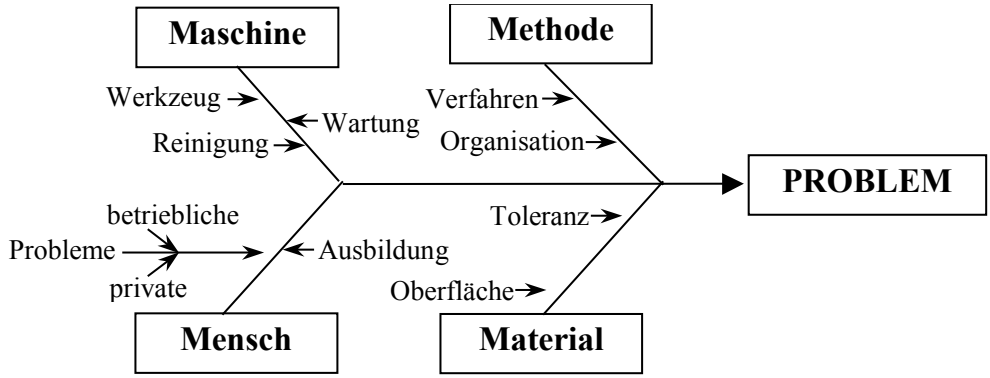


Bild 3.22: Ishikawa- oder „Fischgrätdiagramm“

Checklistenunterstützung der ABC-Analyse, DR, QFD

Jedes Unternehmen sollte für die eingesetzten Bauteile eine Klassifizierung nach A, B oder C vornehmen. Somit besteht für Neuteile eine Orientierung und diese können sofort eingeteilt und ggf. näher untersucht werden. Die Methoden Design Review und QFD orientieren sich ohnehin an Checklisten.

3.2.10 Methoden aus anderen Branchen

Da viele Methoden der Zuverlässigkeitstechnik ihren Ursprung in der Luft- und Raumfahrt haben, allen voran die FMEA, erscheint es sinnvoll die dort angewandten Methoden hinsichtlich einer möglichen Verwendung im Fahrzeug- und Maschinenbau zu analysieren. Die in der Luft- und Raumfahrt anzutreffende Methodenvielfalt ist enorm, wobei sich einige Verfahren ähneln. Nachfolgend werden diese Methoden stichwortartig vorgestellt [42].

Sicherheitsanalyse (nicht im Sinne von Betriebssicherheit)

Durch die Sicherheitsanalyse werden potentielle vom Einsatz des herzustellenden Produkts ausgehende Gefahren für das menschliche Leben und für andere Produkte identifiziert und entsprechende vorbeugende Maßnahmen definiert. Wegen der besonderen Sicherheitsrisiken in der Luft- und Raumfahrt ist die Sicherheitsanalyse dort unentbehrlich. Im Fahrzeug- und Maschinenbau können damit sicherheitskritische Komponenten und Teilsysteme analysiert werden, wie z.B. ein Giermomentsensor für das elektronische Stabilitätsprogramm oder das Airbagsystem. Im Unterschied zur FMEA konzentriert sich die Sicherheitsanalyse noch deutlicher auf Checklisten. Zur Umsetzung und Verifikation der definierten Maßnahmen existieren Formblätter. In der Regel erfolgt eine qualitative Anwendung.

Worst-Case-Analyse (WCA)
Um die Funktionsfähigkeit der meist elektronischen Schaltungen bei der ungünstigsten Kombination der Einsatzbedingungen zu prüfen werden Worst-Case-Analysen (WCA) durchgeführt. Dabei werden sowohl Toleranzen der Bauelemente berücksichtigt als auch Abweichungen der Parameter (Spannung, Strom, Verstärkung, etc.) aufgrund von Temperatur, Alterung, Strahlung, etc. Außer bei einfachen Schaltungen ist die WCA sehr kostspielig und hat in einigen Fällen zu Überdimensionierung geführt [42].

Derating-Analyse
Mit der Derating-Analyse wird sichergestellt, daß Bauteile Anforderungen hinsichtlich Unterlast erfüllen (engl.: To derate = Herabsetzen). Damit wird die richtige Auswahl von elektronischen, elektrischen und elektromagnetischen Komponenten, sogenannten EEE-Komponenten, hinsichtlich der Zuverlässigkeit unterstützt. Aufgrund der hohen Zuverlässigkeitsanforderungen in der Raumfahrt ist eine Derating-Analyse dort unentbehrlich.

Klassifizierung von Design-Parametern
Sämtliche Parameter eines Produkts (Maße, elektrische, funktionelle und werkstoffbezogene Parameter, Prozeßparameter) werden dabei bezüglich ihrer Auswirkungen auf die Sicherheit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit analysiert. Sie werden dann in entsprechende Klassen eingestuft und in den Bauunterlagen gekennzeichnet, um besondere Aufmerksamkeit während der Fertigung und Inspektion sicherzustellen. Diese Methode, die im Ariane5-Programm angewandt wurde, schafft eine Verbindung zwischen Zuverlässigkeitsaktivitäten und Fertigung. Der Aufwand für Inspektion und Fertigung, der sich nach der Kritikalität der Parameter richtet, wird somit kosteneffizient.

Analyse der menschlichen Fehler
Darunter versteht die Luft- und Raumfahrt diejenigen Methoden, welche die menschliche Zuverlässigkeit erfassen. Quantitative Methoden sind wegen der fehlenden, statistischen Eingangsdaten fraglich. Die qualitativen Methoden entsprechen der Vorgehensweise der FMEA und werden auch Human-FMEA genannt [43].

Hardware/Software-Interaktionsanalyse (HSIA)
Die HSIA wird als Erweiterung der FMEA in Systemen mit Software angewandt, um die richtige Reaktion auf die Hardwareausfälle zu sichern. Dabei wird für jeden angenommenen Hardwareausfall in der FMEA die Rolle der Software untersucht und die Berücksichtigung der Softwarereaktion in der Softwarespezifikation sichergestellt. Die Methode wird mittels Formblättern durchgeführt.

Outage-Analyse
Die Outage-Analyse (engl.: Outage = Ausfall, Unterbrechung) wird speziell in der Satellitentechnik durchgeführt, um die durchschnittliche Häufigkeit und Dauer von Serviceunterbrechungen zu erfassen. Die Ergebnisse dienen als Eingangsdaten der Verfügbarkeitsanalyse.

Liste der kritischen Punkte (Critical Item List)
Zur Umsetzung von empfohlenen vorbeugenden Maßnahmen werden alle kritischen Punkte und Szenarien in eine Liste übertragen, die in einem Aktionsplan resultiert.

Probabilistic Safety Assessment (PSA)
Die Methode des Probabilistic Safety Assessment (PSA) kann als Mischung aus Ereignisbaumanalyse (EBA), Fehlerbaumanalyse (FBA) und FMEA bezeichnet werden, Bild 3.23. PSA wird in der Anlagentechnik eingesetzt. Ausgehend von einer EBA werden die Ausfälle in einzelnen Fehlerbäumen betrachtet. Die unterste Ebene der FBA kann wiederum als Fehlfunktion in eine FMEA einfließen.

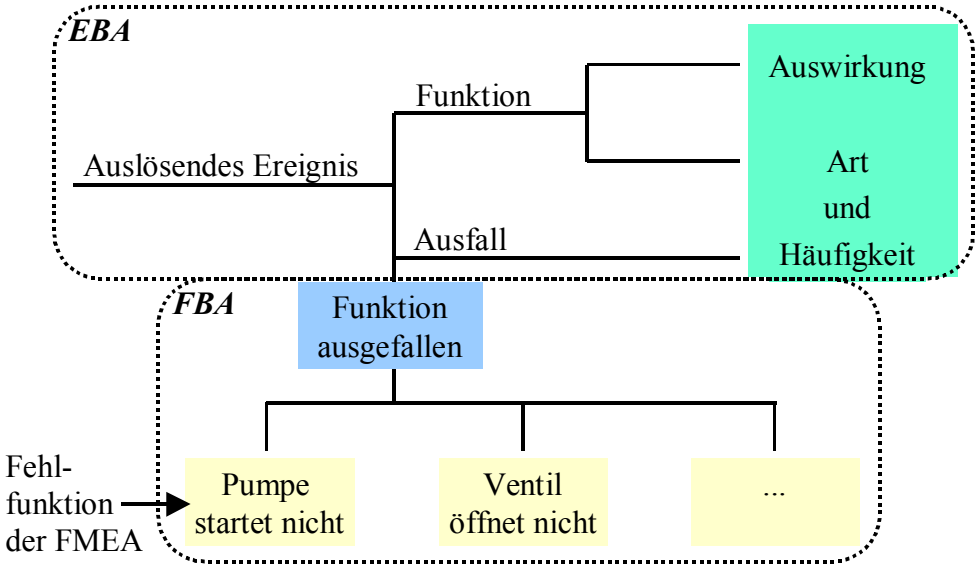


Bild 3.23: Probabilistic Safety Assessment, Beispiel

Qualitativ erhält man eine Struktur von Ursache und Auswirkung. Mit Ausfallraten und Eintrittshäufigkeiten kann man das PSA Modell auch quantitativ auswerten [42].

3.3 Quantitative Methoden der Zuverlässigkeitstechnik

Die quantitativen Methoden der Zuverlässigkeitstechnik sind berechnende Methoden, die als Ergebnis einen Zahlenwert liefern. Die Grundlage dieser Methoden bildet die statistische Beschreibung des Ausfallverhaltens, die ausführlicher im VDA-Band 3 Teil 2 „Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten“ erläutert wird [44].

3.3.1 Statistische Beschreibung des Ausfallverhaltens

Dichtefunktion
Um das Ausfallverhalten von Bauteilen einfach graphisch darzustellen wird das Histogramm der Ausfallhäufigkeiten verwendet. Die Abszisse wird in Zeitintervalle unterteilt, sogenannte Klassen, in denen die Anzahl der Ausfälle ermittelt wird. Dieser Or-

dinatenwert kann als absolute oder als relative Häufigkeit aufgetragen werden. Zum Vorgang der Klassierung existieren verschiedene Verfahren [45]. Für den Grenzübergang der Ausfälle $n \to \infty$ nähert sich der Umriß des Histogramms einer stetigen Kurve an, welche die eigentliche Dichtefunktion $f(t)$ darstellt, Bild 3.24.

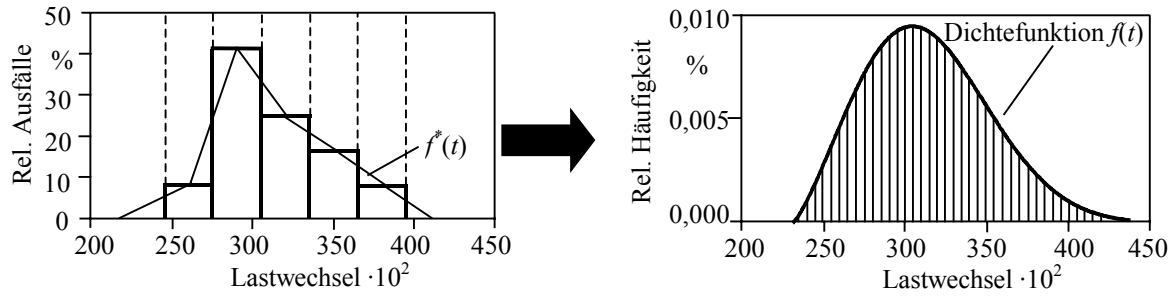


Bild 3.24: Histogramm der Ausfallhäufigkeiten und Dichtefunktion $f(t)$ beim Grenzübergang der Anzahl der Ausfälle von $n = 5$ auf $n \to \infty$

Mit der Verwendung dieser Dichtefunktion behandelt man theoretische Wahrscheinlichkeiten und verläßt die experimentell ermittelten Häufigkeiten. Der Grenzübergang $n \to \infty$ bedeutet, daß man sämtliche Teile einer Grundgesamtheit prüft, was nicht realistisch ist. Auf der Grundlage der experimentellen, realen Daten kann man die empirische Dichtefunktion $f^*(t)$ ermitteln, die von der idealen Dichtefunktion $f(t)$ abweicht.

Ausfallwahrscheinlichkeit (Verteilungsfunktion)

Mit dem Histogramm der Summenhäufigkeit läßt sich erkennen, wie viele Bauteile insgesamt bis zu einem Zeitpunkt ausgefallen sind. Dazu werden die Ausfälle mit fortlaufender Intervallzahl aufaddiert. Es ergibt sich die empirische Verteilungsfunktion $F^*(t)$. Durch den Grenzübergang $n \to \infty$ erhält man wiederum die eigentliche Verteilungsfunktion $F(t)$, die stets bei $F(t{=}0) = 0$ beginnt und bei $F(t{\to}\infty) = 1$ endet, Bild 3.25.

Die Verteilungsfunktion ergibt sich als Integral über der Dichtefunktion oder anders formuliert die Dichtefunktion ergibt sich als Ableitung der Verteilungsfunktion:

$$F(t) = P(\tau \geq t) = \int_0^t f(t')\mathrm{d}t' . \tag{3.1}$$

Die Verteilungsfunktion $F(t)$ wird als Ausfallwahrscheinlichkeit bezeichnet (F steht für engl.: Failure = Ausfall). Sie beschreibt die Summe der Ausfälle als Funktion der Zeit.

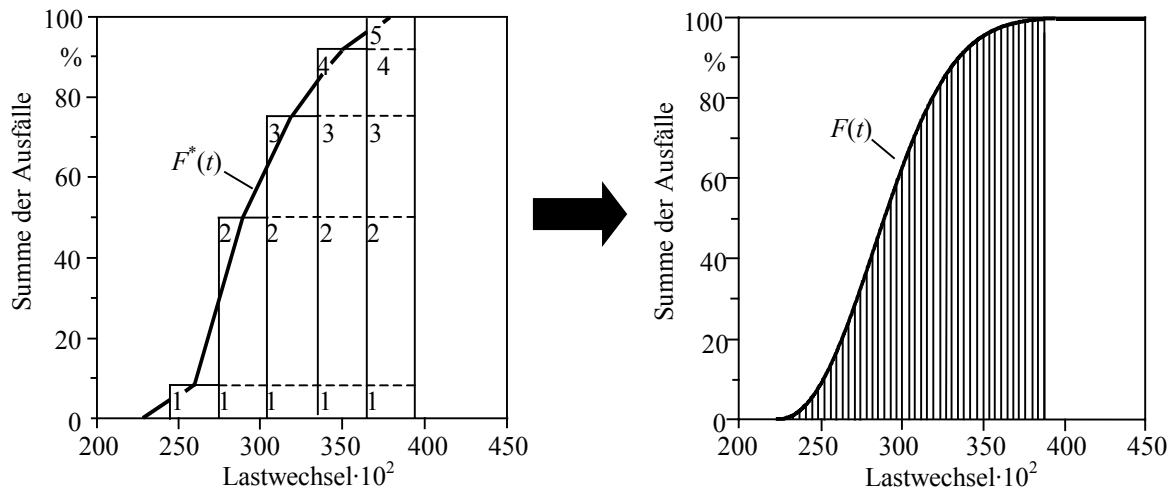


Bild 3.25: Histogramm der Summenhäufigkeiten und Verteilungsfunktion $F(t)$ beim Grenzübergang der Anzahl der Ausfälle von $n = 5$ auf $n \to \infty$

Überlebenswahrscheinlichkeit (Zuverlässigkeit)

Die Überlebenswahrscheinlichkeit beschreibt die Summe der funktionsfähigen Einheiten als Funktion der Zeit. Sie kann als Histogramm der Überlebenshäufigkeit dargestellt werden. Zu einem gewissen Zeitpunkt t ergibt die Addition der beiden Summenhäufigkeiten, Ausfälle und intakte Einheiten, stets 100%. Die Überlebenswahrscheinlicht ist somit das Komplement zur Ausfallwahrscheinlichkeit und wird als Zuverlässigkeit $R(t)$ bezeichnet (R steht für engl.: Reliability = Zuverlässigkeit). Sie beginnt stets bei $R(t{=}0) = 100\%$, fällt monoton ab und endet bei $R(t{\to}\infty) = 0\%$, wenn alle Einheiten ausgefallen sind:

$$R(t) = P(\tau < t) = 1 - \int_0^t f(t')\mathrm{d}t' = 1 - F(t)\,. \tag{3.2}$$

Damit läßt sich die qualitative Definition der Zuverlässigkeit quantifizieren [2]:

Unter der Zuverlässigkeit versteht man die Wahrscheinlichkeit dafür, daß eine Einheit, ein Bauteil oder ein System, während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt.

Ausfallrate

Zur Beschreibung des Ausfallverhaltens mittels einer Rate werden die Ausfälle zu einer bestimmten Zeit t auf die Summe aller noch intakten Einheiten bezogen. Die Ausfallrate kann auch als Quotient aus Ausfalldichte $f(t)$ und Überlebenswahrscheinlichkeit beschrieben werden:

$$\lambda(t) = \frac{\text{Ausfälle zum Zeitpunkt } t}{\text{Summe der noch intakten Einheiten zum Zeitpunkt } t} = \frac{f(t)}{R(t)}\,. \tag{3.3}$$

Die Ausfallrate beschreibt somit das Risiko einer Einheit, die bis zum Zeitpunkt t funktionsfähig ist, auszufallen. Mit der Ausfallrate wird versucht, das gesamte Ausfallverhalten einer Einheit oder eines Systems zu erfassen. Nach der Form der Kurve über der Lebensdauer wird sie als „Badewannenkurve“ bezeichnet, Bild 3.26.

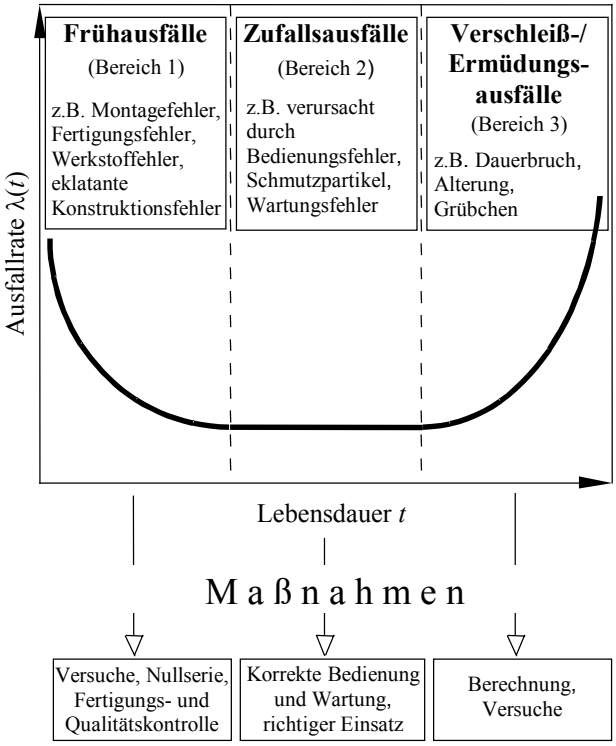


Bild 3.26: „Badewannenkurve“

Im Bereich der Frühausfälle (1) nimmt die Ausfallrate mit zunehmender Lebensdauer ständig ab. Im Bereich mit einer konstanten Ausfallrate befinden sich die Zufallsausfälle (2). Mit einer stark ansteigenden Ausfallrate beginnt der Bereich der Verschleiß- und Ermüdungsausfälle (3).

Entsprechend den verschiedenen Ausfallursachen in den unterschiedlichen Bereichen, ergeben sich Maßnahmen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit. Mit der konstruktiven Auslegung des Systems kann jedoch nur der Bereich 3 beeinflußt werden, der auch rechnerisch erfaßt werden kann.

Mathematische Beschreibung der Überlebenswahrscheinlichkeit

Zur Beschreibung des Ausfallverhaltens werden mathematische Verteilungsarten verwendet. Die bekannte Glockenkurve (**Normalverteilung**) wird in der Praxis nur sehr selten eingesetzt, da mit ihrem symmetrischen Verlauf nur eine Ausfallart beschrieben werden kann.

In der Elektrotechnik findet die **Exponentialverteilung** häufig Anwendung. Wesentliche Kennzeichen sind eine monoton abfallende Dichtefunktion und eine konstante

Ausfallrate λ als einziger Parameter, Bild 3.27. Dieses Verhalten ist charakteristisch für elektronische Bauteile. Die Formeln sind nachfolgend aufgeführt:

Dichtefunktion	$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$	(3.4)
Ausfallwahrscheinlichkeit	$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$	(3.5)
Überlebenswahrscheinlichkeit	$R(t) = e^{-\lambda t}$	(3.6)
Ausfallrate	$\lambda = konst.$	(3.7)

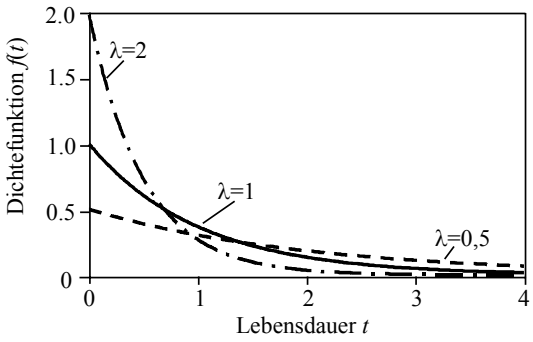


Bild 3.27: Ausfalldichte der Exponentialverteilung

Für den Kehrwert der Ausfallrate sind in der Literatur die Bezeichnungen *MTTF* (Mean Time To Failure) bzw. *MTBF* (Mean Time Between Failure) bekannt.

Mit der **Weibullverteilung** lassen sich die unterschiedlichsten Ausfallverhalten darstellen. Die Weibullverteilung kann als zweiparametrige (charakteristische Lebensdauer T und Formparameter b) oder als dreiparametrige (zusätzlich ausfallfreie Zeit t_0) Verteilung angewendet werden. Der Formparameter b ist ein Maß für die Streuung der Ausfallzeiten und für die Form der Ausfalldichte. Die charakteristische Lebensdauer T ist der Lageparameter der Dichtefunktion. Bei der dreiparametrigen Verteilung legt die ausfallfreie Zeit t_0 fest, ab welchem Zeitpunkt die Ausfälle beginnen. Damit wird die Kurve entlang der positiven Zeitachse um t_0 verschoben. Bei der zweiparametrigen Verteilung beginnen die Ausfälle stets ab $t = 0$. Sie stellt somit einen Sonderfall der dreiparametrigen Weibullverteilung dar mit $t_0 = 0$.

In Abhängigkeit vom Formparameter b ändert sich die Dichtefunktion. Für Werte von $b < 1$ werden Ausfälle ähnlich der Exponentialverteilung beschrieben, für $b = 1$ wird genau die Exponentialverteilung beschrieben. Bei Werten $b > 1$ beginnt die Dichtefunktion stets bei $f(t{=}0) = 0$, erreicht mit zunehmender Lebensdauer ein Maximum und fällt dann flach ab. Für $b = 3{,}5$ wird näherungsweise die Normalverteilung dargestellt. Die Formeln der dreiparametrigen Weibullverteilung sind nachfolgend aufgeführt. Die der zweiparametrigen können direkt daraus abgeleitet werden, indem $t_0 = 0$ gesetzt wird.

Überlebenswahrscheinlichkeit bzw. Zuverlässigkeit $$R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b} \tag{3.8}$$

Ausfallwahrscheinlichkeit $$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b} \tag{3.9}$$

Dichtefunktion $$f(t) = \frac{\mathrm{d}F(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{b}{T-t_0} \cdot \left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b} \tag{3.10}$$

Ausfallrate $$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{b}{T-t_0} \cdot \left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^{b-1} \tag{3.11}$$

Bedingungen $t \geq t_0 \geq 0,\ T \geq t_0,\ b \geq 0$.

Die Ausfall- und Überlebenswahrscheinlichkeit der zweiparametrigen Weibullverteilung mit einer charakteristischen Lebensdauer $T = 1$ für verschiedene Formparameter b sind in Bild 3.28 dargestellt.

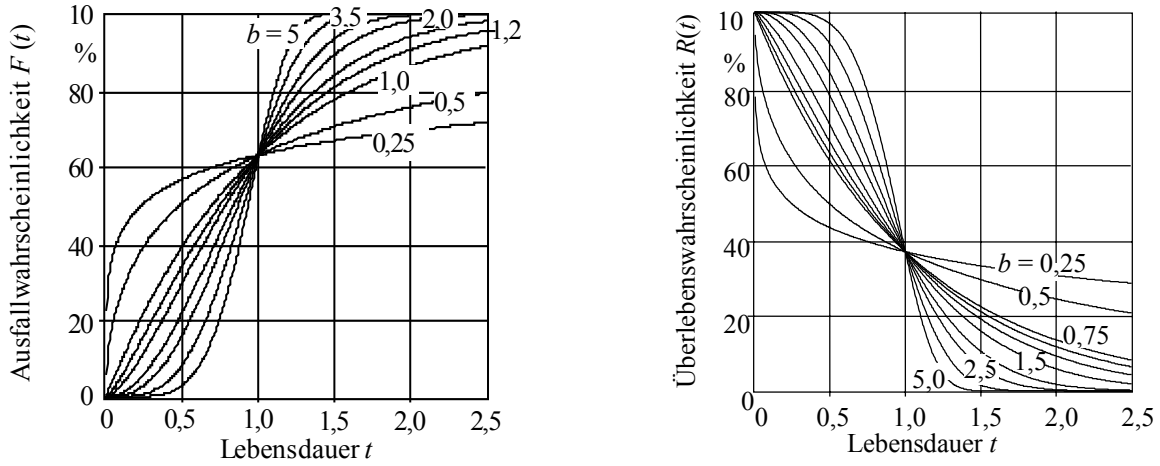


Bild 3.28: Ausfall- und Überlebenswahrscheinlichkeit der Weibullverteilung ($T = 1$, $t_0 = 0$)

Mit unterschiedlichen Werten der Ausfallrate λ der Weibullverteilung lassen sich die drei Bereiche der Badewannenkurve in Abhängigkeit des Formparameters b darstellen, siehe auch Bild 3.26. Für $b < 1$ lassen sich Frühausfälle beschreiben, da die Ausfallrate mit zunehmender Lebensdauer abnimmt (Bereich 1). Für $b = 1$ ist die Ausfallrate konstant und es lassen sich Zufallsausfälle darstellen (Bereich 2). Verschleiß- und Ermüdungsausfälle (Bereich 3) lassen sich mit $b > 1$ beschreiben, da die Ausfallrate mit zunehmender Lebensdauer deutlich ansteigt. Die Ausfallrate sowie die Dichtefunktion für verschiedene Werte des Formparameters b sind in Bild 3.29 dargestellt.

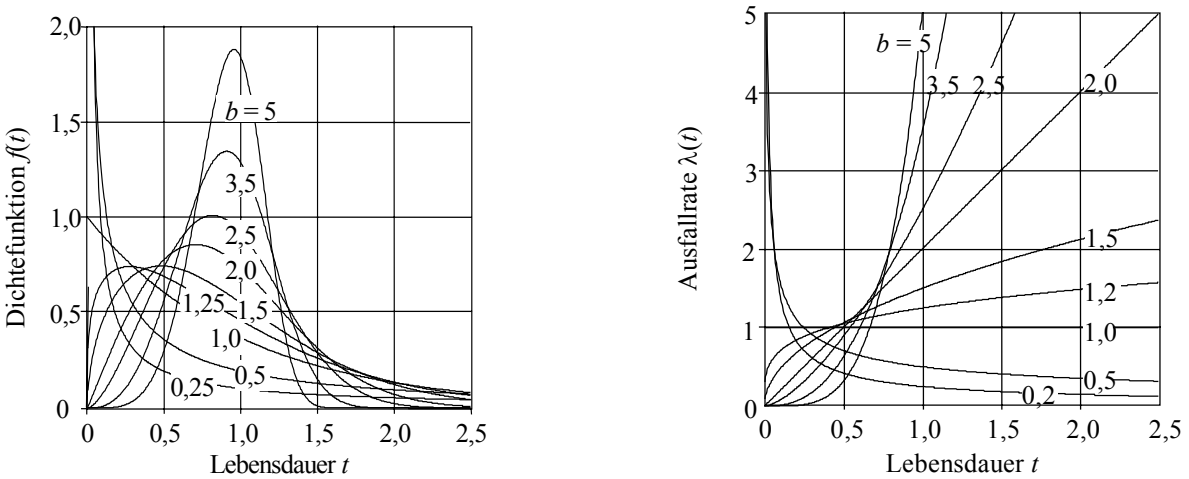


Bild 3.29: Dichtefunktion und Ausfallrate der Weibullverteilung (T = 1, t_0 = 0)

Mit der **Lognormalverteilung**, die aus der Normalverteilung hervorgeht, kann sehr unterschiedliches Ausfallverhalten dargestellt werden. Vorteilhaft ist, daß die Normalverteilung die am besten untersuchte Verteilungsart ist, und eine Übertragung auf die Lognormalverteilung einfach erfolgen kann. Nachteilhaft ist wiederum, daß sich die Ausfallfunktion $F(t)$ nur durch aufwendige Integralbildung bzw. mittels Tabellen ermitteln läßt:

$$f(t) = \frac{1}{t \cdot \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln t - t_m)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{und} \quad F(t) = \int_0^t f(\tau)\mathrm{d}\tau \,. \tag{3.12}$$

Auch bei der Lognormalverteilung existiert eine dreiparametrige Verteilung mit einer ausfallfreien Zeit t_0. Die anschauliche Darstellung erfolgt auf einem Wahrscheinlichkeitspapier, auf dem die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ als Gerade abgebildet wird.

Weitere Verteilungsarten, wie z.B. die Erlangverteilung oder die Gammaverteilung werden in der Literatur behandelt und finden in der Zuverlässigkeitstechnik nur gelegentlich Anwendung [46] - [47].

3.3.2 Boolesche Theorie

Ausgehend vom Ausfallverhalten der einzelnen Bauteile (siehe Kapitel 3.3.1) kann mittels des Booleschen Modells das Systemausfallverhalten berechnet werden. Für die Anwendung dieser Systemtheorie bestehen folgende Einschränkungen:

- Das System ist „nicht reparierbar“, d.h. der erste Systemausfall beendet die Systemlebensdauer,
- die Systemelemente können nur die beiden Zustände „funktionsfähig“ oder „ausgefallen“ annehmen,
- die Systemelemente sind „unabhängig“, d.h. das Ausfallverhalten eines Bauelementes wird durch das Ausfallverhalten anderer Bauelemente nicht beeinflusst.

Die Zuverlässigkeitsstruktur des Systems läßt sich aus den sogenannten Zuverlässigkeitsschaltbildern erkennen, in denen die Auswirkungen einer Komponente (eines Systemelements) auf das gesamte System deutlich werden. Die Verbindungen zwischen Eingang E und Ausgang A stellen die Möglichkeiten der Funktionsfähigkeit des Systems dar.

Bei einer Serienschaltung beispielsweise, wie in Bild 3.30, führt der Ausfall einer beliebigen Komponente zum Ausfall des gesamten Systems.

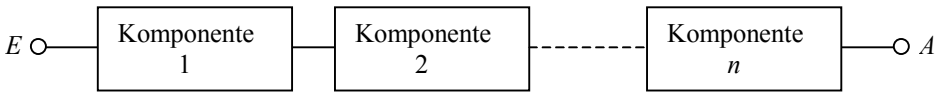


Bild 3.30: Reine Serienstruktur des Booleschen Modells

Das System ist nur dann funktionsfähig, wenn alle Komponenten funktionsfähig sind. Die Systemzuverlässigkeit errechnet bei n Komponenten nach der Beziehung

$$R_S(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \ldots \cdot R_n(t) = \prod_{i=1}^{n} R_i(t) . \tag{3.13}$$

Bei einer Parallelstruktur fällt das System erst aus, wenn sämtliche Komponenten ausgefallen sind, Bild 3.31.

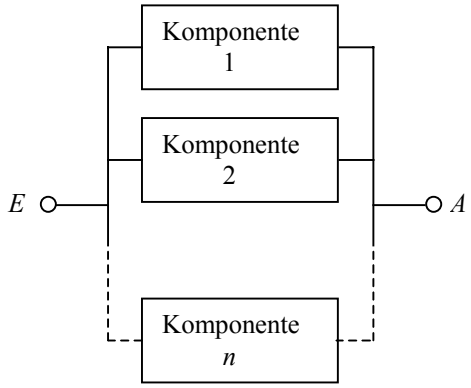


Bild 3.31: Reine Parallelstruktur des Booleschen Modells

Die Beziehung für die Berechnung der Zuverlässigkeit von reinen Parallelsystemen mit n Einzelkomponenten lautet

$$R_S(t) = 1 - (1 - R_1(t)) \cdot (1 - R_2(t)) \cdot \ldots \cdot (1 - R_n(t)) = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - R_i(t)) . \tag{3.14}$$

Zur Zuverlässigkeitsanalyse von Mischformen, d.h. kombinierten oder vernetzten Strukturen, kann die Systemzuverlässigkeit durch schrittweise Anwendung der Beziehungen von Serien- und Parallelanordnung berechnet werden. Dabei werden Ersatzgrößen verwendet. Weitere Möglichkeiten zur Lösung sind der Einsatz der disjunktiven Normalform [48] oder der minimalen Schnittmengen bzw. Erfolgspfade [49].

3.3.3 Quantitative Fehlerbaumanalyse

Theorie und Vorgehensweise

Bei der Fehlerbaumanalyse wird durch die verwendeten Systemelemente ein Fehlerbaum aufgebaut. Ausgehend vom unerwünschten Ereignis bzw. dem Systemausfall (Top-Event) werden alle Zweige abgelaufen. Dabei wird erfragt, welche Ausfälle es auf der nächst tieferen Ebene gibt und wie diese mit dem übergeordneten Ausfall verknüpft sind (UND- bzw. ODER-Verknüpfung). Diese Frage wird bis zur untersten Systemebene wiederholt, wodurch man das komplette Ausfallverhalten des Systems erhält. Bei der Erstellung einer FBA wird eine bestimmte Symbolik verwendet, die in Bild 3.32 dargestellt ist.

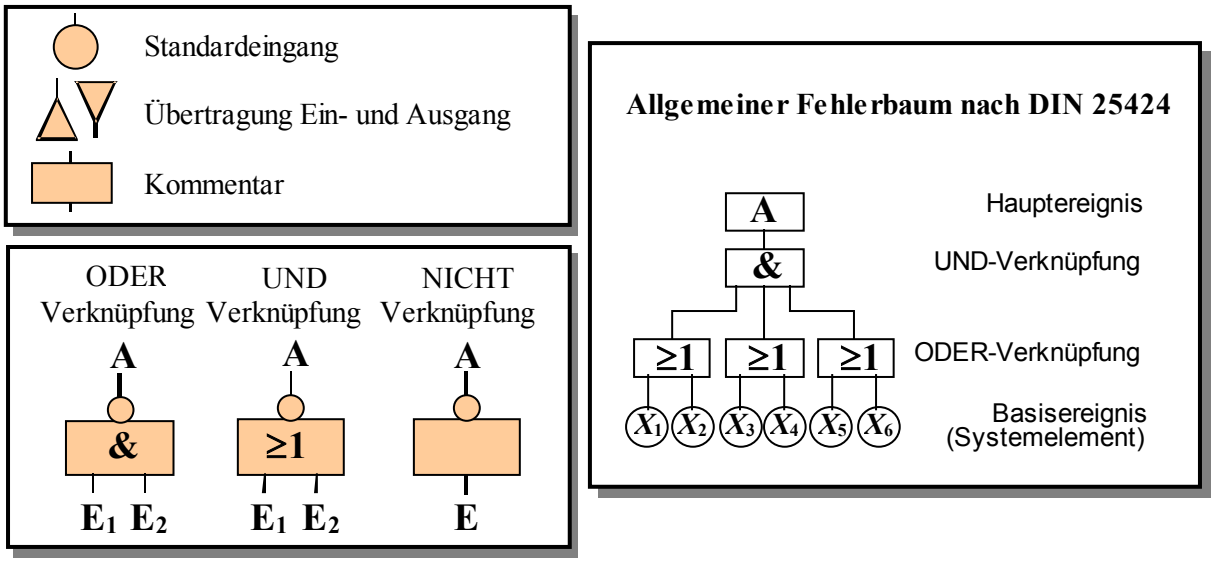


Bild 3.32: Symbolik der Fehlerbaumanalyse

Zweck und Ziele

Zweck der Fehlerbaumanalyse ist die Ermittlung der logischen Verknüpfungen von Komponenten- oder Teilsystemausfällen, die zu einem unerwünschten Ereignis führen. Ziele dieser Analysemethode sind die systematische Identifizierung aller möglichen Ausfallkombinationen die zu einem vorgegebenen unerwünschten Ereignis (Topevent) führen, und die Ermittlung von Zuverlässigkeitskenngrößen, wie z.B. Eintrittshäufigkeiten der Ausfallkombinationen, Eintrittshäufigkeit des unerwünschten Ereignisses oder Nichtverfügbarkeit des Systems bei Anforderung. Nach Abschluß sollte beurteilt werden können, ob bestimmte Zuverlässigkeitskenngrößen die festgelegten Forderungen erfüllen und falls nicht, wie diese verändert werden müssen. Bild 3.33 zeigt ein Fehlerbaumbeispiel für ein Getriebe. Bei der Analyse nach dem Fehlerbaum werden folgende Ausfallarten unterschieden:

- Primärausfall (Ausfall unter zulässigen Bedingungen),
- Sekundärausfall (Ausfall aufgrund unzulässiger Einsatzbedingungen),
- Kommandoausfall (Ausfall durch Fehlbedienung und Mißbrauch).

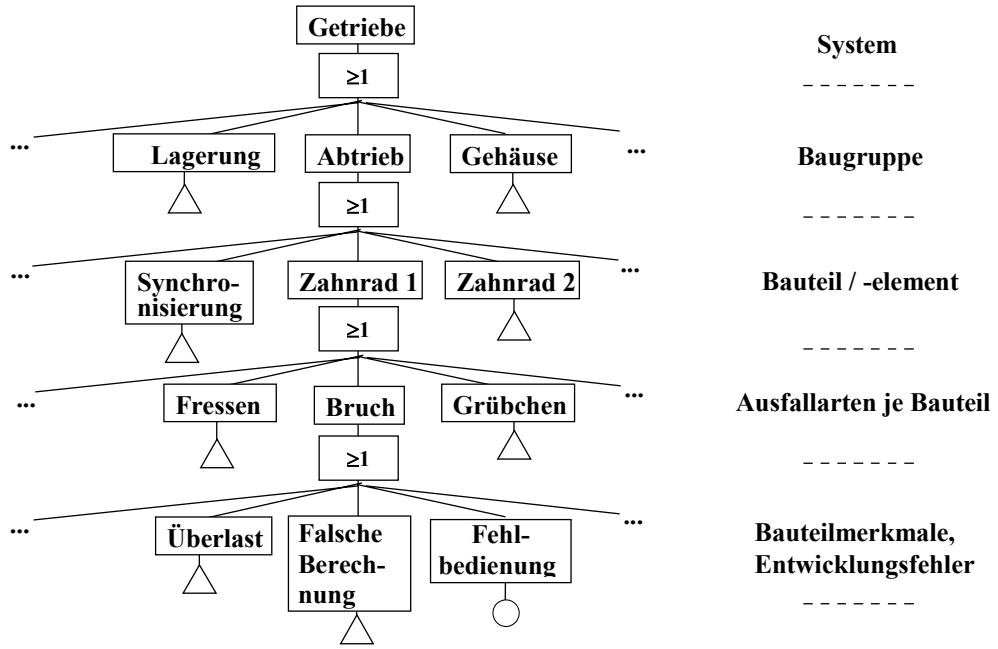


Bild 3.33: Fehlerbaumbeispiel für ein Getriebe

Nachdem ein Fehlerbaum für ein System erstellt ist, kann dieser qualitativ oder quantitativ (siehe auch Kapitel 3.2.7) ausgewertet werden. Für die quantitative Fehlerbaumanalyse müssen die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Einzelkomponenten bekannt sein. Zur Ermittlung der Systemlebensdauer wird das Boolesche Modell verwendet. Beim Booleschen Modell wird die Ausfallwahrscheinlichkeit über der Lebensdauer ermittelt. Ein Fehlerbaum mit ausschließlichen ODER-Verknüpfungen wird, wie die Serienanordnung des Booleschen Modells, nach Gleichung (3.13) berechnet. Ein Fehlerbaum mit ausschließlichen UND-Verknüpfungen entspricht der Parallelanordnung im Booleschen Modell nach Gleichung (3.14).

Bei einer Kombination dieser beiden Anordnungen muß die Systemzuverlässigkeit durch eine schrittweise Anwendung der beiden Beziehungen hergeleitet werden. Da die FBA auf der Booleschen Theorie basiert, kann auch hier die Methode der Minimalschnitte und Minimalpfade angewandt werden [49] - [50]. Die Fehlerbaumanalyse kann auch qualitativ verwendet werden, falls keine oder nur wenig Daten über die Einzelkomponenten vorliegen, siehe Kapitel 3.2.7.

3.3.4 Markoff-Methode

Während bei nichtreparierbaren Systemen die Zuverlässigkeit oder die Ausfallwahrscheinlichkeit betrachtet wird, untersucht man bei reparierbaren Systemen die Verfügbarkeit oder die Nichtverfügbarkeit. Bei unendlich langen Reparaturzeiten stimmt die Verfügbarkeit mit der Zuverlässigkeit überein. Beim Markoff-Modell wird die Verfügbarkeit über der Laufzeit bestimmt. Mit der Markoff-Methode können reparierbare Systeme untersucht werden [51]. Dabei können jedoch nur Systeme behandelt werden, deren Systemelemente konstante Ausfall- und Reparaturraten haben. Folgende Begrif-

fe und daraus abgeleitete Formelzeichen werden bei der Anwendung der Markoff-Methode verwendet, Bild 3.34:

- *MTTFF*: Mean Time To First Failure. Die mittlere Lebensdauer bis zum ersten Ausfall wird bei reparierbaren Systemen als *MTTFF* bezeichnet.
- *MTTR*: Mean Time To Repair. Der Mittelwert der Reparaturzeit bzw. die Instandsetzungszeit wird als *MTTR* bezeichnet.
- *MTBF*: Mean Time Between Failure. Der Mittelwert der ausfallfreien Zeiten oder auch mittlerer Ausfallabstand wird als *MTBF* bezeichnet.
- *MTTF*: Mean Time To Failure. Der Mittelwert der Lebensdauer vom Ende der Reparaturzeit bis zum nächsten Ausfall wird als *MTTF* bezeichnet.

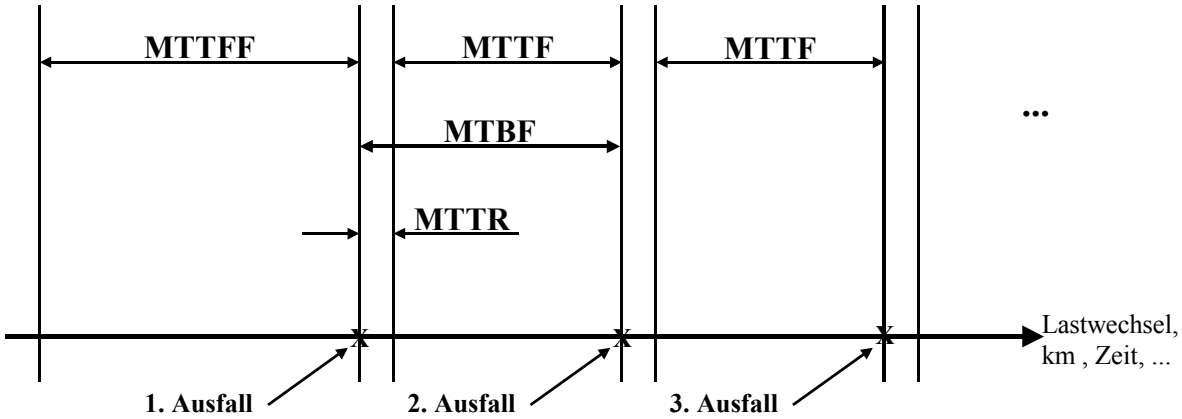


Bild 3.34: Begriffe der Markoff-Theorie

Vorgehensweise

Bei gegebenen Weibullparametern b, T, t_0 und *MTTR* läßt sich der Mittelwert der Betriebsdauer *MTTF* berechnen:

$$MTTF = E(t) = \int_0^\infty t \cdot f(t)\mathrm{d}t = \int_0^\infty R(t)\mathrm{d}t\,. \tag{3.15}$$

Bei der dreiparametrigen Weibullverteilung nach Gleichung (3.10) ergibt sich der Erwartungswert *MTTF* nach einigen Umformungen zu:

$$MTTF = E(t) = (T - t_0) \cdot \Gamma(1 + \frac{1}{b}) + t_0\,,\ \Gamma = \text{Eulersche Gammafunktion.} \tag{3.16}$$

Die Dauerverfügbarkeit A_D ergibt sich aus den Zustandsdifferentialgleichungen. Jedes Element kann nur die zwei Zustände „funktionsfähig“ oder „ausgefallen“ annehmen:

- Zustand Z_0: Das Element ist funktionsfähig und im Betriebszustand,
- Zustand Z_1: Das Element ist ausgefallen und befindet sich im Reparaturzustand.

Die zugehörigen Zustandwahrscheinlichkeiten werden mit $P_0(t)$ und $P_1(t)$ bezeichnet. Die Elemente gehen mit einer gewissen Übergangswahrscheinlichkeit von einem Zu-

stand in den anderen über. Die Summe der Übergangswahrscheinlichkeiten der von einem Zustand ausgehenden Pfeile besitzt immer den Wert 1:

$$P_0(t) + P_1(t) = 1\,. \tag{3.17}$$

Diese Voraussetzung wird als Normierungsbedingung bezeichnet. Zur Zeit $t = 0$ ist das betrachtete Element funktionsfähig und neuwertig. Die Anfangsbedingungen lauten:

$$P_0(t=0) = 0 \text{ und } P_1(t=0) = 1\,. \tag{3.18}$$

Die Änderung der Zustandswahrscheinlichkeiten setzt sich additiv aus den Übergangswahrscheinlichkeiten zusammen, die sich durch Multiplikation der Zustandswahrscheinlichkeit mit den jeweiligen Übergangsraten ergeben. Vom Zustand ausgehende Pfeile werden dabei negativ, alle zum Zustand zeigenden Pfeile werden positiv angesetzt, Bild 3.35. Beim Markoff-Graph werden die Übergangsraten von Z_0 nach Z_1 als Ausfallrate λ und von Z_1 nach Z_0 als Reparaturrate μ angegeben.

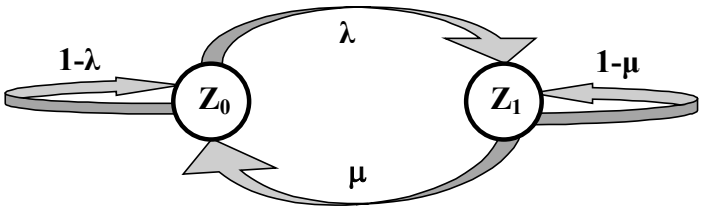


Bild 3.35: Markoff-Graph für ein Einzelelement

Im Betrachtungsfall des Einzelelements ergeben sich die Differentialgleichungen

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda \cdot P_0(t) + \mu \cdot P_1(t)\,, \tag{3.19}$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = -\mu \cdot P_1(t) + \lambda \cdot P_0(t)\,. \tag{3.20}$$

Aus diesen Gleichungen, der Normierungsbedingung nach Gleichung (3.17) und den Anfangsbedingungen aus Gleichung (3.18) ergibt sich für $P_0(t)$:

$$\frac{\mathrm{d}P_0(t)}{\mathrm{d}t} = -\lambda \cdot P_0(t) + \mu \cdot (1 - P_0(t)) \qquad \Rightarrow \qquad \frac{\mathrm{d}P_0(t)}{\mathrm{d}t} + (\lambda + \mu) \cdot P_0(t) = \mu\,. \tag{3.21}$$

Die Lösung dieser inhomogenen Differentialgleichung besteht aus einem homogenen und einem partikulären Teil:

$$P_0(t) = P_{0H}(t) + P_{0p}(t)\,. \tag{3.22}$$

Durch Trennung der Veränderlichen resultiert die homogene Lösung:

$$\int \frac{\mathrm{d}P_0(t)}{P_0(t)} = -\int (\lambda + \mu)\mathrm{d}t \qquad \Rightarrow \qquad P_{0H}(t) = C \cdot e^{-(\lambda+\mu)\cdot t}\,. \tag{3.23}$$

Durch Variation der Konstanten ergibt sich die partikuläre Lösung. Die Addition der beiden Lösungsteile ergibt für $P_0(t)$ folgende Gleichung:

$$P_0(t) = \frac{\mu}{\mu+\lambda} + \frac{\lambda}{\mu+\lambda} \cdot e^{-(\lambda+\mu)\cdot t} . \tag{3.24}$$

Über die Normierungsbedingung Gleichung (3.17) erhält man die Zustandswahrscheinlichkeit $P_1(t)$. Die Zustandswahrscheinlichkeit $P_0(t)$, mit der sich das Element zum Zeitpunkt t im funktionsfähigen Zustand befindet, entspricht der Verfügbarkeit $A(t)$. Entsprechend definiert sich die Nichtverfügbarkeit $U(t)$ mit dem Komplement der Verfügbarkeit zu $P_1(t)$:

$$A(t) = P_0(t) \quad , \qquad U(t) = 1 - A(t) = P_1(t) . \tag{3.25}$$

Die Verfügbarkeit $A(t)$ konvergiert für $t \to \infty$ gegen den Grenzwert der stationären Lösung. Dieser Wert wird Dauerverfügbarkeit A_D genannt und meist durch die zuvor eingeführten Begriffe (siehe auch Bild 3.34) ausgedrückt:

- Mittelwert der Betriebsdauer: $MTTF = 1/\lambda$,
- Mittelwert der Reparaturzeit: $MTTR = 1/\mu$.

Die Dauerverfügbarkeit A_D ergibt sich somit zu:

$$A_D = \lim_{t\to\infty} A(t) = \frac{\mu}{\lambda+\mu} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} = \frac{1}{1+\dfrac{MTTR}{MTTF}} . \tag{3.26}$$

Sie ist nur vom Quotienten $MTTR/MTTF$ abhängig. Je größer dieser wird, desto geringer wird die Dauerverfügbarkeit.

Boole-Markoff-Modell

Soll nun ein System bestehend aus mehreren Elementen analysiert werden, muß das Zusammenwirken aller Elemente berücksichtigt werden. Bei n Elementen kann ein Markoff-Modell 2^n Zustände annehmen. Selbst bei nur zwei Elementen und damit nur vier möglichen Zuständen ergeben sich Differentialgleichungen, die nur mit erheblichem Rechenaufwand zu lösen sind. Besteht ein System aus voneinander unabhängigen, reparierbaren Systemelementen so kann ein Boole-Markoff-Modell gebildet werden, Bild 3.36.

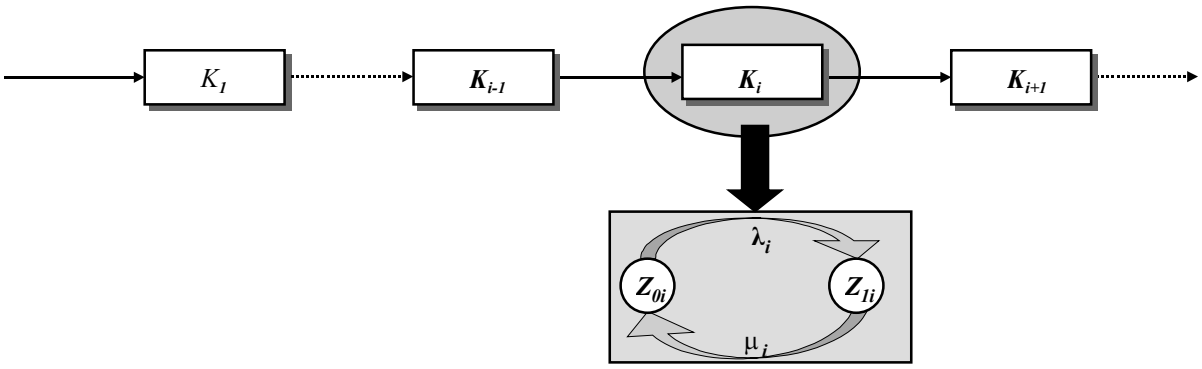


Bild 3.36: Boole-Markoff-Modell

Mit dem Markoff-Modell wird die Dauerverfügbarkeit $A_{Di}(t)$ der einzelnen Elemente ermittelt, mit dem Booleschen Modell erfolgt die Verknüpfung zwischen den Elementen. Bei zeitabhängigen Ausfall- oder Reparaturraten ist eine Auflösung nach den Zustandswahrscheinlichkeiten nicht möglich. Daher wird vorausgesetzt, daß alle Systemelemente konstante Ausfall- und Reparaturraten besitzen. Für die Dauerverfügbarkeit A_{Di} = konst. der einzelnen Systemelemente gilt allgemein:

$$A_{Di} = \lim_{t\to\infty} A_i(t) = \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} = \frac{MTTF_i}{MTTF_i + MTTR_i}. \tag{3.27}$$

Dabei wird der Mittelwert der Betriebsdauer $MTTF_i$ sowie der Mittelwert der Reparaturzeit $MTTR_i$ als Erwartungswert $E(t)$ der Ausfall- bzw. der Reparaturverteilung berechnet. Nunmehr kann die Systemdauerverfügbarkeit A_D mit Hilfe des Booleschen Modells abgeschätzt werden. Für ein Seriensystem gilt:

$$A_{DS} = \prod_{i=1}^{n} A_{Di} = \prod_{i=1}^{n} \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} = \prod_{i=1}^{n} \frac{MTTF_i}{MTTF_i + MTTR_i}. \tag{3.28}$$

Für ein Parallelsystem gilt:

$$A_{DP} = 1 - \prod_{i=1}^{n} A_{Di} = 1 - \prod_{i=1}^{n} \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} = 1 - \prod_{i=1}^{n} \frac{MTTF_i}{MTTF_i + MTTR_i}. \tag{3.29}$$

Bei einer Kombination dieser beiden Anordnungen muß die Systemdauerverfügbarkeit A_D durch eine schrittweise Anwendung der beiden Beziehungen hergeleitet werden [52].

3.3.5 Monte-Carlo-Simulation

Die Monte-Carlo-Methode ist ein Verfahren, das mathematische Ausdrücke, die aus einer oder mehreren Verteilungsfunktionen aufgebaut sind, näherungsweise bestimmen kann. Man zieht eine Zufallsstichprobe heran, um mit dem geschaffenen mathematischen Modell ein Spiel zu spielen, indem ein Experiment simuliert wird. Mit der Monte-Carlo-Simulation kann sowohl die Ausfallwahrscheinlichkeit, als auch die Verfügbarkeit ermittelt werden [53]. Ungeachtet des Nachteils der langsamen Konvergenz, muß beachtet werden, daß der Aufwand für die Realisierung statistischer Modelle im allgemeinen gegenüber den Anforderungen natürlicher Experimente gering ist.

Mathematische Grundlagen

Die mathematischen Grundlagen werden ausführlich in [53] - [57] behandelt. Die grundlegende Aufgabe der Monte-Carlo-Methode ist die Schätzung von Zufallskenngrößen, deren Verteilungsfunktion sehr kompliziert sein kann.

Vorgehen bei der Simulation der Zuverlässigkeit

Für n Komponenten eines Systems werden n Zufallszahlen ξ_i , $j = 1(1)n$ gezogen. Zu jeder Zufallszahl wird mit Hilfe der Inversionsmethode eine Lebensdauer t_i berechnet:

$$t_i = F_i^{-1}(\xi_i), \forall i = 1(1)n\,. \tag{3.30}$$

Jeder einzelnen Systemkomponente wird somit eine simulierte Lebensdauer t_i zugewiesen. Nun erfolgt die Ermittlung der Systemstruktur nach dem Booleschen Modell. Bei Durchführung von m Systemlebensdauersimulationen erhält man m Systemlebensdauerwerte $t_{Sj}, j = 1(1)m$. Für die statistische Auswertung werden diese Werte der Größe nach geordnet. Es muß gelten:

$$t_{Sj-1} \le t_{Sj} \le t_{Sj+1}\,, \forall j = 1(1)m\,. \tag{3.31}$$

Diese Werte heißen simulierte Ranggrößen, denen nun Ausfallwahrscheinlichkeiten zugeordnet werden. Aus der Beziehung

$$F_j = \frac{j - 0{,}3}{m + 0{,}4}, \forall j = 1(1)m \tag{3.32}$$

erhält man diese näherungsweise mit dem Medianwert der Betaverteilung. Die Wertepaare (t_{Sj}, F_j) können nun graphisch aufgetragen werden und geben so den zeitlichen Verlauf der Systemzuverlässigkeit wieder. Um die Genauigkeit zu steigern, wird der beschriebene Algorithmus p mal durchgeführt, bei jeweils gleichem m. Durch Bildung eines arithmetischen Mittelwertes

$$t_{Sk} = \frac{1}{p} \cdot \sum_{k=0}^{p} (t_{Sj})_k \tag{3.33}$$

ergibt sich das Systemausfallverhalten in einer varianzreduzierten Form, die zu einer Steigerung des Ergebnisses führt. Es bleibt $F_k = F_j$, damit bleiben als Ergebnis die Wertepaare (t_{Sk}, F_k).

3.4 Rechnerunterstützung im Konstruktionsprozeß und Datentechnik

3.4.1 Computer Aided Design

Die mit dem Rechnereinsatz verbundene Arbeitstechnik des Konstruierens unter Nutzung entsprechender Geräte und Programme wird international als Computer Aided Design (CAD) bezeichnet, deutsch: Rechnerunterstütztes Konstruieren [8].

Unabhängig von der rechnerinternen Darstellung existieren verschiedenartige Verfahren, um geometrische Modelle zu erzeugen und zu verändern [58]. Die Zuordnung dieser Verfahren zu den Haupt-Konstruktionsphasen zeigt Bild 3.37.

Parametrische Modellierer

Am häufigsten anzutreffen ist die Methode der Erzeugung von parametrischen, zweidimensionalen Profilen, die im Raum positioniert, referenziert und in geeignete Erzeugungskommandos mit einbezogen werden. So läßt sich beispielsweise durch das Extrudieren eines quadratischen Profils um einen bestimmten Betrag senkrecht zu die-

sem, ein Würfel erzeugen. Die den Würfel bestimmenden Variablen Breite, Höhe und Extrusionstiefe werden automatisch als Parameter angelegt und können für Modifikationen herangezogen werden. Die Entstehungsgeschichte der Operationen wird in einer Modelldatei festgehalten.

Dynamische Modellierer

Dynamische Modellierer funktionieren in ähnlicher Weise, d.h. aus einem Profil und seiner Ausprägung in die dritte Dimension entsteht ein räumlicher Körper. Allerdings wird die Entstehungsgeschichte nicht in einer Modelldatei festgehalten.

Modellierer mit Formelementen

Dieser Modelliertyp arbeitet mit bereits vordefinierten Formelementen (Features), wie z.B. Welle, Nut, Durchgangsbohrung, Fase, etc., die bereits eine Reihe typischer Eigenschaften haben und somit in späteren Prozeßschritten leicht ausgewertet werden können. Beispielsweise lassen sich Bohrungs-Formelemente bei CAM-Systemen sehr leicht mit entsprechenden Fertigungsoperationen verknüpfen.

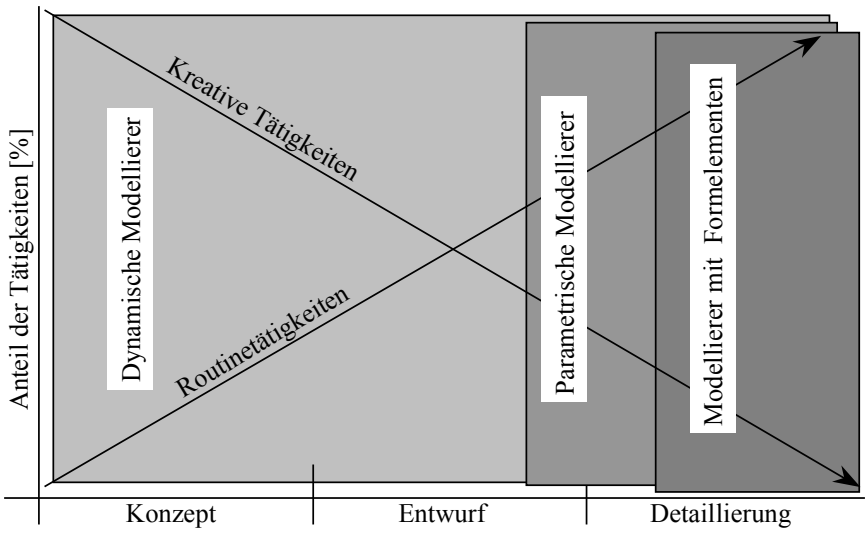


Bild 3.37: Einsatz der verschiedenen Modellierverfahren und deren Zuordnung zu den Haupt-Konstruktionsphasen

Die meisten am Markt verfügbaren Modelliersysteme, d.h. CAD-Systeme, unterstützen hauptsächlich die Detaillierung, die Dokumentation und die Erstellung von Fertigzeichnungen, also eine recht späte Phase im Konstruktionsprozeß. Beim Einsatz von 3D-CAD-Systemen können auch die Analyse und NC-Bearbeitung integriert werden. Wenige Systeme sind dafür geeignet, in der konzeptionellen Phase eingesetzt zu werden. Software für die Design- oder Konzeptphase wird in der Regel nicht für die konstruktive Detaillierung eingesetzt sondern ist meist ein Spezialpaket [59].

Programme auf Basis der dynamischen Modellierer bieten als einzige die notwendigen Voraussetzungen für die Darstellung der Konzeption. So können bereits in der Konzeptionsphase die richtigen Konstruktionsentscheidungen getroffen werden.

Modellkommunikation

Der Hauptvorteil der elektronischen Datenverarbeitung ist, daß die einmal erzeugten Daten für weiterverarbeitende Systeme immer elektronisch zur Verfügung stehen. Da unterschiedliche CAD-Systeme an verschiedenen Orten mit anderen Daten arbeiten, steht im Sinne der Integration die Frage nach einem gemeinsamen Datenaustauschformat, das alle Daten- und Systemtypen erfaßt, im Vordergrund. Um den Forderungen an den Datenaustausch zu genügen, muß es möglich sein, die in einem CAD-System erzeugten Daten auszulesen und in einem anderen System wieder einzulesen. Aufgrund der unterschiedlichen Modellstrukturen der CAD-Systeme ist eine Aufbereitung der Daten vor dem Auslesen und zum Einlesen notwendig. Während bei einer systemspezifischen Kopplung eine Vielzahl von Anpassungen für jedes anzupassende System nötig ist, erfordert eine systemneutrale Kopplung nur eine Anpassung auf eine neutrale Definition. Bei den meisten CAD-Systemen stehen die Graphikschnittstelle, die Schnittstelle zum CA-Datenformat sowie bei offenen Systemen eine prozedurale Schnittstelle für den Datenaustausch zur Verfügung. Die Problematik des Modelldatenaustausches liegt darin, daß jedes System für einen bestimmten Einsatzzweck ausgelegt und optimiert ist und daher die Art und Anzahl der Datenelemente der jeweiligen Systeme sehr unterschiedlich sind. Ein CAD-System weist eventuell Daten auf, die in einem anderen überhaupt nicht vorgesehen sind, wodurch eine Abbildung dieser Daten bei einer direkten Schnittstelle nicht möglich ist.

Schnittstellen zwischen CAD-Systemen

Initial Graphics Exchange Standard (IGES) wurde 1979 im Zeitalter der Lochkarten von den Firmen Boeing und General Electric im Auftrag des National Bureau of Standards (NBS) in den USA erarbeitet und fand 1981 Eingang in die US ANSI-Norm Y14.26M. In seiner Grunddefinition ist IGES ein Standard zur Übertragung von Zeichnungsdaten in eine Datei im ASCII-Format, in der Linien, Texte und mittlerweile auch 3D-Flächen- und Volumenmodelle nummeriert enthalten sind.

Standard d'Exchange et de Transfert (SET) wurde als europäischer Standard erstmalig 1984 vorgestellt. Wesentliche Zielsetzung war, neben der Beseitigung von Fehlern aus IGES, das Ablegen aller, in verschiedenen CAD-Systemen vorkommenden Daten, in einer Datenbank mittels einer sequentiellen ASCII-Datei mit unterschiedlichen Strukturstufen (Baugruppe, Unterbaugruppe, Block). Trotz vieler Verbesserungen und einer flexiblen Gestaltung der Schnittstelle findet dieser Standard nur lokal in Frankreich Einsatz, überwiegend in der dortigen Luftfahrtindustrie.

Die Schnittstelle VDA-FS (Verband der Automobilhersteller - Flächenschnittstelle) definiert aufgrund der Komplexität der anderen Schnittstellen bewußt nur den Standard für den Flächenaustausch. Zu Beginn wurden nur wenige Elemente zugelassen. Inzwischen dehnen sich die VDA-Definitionen auf andere Geometrieelemente aus,

entsprechend den Elementen und Untergruppen des IGES-Standards. Bedingt durch die nationale Institution VDA beschränkt sich die Verbreitung auf den deutschsprachigen Raum

STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data) ist als ISO-Norm 10303 veröffentlicht. Es werden nicht nur Produktmodelldaten definiert sondern auch Beschreibungs-, Implementierungs- und Testverfahren sowie die Gesamtstruktur des Standards. Der Standard Pro-STEP findet oftmals Einsatz bei der CAD-FE-Kopplung.

Produktivitätserhöhung durch Datenorganisation und -eingabe

Mit Hilfe der Ebenentechnik lassen sich Daten strukturieren und bei Bedarf ein- oder ausblenden. Durch eine Trennung von z.B. Geometrie, Dimensionierung, Text- und Oberflächenzeichen sowie Schraffur läßt sich die Übersichtlichkeit erhöhen. Jedoch steigt mit den zur Verfügung stehenden Ebenen auch die Komplexität des Datenmodells, was wiederum die Verarbeitungsgeschwindigkeit senkt.

Unter der Makrotechnik versteht man die Zusammenfassung von interaktiven Systembefehlen zu einem Satz von Befehlen, einem sogenannten Makro. Durch Befehls- oder Zeichenmakros (Templates, Pattern, etc.) läßt sich die Modellerstellung beschleunigen, das Teilespektrum standardisieren, Betriebsnormen in das CAD-System integrieren oder sogar die Zeichnungserstellung automatisieren. Erzeugt werden die Makros durch eine Protokolldatei oder durch Programmierung. Durch eine Parameterabfrage vor der Ausführung lassen sich auch variable Geometrien und Teilefamilien erzeugen.

Prozedurale Schnittstellen

Im Gegensatz zu den Schnittstellen zwischen den CAD-Systemen, die Ergebnisdaten austauschen, besteht mit einer prozeduralen Schnittstelle oder API (Application Programming Interface) die Möglichkeit, allgemeine Beschreibungs- oder Erstellungsvorschriften zu übertragen. Je nach Funktionsumfang lassen sich funktionale Erweiterungen der Basis-CAD-Software schreiben. Die Implementierung dieser APIs ist herstellerspezifisch. Der große Vorteil besteht darin, eine sehr effektive Datenkopplung zu erreichen, jedoch ist der Erstellungs- und Pflegeaufwand hoch. Eine Anwendung ist die Erstellung von Norm- und Wiederholteilen mittels einer API, welche die systemneutrale Beschreibung einfacher Geometrien ermöglicht. Als Beispiel ist die Schnittstelle VDA-PS zu nennen, mit der im Zusammenhang mit den Normen DIN 4000 und 4001 (Teilekategorien und Sachmerkmalleisten) Bauteile auf systemneutrale Weise (Geometrie) beschrieben und dann im jeweiligen CAD-System erzeugt werden können. Weitere Möglichkeiten Teilebibliotheken zu erstellen, bieten auch IGES und STEP mit entsprechenden prozeduralen Schnittstellen.

Bewertung von Schnittstellen

Die herkömmlichen CAD-Schnittstellen mit ihren geometrischen Daten können den Forderungen einer zunehmenden digitalen Produktentwicklung im Sinne von DMU (Digital Mock-up) allein nicht mehr genügen. Immer mehr werden auch produktbe-

schreibende Informationen aus dem betriebswirtschaftlichen Umfeld wie Materialeigenschaften oder Stücklisten benötigt, womit sich der Zwang zur Verknüpfung oder besser Integration von technischen und kommerziell geprägten Sichten verstärkt. Die Integration aller technischen Sichten wird in [60] erläutert.

3.4.2 Produkt-Daten-Management-Systeme

Produkt-Daten-Management-Systeme (PDM) sind eigentlich Datenverwaltungssysteme, die sich dadurch entwickelt haben, daß eine Vielzahl an Daten in allen Bereichen eines Unternehmens während der Produktentwicklung entstehen. Diese Daten werden kopiert und verändert, so daß eine elektronische Versionsverwaltung möglich ist [58].

Datenbanksysteme werden in einzelnen Unternehmensbereichen schon seit längerer Zeit eingesetzt, jedoch besteht die Forderung an PDM-Systeme, diese vereinzelten Datenbanken und -systeme zusammenzuführen, um die Kommunikation zu ermöglichen, zu vereinfachen und zu kontrollieren.

Zur Realisierung der verschiedenen Anforderungen entstanden vier Datenbanktypen. Die relationale Datenbank ist der am häufigsten vorkommende Typ bei Datenbanksystemen. Sie stellt sich dem Anwender in Form von zweidimensionalen Tabellen dar. Die Datenhaltung erfolgt in einfachen Tabellen. In netzwerkartigen Datenbanken tragen die Beziehungen zwischen den Daten semantische Informationen. Im hierarchischen Datenbankmodell als Sonderfall der netzwerkartigen Datenbank wird die Datenstruktur als Baum dargestellt. Objektorientierte Datenbanken besitzen eine größere Ausdrucksfähigkeit hinsichtlich Typendefinition und Datenabstraktion, die von den objektorientierten Programmiersprachen herrührt. SQL (Structured Query Language) ist die Abfrage- und Manipulationssprache für ein relationales Datenbanksystem, die sich zu einem Quasi-Standard entwickelt hat.

Definition einiger Datenbankbegriffe

Als Objekte bezeichnet man in diesem Zusammenhang konkrete Gegenstände, wie z.B. eine Schraube. Ähnliche Objekte mit geringfügigen Abweichungen bezeichnet man als Ausprägungen oder Instanziierung dieses Objektes. Attribute sind kennzeichnende Eigenschaften eines Objekts. Objektgruppen mit ähnlichen Attributsätzen werden als Klassen bezeichnet. Ein Merkmal ist eine bestimmte Eigenschaft, die zum Beschreiben und Unterscheiden von Gegenständen einer Gruppe dient. Als Sachmerkmal hingegen bezeichnet man Merkmale, die Gegenstände unabhängig vom Umfeld beschreiben (Merkmalsausprägungen). Beziehungen beschreiben die Zuordnung von Objekten untereinander. Relationsmerkmale sind Merkmale, die eine Beziehung von Gegenständen zu ihrem Umfeld kennzeichnen, wie z.B. Herstellungskosten, Bestellmenge, etc.

3.4.3 Objektorientierte Programmiertechniken

Objektorientierter Ansatz

Die Idee der Objektorientierung ist über 25 Jahre alt und fast ebenso lange liegt die Entwicklung objektorientierter Programmiersprachen zurück. Während es am Anfang nur Publikationen zur objektorientierten Programmierung gab, erschienen die ersten Bücher über objektorientierte Analyse- und Designmethoden erst Anfang der 90iger Jahre. Beim objektorientierten Ansatz handelt es sich um ein Konzept, das zu einer bestimmten Lösungsweise von Problemen führt. Laut einer Definition von Meyer [61] sind die folgenden Elemente Voraussetzung für den objektorientierten Ansatz:

- Modularisierung bedeutet die optimale Zerlegung eines Systems,
- Datenabstraktion: Beschreibung von Datenstrukturen durch ihre Operationen,
- Klassen: Alle Werte (Objekte) werden als Instanzen eines Typs oder einer Klasse betrachtet, zwischen den einzelnen Klassen besteht eine Beziehung,
- Vererbung: Unterklassen besitzen alle Eigenschaften der Oberklasse, ausgenommen eine Eigenschaft wird für die Unterklasse neu definiert,
- Polymorphie: Eigenschaft, die erlaubt, daß sich zur Laufzeit des Programms Operationen automatisch an die Klasse (oder den Typ) ihrer Operanden (oder Parameter) anpassen. Hierfür wird auch der Ausdruck „dynamisches Binden“ verwendet.

Ähnlich wie bei der strukturierten Programmierung, bei der das Attribut „strukturiert“ zuerst auf der Programmierebene verwendet wurde und erst später bei Entwurf und Analyse, entwickelten sich die Begriffe objektorientierte Programmierung (OOP), objektorientierter Entwurf (OOD, engl.: Design) und objektorientierte Analyse (OOA) historisch in dieser Reihenfolge.

Objektorientierte Programmierung

Objektorientierte Programme werden nicht nur strukturiert in Prozeduren, Funktionen und Unterprogramme sondern zusätzlich in Objekte und Klassen unterteilt, wobei Objekte mittels ihrer Operationen (Methoden) miteinander kommunizieren. Eigenschaften der Objekte und Operationen werden durch die Klassenhierarchie bestimmt. Von den heute existierenden, objektorientierten Programmiersprachen sind nur wenige rein objektorientierte Sprachen, wie z.B. Smalltalk. Der Hauptvorteil der reinen Objekt-orientierung liegt in der größeren Allgemeinheit, wobei ein Gewinn an Allgemeinheit und Flexibilität meist mit einem Verlust an Effizienz verbunden ist. Sprachen, in denen Objekte und konventionelle Daten nebeneinander existieren, werden als hybrid bezeichnet. Der Hauptvorteil einer Hybridsprache besteht darin, daß elementare Daten und Objekte im Speicher verschieden dargestellt werden. Während eine Objektvariable eine Referenz (üblicherweise einen Zeiger von Wortlänge) auf das eigentliche Objekt enthält, kann eine Variable eines elementaren Datentyps den Wert selbst enthalten. Während bei einem Objekt immer ein indirekter Zugriff auf die eigentlichen

Daten erforderlich ist, kann auf elementare Daten direkt zugegriffen werden. Objekte müssen in der Regel dynamisch erzeugt werden. Bei elementaren, statischen Daten ist dies nicht erforderlich, weil ihr Speicherplatzbedarf und ihre Adresse schon zur Übersetzungszeit feststeht. Ein weiterer Vorteil der Hybridsprachen ergibt sich daraus, daß die elementaren Datentypen keinen Polymorphismus zulassen. Der Compiler kann also voraussetzen, daß eine als „Integer“ deklarierte Variable auch immer einen Integer-Wert enthält. Er kann daher auf dynamische Bindung verzichten und sogar Optimierungen für häufig vorkommende Konstruktionen (wie z.B. die Anweisung $i := i + 1$) vornehmen.

In rein objektorientierten Sprachen sind alle Daten Objekte, daher müssen auch für alle mit ihnen erlaubten Operationen Methoden zur Verfügung gestellt werden. Selbst arithmetische Operationen müssen mit Hilfe von „Messages“ aktiviert werden. In Hybridsprachen besteht die Wahl zwischen konventionellen und objektorientierten Sprachmitteln, womit man vor der Entscheidung steht, welches Denkmodell in welcher Situation eingesetzt werden soll. In rein objektorientierten Sprachen entsteht hingegen fast automatisch eine objektorientierte Lösung, da der Einsatz konventioneller Teillösungen erschwert, wenn nicht gar unmöglich gemacht wird. Jedoch liegt bei objektorientierten Sprachen die Schwierigkeit darin, die Zahl der Objekte zu begrenzen [62].

Die meisten Hybridsprachen sind objektorientierte Erweiterungen konventioneller Sprachen. Vorteilhaft bei diesen Sprachen ist, daß sie für einen bereits in der Basissprache versierten Programmierer leicht zu erlernen sind. Beispiele für Hybridsprachen sind Object-Pascal und C++, mit der die objektorientierte Programmierung erst weltweit Beachtung fand, obwohl das Prinzip 10 Jahre vorher schon bekannt war. Mitte der Achtziger wurde von Stroustrupp bei AT&T Bell Laboratories die Programmiersprache C++ entwickelt. Ziel war es, die eingeführte Programmiersprache C zu verbessern und die Aufwärtskompatibilität von C nach C++ zu erhalten [63].

Objektorientierter Entwurf

Beim objektorientierten Entwurf geht es darum, ein System so zu zerlegen, daß eine Struktur von Klassen und Objekten entsteht. Dabei hängt die Vorgehensweise sehr stark davon ab, in welchem Aspekt des Systems (Datenbeziehungen, Verarbeitungsschritte) sich das größere Maß an Komplexität manifestiert. Sinnvoll ist, in einem ersten Schritt eine Liste von noch unpräzisen Objekten und Klassen zu erstellen, sowie deren Attribute, Beziehungen untereinander und die erforderlichen Operationen zu spezifizieren. Ähnlich erscheinende Operationen werden vereinfacht oder verallgemeinert, so daß sie zu Merkmalen einer Klasse werden, womit die Anzahl der Klassen im Sinne einer stabilen Lösung reduziert oder vergrößert wird. Da der Programmentwurf in der Regel im Kontext einer bestehenden Klassenstruktur entsteht, sind diese Klassen frühzeitig zu berücksichtigen. Ihre (Wieder-)Verwendung, auch durch Spe-

zialisierung mittels Vererbung, ist ein zentrales Merkmal beim objektorientierten Entwurf. Im folgenden wird dies im Kontext mit der Microsoft Foundation Class (MFC) nochmals verdeutlicht [64]. Das ideale Ergebnis des objektorientierten Entwurfs ist eine Zweiteilung der Klassenstruktur in anwendungsspezifische Klassen und Standardklassen. Beide sind nur miteinander verknüpft über Relationen, die für ihr Verhalten relevant sind.

Der objektorientierte Ansatz fördert ganz eindeutig die Produktzuverlässigkeit eines Programms, da von Bausteinen und Klassen Gebrauch gemacht wird, die sich bereits als fehlerfrei erwiesen haben [65].

Programmiersprache Visual C++

Das Developer Studio ist eine Windows gestützte integrierte Entwicklungsumgebung, die von Visual C++ (VC++) genutzt wird und in der Quelltext, Compiler- und Linkerangaben sowie der Arbeitsbereich mit sämtlichen Dateien strukturiert dargestellt sind. Damit erfährt die Programmiersprache C++ eine einfachere Handhabung. Ein Projekt, als zentraler Begriff, ist eine Sammlung von miteinander verknüpften Quelldateien, die zu einem ausführbaren Windows-Programm oder einer DLL (Dynamic Link Library) kompiliert und gelinkt werden können. In Bild 3.38 ist ein Projekt mit seinen Teilbereichen beispielhaft dargestellt.

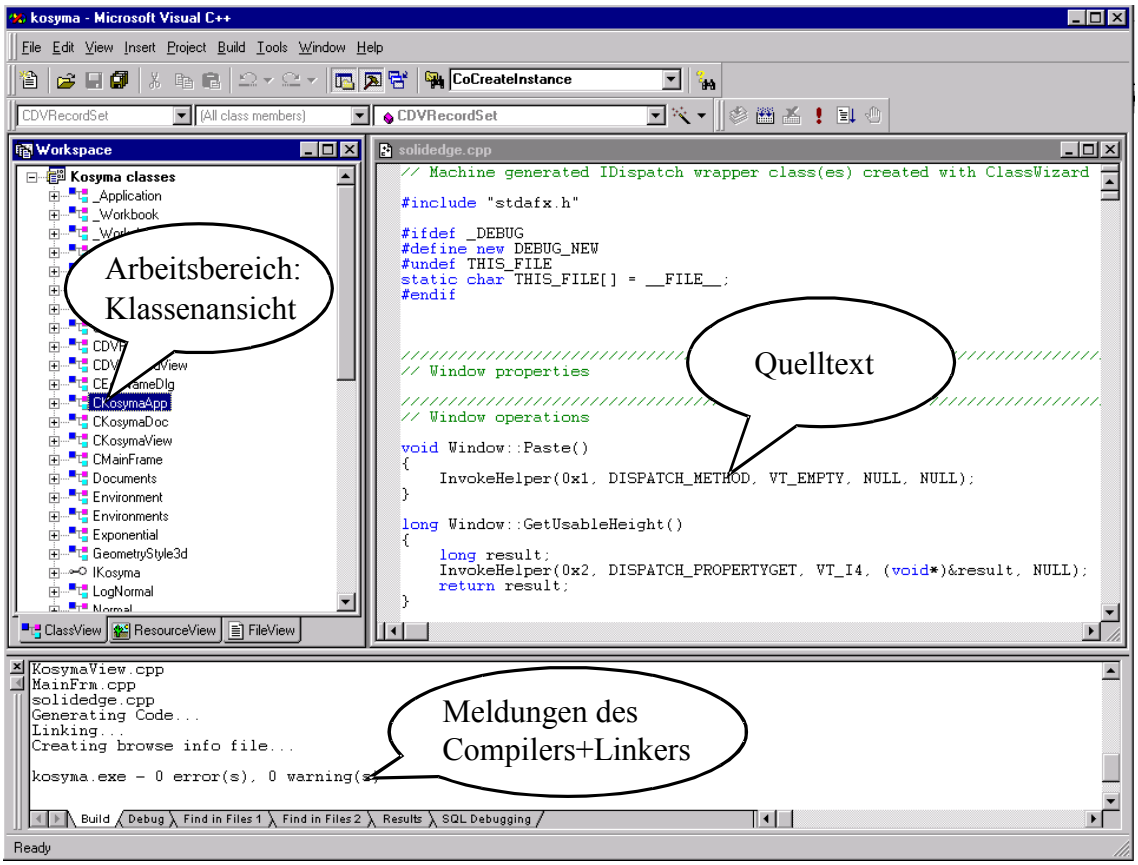


Bild 3.38: Developer Studio und Visual C++

Bild 3.39 zeigt eine Übersicht über den VC++ Anwendungserstellungsprozeß. Hauptvorteil bei der Verwendung von VC++ im Developer Studio ist das Microsoft Foundation Class (MFC) Anwendungsgerüst, das über eine Standardstruktur verfügt.

Im Vergleich zu der Klassenbibliothek ist ein Anwendungsgerüst eine Obermenge einer Klassenbibliothek. Während eine Klassenbibliothek eine bestimmte Menge von Klassen enthält, die darauf ausgelegt sind, in beliebige Anwendungen eingebaut zu werden, liefert ein Anwendungsgerüst die Struktur des eigentlichen Programms.

Die Werkzeuge von VC++ erleichtern die Codierung. Z.B. erstellt der Ressourcen-Editor eine Header-Datei, die bereits alle *#define*-Anweisungen zum Deklarieren von Parametern enthält. Die MFC-Bibliothek enthält bereits eine Fülle von Merkmalen wie z.B. eine C++ Schnittstelle für die Windows-API und die Unterstützung von Multiple Document Interface (MDI) Anwendungen.

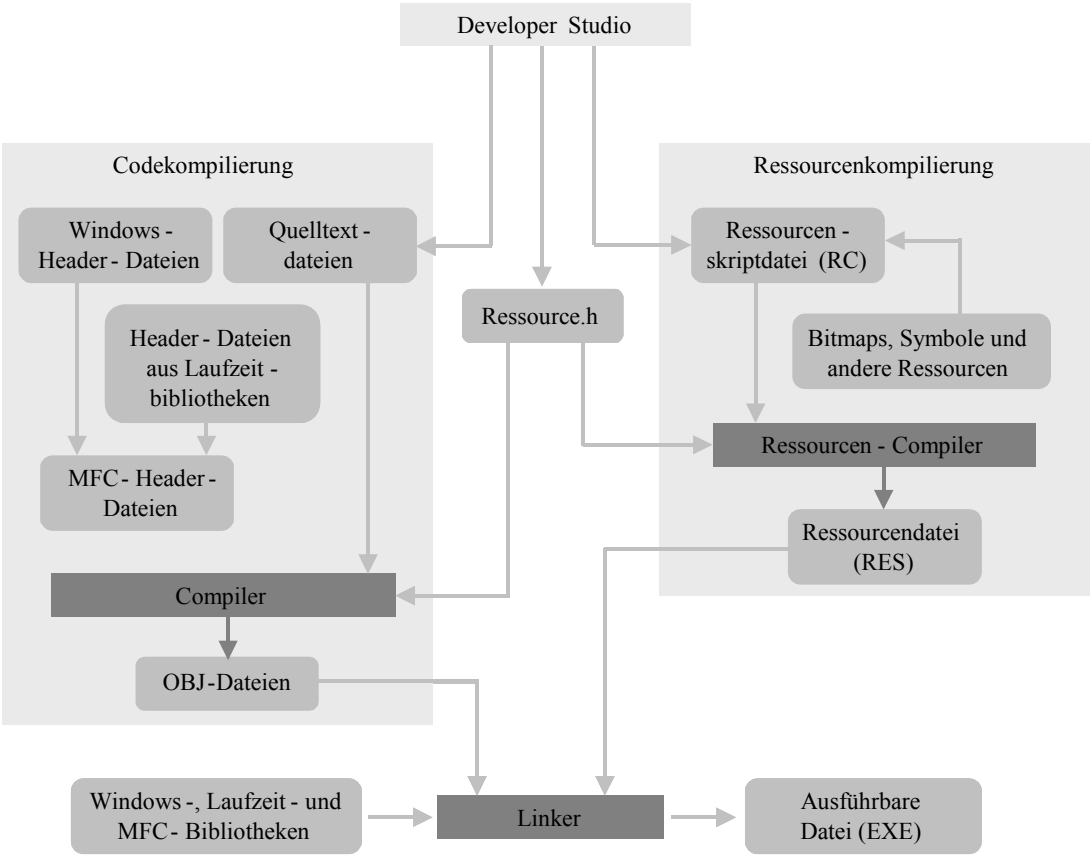


Bild 3.39: Anwendungserstellungsprozeß in Visual C++ mit Unterstützung der MFC

3.5 Kosten der Zuverlässigkeit

Die Anwendung der qualitativen und quantitativen Methoden der Zuverlässigkeitstechnik verursacht, wie jede andere Aktivität im Unternehmen, Kosten. Durch Vermeidung bzw. Verringerung von Ausfällen führt der Methodeneinsatz zu Kostensenkungen. Analog zu der Einteilung der Qualitätskosten in Fehlerverhütungskosten,

Prüfkosten und internen bzw. externen Fehlerkosten können die Zuverlässigkeitskosten, wie in Bild 3.40 dargestellt, aufgeteilt werden [66]. Des weiteren können diese Unterarten der Zuverlässigkeitskosten den Phasen des Produktentstehungsprozesses zugeordnet werden [67].

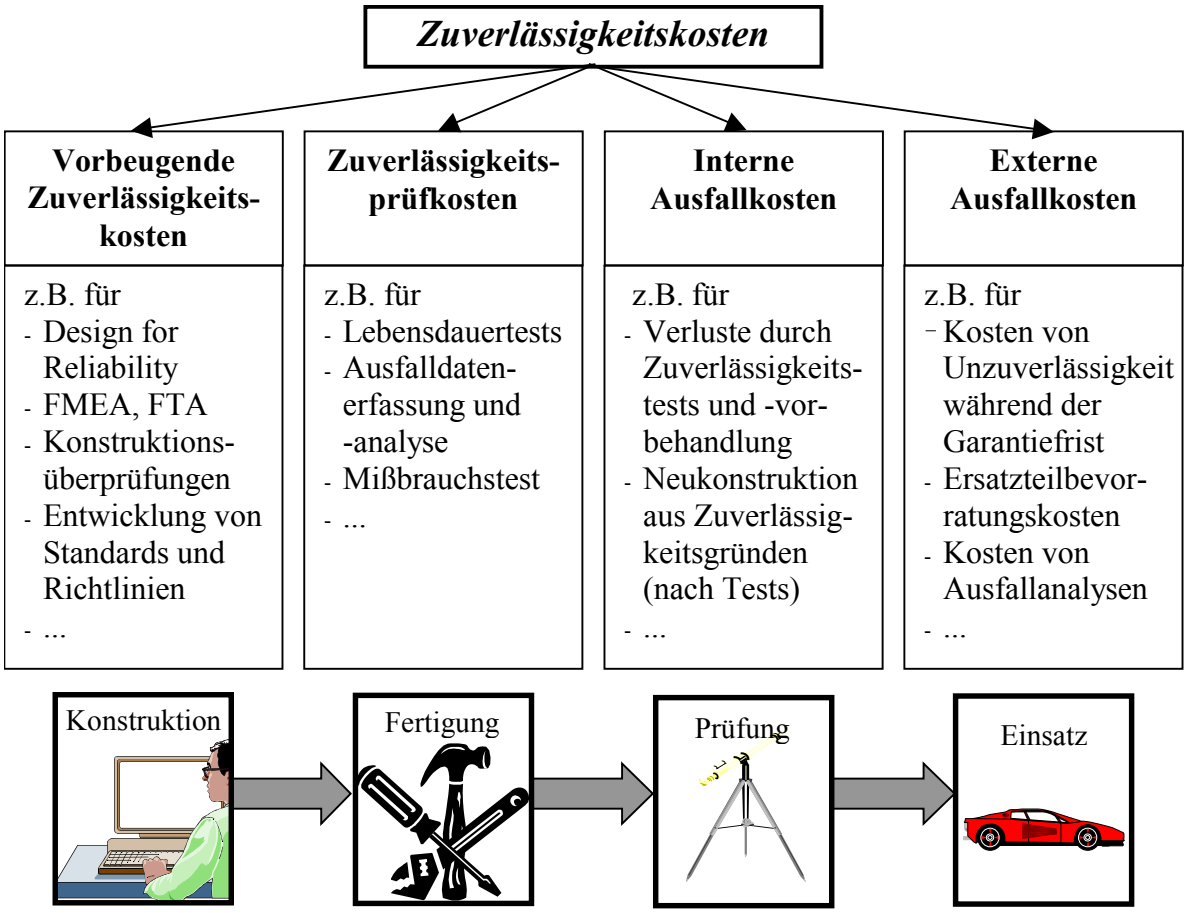


Bild 3.40: Aufteilung und Phasenzuordnung der Zuverlässigkeitskosten

Kececioglu setzt voraus, daß jedes Produkt eine optimale Zuverlässigkeit bei einem minimalen Herstellpreis besitzt [68]. Dieses Optimum der Zuverlässigkeit leitet sich aus den minimalen Gesamtkosten des Herstellers ab, Bild 3.41.

Die Kosten vor Auslieferung beinhalten Entwicklung, Forschung, Konstruktion, Herstellung und Gemeinkosten. Die Kosten vor Auslieferung steigen mit zunehmender Zuverlässigkeit, da eine intensivere Entwicklung nicht nur eine höhere Zuverlässigkeit sondern auch höhere Kosten zur Folge hat.

Die Kosten nach der Auslieferung des Produkts beinhalten Logistik, Installation, Garantie und Kulanz. Die Kosten nach der Auslieferung sinken mit zunehmender Zuverlässigkeit, da eine höhere Zuverlässigkeit gleichbedeutend mit geringeren Ausfällen ist.

Aus diesen zwei Kostenarten ergeben sich additiv die Gesamtkosten und der Verkaufspreis des Herstellers. Wie in Bild 3.41 ersichtlich ist, weisen beide Kurven ein

Minimum auf. Der dazugehörige Zuverlässigkeitswert wird als optimale Zuverlässigkeit R_{OM} für einen minimalen Herstellerpreis bezeichnet. Mit von R_{OM} abweichenden Zuverlässigkeitswerten wird das Kostenoptimum nicht erreicht.

Kececioglu stellt Erweiterungen dieses Modells dar, in denen weitere Größen wie z.B. Instandhaltbarkeit mit einbezogen werden oder die optimale Zuverlässigkeit aus anderen Sichtweisen (z.B. Käufer) betrachtet wird [68].

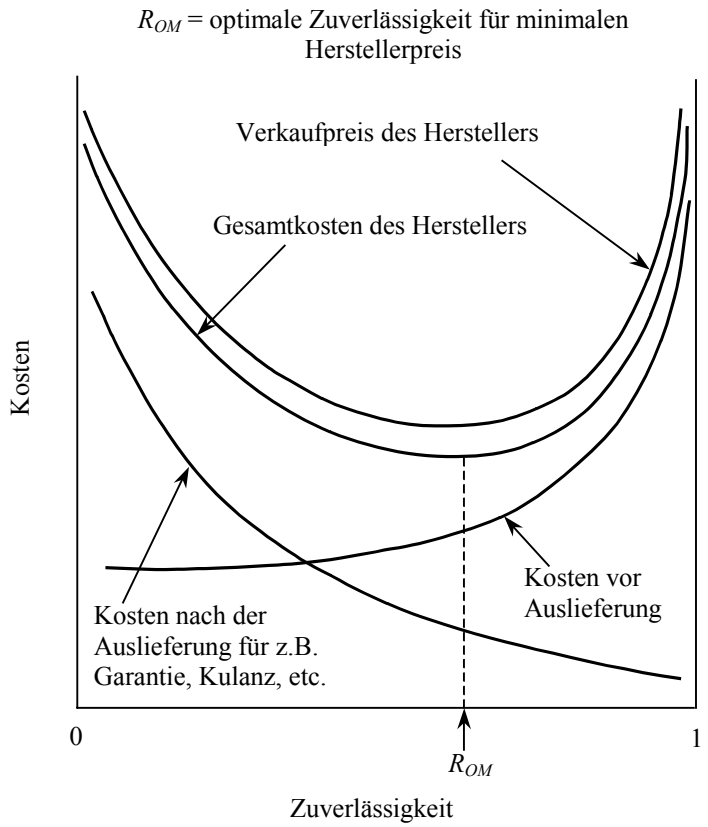


Bild 3.41: Optimale Zuverlässigkeit aus Sicht des Herstellers

Den Zielkonflikt zwischen der Minimierung des kostenverursachenden Einsatzes von Zuverlässigkeitsmethoden und der Maximierung fehlerfreier Produkte gilt es zu lösen. Als zweiter Aspekt kommt hinzu, daß auf Basis durchgeführter Zuverlässigkeitsanalysen, nicht nur die unzuverlässigsten Elemente optimiert werden können, sondern zusätzlich die zuverlässigsten Bauteile ein gewisses Kosteneinsparpotential in sich bergen. Auf diesen Aspekt wird in Kapitel 5.4 eingegangen. Die beispielhafte Kostenreduzierung auf Basis einer Zuverlässigkeitsanalyse folgt in Kapitel 6.5.

4 Analyse und Entwurf eines CAD-integrierten Zuverlässigkeitsinformationssystems

Dieses Kapitel beginnt mit der Untersuchung des CAD-Systems Solid Edge hinsichtlich der Integrationsmöglichkeiten seiner Daten. Die Analyse der möglichen Integration von CAD- und Zuverlässigkeitsdaten sowie die Beschreibung der Datenübergabe mittels Programmiersprachen und Schnittstellen in eine gemeinsame Datenbasis schließen sich an (Kapitel 4.1). Darauf aufbauend folgt die Untersuchung der in Kapitel 3.1 vorgestellten Konstruktionsphasen hinsichtlich ihrer Eignung, in diesem CAD-System dargestellt zu werden (Kapitel 4.2).

Ein Schwerpunkt dieses Kapitels liegt in der Beurteilung der für die Zuverlässigkeitsmethoden relevanten Daten und deren Zuordnung zu den Konstruktionsphasen (Kapitel 4.3). Aufbauend auf dieser Datenbasis kann die CAD-integrierte Anwendung der gängigen qualitativen und quantitativen Zuverlässigkeitsmethoden erfolgen. Zusätzlich wird untersucht, inwieweit die Zuverlässigkeitsanalysen den jeweiligen im CAD-System abbildbaren Entwicklungsphasen zugeordnet werden können (Kapitel 4.4). Abschließend folgt der Entwurf der dafür notwendigen Programmodule (Kapitel 4.5).

4.1 Ausgangspunkt CAD-System

4.1.1 Das CAD-System Solid Edge

In Kapitel 3.4.1 wurde der Stand der Forschung und Technik der CAD-Systeme sowie derer Schnittstellen vorgestellt. Das auf Windows NT basierende CAD-System Solid Edge legt die Methoden und Eigenschaften seiner Objekte für den Zugriff von einer anderen Software aus offen. Dies ist eine notwendige Bedingung für die vorliegende Arbeit. Die Wahl des CAD-Systems wurde bereits in der Vorgängerarbeit getroffen [6].

Solid Edge ist ein unter dem Betriebssystem Windows NT auf PC-Plattform lauffähiges sogenanntes „Midrange“ CAD-Programm, das hauptsächlich bei mittelständischen Unternehmen eingesetzt wird. Der ursprüngliche Entwickler Intergraph war federführend bei der Einführung der auf OLE basierenden CAD-Systeme. Die OLE/COM-Technologie, die Basis aller Microsoft-Programme ist, bietet die Möglichkeit, programmübergreifend Daten auszutauschen. Mit der Übernahme des Mechanik-CAD-Bereiches von Intergraph durch Unigraphics Solutions (UGS) wurde auch die Integration des Parasolid-Kerns von UGS vollzogen. Der Wechsel vom ACIS-Kern von Spa-

tial Technology zu Parasolid wurde mit der Version 5.0 im Juli 1998 durchgeführt [69]. Mit den Versionen 6 und 7, letztere erschien im August 1999, wurde der Begriff „Stream Technologie“ eingeführt, der die Besonderheiten der einfachen Bedienung (wenige Befehle) und Erlernbarkeit (einfache Oberfläche) eines auf dem Windows-Betriebssystem basierenden CAD-Systems betont [70] - [71].

Viele CAD-Systeme (Solid Edge, Solid Works, AutoCAD, Unigraphics und ME10) unterstützen in ihrer Windows-Version die speziellen Eigenschaften des Microsoft-Betriebssystems. Die auf den Betriebssystemen Linux und Unix laufenden CAD-Systeme verfügen hingegen nicht oder nur eingeschränkt über die Möglichkeit zur OLE-Integration, Cut&Paste- und Drag&Drop-Funktionalitäten [72]. CORBA (Common Object Request Broker Architecture) ist beispielsweise ein Konzept um Anwendungen plattformübergreifend und unabhängig vom Betriebssystem zu verbinden [73].

4.1.2 Daten des CAD-Systems

Datenverwertung aus dem Lastenheft

Abhängig von der jeweiligen Konstruktionsphase können mit dem CAD-System Solid Edge verschiedene Daten erstellt werden. Zu Beginn der Konzeptphase stehen lediglich die Vorgaben aus dem Lastenheft zur Verfügung. Hier ist nun zu analysieren, welche Lastenheftdaten für das rechnergestützte Konstruieren relevant sind, wie z.B. zulässiger Bauraum, Konzeptvorgaben, Gewichtsvorgaben, etc. und wie diese Daten in das CAD-System einfließen können (siehe auch Kapitel 4.3).

Daten des CAD-Systems

Das verwendete CAD-System Solid Edge ist ein dynamischer Modellierer mit Formelementen, sogenannten Features, wie z.B. Bohrungen, Fasen, Rundungen etc. (siehe auch Kapitel 3.4.1). Die Erzeugung eines räumlichen Körpers (Solids) erfolgt dadurch, daß man aus einem zweidimensionalen Profil die Ausprägung in die dritte Dimension wählt. Das Profil kann direkt in der dreidimensionalen Part-Umgebung gezeichnet werden oder in der zweidimensionalen Draft-Umgebung und dann in die dreidimensionale Part-Umgebung übernommen werden. Die Entstehungsgeschichte in ihrer Reihenfolge kann mittels des „Feature PathFinder“ des CAD-Programms verfolgt werden, wobei die ausgeführten Features produktspezifisch umbenannt werden können, wie z.B. in Bild 4.1. Dadurch lassen sich die Einzelteile eines Systems besser und übersichtlicher darstellen und bearbeiten. Zusätzlich kann der jeweilige Konstrukteur den zeitlichen Konstruktionsablauf in den Dateieigenschaften mit den jeweiligen Bearbeitungsschritten datumsbezogen festhalten.

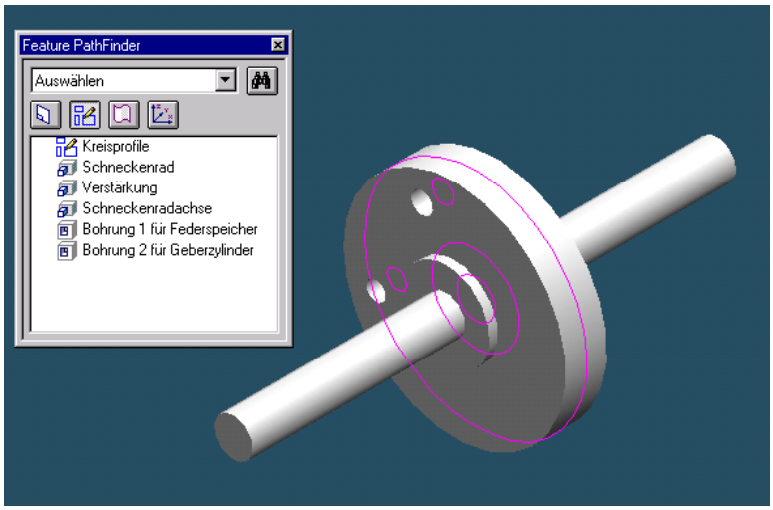


Bild 4.1: Schneckenrad und Achse inklusive Features (Eigenschaften) als Einzelteil

In der „Assembly-Umgebung“ werden die Einzelteile zusammengefügt, Bild 4.2. Zuvor können auch Baugruppen, sogenannte „Subassemblies“, erstellt werden, die wiederum in die endgültige Zusammenbauzeichnung eingefügt werden. Auf diese Weise entsteht eine Strukturstückliste des technischen Systems, in der sowohl aussagekräftige Bezeichnungen als auch Sachnummern der jeweiligen Einzelteile oder Baugruppen stehen können. Auf diese Strukturstückliste und auf die einzelnen Komponenten kann wiederum über die Programmierschnittstelle von anderen Anwendungen aus zugegriffen werden. Ein Beispiel für eine Zusammenbauskizze in der Konzeptphase eines Produktentstehungsprozesses stellt Bild 4.2 dar.

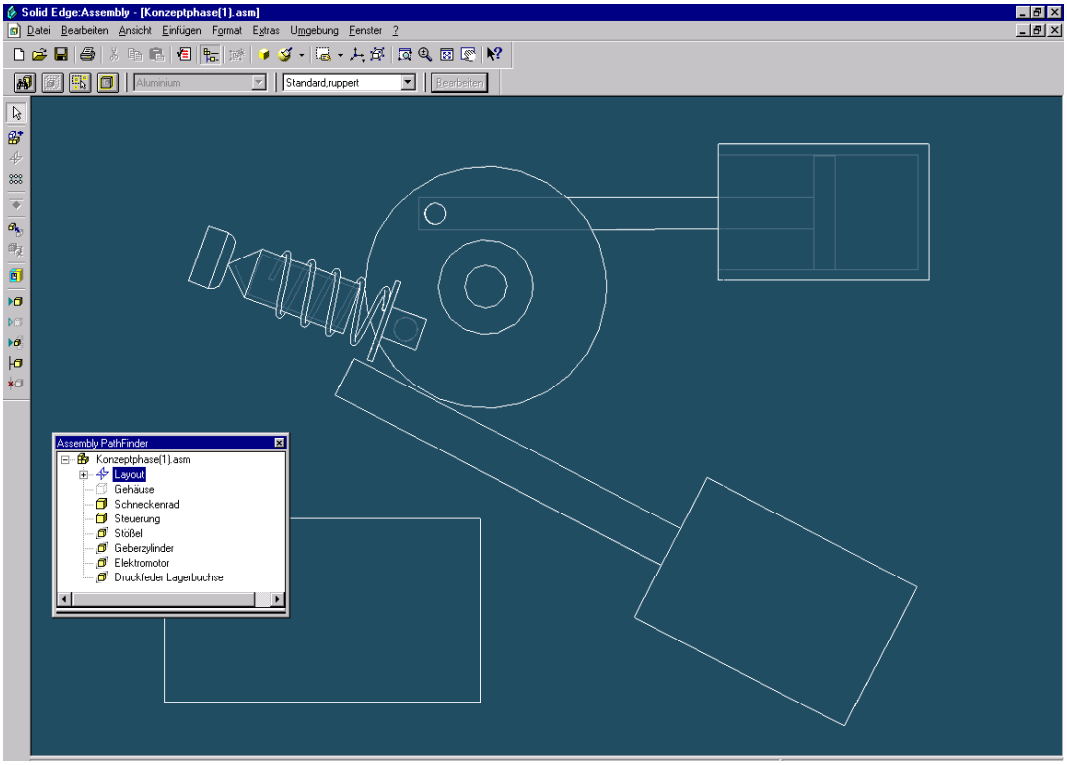


Bild 4.2: Konzepterstellung im CAD-System

Geometrische Daten

Schon bei der Erstellung von Profilen werden dessen beschreibende Daten angelegt. Die geometrischen Daten eines Körpers, d.h. die Bemaßungsbeziehungen werden in einer Tabelle abgelegt. Zusätzlich kann der Konstrukteur Variablen definieren, die durch Formeln bestimmt werden können. Dieses Steuern von Werten (Parametrik) kann mittels mathematischer Standardfunktionen des CAD-Systems oder durch benutzerdefinierte Beziehungen erfolgen. Letztere werden praktischerweise in einer MS Excel-Tabelle erstellt, die mit dem CAD-System gekoppelt wird, Bild 4.3.

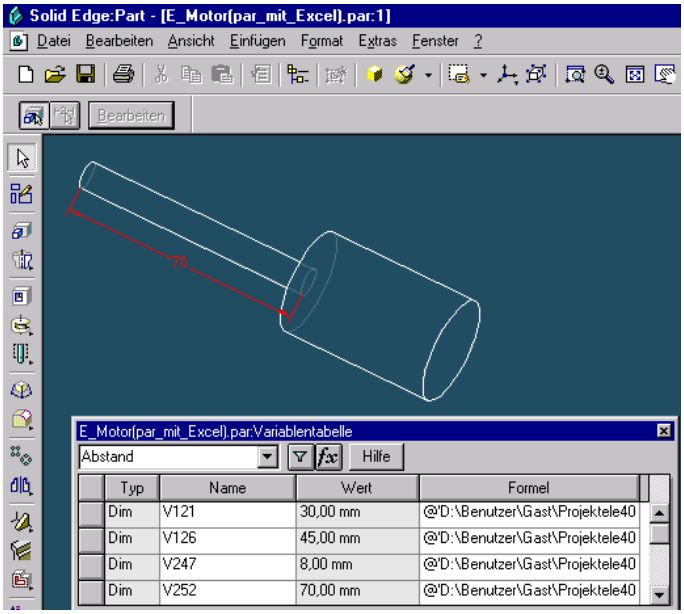


Bild 4.3: Variablensteuerung des geometrischen Modells

Zu der Grobskizze eines elektronischen Motors werden die Hauptabmessungen in einer MS Excel-Tabelle abgelegt. Die Hauptabmessungen können wiederum über eine externe Tabelle als Variablen abgelegt sein. Derart kann der Körper von „außen“ über eine Werteingabe gesteuert werden, Bild 4.4. Auf die geometrischen Daten kann dann über die Programmierschnittstelle des CAD-Systems, die weiter unten beschrieben wird, zugegriffen werden.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die strukturellen und geometrischen Daten des CAD-Systems zwar die Grundlage für eine Zuverlässigkeitsanalyse bilden, also notwendig sind, jedoch keinesfalls hinreichend für eine adäquate Anwendung der Zuverlässigkeitsmethoden aus Kapitel 2.

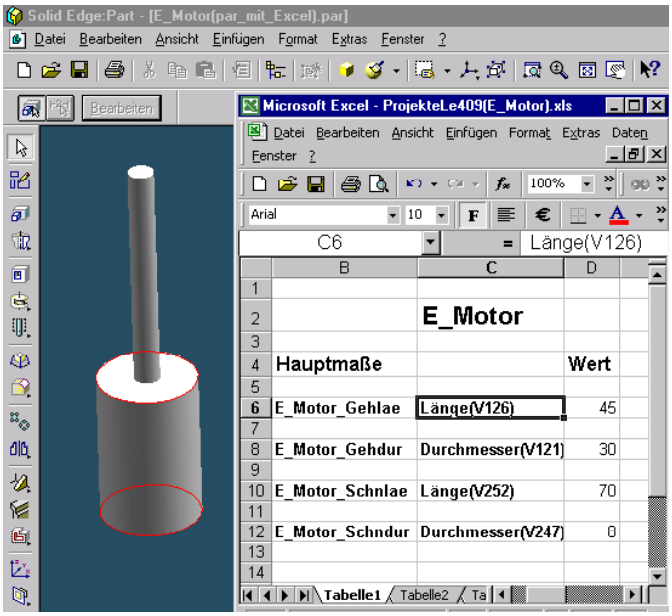


Bild 4.4: Steuerung des CAD-Modells mittels MS Excel

4.1.3 Programmierschnittstelle des CAD-Systems

OLE for Design and Modelling (OLE for D&M)

1993 definierte Microsoft "Interfaces", d.h. Schnittstellen, die auf dem Konzept des Component Object Model (COM) basierten. Einen Aufschwung erhielt diese Technologie mit den populären Office-Anwendungen wie z.B. MS Word oder MS Excel, bei denen die Technik des „Object linking, embedding and in-place-activation" verwendet wird. Damit lassen sich Objekte einer Anwendung mit einer zweiten Anwendung per Drag&Drop verbinden („linking") bzw. in der zweiten Anwendung plazieren („embedding") und aktivieren („in-place-activation"). Bei der Aktivierung tritt die ursprüngliche Anwendung mit ihren Methoden auf, ohne daß der Benutzer zwischen den Anwendungen wechseln muß.

Auch Solid Edge-Objekte (Profile, Skizzen, etc.) lassen sich per Drag&Drop in alle OLE/COM basierenden Office-Anwendungen integrieren. OLE for Design and Modelling (OLE for D&M) ist eine Erweiterung der OLE-Technologie, die Entwurfs- und Modellierdokumente unterstützt. Einer der Hauptvorteile von OLE for D&M ist, daß verschiedene Software-Anwendungen integriert werden können. Dabei erfolgt keine Datenübersetzung. OLE for D&M ermöglicht den Zugriff auf Daten, nicht aber deren Austausch [59].

Die OLE-Automation, als eine Möglichkeit, verbessert diesen manuellen Vorgang, indem die Aktionen im Hintergrund, wie der Name schon sagt automatisiert oder programmiert, ablaufen. In diesem Fall wurde die OLE-Technologie mittels der Schnittstelle „*IDispatch*" verwendet, sowie die gegebenen Methoden und Eigenschaften aus der Microsoft Foundation Class (MFC) eingesetzt. Bild 4.5 zeigt generell die Möglichkeiten, die auf Basis von COM implementiert werden können [74].

Programmierbarkeit bedeutet, daß ein Programm seine Funktionen einem anderen zur Verfügung stellt. Anwendungen können den Zugriff auf ihre Funktionen durch die in ihren COM-Objekten dargestellten Schnittstellen ermöglichen. Jede Software, die in der Lage ist, Methoden eines COM-Objekts aufzurufen, kann dann diese Funktionen verwenden. Es lassen sich Programme schreiben, die alles, was die Benutzer manuell tun, automatisch erledigen. Diese Art allgemeiner Programmierbarkeit unter Verwendung von COM wird OLE-Automation oder Automatisierung genannt. Viele Anwendungen machen mit Hilfe der Automatisierung ihre Funktionen für Clients verfügbar. Mit Hilfe von relativ einfachen, graphisch orientierten Programmierwerkzeugen (Visual Basic, Skriptsprachen, etc.) können z.B. Office-Anwendungen untereinander automatisiert verbunden werden, d.h. eine Anwendung greift auf die Funktionalität einer weiteren Applikation zu.

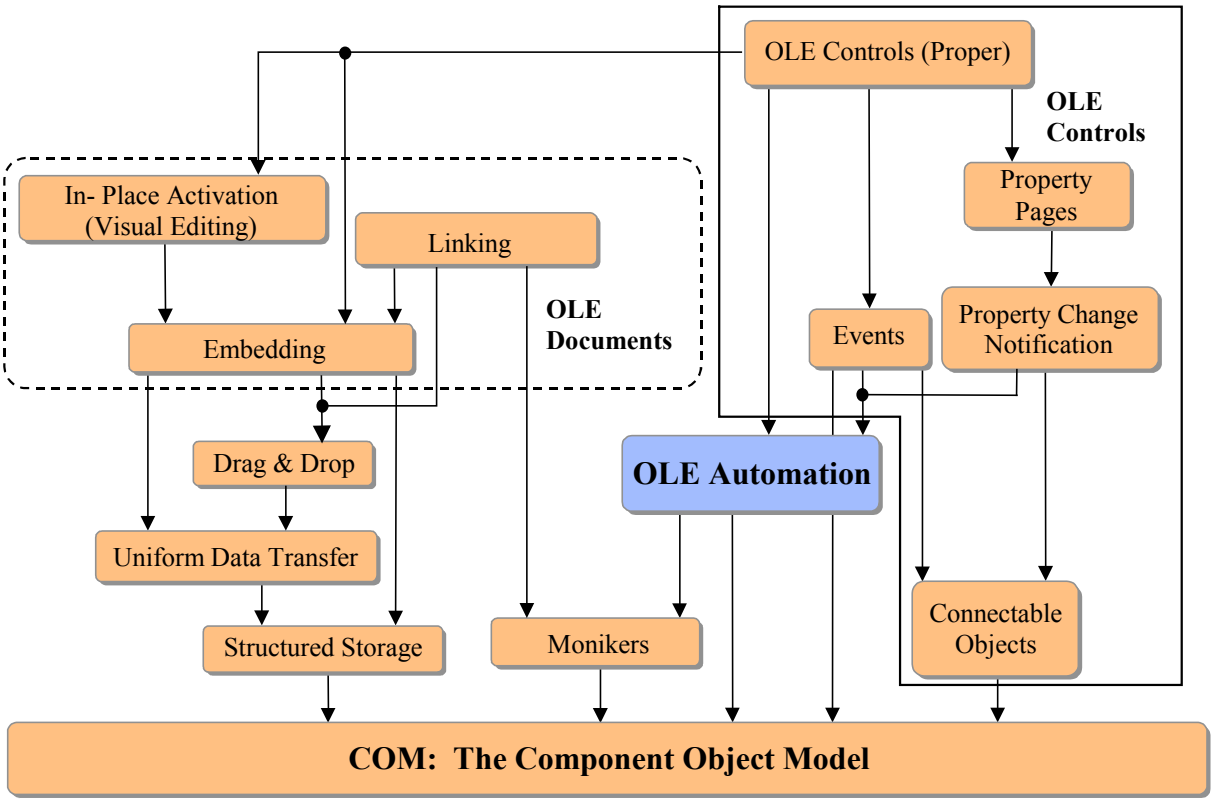


Bild 4.5: COM als Basis für die OLE-Automation [74]

Mit der Standardschnittstelle *IDispatch* werden die internen Funktionen einer Software offengelegt. Sie wird, wie eine normale COM-Schnittstelle, mit Hilfe einer sogenannten „Vtable-Struktur“, d.h. einer Tabelle von Funktionszeigern, implementiert, welche Zeiger auf die Methoden der Schnittstelle enthält. Mit der Methode *Invoke* läßt sich eine beliebige Methode aus einer Gruppe von Methoden aufrufen und ihr alle erforderlichen Parameter übergeben. Zuvor muß jedoch genau angegeben werden, welche Methoden aufgerufen werden können, wofür eine sogenannte Verteilerschnittstelle

(*dispinterface*) definiert werden muß. Mit dem Aufruf *IDispatch::Invoke* werden zunächst alle Methoden des COM-Objektes aufgerufen. Mit der gleichzeitigen Übergabe einer bestimmten Verteiler-ID (*DISPID*) ergibt sich diejenige Methode, die ausgewählt und ausgeführt werden soll.

Der Datenaustausch zwischen Programmen erfolgt seit OLE2 (OLE-Automation) mit dem Uniform Data Transfer UDT (einheitliche Datenübertragung). Dieses Konzept zur Vereinheitlichung des Datenaustausches zwischen und innerhalb von OLE-Objekten ersetzt das komplexere DDE-Verfahren (Dynamic Data Exchange) von OLE1 und bietet somit eine einfachere Möglichkeit, Daten auszutauschen. UDT ist ein Dienst, der von den OLE-Erweiterungen von Microsoft Windows verwendet wird und ermöglicht, daß zwei Anwendungen Daten austauschen, ohne daß deren interne Struktur gegenseitig bekannt ist.

Component Object Model (COM)

Das Component Object Model (COM) definiert ein Standardverfahren, mit dem eine Software-Komponente seine Dienste einer anderen zur Verfügung stellt. COM ist von Microsoft entwickelt worden und wurde ursprünglich in Windows und Windows NT zur Verfügung gestellt. Für andere Betriebssysteme bietet Microsoft keine Unterstützung, jedoch haben andere Hersteller diese Lücke geschlossen, so daß Implementierungen für COM und zahlreiche Technologien auf COM-Basis für ein breites Spektrum von Betriebssystemen zur Verfügung stehen.

COM ist die gemeinsame Grundlage für OLE und ActiveX, mit der die Abstraktionen und Regeln festgelegt werden, die man zur Definition von Objekten und Schnittstellen benötigt. Jede Schnittstelle besitzt eine oder mehrere Methoden, d.h. Funktionen, die vom Client des Objekts aufgerufen werden können. Eine ausführliche Beschreibung von COM im Zusammenhang mit OLE und ActiveX findet sich in [75].

Einen besonderen Stellenwert im COM nimmt die grundlegende Schnittstelle *I-Unknown* ein, aus der alle anderen Schnittstellen durch Vererbung abgeleitet werden und die jedes COM-Objekt in jedem Fall unterstützen muß. Die Methoden dieser Schnittstelle dienen zur Navigation über die von einem Objekt implementierten Schnittstellen sowie zur Verwaltung des Objektlebenszyklusses. Der allgemein lesbare Name der meisten COM-Schnittstellen beginnt mit dem Buchstaben *I*, der für Interface (Schnittstelle) steht. Der zweite eindeutige Name einer COM-Schnittstelle ist ein sogenannter GUID-Wert (Globally Unique Identifier), der die Schnittstelle mit einem IID (Interface Identifier) bezeichnet. Dieser wird mit einem Software-Dienstprogramm erstellt und liefert einen 16-byte-Wert, der sich garantiert von jedem anderen GUID-Wert unterscheidet. Meist werden auch zur eindeutigen Kennzeichnung der Objekte UUID-Werte (Universal Unique Identifier) verwendet, da diese aus dem DCE-Konzept übernommen wurden (Distributed Computing Environment). Die Schnittstelle wird mit Hilfe der Schnittstellendefinitionssprache IDL (Interface Definition

Language) von COM beschrieben, die der Programmiersprache C++ ähnelt, damit sich Objekt und Client in der Verwendung der Methoden und deren Parameter auch verständigen können. Zusammenfassend kann man folgende Aussagen zu Interfaces treffen [74]:

- Interfaces sind keine Klassen und keine Objekte,
- Interfaces sind streng typisiert und unveränderlich.

Jedes COM-Objekt ist die Instanz einer Klasse und jeder Klasse kann ein GUID-Wert, ein sogenannter Klassenbezeichner CLSID (Class Identifier) zugewiesen werden. Damit wird das COM-Objekt in die Registrierdatenbank des Betriebssystems eingetragen. Seit dem Betriebssystem Windows NT 4.0 sind COM-Objekte für mehrere „Threads“ Aktionen) zugänglich. Bei dieser Option, als „Multithreading“ bezeichnet, können mehrere Aktionen gleichzeitig in einem COM-Objekt aktiv sein.

Mit Hilfe von Distributed COM (DCOM) kann ein Client sowohl auf dem eigenen System als auch auf anderen Systemen COM-Objekte erstellen und verwenden. Die wichtigsten Trends in der Software-Entwicklung, wie die Verwendung der Objekttechnologie und die zunehmende Verbreitung verteilter Computersysteme werden durch die Entwicklung von DCOM vereint. Aufgrund der Verbreitung von Microsoft und NT wird diese Technologie sicher weiterentwickelt.

Als bekannteste COM-gestützte Dienstschnittstelle gilt die Open Database Connectivity (ODBC), mit deren Hilfe man Datenbanken aus verschiedenen ODBC-unterstützenden Anwendungen exportieren und importieren kann.

Weiterentwicklung zu ActiveX

Die Entwicklung zu ActiveX begann mit Visual-Basic-Erweiterungen, den sogenannten VBX-Steuerelementen, die der Beschränkung unterlagen, ausschließlich mit Visual Basic zusammenzuarbeiten. Sinnvoll erschien, allgemein einsatzfähige Software-Komponenten zu entwickeln, welche die grundlegenden Abstraktionen von COM nutzen. Daraus resultierten die OLE-Steuerelemente mit einer strengen Spezifikation bezüglich Schnittstellen und Oberfläche, welche die Software-Komponenten mit potentiell überflüssigem Code überfrachteten. Eine gelockerte Spezifikation (Schnittstelle *IUnknown* und Fähigkeit zur Selbstregistrierung) brachte die Abhilfe, die notwendig war, um solche Komponenten in einer angemessenen Zeit von WWW-Servern herunterzuladen. Zusätzlich begann Microsoft, die OLE-Steuerelemente an die Gegebenheiten des Internets anzupassen, wodurch der neue Begriff ActiveX definiert wurde.

Prinzipiell besteht zwischen einem COM-Objekt und einem ActiveX-Steuerelement heutzutage kein Unterschied mehr. Voraussetzung für ein COM-Objekt ist die Unterstützung der Schnittstelle *IUnknown*. Zusätzlich dazu muß ein ActiveX-Steuerelement die Fähigkeit zur Selbstregistrierung besitzen. Die Methoden eines Steuerelements

müssen in der Verteilerschnittstelle definiert und mit folgendem Befehl *IDispatch::Invoke* aufgerufen werden.

4.1.4 Verwendung einer gemeinsamen Datenbasis

Um auf die Daten des CAD-Systems aufbauen zu können, müssen diese zuerst in ein neutrales Datenformat gebracht werden. Um auf Daten in einer heterogenen Umgebung relationaler oder nichtrelationaler Datenbankmanagementsysteme (DBMS) zugreifen zu können, bietet Microsoft die Schnittstelle Open Database Connectivity (ODBC) an. Der ODBC-Standard besteht aus einer erweiterbaren Menge von DLLs, die eine Standardprogrammierschnittstelle für Datenbankanwendungen bereitstellen. ODBC basiert auf einer standardisierten Version der Sprache SQL (Structured Query Language). SQL ist eine Standardsprache für Datenbankabfragen mit eigener Syntax. Der ODBC-Standard definiert C-Programmschnittstellen für SQL-Datenbanken. Damit ist es nun möglich, mit demselben C++ Programm auf ein beliebiges Datenbankmanagementsystem, das über einen ODBC-Treiber verfügt, zuzugreifen. Das zum Lieferumfang von Visual C++ gehörende ODBC-Software Development Kit (SDK) enthält 32-Bit Treiber für verschiedene Datenbanken, u.a. DBF-Dateien, MS Access, XLS-Dateien, FoxPro-Dateien oder SQL Server-Datenbanken. Die beiden wichtigsten ODBC-Klassen der MFC-Bibliothek heißen *CRecordset* und *CDatabase*. Objekte von *CDatabase* repräsentieren ODBC-Verbindungen zu Datenquellen und mit *CRecordset* können die Spalten von Datenbanktabellen wiedergegeben werden [64].

ODBC trennt die Benutzeroberfläche (Frontend) von der eigentlichen Datenbankverwaltung (Backend). Daher müssen Oberflächen-Tools und die Datenbank-Engine nicht vom gleichen Hersteller sein. Im Rahmen dieser Arbeit ist es jedoch von Vorteil hinsichtlich der Programmierung, ein möglichst einfaches Datenbankmanagementsystem zu verwenden. Das Frontend zur Datenverwaltung ist ein eigenes Programm und das Backend, d.h. die Datenverwaltung wird mit MS Access durchgeführt. Das MDB-Format, das MS Access verwendet, speichert sämtliche Datenbanktabellen und Indizes in einer Datei. Über Schlüsselwörter ist der Benutzer in der Lage, rasch auf Datensätze zuzugreifen (indizierter Datenzugriff). Auch bietet MS Access Datenintegrität hinsichtlich der Datenverarbeitung und eine Zugriffskontrolle im Mehrbenutzerbetrieb.

In der MS Access Datenbank wird für jede abzuspeichernde Phase der Konstruktion eine Tabelle angelegt. Als Basis für diese Tabelle dienen die Daten des CAD-Programms (siehe Kapitel 4.1.2). Abhängig von der jeweiligen Konstruktionsphase (Konzeption, Entwurf, Ausarbeitung) können unterschiedliche Daten (z.B. Geometriedaten, Parameter, etc.) vom CAD-System Solid Edge in die MS Access Datenbank übernommen werden. Hierbei können auch, sofern vorhanden, angelegte Strukturinformationen (Strukturstückliste, Struktur der Features oder der Baugruppen, etc.) eingehen.

4.2 Analyse der Konstruktionsphasen

Dieses Unterkapitel beschäftigt sich mit folgenden zwei Fragestellungen:

- Welche Phasen der Entwicklung sind mit dem CAD-System abbildbar?
- Welche Zuverlässigkeitsanalysen können mit diesen Phasen gekoppelt werden?

4.2.1 Phasenabbildung im CAD-System

Konzeptphase

In der Part-Umgebung beginnt die Konstruktion mit dem Skizzenmodus, in dem zweidimensionale Profile erstellt werden. Auf deren Basis werden dreidimensionale Bauteile generiert, die mit ebenfalls dreidimensionalen Formelementen (Rippen, Verrundungen, Bohrungen, Formschrägen, Fasen, etc.) weiter ergänzt werden können. Der „Feature Pathfinder“ zeigt den Aufbau eines Volumenteils in Form von Umrissen an. Mit Hilfe des Feature PathFinders können Skizzen und Formelemente zur Bearbeitung ausgewählt, umbenannt oder neu geordnet werden. Darüber hinaus können diese Elemente im Feature PathFinder als Objekte angesprochen und ihre Eigenschaften mit den über die Programmierschnittstelle zugänglichen Funktionen von Solid Edge übernommen und verändert werden. Die Konzeptphase der Entwicklung kann in dem Skizzenmodus des CAD-Systems Solid Edge abgebildet werden [76].

Das erste Konzept eines technischen Systems kann sich wie in Bild 4.6 darstellen. Dazu ist im Sketchmodus des CAD-Programms eine Skizze erstellt worden. Die Funktionsweise wird in Teilfunktionen unterteilt, für die Baugruppen oder Bauteile verantwortlich sind, Tabelle 4.1.

Tabelle 4.1: Teilfunktionen und entsprechende Baugruppen

Teilfunktionen	***Baugruppe***
Bauraumbegrenzung	Gehäuse
Initiierung	Steuerung
Kraft + Stellweg erzeugen	Motor
Kraft + Stellweg übertragen	Übertragungsmechanismus
Nehmerzylinder betätigen	Geberzylinder

Ausgehend von der Hauptfunktion und deren Aufgliederung erfolgt die Zuteilung zu geometrischen Einheiten. In diesem Beispiel resultieren die räumlichen Randbedingungen in den Abmessungen des Gehäuses. Die Hauptbauteile bzw. Baugruppen innerhalb des Gehäuses sind eine Steuereinheit, ein E-Motor zur Initiierung der Bewegung, der Übertragungsmechanismus, Federspeicher und Geberzylinder zur weiteren Übertragung und Schnittstelle zu anderen Systemen. Dadurch werden die ersten Funktionsstrukturen definiert.

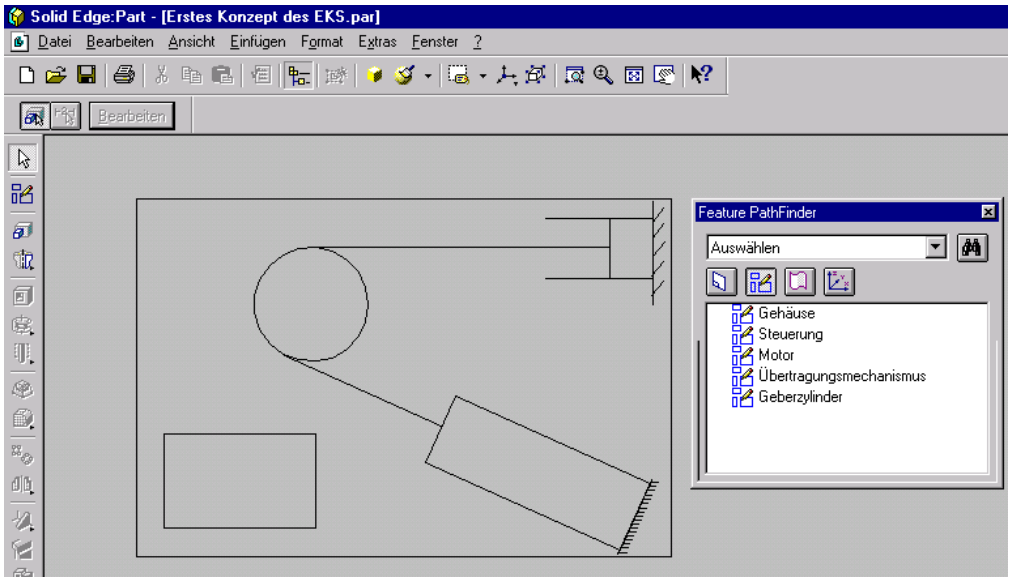


Bild 4.6: Konzeptphase im Skizzenmodus des CAD-Systems

Entwurfsphase

In der darauffolgenden Entwurfsphase können aus diesen zweidimensionalen Profilen dreidimensionale Bauteile (Parts) erstellt werden, die in der Assembly-Umgebung zusammengeführt und ausgerichtet werden können, Bild 4.7.

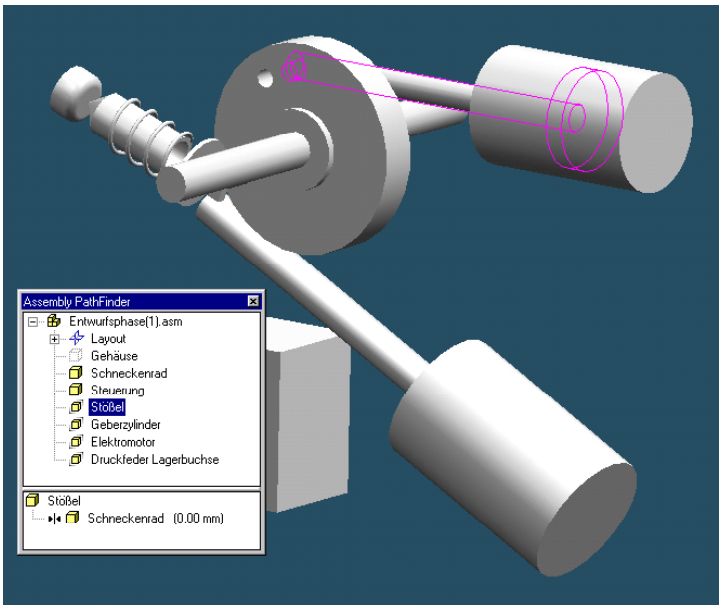


Bild 4.7: Entwurfsphase in der Assembly-Umgebung des CAD-Systems

Um die gefundene Grundkonzeption zu erhalten, bleiben die assoziativen Beziehungen zwischen den verschiedenen Teilen während der gesamten Konstruktionsphase bestehen. So bleiben zwei zusammengefügte Teilflächen auch dann zusammen, wenn eines der Teile in der Part-Umgebung bearbeitet wird und weitere Formelemente hinzugefügt werden. Solid Edge behält diese Beziehungen während der Weiterentwicklung der Konstruktion automatisch bei.

Ausarbeitungsphase

Ausgehend von diesem Gesamtentwurf können nun die Einzelteile ausgearbeitet werden, wobei der Zusammenbau immer im Hintergrund bleibt. Die Assembly-Umgebung wird nur verlassen, um einzelne Bauteile auszuarbeiten, Bild 4.8.

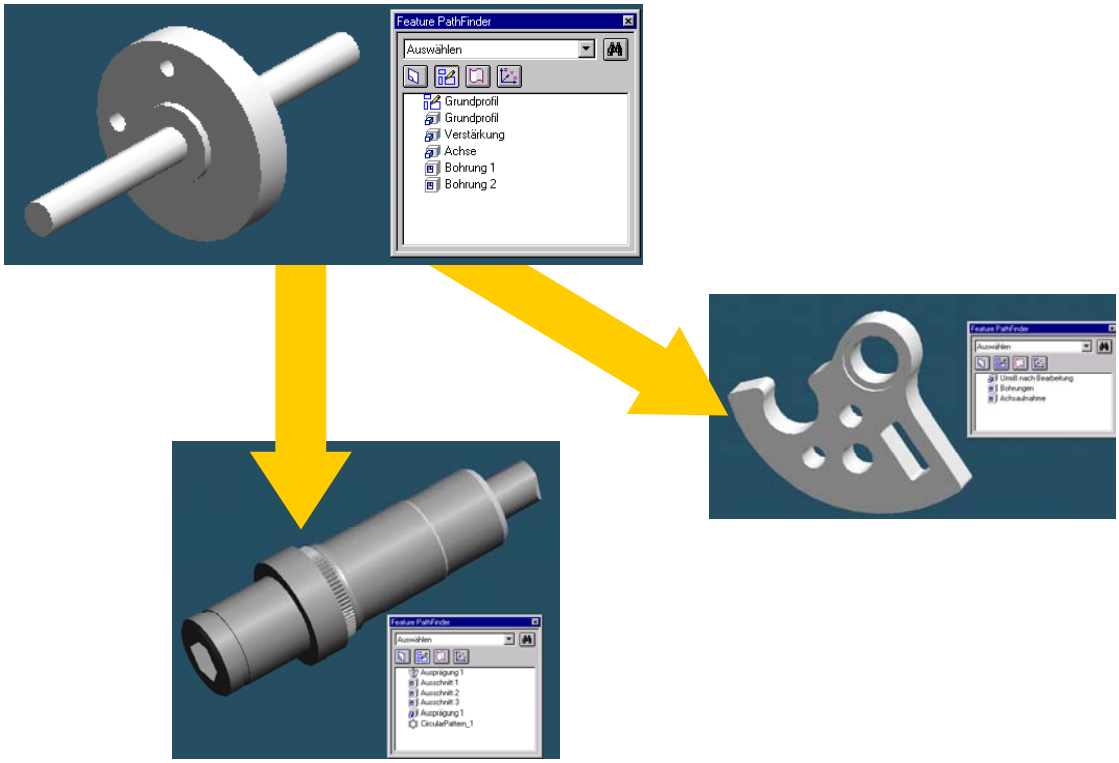


Bild 4.8: Ausarbeiten einzelner Bauteile in der Part-Umgebung des CAD-Systems

Die Veränderungen werden nach Beenden der Part-Umgebung sofort im Gesamtzusammenhang sichtbar. Auftretende Probleme wie z.B. Kollisionen können so direkt erkannt werden. Bei der Ausarbeitung werden die hinzugefügten Formelemente und deren Reihenfolge im Feature PathFinder aufgezeichnet.

Die Formelemente können als Objekte über die Programmierschnittstelle angesprochen und ihre Eigenschaften durch eine andere Anwendung verändert werden. Für die Erstellung von Formelementen steht die sogenannte „SmartStep“-Formatierungsleiste zur Verfügung, die durch die einzelnen Arbeitsschritte führt. Mit SmartStep können alle Arbeitsschritte separat zurückverfolgt werden. Wenn beispielsweise eine Rippe erstellt wurde, kann später jederzeit ihr Profil oder ihre Dicke verändert werden.

Die ausgearbeiteten Bauteile und Baugruppen können wiederum in der Assembly-Umgebung zum gesamten System zusammengefügt werden, Bild 4.9. Die Struktur des Zusammenbaus wird in der Assembly-Umgebung im sogenannten „PathFinder“ festgehalten. Die Arbeit in einer Ansicht eines Baugruppenentwurfs wird durch den PathFinder erleichtert, da dieser Text und Symboldarstellungen der einzelnen Teile einer Baugruppe und deren Beziehungen zueinander in Form von Umrissen enthält.

Damit können die Teile der Baugruppe und ihre Beziehungen identifiziert und aktiviert sowie verschiedene Darstellungsarten eingestellt werden. Der PathFinder erlaubt Konstrukteuren eine übersichtliche Darstellung und eine effektivere Bearbeitung von Baugruppen. Vor allem für Projektleiter, die vornehmlich mit der Verwaltung verschiedener Baugruppen betraut sind, ist dieses Werkzeug sehr nützlich.

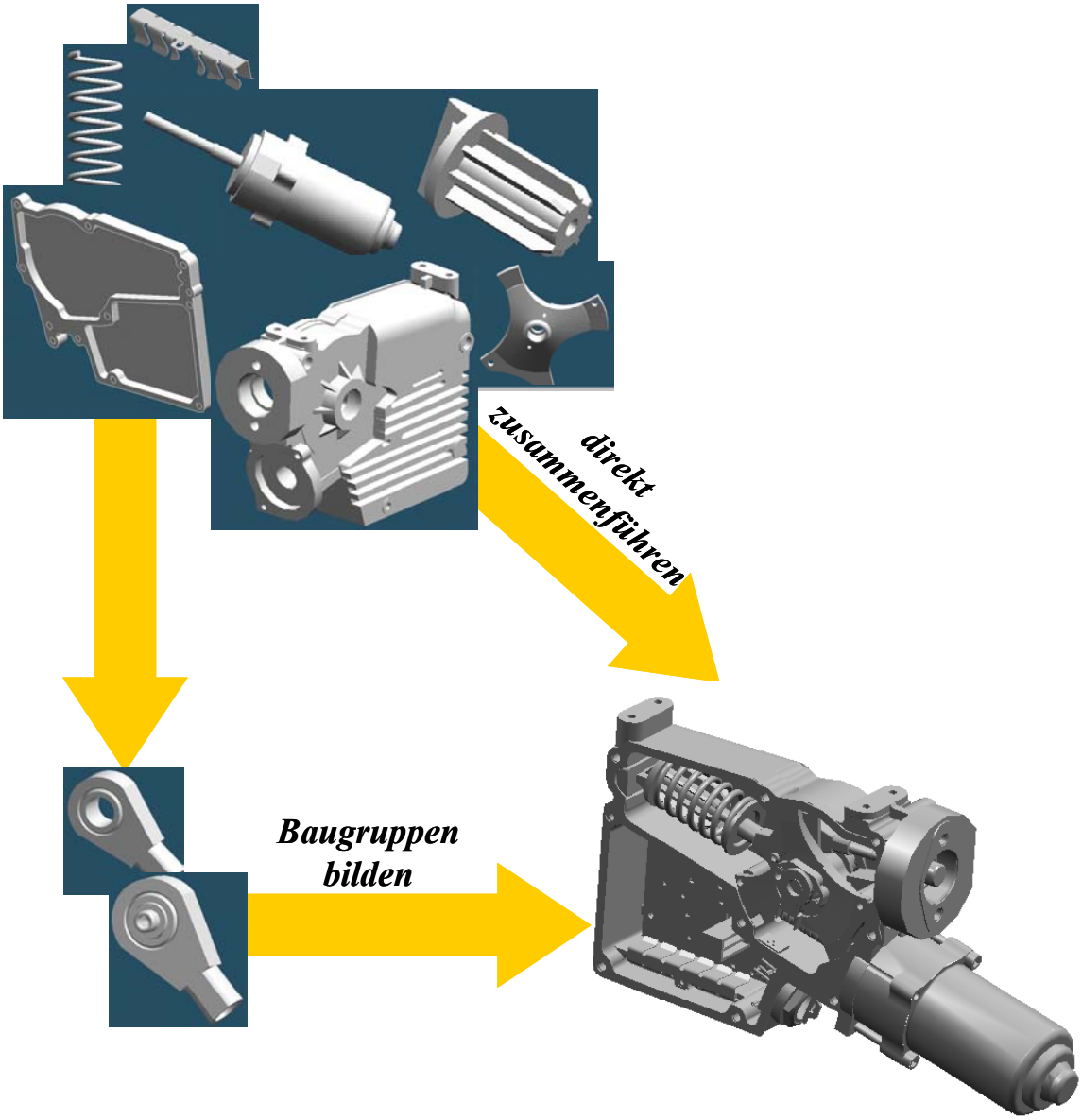


Bild 4.9: Zusammenfügen der Bauteile und -gruppen im Assembly-Modus

Die Verwaltung der Dokumente erfolgt mit Hilfe des „PathFinders“ und des „Feature PathFinders“, mit denen sich die Struktur des Gesamtsystems übersichtlich in einer Strukturstückliste erkennen läßt. Zusammenfassend läßt sich die Abbildung der Hauptkonstruktionsphasen im CAD-System Solid Edge wie in Bild 4.10 darstellen.

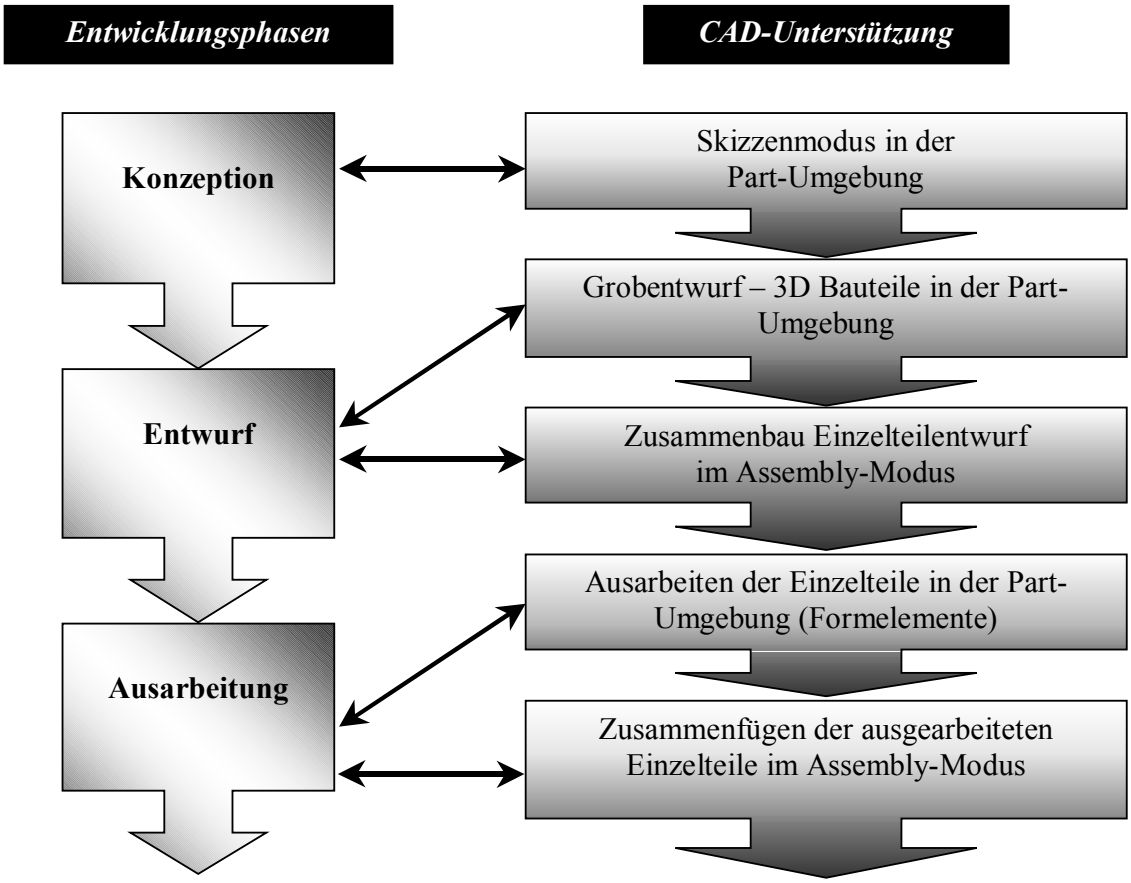


Bild 4.10: Abbildung der Entwicklungsphasen im CAD-System

4.2.2 Kopplung von Zuverlässigkeitsanalysen mit Entwicklungsphasen

Einsatz der Zuverlässigkeitsmethoden im Entwicklungsprozeß

Zuverlässigkeitsmethoden lassen sich innerhalb des gesamten Entwicklungsprozesses bestimmten Phasen zuordnen. Diese Analysen werden meist erst den späten Entwicklungsphasen zugeordnet, wie ein Vergleich verschiedener Autoren zeigt, Bild 4.11. Roth [10] beispielsweise ordnet eine Schwachstellenanalyse erst der fertigungsgestaltenden Phase zu. Pahl/ Beitz [77] betrachten Störgrößen und Schwachstellen erst zu Ende der Entwurfsphase.

Autoren neuerer Zeit stellen die Methoden der Zuverlässigkeit- und Qualitätstechnik in ihrer Gesamtheit über dem Produktentwicklungsprozeß dar. Lenk beispielsweise [78] beschreibt den qualitätsorientierten Einsatz von Qualitätsmanagementmethoden über der Zeitachse der Produktphasen und berücksichtigt auch den Einsatzzeitraum der Methoden, Bild 4.12.

Ablaufplan nach					
Konstr.-Phasen (Roth)	Roth	Pahl/Beitz	VDI - 2221	Koller	Rodenacker
	Aufgabe	Aufgabe	Aufgabe	Produktplanung	Aufgabe
Aufgaben-stellung	*Formulieren* Klären d. Aufgabenstellung, Hauptaufgabe, Anweisung, Anforderungsliste	*Klären der Aufgabe* Klären d. Aufgabenstellung, Anforderungsliste	*Formulieren der Aufgabe* 1 Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung	*Marktanalyse* Erarbeiten der Aufgabenstellung	Geforderter Wirkzusammenhang
Wirkprinzip / Prinzipielle	*Funktion entwickeln* Funktion ermitteln, Allgemeine, logische, Funktionsstruktur	*Konzipieren* Entwickeln der prinzipiellen Lösung, Funktionen, Wirkprinzipien, Wirkstrukturen, Prinzipielle Lösungen, Varianten, Technisch-wirtschaftliches Bewerten	*Prinzip finden* 2 Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen	*Funktionssynthese* Zweck- o. Hauptfunktionen, Gliedern der Teil- und Grundfunktionsstrukturen, Technisch-wirtschaftliches Bewerten	*Funktion* Logischer Wirkzusammenhang Physikalisches Geschehen
Wirkstruktur	Effektträger zur Prinzipskizze entwickeln, Techn.-wirtschaftl. Bewerten		3.1 Suchen nach Lösungsprinzipien, Effektebene		Physikalischer Wirkzusammenhang
			3.2 Suchen nach Lösungsprinzipien, Gestaltebene	*Qualitative Synthese* Zuordnen und Variieren von Effekten, Effektträger variieren, Prinzip darstellen, **Auswählen der Lösungen für Gesamtkonzept,** Gestalten, Entwerfen	*Wirkort* Kinematischer Wirkzusammenhang
Geometrisch-stoffliche / Gestaltende	*Gestalten* *Struktur und Formgestalten* Strukturgestalt, Skizze, Konturen und Querschnitte entwerfen, Werkstoffe, Festigkeit, Montierbarkeit, Benennung, Funktionsintegration, Gesamtentwicklung, Techn.-wirtschaftl. Bewerten	*Entwerfen* Baustruktur entwickeln, Grobgestalten, Form, Werkstoff, Berechnen, Feingestalten, Techn.-wirtschaftl. Bewerten Baustruktur endgültig gestalten, **Schwachstellen, Störgrößen,** Kostendeckung, Stücklisten, Fertigungsanweisungen	*Gestalten* 4 Gliedern in realisierbare Module 5 Gliedern in maßgebende Module		**Konstruktiver Wirkzusammenhang**
Herstellungstechnische	*Fertigungsgestalten* **Schwachstellenanalyse,** Fertigungs-, Montage-, Transport-Recyclinggerecht, usw. Gestalten endgültiger Entwurf, Detaillieren, Tolerieren, Herstellungsunterlagen, Montage-, Betriebs-, Prüfvorschriften	*Ausarbeiten* Ausführungs- und Nutzungs-unterlagen, Fertigungs-unterlagen, Montage, Transport-Betriebs-, Prüfvorschriften	6 **Gestalten des gesamten Produkts** 7 Festlegen der Ausführungs- und Nutzungsaufgaben	*Quantitative Synthese* Berechnen, Bemessen, Experimentelle Untersuchungen, Erprobung, Verbesserung, Detaillierung, Arbeitspläne erstellen, Fertigungs-, Montageunterlagen	Fertigungstechnischer Wirkzusammenhang
Produktdokumente					

Bild 4.11: Zuverlässigkeitsmethoden im Entwicklungsprozeß nach [77]

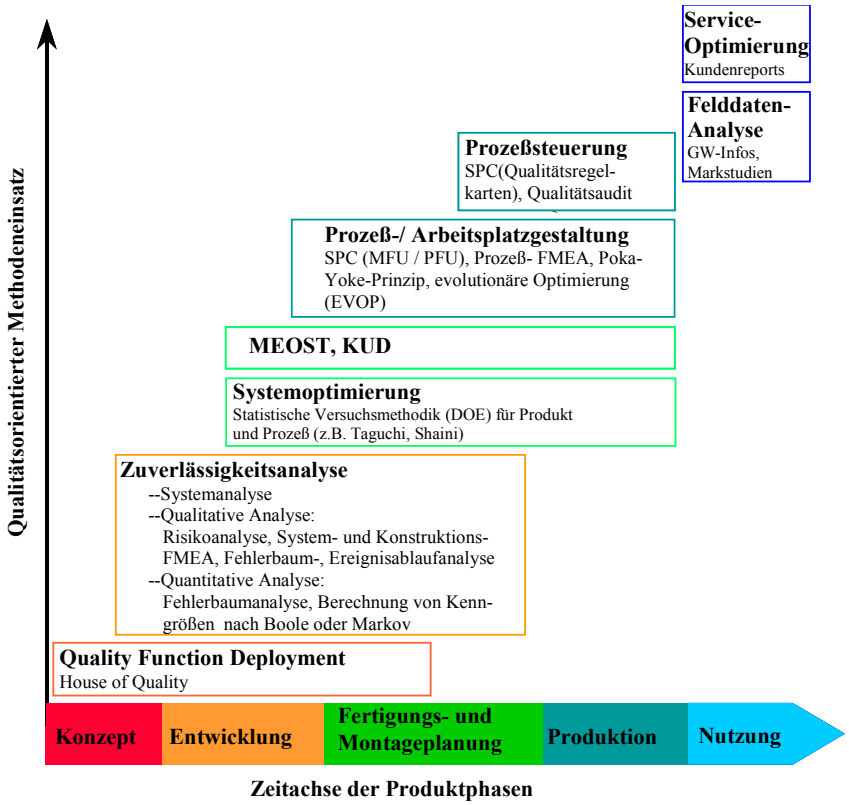


Bild 4.12: Gesamtübersicht über Qualitätsmanagementmethoden nach [78]

Anwendungskopplung der Methoden mit dem Entwicklungsprozeß

Viele Automobilhersteller (z.B. Ford, Iveco, DaimlerChrysler, etc.) haben ein Zuverlässigkeitskonzept installiert, das jedoch nicht direkt mit dem Produktentstehungsprozeß gekoppelt ist [77]. In der neuen Auflage des VDA-Bandes 3 Teil 1 [79] werden Aufgabenfelder und Meilensteine über den Produktentstehungsprozeß einander zugeordnet, Bild 4.13. Im zweiten Teil des VDA-Bandes werden Zuverlässigkeitsmethoden und -Hilfsmittel im Produktentstehungsprozeß von Konzeptions- bis Nutzungsphase ausführlich besprochen. Dabei werden die verschiedenen Methoden den Entwicklungsphasen zugeordnet und zu Beginn ein Zuverlässigkeitsregelkreis vorgestellt [44]. Produktentstehungsprozesse, die kritische Systeme betreffen, besitzen oft einen speziellen Sicherheitsprozeß, der mit dem eigentlichen Entwicklungsprozess eng verbunden ist [80]. Die Verbindungen der entwicklungsspezifischen Sicherheitsaktivitäten zum Entstehungsprozeß sind für das Beispiel einer elektrischen Steuerung in Bild 4.14 dargestellt.

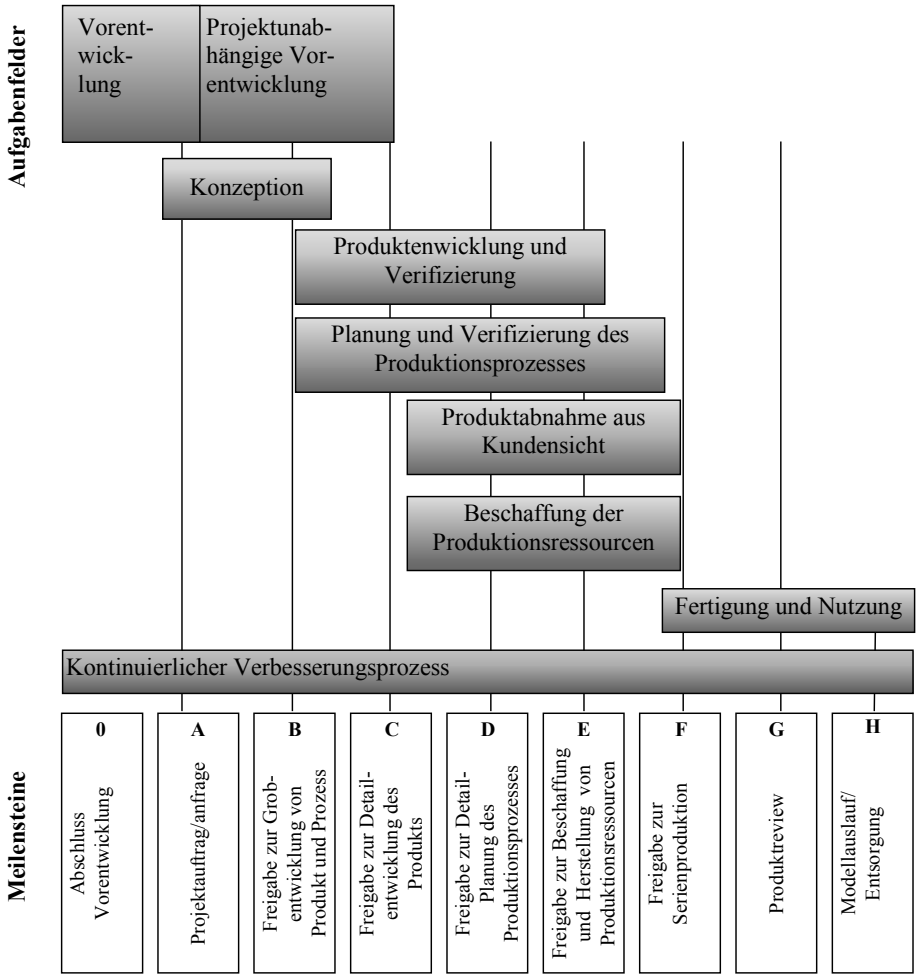


Bild 4.13: Zuordnung Aufgabenfelder und Meilensteine [79]

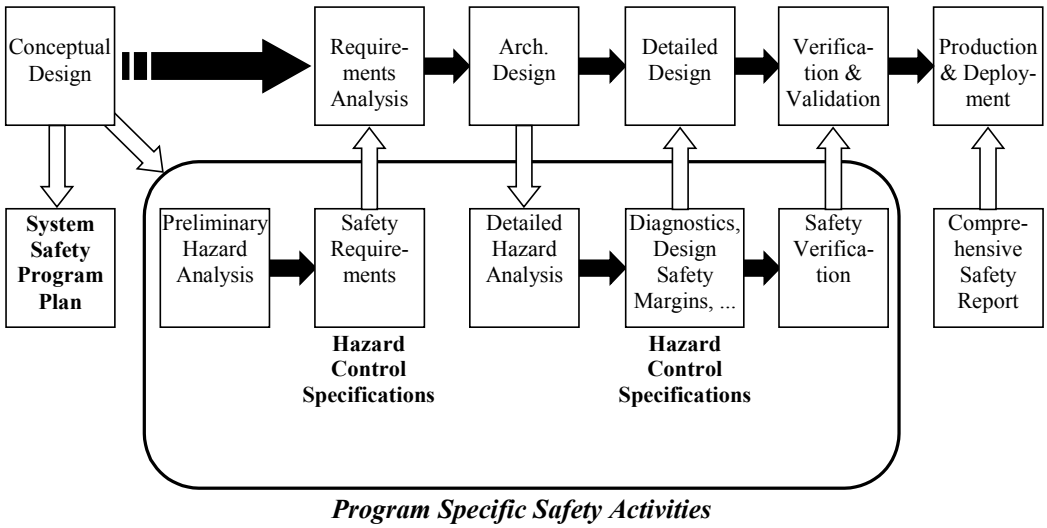


Bild 4.14: Beispiel eines integrierten Sicherheitsprozesses [80]

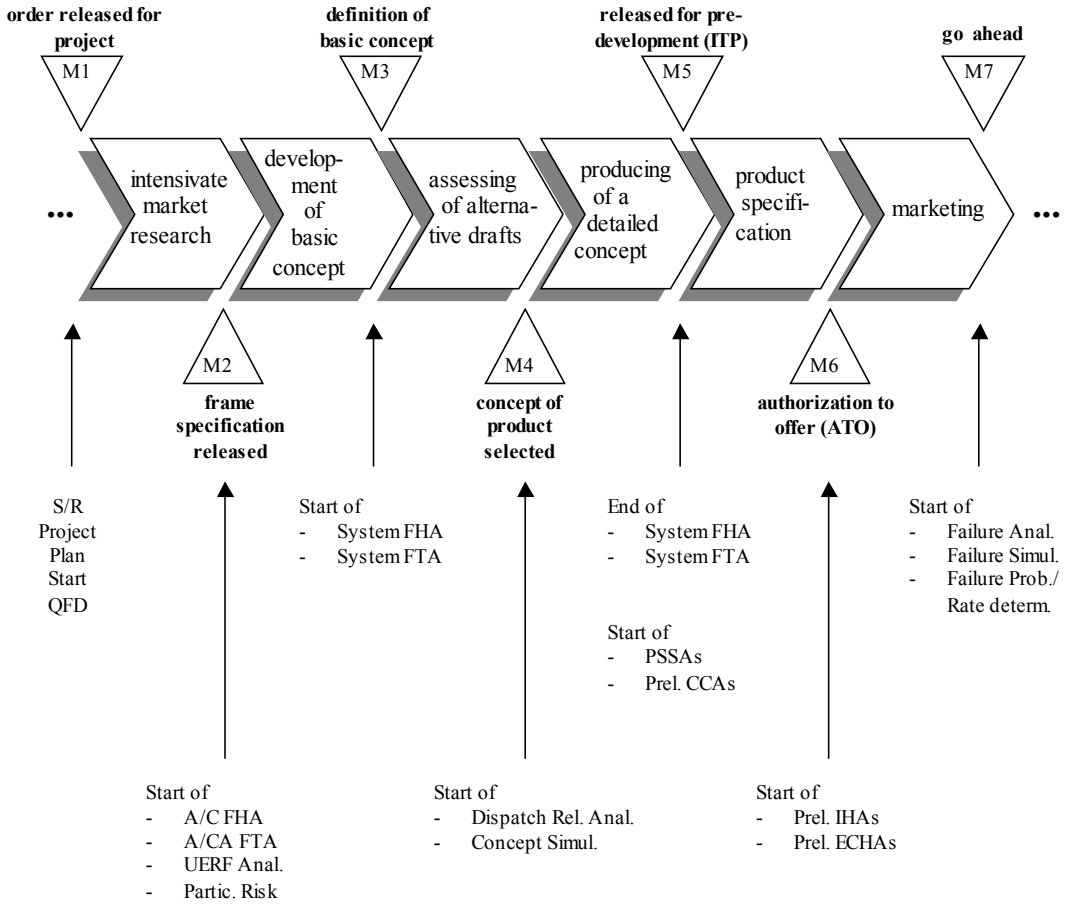


Bild 4.15: Auszug aus dem Entwicklungsprozeß von DASA, Kopplung von Product-Development und Safety/ Reliability Documents [42]

Im Bereich der Luft- und Raumfahrttechnik, in dem, beginnend mit dem Apollo-Programm, Methoden der Zuverlässigkeitstechnik aktiv angewandt wurden, besteht eine engere Verbindung mit dem Produktentstehungsprozeß [42]. Hauptsächlich wer-

den Techniken angewendet, die auf die Bewertung der Gefährdung (engl. hazard) abzielen, die vom System ausgeht. Bild 4.15 zeigt einen Auszug aus dem DASA-Entwicklungsprozeß, in dem eine Zuordnung von Zuverlässigkeitsmethoden und -dokumenten zu den Phasen des Entwicklungsprozesses erfolgt.

Eine Verbindung des Produktentstehungsprozesses mit den Methoden und Ergebnissen der Zuverlässigkeitstechnik wird in [81] dargestellt. Die Vorgeschichte der Zuverlässigkeit und Wartbarkeit soll in der Form „Lessons Learned“ in den Lebenszyklus der Produktentstehung zurückfließen, Bild 4.16.

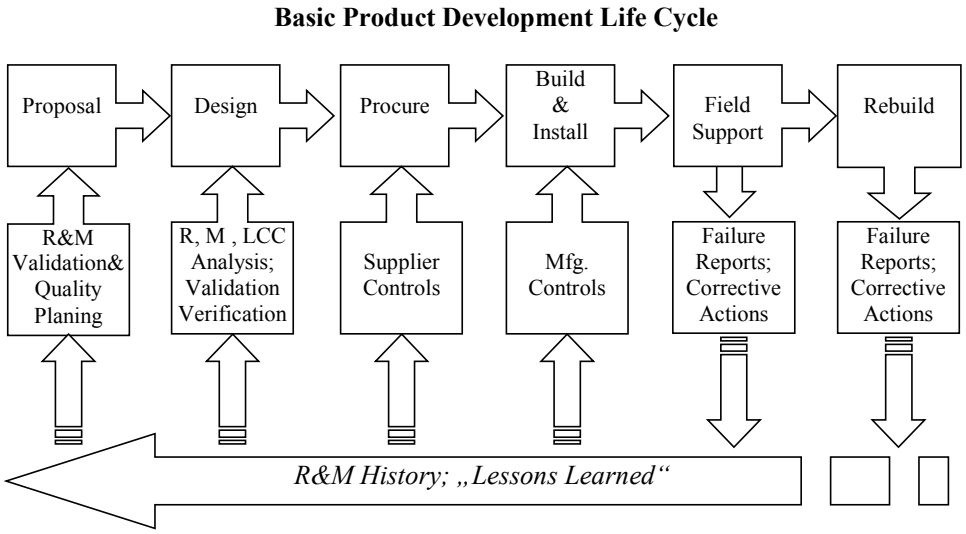


Bild 4.16: Rückkopplung der Zuverlässigkeitsanalysen in den Produktentstehungsprozeß [81]

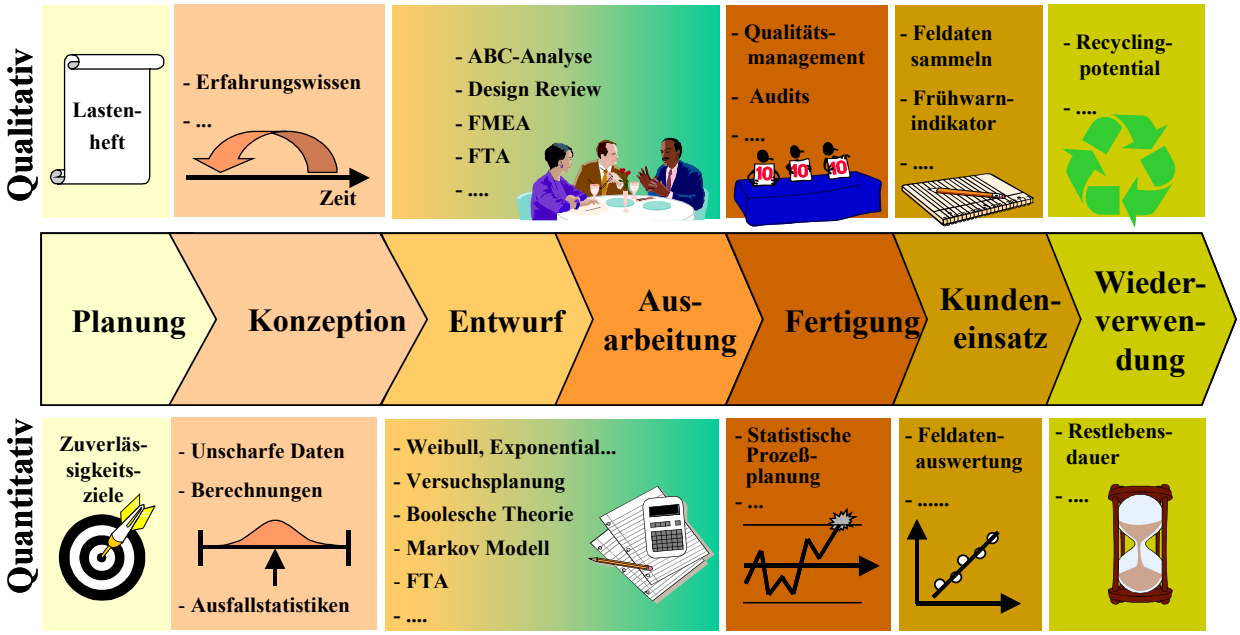


Bild 4.17: Zuverlässigkeitsmethoden im Entwicklungsprozeß [82]

Die Zuordnung von qualitativen und quantitativen Zuverlässigkeitsmethoden zu den Hauptphasen des Produktentstehungsprozesses ist auch in [82] zu finden. Bild 4.17 zeigt dies von der Planung bis hin zur Wiederverwendung.

Bei allen vorgestellten Produktentstehungsprozessen werden die Methoden der Zuverlässigkeitstechnik den Entwicklungsphasen mehr oder weniger genau zugeordnet. Jedoch bestehen wesentliche Mängel:

- Die Durchgängigkeit der Methoden, d.h. die phasenübergreifende Anwendung ist nicht gegeben und
- die Kopplung zu dem eigentlichen Entwicklungswerkzeug CAD-System wird nicht erwähnt bzw. fehlt vollständig.

Daher wird in der vorliegenden Arbeit auf diese beiden Punkte das Hauptaugenmerk gelegt. Bezüglich der Entwicklungsphasen erfolgt eine Beschränkung auf die drei Hauptphasen: Konzeption, Entwurf und Ausarbeitung. Diese Phasen können mittels des CAD-Systems Solid Edge sehr gut dargestellt werden, siehe auch Kapitel 4.2.1 und Bild 4.10.

4.3 Analyse der notwendigen Zuverlässigkeitsdaten

Nachdem zuvor der notwendige Aufbau, die Basis und die Form der Datenübergabe und -verwaltung für eine Zuverlässigkeitsdatenbank untersucht wurde, werden in diesem Abschnitt die für die Zuverlässigkeitsmethoden notwendigen Daten betrachtet. Dieses Unterkapitel basiert auf dem VDA-Band 3 Teil 2 [44], in dem die Zuverlässigkeitstätigkeiten entlang des Entwicklungsprozesses beschrieben sind.

4.3.1 Zuverlässigkeitsziel und -anforderungen im Lastenheft

Zu Beginn einer Entwicklung sind Zuverlässigkeitsziele zu ermitteln und festzulegen. Dafür existieren verschiedene Vorgehensweisen. Darüber hinaus müssen auch Zuverlässigkeitsrisiken ermittelt werden.

Kundenerwartungen ermitteln

Zur Ermittlung der Kundenerwartungen stehen in der Planungsphase als Quellen die klassische Marktforschung, Benchmarkuntersuchungen, Kundenbefragungen, etc. zur Verfügung, siehe auch Kapitel 3.2.1. Die Ergebnisse dieser Methoden müssen hinsichtlich Absatzgebiet, Markenimage, beabsichtigten Kundenkreis, Stand der Technik sowie Zeit und Ort der Befragung differenziert werden. Auch muß berücksichtigt werden, daß Befragungen selbst u.U. die Kundenmeinung beeinflussen.

Die Kundenerwartungen beziehen sich auf Beanstandungen hinsichtlich Funktion bzw. Funktionsnichterfüllung und deren Folgen (wie z.B. Liegenbleiber, etc.). Daher müssen die Funktionen, auf die sich die Zuverlässigkeit bezieht, detailliert beschrieben sein.

Die oftmals nicht immer objektive Kundensicht hinsichtlich Zuverlässigkeit drückt sich nicht in Zuverlässigkeitskennzahlen (siehe auch Bild 4.19) aus sondern in der Anzahl ungeplanter Werkstattaufenthalte pro Jahr. Unter Zuhilfenahme von Garantie- und Kulanz-Datenbanken müssen dann die zuverlässigkeitsrelevanten Beanstandungen ermittelt werden, woraus sich mathematische Zuverlässigkeitskennzahlen ableiten lassen. Bei der Zuverlässigkeitsvorgabe wird die Fehlerfolge für das Gesamtprodukt mitbetrachtet und in Beanstandungsklassen (kritisch, hoch, mittel, gering) eingeteilt, Bild 4.18.

Schweregrad	*Beschreibung*	*Bauteil / Komponente*	*Beispiel*	*Folge für den Kunden*
Kritisch	Unmittelbare Gefährdung von Leib und Leben für den Benutzer oder andere Verkehrsteilnehmer bei Funktionsversagen	Passives oder aktives Sicherheitsteil, Teil mit DmbA (Dokumente mit besonderer Archivierung nach VDA Bd. 1, 2. Auflage)	Defekt an der Lenkung oder Radaufhängung, Reifenschaden, Defekt am Bremssystem, Defekt am Airbag	Unfall
Hoch	Es muß mit einem hohen Schaden am Fahrzeug, Schaden an der Umwelt oder Verletzung eines Gesetzes gerechnet werden	Risikoteil, Teil mit DmbA	Kolbenfresser, Beschädigung des Katalysators	Liegenbleiber mit sofortigem Werkstattaufenthalt
Mittel	Die Hauptfunktion (Transport/ Beförderung) wird nicht erfüllt	Standardteil	Batterieausfall, Riss des Keilriemens, Verlust des Kühlmittels, Ausfall des Bremslichts	Liegenbleiber mit Behebung vor Ort oder/ und sofortigem Werkstattaufenthalt (Notbetrieb)
Niedrig	Funktionseinbuße bei den Komfortfunktionen bzw. einer Redundanzfunktion	Standardteil	Innenraumbeleuchtung, Radioausfall	Ungeplanter Werkstattaufenthalt

Bild 4.18: Klassierungsanalyse nach dem Schweregrad [79]

Insbesondere bei gewerblichen Fahrzeugen spielen die laufenden Kosten eine größere Rolle als die Anschaffungskosten. Die Elementarkosten hinsichtlich Wartung, Reparatur und Stillstand beeinflussen maßgeblich die Zuverlässigkeit des Fahrzeugs.

Vergangenheitswerte und Wettbewerber analysieren

Im Sinne einer kontinuierlichen Produktverbesserung werden von der laufenden Produktserie Stärken- und Schwächenprofile erstellt, die sich z.B. aus internen Garantie- und Kulanzstatistiken erzeugen lassen. Ein Ergebnisvergleich der Versuche von Nachfolger- und Vorgängerprodukt ergibt frühzeitig Aufschluß über den Stand der Zuverlässigkeit. Nur durch entwicklungsbegleitende Beurteilung von Wettbewerbsprodukten hinsichtlich Zuverlässigkeit kann die eigene Marktposition beurteilt werden. Oftmals werden auch öffentliche Wettbewerbsvergleiche aus Fachzeitschriften, TÜV-Statistiken, u.ä. herangezogen.

Gesamtzuverlässigkeitsziel festlegen

Das Zuverlässigkeitsziel wird durch eine oder mehrere Zuverlässigkeitskennzahlen beschrieben. In der Praxis gängige Größen sind Lebensdauerkennzahlen (B_q-Werte) bei einer bestimmten Ausfallwahrscheinlichkeit q in % (z.B. B_{10}-Lebensdauer), Ausfallraten bezogen auf eine bestimmte Zeitdauer, Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$, Ausfallquoten (parts per million: *ppm*) oder durchschnittliche Ausfallintervalle (Mean Time To Failure: *MTTF*), Bild 4.19.

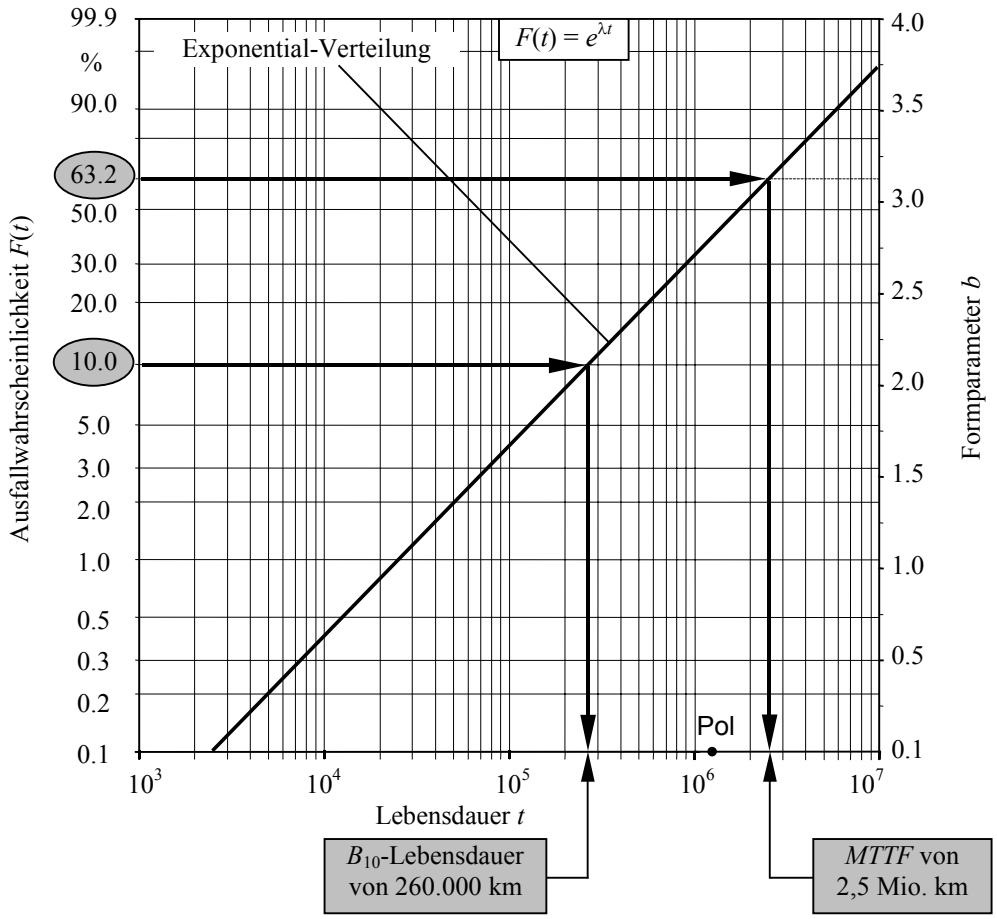


Bild 4.19: Weibullnetz mit Zuverlässigkeitskennzahlen [44]

Gesamtzuverlässigkeitsziel aufteilen

Ausgehend vom Gesamtzuverlässigkeitsziel (Ausfallrate, B_{10}-Lebensdauer, etc.) muß die Kennzahl der Gesamtsystemebene zunächst auf Untersysteme (Aggregate), anschließend auf Baugruppen und abschließend auf die einzelnen Bauteile aufgeteilt werden. Dabei hat die Systemstruktur (Reihen- oder Parallelanordnung) einen großen Einfluß auf die Zuverlässigkeitsvorgabe.

Im Maschinenbau üblich sind Systeme ohne redundante Anordnung, also eine reine Reihenschaltung hinsichtlich der Zuverlässigkeit. Falls auf Komponentenebene keine Besonderheiten vorliegen, kann im Sinne einer Abschätzung die geforderte Ausfallrate des Gesamtsystems gleichmäßig auf die einzelnen Komponenten verteilt werden, Bild

4.20. Bei Neu- oder Anpassungsentwicklungen, kann die Gesamtausfallrate beispielsweise auf Basis der Komplexität verteilt werden. Ebenso kann die Gesamtausfallrate eines Systems basierend auf der Kenntnis von Vorgängerprodukten verringert werden, um eventuell eine Kostenreduktion zu erzielen. Gibt es hingegen Systeme, deren Zuverlässigkeit wettbewerbsentscheidend ist, so muß die Aufteilung der Gesamtzuverlässigkeit entsprechend erfolgen. Es besteht auch die Möglichkeit die Aufteilung anhand von Pannenstatistiken zu betreiben.

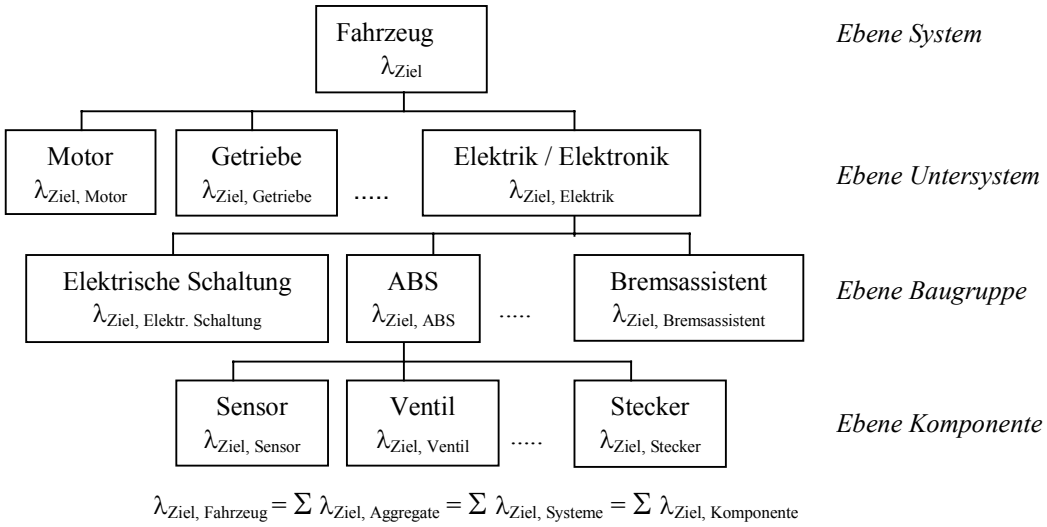


Bild 4.20: Aufteilung des Gesamtzuverlässigkeitsziels auf Untersysteme (Bsp. Fahrzeug) [44]

Das Ausfallverhalten mechanischer Bauteile wird sehr gut durch die Weibullverteilung beschrieben, wobei häufig eine ausfallfreie Zeit t_0 zu beachten ist. Hingegen kann das Ausfallverhalten elektrischer Bauteile idealisiert durch eine Exponentialverteilung beschrieben werden. Die ausfallfreie Zeit hat am Anfang der Lebensdauerverteilung großen Einfluß auf die System-Zuverlässigkeit, so daß Bauteile mit ausfallfreier Zeit bis zu dieser Lebensdauer nicht mit in die Aufteilung der Systemzuverlässigkeit einbezogen werden müssen.

Wird ein System als kritisch angesehen oder kann ein gefordertes Zuverlässigkeitsziel wirtschaftlich oder konzeptbedingt nicht erreicht werden, so lassen sich durch eine redundante Anordnung zuverlässigkeitsrelevanter Komponenten wesentlich kleinere Ausfallraten realisieren. Jedoch muß der Kostenaspekt mit in diese Überlegungen einbezogen werden.

Im Lastenheft sind die Zuverlässigkeitsanforderungen anhand von Kennzahlen unter Berücksichtigung der Funktions- und Randbedingungen vorgegeben. Damit die Anforderungen auch verifizierbar sind, muß vor dem Feldeinsatz die Einsatztauglichkeit in Versuchsreihen erprobt werden.

Erprobungsprogramms planen

Grundlegend für die Erprobung ist eine Beschreibung der geforderten Funktion der jeweiligen Komponente oder des jeweiligen Systems. Zusätzlich sollten auch die wesentlichen Nahtstellen und Wechselwirkungen mit anderen Bauteilen oder Baugruppen beschrieben sein. Darauf aufbauend werden die Ausfallkriterien oder Toleranzgrenzen bestimmt.

Einwirkende Beanspruchung ermitteln und festlegen

Ziel der Erprobung ist es, den Einsatz unter realen Bedingungen nachzubilden, um damit die Zuverlässigkeit der Systeme im Feldeinsatz abzusichern. Falls dies nicht möglich ist, müssen Korrelationen zwischen den Einsatzbedingungen im Feld und im Versuch ermittelt werden. Um Lastkollektive von Kunden genau ermitteln zu können, werden oftmals neben den internen Erprobungen Kundenerprobungen durchgeführt, die wiederum zur Optimierung der internen Erprobung dienen.

Probandenzahl festlegen

Mit steigender Probandenzahl steigt die Genauigkeit der experimentellen Ergebnisse. Unter Anwendung der Binomialverteilung läßt sich die mindestens benötigte Probandenanzahl zum Nachweis einer Mindestzuverlässigkeit bei einer gewissen Aussagewahrscheinlichkeit P_A ermitteln, Bild 4.21.

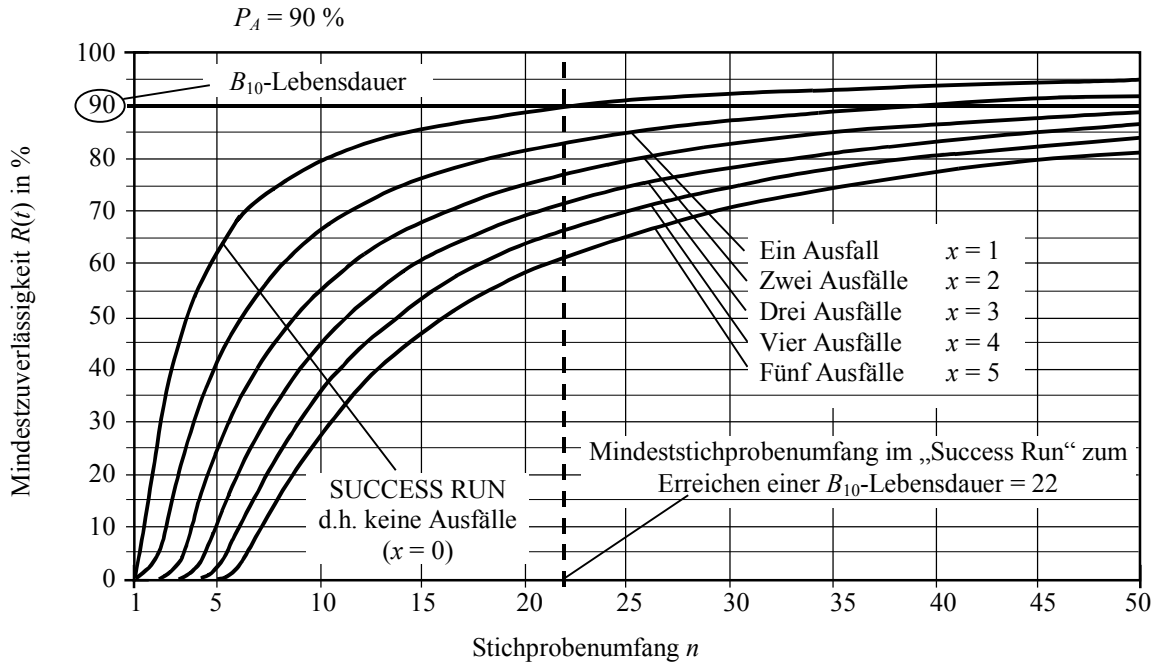


Bild 4.21: Zuverlässigkeit in Abhängigkeit von der Probandenzahl und der Zahl der Ausfälle bei einer bestimmten Ausfallwahrscheinlichkeit [44]

Unter Berücksichtigung einer gewissen Aussagewahrscheinlichkeit wird die Probandenzahl je nach Anzahl der Ausfälle auf verschiedene Erprobungsebenen verteilt. Üblicherweise geht man von Null Ausfällen aus (Success Run). Die notwendige Anzahl der Probanden erhöht sich bei gleicher Aussagewahrscheinlichkeit drastisch, falls nicht

geplante Ausfälle auftreten. Anhand des Nomogramms der kumulativen Binomialverteilung [83] läßt sich noch besser ermitteln, wie die Größen Zuverlässigkeit, Aussagewahrscheinlichkeit, Stichprobenumfang und Anzahl der Ausfälle zusammenhängen, Bild 4.22.

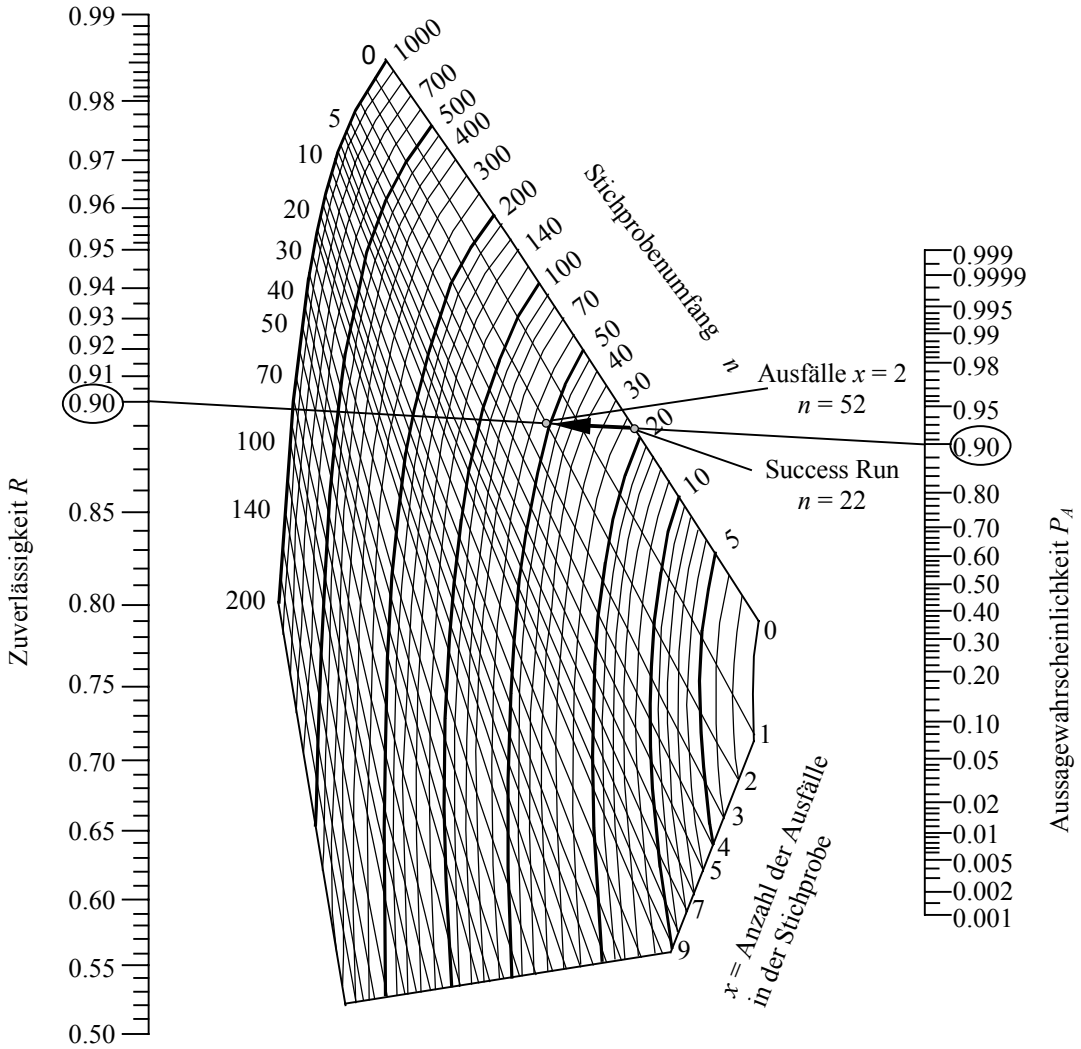


Bild 4.22: Nomogramm der kumulativen Binomialverteilung [44]

Beschleunigte Erprobung

Um den zeitlichen und finanziellen Aufwand zu verringern, wird versucht das Lebensdauerende durch beschleunigte Testverfahren eher zu erreichen. Dazu müssen die real auftretenden Beanspruchungen zu zeitlich komprimierten Lastkollektiven und Lastzyklen zusammengefaßt werden. Durch eine Erhöhung der Lastamplitude einerseits oder durch Raffung der Beanspruchungsdichte andererseits kann eine Beschleunigung der Tests hervorgerufen werden. Für eine hohe Aussagekraft ist es unerläßlich die Korrelationsfaktoren, die sogenannten Raffungsfaktoren, zu kennen. Bedingung für die Bestimmung der Raffungsfaktoren ist eine Übereinstimmung des Schadensmechanis-

musses im Feld und in der Erprobung, die sich im Weibulldiagramm anhand parallel verlaufender Ausfallwahrscheinlichkeiten nachweisen läßt, Bild 4.23.

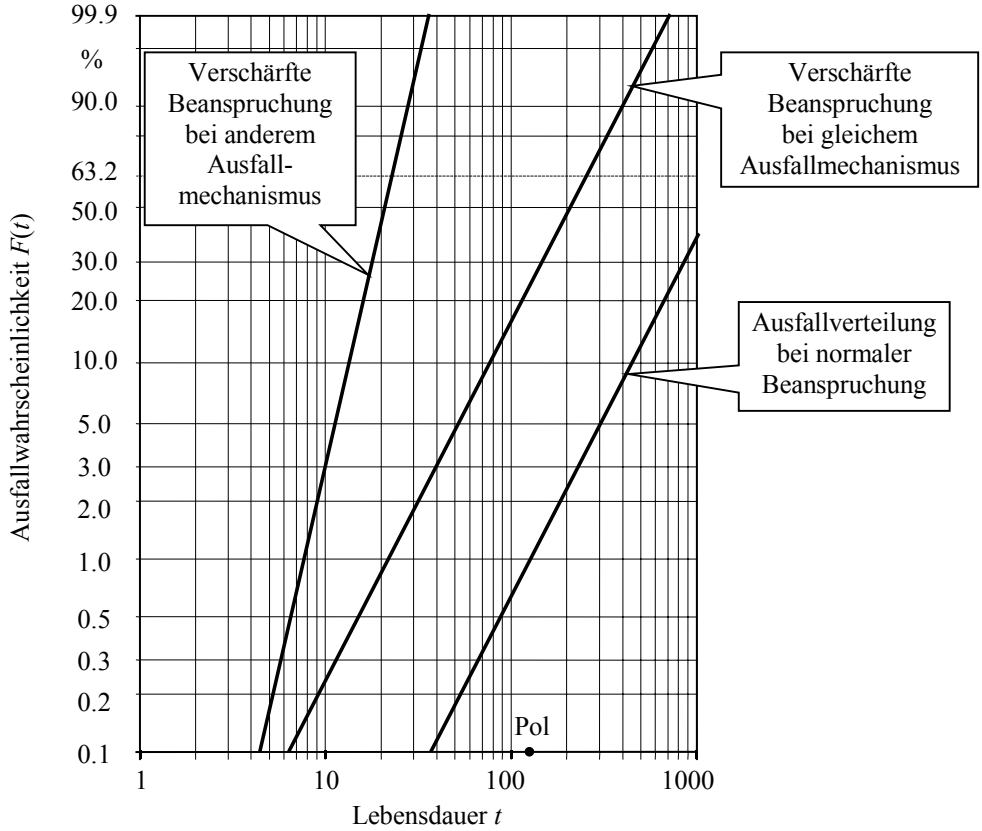


Bild 4.23: Veränderung der Ausfallwahrscheinlichkeit bei verschärfter Beanspruchung

Erprobungsergebnisse dokumentieren

Je nach Dokumentationssystem sollte ein Zugriff auf bereits vorhandene Daten möglich sein. Darüber hinaus ist eine Unterscheidung der möglichen Ausfälle bzw. Ausfallarten hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Gesamtprodukt und ihrer Schwere sinnvoll. Dies wird durch die sogenannte Klassierungsanalyse erreicht, siehe auch Bild 4.18. Eine Auflistung grundlegender Daten, die mindestens nach erfolgter Erprobung dokumentiert werden sollten, sind z.B.:

- Teilebenennung, sofern erforderlich mit Einbauort,
- Datum und Uhrzeit des Ausfalls,
- Laufleistung bzw. Betriebsdauer bis zum Ausfall,
- Schadensart,
- Ausfallsymptome und Auswirkungen auf das Gesamtsystem,
- Klassifizierung des Ausfalls,
- eventuelle Folgeschäden,
- sofortige Reparaturmaßnahme,
- Ursache des Ausfalls, Befundung der Teile,

- konstruktive Abhilfemaßnahme für die Serie und
- Verifikation dieser Abhilfemaßnahme.

4.3.2 Zuverlässigkeitsdaten aus der Verifikationsphase

Die Komponenten eines technischen Systems sind je nach Umgebungsbedingungen, Funktion und Einsatzbereich sehr unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt. Daher muß in der Entwicklungsphase überprüft werden, ob diese den Belastungen über der geforderten Lebensdauer standhalten können. Dafür müssen Forderungen bezüglich Material-, Einbau-, Lebensdauerprüfungen, etc. genannt und spezifiziert werden.

Relevante Prüfverfahren

Die Basis für die Erstellung eines erzeugnisspezifischen Versuchsprogramms (Erprobungsplan) bildet ein Prüfauswahlblatt, in dem die für die Freigabe von Entwicklungen notwendigen Prüfverfahren aufgelistet sind, wie z.B.:

- Statische Prüfungen (z.B. Festigkeit, Dichtheit, Blockieren, Abziehkräfte),
- mechanisch-dynamische Prüfungen (z.B. Schütteln, Schwingen, etc.),
- klimatische Prüfungen (z.B. Temperatur, Feuchte, Korrosion, etc.),
- sonstige Prüfungen (z.B. elektrische Prüfung, Geräusch, etc.),
- Prüfstandsdauerläufe,
- Fahrzeugerprobung und
- Erprobung beim Kunden.

Die Prüfverfahren sind je nach Unternehmen standardisiert und werden individuell auf den Einzelfall abgestimmt.

Versuchsprogramm

Das eigentliche Versuchsprogramm wird erzeugnisspezifisch durchgeführt und beruht auf Erfahrungen mit Vorgängern und ähnlichen Erzeugnissen oder Überlegungen bezüglich der möglichen Ausfallmechanismen, Schwachstellen und Risiken. Das Vorgehen könnte folgendermaßen aussehen:

- Beanspruchungs-/Belastungsanalyse (Messungen im Fahrversuch),
- Nachbildung dieser Belastungen im Versuch,
- Auswahl der Prüfverfahren (Normen),
- Festlegung der Prüfbedingungen, Prüfschärfe, Meßgrößen, Prüflingsanzahl,
- Versuchsdurchführung,
- Analyse und Beurteilung der Versuchsergebnisse (Demontagebefund, Funktionsprüfung, Sichtprüfung),
- Bewertung der Ergebnisse und
- Zuverlässigkeitsaussage.

Um den Praxisbezug der Versuche zu verbessern, wurden spezifische Reihen- und Kombinationsprüfungen entwickelt. Reihenprüfungen sind eine Folge von Einzelprüfungen, die den Alterungsprozeß möglichst gut nachbilden. Die Reihenfolge wird in einem Prüffolgeplan festgelegt. Bei Kombinationsprüfungen werden mehrere Belastungsarten kombiniert, z.B. dynamischer Schwingversuch bei verschiedenen Temperaturen.

Erprobungsplan

Der Erprobungsplan, der analog zum Prüfauswahlblatt gegliedert sein sollte, könnte folgendermaßen aussehen:

- Erzeugnisdaten (z.B. Name, Sachnummer, Variante),
- Anzahl der Prüflinge,
- Vorgesehene Dauer (z.B. Anzahl von Stunden, Zyklen, Lastwechseln),
- durchführende Abteilung und
- Ergebnis.

Mindeststichprobenumfang

Eine Abschätzung kann durch die Binomialverteilung erfolgen, durch die deutlich wird, daß eine hohe geforderte Zuverlässigkeit bei großer Aussagewahrscheinlichkeit P_A und akzeptabler Prüfzeit (geringeres Lebensdauerverhältnis L_V) zu einem großen Mindeststichprobenumfang n ohne auftretende Ausfälle führt:

$$n = \frac{\ln(1 - P_A)}{L_V{}^b \cdot \ln(R)} . \tag{4.1}$$

Mit Hilfe von Überlegungen bezüglich maximal zulässiger Vertrauensbereiche für Kenngrößen der Weibullverteilung kann der Mindeststichprobenumfang ebenfalls abgeschätzt werden [44], [84].

Mischverteilungen

Von Mischverteilungen im Weibullschen Modell spricht man, wenn sich bei Auftragung der Ausfalldaten im Weibullnetz keine Gerade bildet sondern eine von der Abszisse (Zeitachse) weg gekrümmte Kurve. Mischverteilungen entstehen, wenn Produkte unterschiedlicher Grundgesamtheiten zusammengefaßt werden [44].

Konkurrierende Ausfallmechanismen

Konkurrierende Ausfallmechanismen liegen vor, wenn ein System aufgrund verschiedener Ursachen ausfallen kann. Die Überlebenswahrscheinlichkeit des Systems berechnet sich dann aus dem Produkt der Überlebenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Ausfallursachen [44].

Reduktion des Prüfaufwandes

Die zum Nachweis der Zuverlässigkeitsforderungen notwendigen Prüfzeiten sind meist inakzeptabel. Daher versucht man die Prüfzeit (Typ I-Zensierung), die Anzahl der Ausfälle (Typ II-Zensierung) oder beides (Multiple Zensierung) vor dem Test zu

begrenzen. Die statistischen Auswerteverfahren berücksichtigen dann die Unvollständigkeit der Daten. Zu nennen sind hier die Verfahren nach Nelson [85], der Sudden-Death-Test oder die Auswertung nach Johnson [86].

Eine weitere Möglichkeit den Prüfaufwand zu reduzieren ist die Laststeigerung. Spezialfälle hiervon sind der Step-Stress Test, bei dem in festgelegten Schritten die Last gesteigert wird [87], und der bekannte Wöhlertest [88]. Ein Test mit schrittweiser Laststeigerung für überwiegend elektrische Bauteile ist unter dem Namen HALT (Highly Accelerated Life Testing) bekannt [89].

Die Ausfallrate elektronischer Bauelemente erhöht sich erfahrungsgemäß mit höherer Temperatur. Diese Beziehung wird durch einen Arrhenius-Ansatz beschrieben. Für Metalle, die einer Wechselbeanspruchung mit Verformung bis in den plastischen Bereich unterworfen sind, findet die sog. Coffin-Manson-Formel (inverse-power law) ihre Anwendung [85]. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, das Lebensdauerende aus dem gemessenen Verschleiß oder der Alterung hochzurechnen.

Die Verbindung von Vorwissen über das Verhalten einer Zufallsgröße mit den Erkenntnissen aus Versuchsergebnissen liefert eine verbesserte Information über diese Zufallsgröße. Diesen Zusammenhang kann man sich mittels der Bayesschen Statistik zunutze machen [90]. Die Anwendung im Rahmen der Schätzung der Zuverlässigkeit eines Systems wird in [91] beschrieben. Ein praktischer Ansatz zur Bayes-Methode stammt von Beyer/ Lauster [92].

Korrelation Versuch-Feld

Um die Zuverlässigkeit von Systemen und ihrer Komponenten zeitraffend nachweisen zu können, muß der Zusammenhang zwischen den verschärften und den tatsächlichen Bedingungen im Feld bekannt sein. Beispielsweise besitzen die gleichen Ausfallarten von Feld und Versuch im Weibullnetz dieselbe Ausfallsteilheit. Die Verteilungen sind lediglich um einen gewissen Betrag auf der Zeitachse verschoben. Dieser Raffungsfaktor gibt das Verhältnis der Lebensdauer im Feld zur erreichten Lebensdauer im Versuch an, siehe auch Bild 4.23.

Zuverlässigkeitswachstum

Das Zuverlässigkeitswachstum oder Reliability Growth Management (RGM) ist ein Konzept zur Planung, Verfolgung und Visualisierung der Zuverlässigkeit von Systemen während der Entwicklung. Von Duane [93] wurde beobachtet, daß die Zuverlässigkeit eines Systems im Zuge seiner Entwicklung nach einer gewissen Gesetzmäßigkeit zunimmt. Weitere Literatur findet sich in [94] und [95].

Systemzuverlässigkeit

Bei der Ermittlung der Zuverlässigkeit eines Gesamtsystems ist die Anordnung der Subsysteme, Baugruppen und Einzelteile entscheidend: Reihen-, Parallel- oder Mischanordnungen. Bei mechanischen Systemen ist meist davon auszugehen, daß eine

Serienanordnung vorliegt und somit der Ausfall irgendeiner Einheit den Ausfall des Gesamtsystems zur Folge hat.

Statistische Versuchsplanung

Da es sich bei Lebensdauerversuchen meist um geplante Versuche handelt, wird die statistische Versuchsplanung selten eingesetzt. Sie wird angewendet, falls ein Lebensdauermerkmal in Abhängigkeit von mehreren Parametern, wie z.B. Designkombinationen oder Werkstoffpaarungen untersucht werden soll. Eine ausführliche Beschreibung der Methode findet sich in [96].

4.3.3 Zuverlässigkeitsdaten aus der Nutzungsphase

Felddaten besitzen gegenüber Versuchsdaten den Vorteil, daß sie die tatsächlichen Gegebenheiten widerspiegeln. Jedoch sind sie schwer und meist unvollständig erfaßbar. Entsprechend dem Auftreten werden Felddaten folgendermaßen unterteilt [44]:

- Daten, die kurz nach Serienanlauf anfallen (Erkennen von Serienschäden, schnelle Information durch Werkstätten),
- Daten, die während der Gewährleistungszeit anfallen (Vorhersage von Gewährleistungskosten, Informationsquelle für Zuverlässigkeitsplanung) und
- Daten, die nach der Gewährleistungszeit anfallen (mögliche Erweiterung der Gewährleistungszeit, Erfüllung der Forderung nach Produktbeobachtung, Informationsquelle für Zuverlässigkeitsplanung, Vermeidung von Imageproblemen, etc.).

Datenquellen und -erhebung

Die aktive Datenerfassung durch gezielte, regelmäßige und umfassende Befragung von Großkunden, Händlern, Reparaturbetrieben oder Endkunden liefert die qualitativ besten Daten. Die wichtigste Datenquelle bildet die firmeninterne Gewährleistungs- oder Qualitätsdatenbank, die sich jedoch oftmals nur auf den Gewährleistungszeitraum beschränkt. Indirekte Informationsquellen sind zudem der Ersatzteilbedarf oder die Anzahl von Austauschteilen. Befundungen können qualitative Aussagen über Schadensverläufe und Risikopotentiale liefern, auf deren Basis eventuell quantitative Analysen aufbauen. Wesentliche Informationsquelle ist der Austausch zwischen Betreiber, Hersteller, Lieferant und Unterlieferanten bzw. Dienstleistern. Weitere Felddaten fallen auch als Nebenprodukt an, wie z.B. Fahrzeuguntersuchungen innerhalb der regelmäßigen Wartungen. Öffentlich zugängliches Datenmaterial kommt z.B. aus [44]:

- Amtlichen Stellen, z.B. in den USA: Government-Industry Data Exchange Program, Technical Information Center, Reliability Analysis Center, National Information Service,
- Statistiken des Kraftfahrtbundesamtes,
- Daten der Bundesanstalt für Straßenwesen,
- Datensammlungen der Versicherungsträger,

- Ergebnisse der regelmäßigen Fahrzeuguntersuchungen (TÜV-Autoreport, DEKRA, etc.),
- Berichte und Pannenstatistiken der Automobilvereine (z.B. ADAC-Datenbank, AVD-Aussagen, etc.),
- Informationsdienste einzelner Firmen (z.B. Bosch-Dienst) und
- Publikationen in Zeitungen und Zeitschriften.

Datentransfer und -qualität

Bei dem Transfer der Daten sollten standardisierte Verfahren angewendet werden, die z.B. Fehlerschlüssel und Produktionsnummern verwenden. Nachfolgend sind mögliche Fehlerquellen aufgelistet, die den Datentransfer und die Datenqualität negativ beeinflussen:

a) Daten sind fehlerhaft:
   - Datenerfassung unvollständig, Bestimmung von Fehlerarten nicht möglich,
   - Fehler werden gar nicht gemeldet oder Fehlermeldung ohne Daten,
   - Fehlerkennung oder Teileidentifikation stimmt nicht,
   - Fehleranalyse oder Verschlüsselung ist falsch,
   - Art der Beanstandung bzw. des Fehlers ist falsch,
   - Eingabefehler (Tabellen, Berichte, Rechnerlisten) oder Datenpräzision ist nicht ausreichend,
   - Gemeldete Stückzahlen sind falsch, damit werden Ratenberechnungen falsch; Datenzuverlässigkeit nicht vorhanden,
   - Häufige Fehlercodes bleiben im Gedächtnis der Formularausfüller und werden bevorzugt benutzt,
   - Vorsortierung bei Anerkennungsquotenermittlung, dadurch keine Übertragbarkeit der Quoten und
   - große Unterschiede bei Fehlermeldung und anschließender Befundung.

b) Zuordnung von Daten ist fehlerhaft:
   - Datenzuordnung ist nicht überprüfbar,
   - Daten den falschen Fahrzeugen bzw. falschen Teilen zugeordnet oder Daten auf Fahrgestellnummer bezogen, nicht auf Teil,
   - Teilenummer bezieht sich nicht auf beanstandetes Teil, sondern auf neu eingebautes Teil,
   - Laufleistungsangaben beziehen sich auf das Fahrzeug, nicht auf das Teil, d.h. Reparatur oder Teilaustausch kann schon stattgefunden haben,
   - bei Zeitangaben: Sind Unterschiede bekannt und werden sie berücksichtigt zwischen Zeitpunkt von Produktion des Teils und Produktion des Fahrzeugs, Auslieferung ins Lager, Auslieferung an den Händler, Auslieferung an den Kunden und Inbetriebnahme durch den Kunden, Zeitpunkt vom Ausfallter-

min des Teiles, Ausfalltermin des Fahrzeuges, Ausfallbefundungstermin und Ausfallmeldungstermin,

- Belastungszeit der Bauteile ist nicht erfaßt oder nicht bekannt und
- Unsicherheit über ”mileage”-Angabe: Sind die Daten aus Ländern mit nicht-metrischen Angaben schon umgerechnet oder nicht?

c) Reproduzierbarkeit von Daten ist nicht gegeben:
- Fehlermeldung ist nicht nachprüfbar,
- mangelnde Reproduzierbarkeit von Befundungen, z.B. Geräusche werden reklamiert und können nicht reproduziert werden,
- Fehler treten nur bei eingebauten Teilen auf,
- Zerstörung des Teils beim Ausbau, danach keine Befundung mehr möglich oder Zerstörung des beanstandeten Teils durch die Befundung,
- Fehler an anderen Teilen werden verursacht durch Befundung und
- gemeldeter Zusammenhang Fehler-Ursache ist nicht nachvollziehbar.

d) Einfluss von Umständen oder Betriebsbedingungen:
- Betriebsbedingungen beeinflussen das Geschehen erheblich, großen Einfluss haben: Viele Stadtfahrten, Taxis, Anhängerbetrieb,
- Lieferantenfahrzeug, d.h. häufiger Fahrerwechsel,
- Standzeiten im Winter,
- Fehler tritt nicht am (ausbaubaren) Teil auf, sondern in der Zusammenwirkung Teil-Umfeld und
- Kommunikationsprobleme: Verallgemeinerungen, Mißverständnisse, Vorurteile, mangelnde Information.

Datenerfassung

Die Frage, welche Daten gespeichert werden sollen, läßt sich nur aus der Aufgabenstellung heraus beantworten, die meist bei Beginn der Datensammlung nicht völlig klar ist. Die wichtigsten Daten lassen sich unterteilen in Identifikationsdaten und Fahrzeugeinsatzdaten [44]:

a) Identifikationsdaten:
- Baureihe, Baumuster, Modell, Typ, Hersteller-Sachnummer,
- Fahrgestellnummer, Aggregatenummer, Teilenummer, Seriennummer,
- Hersteller und
- Produktionsdatum, Produktionsort, Produktionsstückzahl für jede durch Auswahlparameter festgelegte Variante.

b) Fahrzeugeinsatzdaten:
- betroffenes Fahrzeug, Schadensteil, Teile-Index,
- Entwicklungsstand, Elektronik: Hardwarestand, Softwarestand,

- Fahrstrecke des Teils bzw. des Fahrzeugs,
- Einsatzgebiet (Verkaufsgebiet) und Einsatzart (Kurzstrecke, Baustelle, Fernverkehr, Lieferverkehr, Taxi),
- Zulassungsdatum,
- Umweltbedingungen beim Fehlerfall, Schadensort, Befundnummer,
- Fehlercode des Lieferanten, Fehlerbeschreibung im Klartext, Prüfcodeausdruck,
- Schadenswirkung (Bezeichnung des Mangels, z.B. durch Kunden),
- Befundung (durch technischen Fachmann),
- Schadensursache,
- Gewährleistungs-Anerkennung (evtl. verschlüsselt),
- Abstellmaßnahmen, Ersatzteil, Reparaturdatum, Kosten (Lohn, Material, Handhabung), Werkstatt und
- Gewährleistungsdaten/ Vergütungsart (Gewährleistung, Kulanz, Ausliefermangel).

Nach der Datenanalyse kann die darauf aufbauende Schadensanalyse erfolgen. Mögliche Vorgehensweisen für das Erkennen der eigentlichen Schadensursache können sein:

- Analyse der Beanstandung in der Werkstatt,
- Befragung der Kunden oder des Werkstattpersonals,
- Analyse der schadhaften Teile beim Hersteller,
- Analyse der Einsatzbedingungen (Belastung, Bedienung),
- Reproduktion des Schadens im Labor und
- Werkstoffprüfung.

Weitere Strategien für die Schadensanalyse ist eine Schadensauflistung, die als Grundlage jeder weiteren Datenanalyse dient und mittels der sich Schäden, z.B. bezüglich Produktionszeit, einschränken lassen. Die Schadensfrüherkennung soll Trendfaktoren für notwendige Maßnahmen liefern. Um Einflüsse von Konstruktions-, Produktionsänderungen oder Lieferantenwechsel einschätzen zu können, sollte im Rahmen der Schadensbeobachtung die Beanstandungshäufigkeit fortgeschrieben werden. Die häufigsten und teuersten Schäden werden in einer Rangordnungsliste priorisiert. Mit einer Schadensübersicht werden für das Management die Beanstandungen und deren Zielwerte gegenübergestellt, z.B. in einem Kuchendiagramm. In der Nachgewährleistungszeit ist die Beschaffung von Felddaten schwieriger als im Gewährleistungsbereich. Von Großabnehmern oder ausgewählten Kunden kann sich der Hersteller die notwendigen Informationen beschaffen.

Fehleranalyse- und Management
Unter Fehleranalyse versteht man die zielgerichtete Ermittlung von Ursache-Wirkung-Zusammenhängen. Das Fehlermanagement lässt sich durch die Schlagworte Fehlererfassung, Fehlerkorrektur und Fehlerauswertung charakterisieren.

Auswertung von Felddaten
Für den Gewährleistungszeitraum liegen im Regelfall durch die Rückkopplung vom Kunden über den Händler bis zum Hersteller vollständige Produktdaten vor, die sich mit Hilfe des Weibulldiagramms auswerten lassen. Im Nachgewährleistungszeitraum liegen meist unvollständige Daten vor, die z.B. mittels des Sudden Death Test [44] ausgewertet werden können.

Korrelation mit Versuchsdaten
Um die Versuchsbedingungen den tatsächlichen Beanspruchungen anzunähern, existieren mehrere Vorgehensweisen, wie z.B. Beanspruchungsanalysen, Labortests oder Zuverlässigkeitsvergleiche ähnlicher Elemente, wobei der Ausfallmechanismus im Feld und Versuch derselbe sein muß. Die Auswertung der Ausfalldaten aus Versuch und Feld wird im Weibullwahrscheinlichkeitsnetz durchgeführt. Bei parallelen Ausgleichsgeraden läßt sich der Raffungsfaktor, das Verhältnis Versuch zu Feld, berechnen, siehe auch Kapitel 4.3.2 und Bild 4.23.

4.3.4 Zuverlässigkeitsdaten aus Datenbanken

Da Zuverlässigkeitsdaten zum Know-how der jeweiligen Hersteller gehören, sind sie nicht öffentlich verfügbar. Dennoch gibt es einige Quellen, die nachfolgend den Fachgebieten zugeordnet werden.

Elektrik und Elektronik
Bei den Ausfällen von elektronischen Bauteilen handelt es sich meist um sogenannte Zufallsausfälle. Diesen mittleren Bereich der Badewanne kann man mit einer konstanten Ausfallrate beschreiben. Angaben darüber findet man in Datenblättern oder Veröffentlichungen der Hersteller, in firmenspezifischen Normen [97], in Prüfberichten der Luft- und Raumfahrt [42] oder im MIL-Handbook 217 (Reliability Prediction of Elec-tronic Equipment) [98].

Mechanik
Die Parameter der Verteilung, mit der sich das Ausfallverhalten mechanischer Bauteile am besten beschreiben läßt, können Garantie- und Kulanzstatistiken, Auswertungen zugänglicher Fremdliteratur und Forschungsberichten oder firmeneigenen Versuchen entnommen werden.

Das Ausfallverhalten mechanischer Bauteile läßt sich am besten mit der dreiparametrigen Weibullverteilung beschreiben. Das Problem beim Aufbau einer Datenbank für die Parameter b, T, und t_0 besteht darin, daß diese statistischen Parameter von den Einflußgrößen Form, Werkstoff, Bearbeitung und Belastung abhängen. Damit sind die

Bauteil-Parameter für jeden Einsatzfall unterschiedlich. In [2] werden für die statistischen Parameter der Weibullverteilung Streubereiche angegeben, welche die Vertrauensbereiche und die Belastungshöhe berücksichtigen. Z.B. steigt der Formparameter *b* bei Zahnrädern und Wellen mit steigender Belastung an.

Die Zuverlässigkeitsdatenbank „ZUDIMA“ [99] enthält Weibullparameter einiger Bauteile, wie z.B. Zahnräder, Wellen oder Lager mit Quellenangabe.

4.4 Analyse der CAD-integriert anwendbaren Zuverlässigkeitsmethoden

Die Zuverlässigkeitsdaten, die im vorigen Kapitel 4.3 ausführlich untersucht wurden, dienen als Basis für die phasenübergreifend anwendbaren Zuverlässigkeitsmethoden aus Kapitel 3.2 und 3.3. Grundsätzlich sind alle Ergebnisse der jeweiligen Methoden über der Entwicklung fortzuschreiben. Jedoch können im Rahmen dieser Arbeit nur diejenigen Methoden betrachtet werden, die integriert zu dem rechnerunterstützten Konstruktionsprozeß angewendet werden können. Analog zu der Abfolge in Kapitel 2, werden nachfolgend die Zuverlässigkeitsmethoden hinsichtlich eines CAD-integrierten Einsatzes betrachtet.

ABC-Analyse

Eine Analyse mit dem Ziel einer einfachen Priorisierung kann bereits in der Konzeptphase durchgeführt werden. Das jeweilige Ergebnis wird dann bei Entwicklungsfortschritt aktualisiert und gegebenenfalls abgeändert. Damit können während der gesamten CAD-Entwicklung die kritischen und unkritischen Bauteile und Baugruppen transparent dargestellt werden.

Fehler Möglichkeits- und Einflußanalyse

Basierend auf einer vorläufigen Stückliste oder Baugruppenliste des ersten Konzepts, kann eine Konzept-FMEA erstellt werden. Aufbauend darauf und auf der Weiterentwicklung des geometrischen Modells wird die Konzept-FMEA in verschiedene Unter-FMEAs aufgespaltet, die sich mit möglichen Fehlfunktionen kritischer Baugruppen befassen.

Fehlerbaumanalyse und Ereignisablaufanalyse

Im Konzeptstadium werden die geometrischen Bauteile strukturiert in einem groben Fehlerbaum zusammengestellt, der mit zunehmendem Entwicklungsfortgang verfeinert und aufgeteilt wird. Darüber hinaus werden die Elemente des Fehlerbaums zunehmend mit quantitativen Daten versehen, so daß frühstmöglich der kritische Pfad und das kritische Element erkannt und optimiert werden können.

Bei der Ereignisablaufanalyse gilt analog die zur Fehlerbaumanalyse beschriebene Vorgehensweise, wobei zusätzlich zu den möglichen Ausfällen, alle Ereignisse betrachtet werden.

Boolesche Theorie
Im Konzeptstadium sollte eine Grobstruktur erstellt werden, die im Zuge der Weiterentwicklung verfeinert und verändert wird. Durch eine zunehmende Belegung der Systemelemente mit quantitativen Daten kann die jeweilige Systemzuverlässigkeit der Entwicklungsphase berechnet werden. Mittels des Boole-Markoff-Modells kann die Dauerverfügbarkeit bei Angabe der Reparaturrate μ sowie der Ausfallrate λ ermittelt werden.

4.5 Entwurf der Programmodule

Folgende Teilprogramme, die unter Verwendung von MS Visual C++ entwickelt wurden [64] - [75], stehen dem Konstrukteur während der Produktentwicklung zusätzlich zu dem CAD-System zur Verfügung:

- Der Lebensdauermanager und
- der Systemstruktureditor mit der graphischen Darstellung der Ergebnisse.

Die Anordnung der Teilprogramme auf der Arbeitsoberfläche sollte so aufgebaut sein, daß diese gleichzeitig zusammen mit dem CAD-System sichtbar sind und dadurch ein einfaches Wechseln zwischen den einzelnen Anwendungen möglich wird.

4.5.1 Der Lebensdauermanager KOSYMA

Unter dem Begriff „konstruktionsbegleitender Systemlebensdauermanager“ (KOSYMA) werden mehrere Teilmodule vereint:

Modul zur Aufnahme und geordneten, d.h. phasenbezogenen Ablage der Daten
Dieses Modul stellt das sogenannte Frontend für den Benutzer, also für den Konstrukteur dar, um alle zuverlässigkeitsrelevanten Daten konstruktionsphasenorientiert ablegen zu können. Darüber hinaus sollen die einmal abgelegten Daten auch für weitere, folgende Konstruktionsphasen verwendet werden können. Gleichzeitig organisiert das Programmodul auch die geordnete Ablage der Daten.

Mittels einer MS Access-Datenbank können Tabellen für die Datenablage in den verschiedenen Konstruktionsphasen verwendet werden. Mit diesen Datentabellen können den Objekten des CAD-Systems Zuverlässigkeitsdaten zugeordnet werden, deren Eingabe über das „Frontend“ des Lebensdauermanagers erfolgt. Für jede der CAD-Konstruktionsphasen Konzeption, Entwurf und Ausarbeitung wird eine Datentabelle zur Verfügung gestellt. Mittels Beziehungen zwischen den einzelnen Tabellen können die Daten von anderen CAD-Entwicklungsphasen objektbezogen, ganz oder auch teilweise, übernommen werden.

Modul zur Abfrage und Übernahme von qualitativen und quantitativen Daten
In das Frontend zur Dateneingabe ist eine Schaltfläche integriert, mit der sich eine Zuverlässigkeitsdatenbank aufrufen läßt. Z.B. lassen sich Weibullparameter bestimmter

Bauteile über die Zwischenablage in das Eingabemodul einfügen. Genauso lassen sich bestimmte qualitative Daten (wie z.B. Ausfallarten, Ausfallursachen, etc.) aus einer weiteren Datenbank in die Zwischenablage übernehmen.

Den Entwurf der Integration von zuverlässigkeitsrelevanten Daten mit CAD-Daten zeigt Bild 4.24.

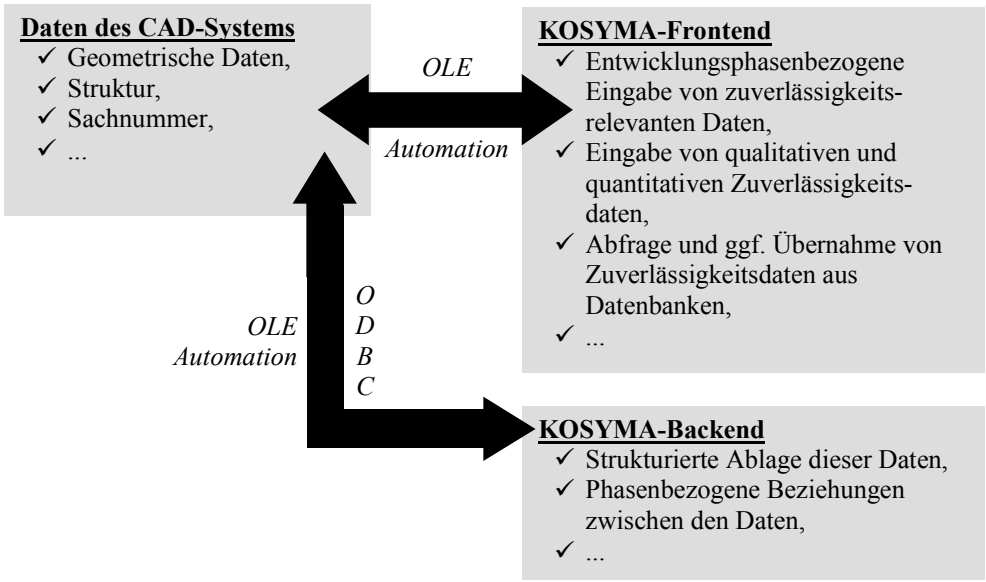


Bild 4.24: Konzept der Integration von zuverlässigkeitsrelevanten Daten mit CAD-Daten

Vorgehensweise

Während der Arbeit im CAD-System kann der Konstrukteur, ohne die CAD-Umgebung zu verlassen, den Lebensdauermanager starten. Hier trägt der Konstrukteur die relevanten Lebensdauermerkmale ein, die in einer Access-Datenbank abgelegt werden. Einen Auszug aus der Speicherung der Lebensdauerdaten zeigt Bild 4.25. Sowohl qualitative als auch quantitative Lebensdauerdaten können vermerkt werden.

Microsoft Access - [Part : Tabelle]

Datei Bearbeiten Ansicht Einfügen Format Datensätze Extras Fenster ?

Bezeichnung	Werkstoff	Schnittstelle	Fr_QKlasse	Fr_Verteilung	Fr_T	Fr_T0	Fr_B	Fr_B10	Fr_U	Fr
Stellgliedgehäuse	G-AlSi9Cu3	☑	C	1	0	0	0	0	0	
Führungsbolzen	9S Mn Pb 28	☐	C	0	0	0	0	0	0	
Gelenklager	9S Mn 28K	☐	C	0	0	0	0	0	0	
Gelenklager	9S Mn 28K	☐	C	0	0	0	0	0	0	
Lagerbolzen	C35	☐	C	0	0	0	0	0	0	
Welle	C 35	☐	B	2	0	75770,3281	0	93296,0929059408	234234	
Lagerbolzen	C35	☐	C	0	0	0	0	0	0	
Niet	USt36-2 DIN 17	☐	C	0	0	0	0	0	0	
Welle	StW32	☐	A	1	900006214	70005805,359	0,9872	154940331,866691	0	
Stößel	9SMn 28k DIN1	☐	C	0	0	0	0	0	0	
Gegenlager (Lagerbuchse Feder)	C 15	☐	B	1	7830000	3360000	2	4810930,02150602	0	
Schneckenradsegment	SINT C50	☐	A	1	244000000	48000000	1,6	96020839,8227434	0	
E-Motor	1BB 42	☐	A	1	333000000	7430000	1,1	49519108,9697669	0	
Stiftleiste mit EMV-Schutz	Duko Ceramik	☐	A	1	627703	128296,8438	1,129	196342,593275332	0	
Dichtringaufnahme	PA 6.6 Gv 25%	☐		0	0	0	0	0	0	
Sechskantmutter	PA 6.6 GV 25%	☐		0	0	0	0	0	0	
Ring	C15	☐	C	0	0	0	0	0	0	
Schneckenradachse	16MnCr5	☐	A	0	0	0	0	0	0	
Lagerbuchse	Vespel SP 211	☐	B	1	118958,078	47201,4453	1,8492	68451,0709190603	0	
Lagerbuchse	Vespel SP 211	☐	B	1	118958,078	47201,4453	1,8492	68451,0709190603	0	

Bild 4.25: Ablage der Lebensdauerdaten, Auszug

4.5.2 Der Systemeditor SYSEDIT

Modul zur phasenbezogenen Analyse des Systems

Mit diesem Software-Modul können auf Basis der vorhandenen Daten sowohl qualitative als auch quantitative Zuverlässigkeitsanalysen durchgeführt werden. Es lassen sich Strukturen erstellen und phasenbezogen ablegen. Damit wird eine Wiederverwendung der Analyseergebnisse bzw. ein Rückgriff auf diese in fortgeschrittenen Konstruktionsphasen möglich.

Nach erfolgter Kopplung der Daten aus dem CAD-System mit dem Lebensdauermanager können den geometrischen Objekten zuverlässigkeitsrelevante Daten zugewiesen werden. Auf der Grundlage dieser gemeinsamen Datenbasis kann die Zuverlässigkeitsanalyse erfolgen. Die einzelnen Ergebnisse dieser Analyse sollen phasenbezogen zusätzlich zu den Daten in der Datenbank abgelegt werden.

Im Systemeditor kann zwischen der Erstellung einer Booleschen Systemstruktur oder eines Fehlerbaums und der graphischen Ausgabe der Ergebnisse im Weibullnetz gewechselt werden. Die Systemstruktur kann dabei direkt erstellt werden. Die Ergebnisse der Analyse werden im Graphikmodus ausgegeben (Weibullnetz).

Vorgehensweise

Das Programm SYSEDIT, mit dem die Systemstruktur festgelegt wird, greift auf die Daten des Lebensdauermanagers KOSYMA zu und verwendet sie für die Systemberechnungen, wie z.B. nach Boole oder FBA. Mittels des graphischen Modus können die verschiedenen Zuverlässigkeitskenngrößen des untersuchten Systems dargestellt werden. In dem Hauptprogramm werden die Ergebnisse ermittelt und im CAD-System visualisiert. Das durch die Analyse gefundene kritische Teil bzw. der ermittelte kritische Pfad wird hervorgehoben, um dem Konstrukteur ein optisches Signal zu geben, daß der Systemausfall (Topevent) von diesem Systemelement bzw. von den in diesem Pfad enthaltenen Systemelementen in erster Linie abhängt.

Graphikmodul

Mit dem graphischen Modul lassen sich die verschiedenen Zuverlässigkeitsparameter über der Zeit graphisch übersichtlich darstellen. Die Weibull-, Normal-, Lognormal- und Exponentialverteilung stellen die Lebensdauerverteilungen der Einzelkomponenten sowie des Gesamtsystems dar. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, für verschiedene Methoden der Zuverlässigkeitstechnik unterschiedliche Oberflächen zu verwenden. Z.B. kann der kritische Pfad eines Fehlerbaums bei Selektion eines Schalters („Icon“) rot angezeigt werden, so daß der Konstrukteur die Bauteile erkennt, die bezüglich der geforderten Zuverlässigkeit zu verbessern sind.

Das Konzept der CAD-Integration der Zuverlässigkeitsanalyse auf Basis der Datenbank des Lebensdauermanagers zeigt Bild 4.26.

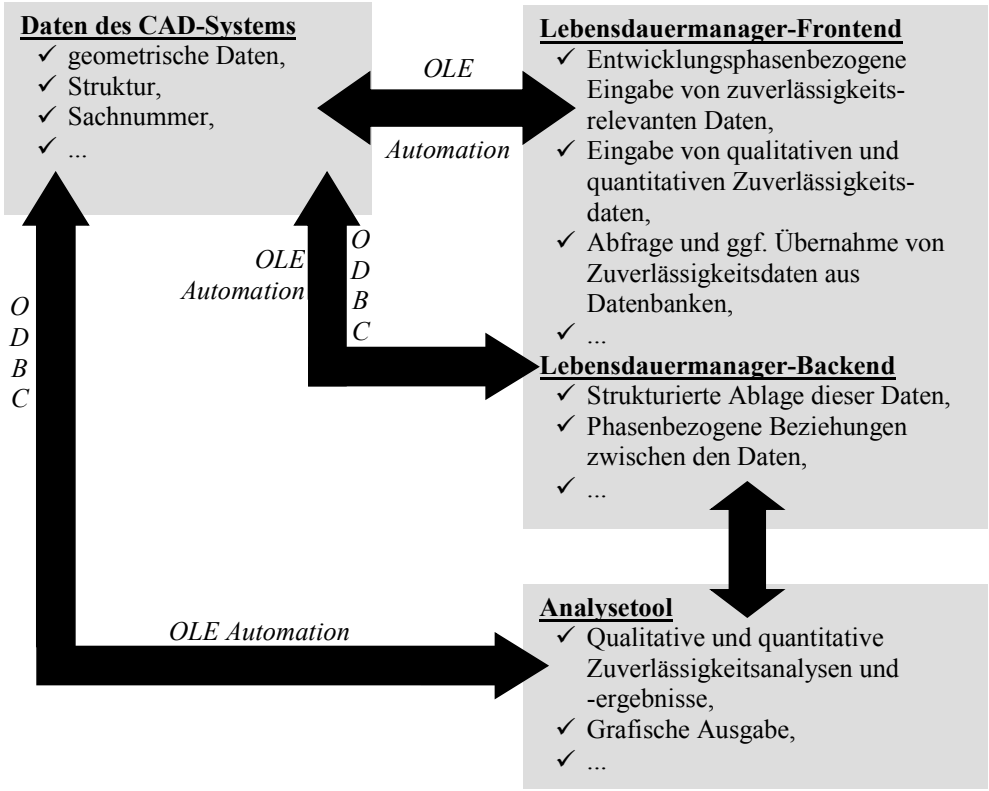


Bild 4.26: Konzept der CAD-Integration der Zuverlässigkeitsanalyse auf Basis der Datenbank

4.5.3 Gesamtanordnung des Systems

Der Entwurf der Kopplung des CAD-Programms Solid Edge mit den eigenentwickelten Software-Modulen stellt Bild 4.27 dar.

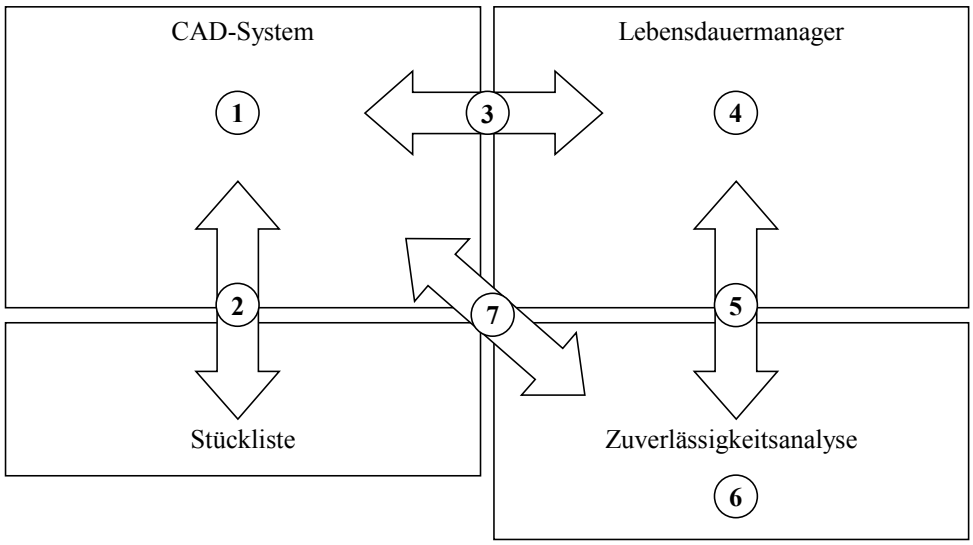


Bild 4.27: Konzept der CAD-Integration der Zuverlässigkeitsanalyse

Ausgehend von dem CAD-System (1) werden die geometrischen Objekte in der Stückliste strukturiert dargestellt (2). Durch die Kopplung (3) mit dem Lebensdauermanager werden den geometrischen Objekten phasenbezogen Zuverlässigkeitsdaten

hinzugefügt (4). Durch die weitere Kopplung mit dem Programm zur Zuverlässigkeitsanalyse (5) können auf dieser Datenbasis Zuverlässigkeitsmethoden angewendet und eingesetzt werden (6). Die Ergebnisse dieser Zuverlässigkeitsanalysen werden phasenbezogen zusätzlich zu den eigentlichen Zuverlässigkeitsdaten abgespeichert sowie im eigentlichen Entwicklungswerkzeug CAD-System sichtbar gemacht (7).

Die Verwendung der Zuverlässigkeitsdatenbank ZUDIMA [99] zeigt Bild 4.28. Ausgehend vom Lebensdauermanager können in der Zuverlässigkeitsdatenbank Daten von passenden Bauteilen ausgewählt (4a) und als Basis für die nachfolgende Analyse übernommen werden (4b).

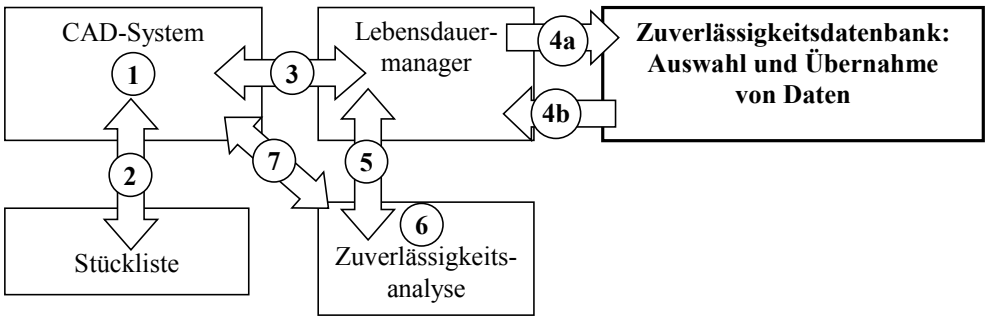


Bild 4.28: Verwendung der Zuverlässigkeitsdatenbank ZUDIMA

Datenablage

Jeder Hauptkonstruktionsphase kann eine Datentabelle zugeordnet werden. Wobei die Tabelle „Sketch“ (Skizze) für die Konzeptphase steht, in der die einzelnen Skizzen als Objekte verwendet werden. Ausgehend von den Skizzen, können dreidimensionale Volumenkörper erstellt werden, sogenannte „Parts“, deren Zuverlässigkeitsdaten in der Tabelle Parts abgelegt wird. Alle Parts zusammen ergeben den Gesamtentwurf in der gleichnamigen Konstruktionsphase. In der Ausarbeitungsphase werden die Formelemente („Features“) der einzelnen Bauteile unter Beachtung des Gesamtkontextes gestaltet. Die dazugehörigen Zuverlässigkeitsdaten werden in der Tabelle „Feature“ abgelegt und in der Datentabelle „Part“ zusammengeführt. Die strukturierte, entwicklungsphasenbezogene Datenablage in der Access-Datenbank mittels des Lebensdauermanagers ist in Bild 4.29 dargestellt. Aufbauend auf Bild 4.10 wird die Ablage der Zuverlässigkeitsdaten phasenbezogen betrachtet. Zwischen den einzelnen Datentabellen bestehen Beziehungen, d.h. die Daten können von vorangegangenen Konstruktionsphasen übernommen werden.

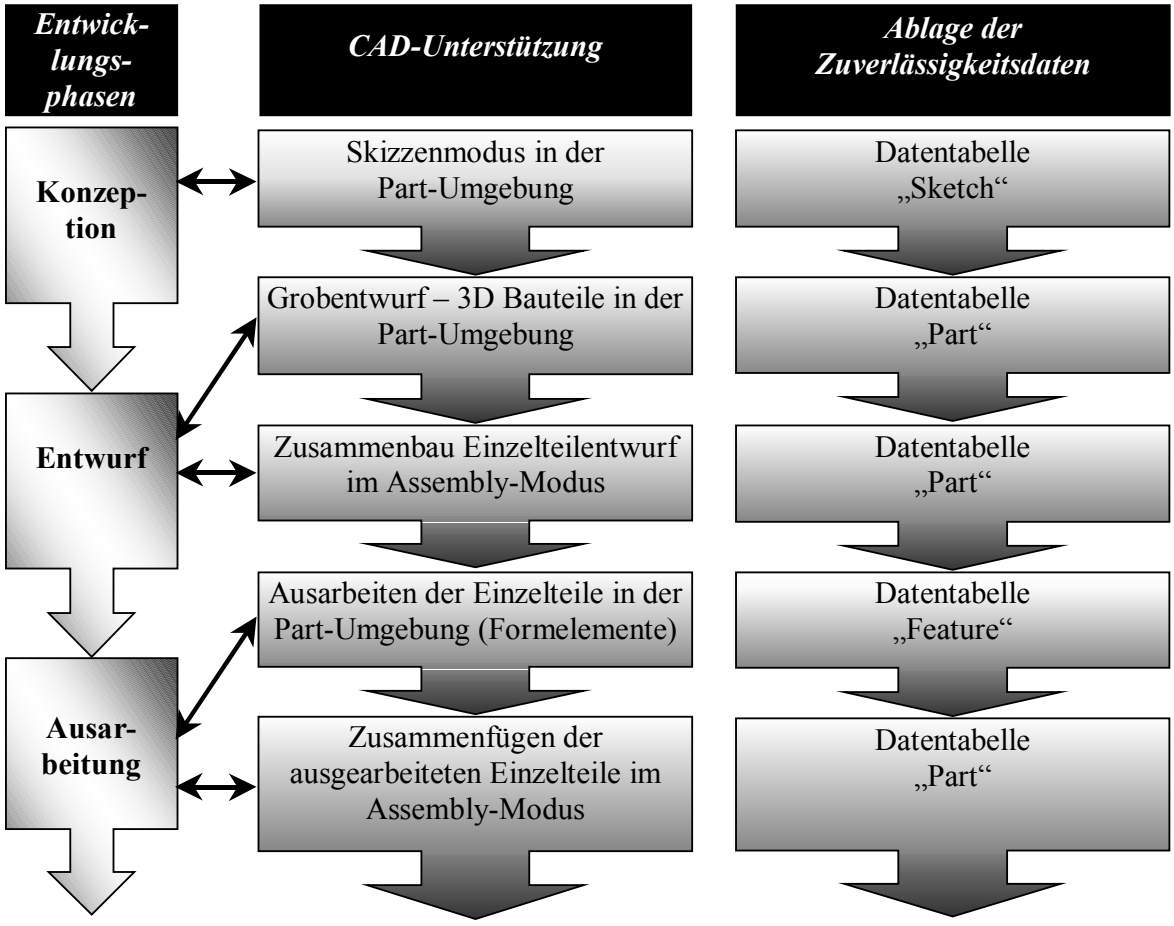


Bild 4.29: Datenablage im Lebensdauermanager KOSYMA

5 Phasenbezogene, durchgängige Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen

Aufbauend auf der vorangegangenen Analyse und dem Entwurf eines phasenübergreifenden CAD-integrierten Zuverlässigkeitsinformationssystems wird in diesem Kapitel die Umsetzung betrachtet. Diejenigen Konstruktionsphasen, die mittels eines CAD-Systems abgebildet werden, können auch mit Zuverlässigkeitsdaten und -methoden verknüpft werden (Kapitel 5.1-5.3).

Schwerpunkt dieses Kapitels ist die durchgängige Integration der Zuverlässigkeitsdaten und -analysen in die CAD-Entwicklungsschritte mit der Möglichkeit, Ergebnisse aus vorangegangen Phasen übernehmen zu können sowie diese Ergebnisse für alle Teilschritte im CAD-System visualisieren zu können. Basis der Zuverlässigkeitsanalysen bilden die Zuverlässigkeitsdaten, die wiederum auf den Daten des CAD-Systems basieren. Nach der Ausarbeitungsphase können aufbauend auf den Ergebnissen der Weibullanalyse Kostenbetrachtungen erfolgen (Kapitel 5.4).

5.1 Anlegen der Zuverlässigkeitsdaten in der Konzeptphase

5.1.1 Datenkopplung in der Konzeptphase

Nach dem Klären der Aufgabenstellung folgt mit dem Abstrahieren die Konzeptphase, in der die prinzipielle Lösung festgelegt wird. Die Gesamtfunktion wird unterteilt in Teilfunktionen. Im CAD-System Solid Edge werden diesen Teilfunktionen Baugruppen zugeordnet, die in der Part-Umgebung mittels Skizzen dargestellt werden und als Objekte angesprochen werden können. Im CAD-System können mittels des „Feature Pathfinders“ die Skizzen aufgelistet und ggf. deren Struktur sichtbar gemacht werden.

Vom CAD-System aus durchführbar und direkt daran gekoppelt wird der Lebensdauermanager KOSYMA aufgerufen, mittels dem die Eingabe relevanter Zuverlässigkeitsdaten erfolgt. Die Benutzerschnittstelle von KOSYMA, das sogenannte „Frontend“ ist in Bild 5.1 dargestellt. Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, wird für jedes Objekt im CAD-System ein Datenblatt angelegt, in dem die zuverlässigkeitsrelevanten Daten eingegeben werden können. Zusätzlich wird je Versagensart ein Datenblatt angelegt. Für Schnittstellenelemente, die im CAD-System nicht sichtbar werden und daher nicht als Objekte angesprochen werden können, wie z.B. eine axiale Verbindung, können Datenblätter hinzugefügt werden.

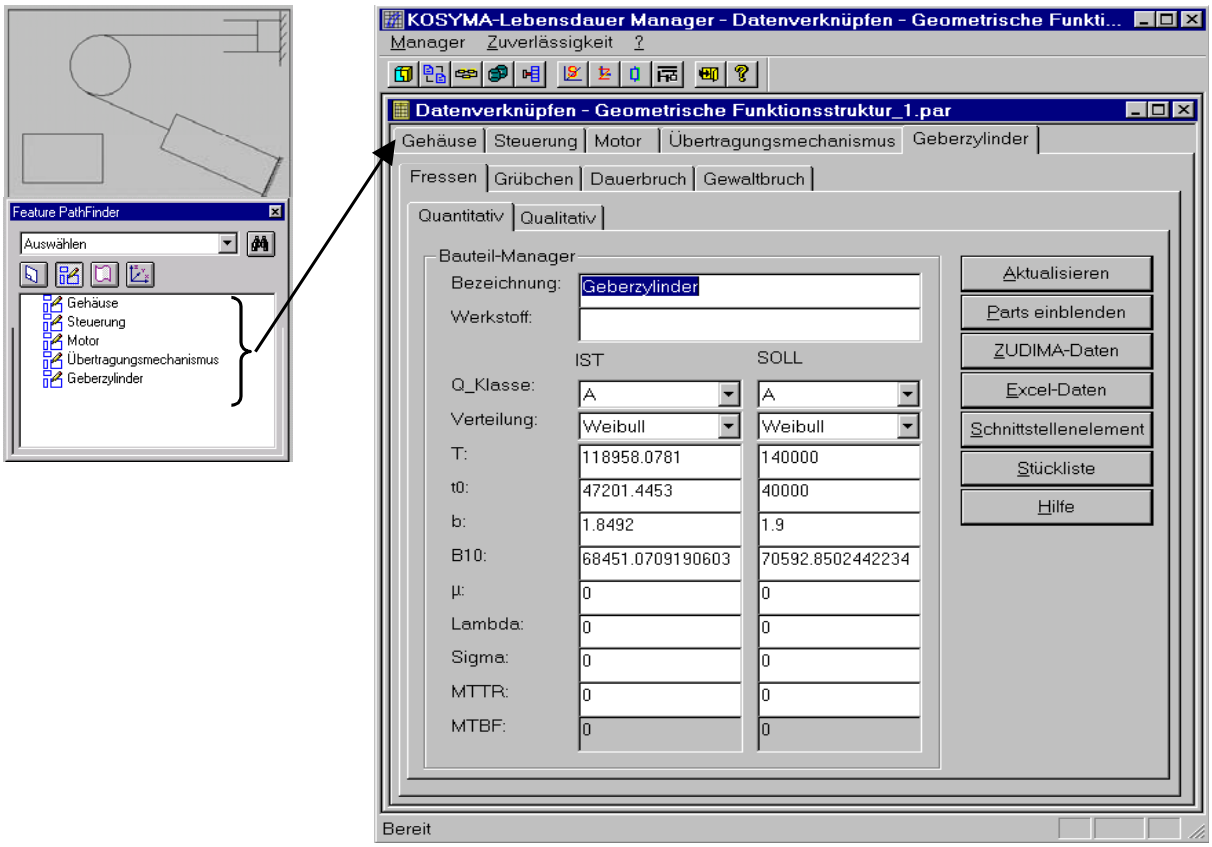


Bild 5.1: Oberfläche des Lebensdauermanagers KOSYMA

Die Datenblätter je Versagensart sind weiter unterteilt in qualitative und quantitative Bereiche. In den Datenblättern können die vom CAD-System übernommenen Bezeichnungen verändert und Werkstoffangaben hinzugefügt werden. Für qualitative Angaben, wie z.B. Angaben über die Funktion der Baugruppe oder des Bauteils oder Besonderheiten, steht ein Textfeld zur Verfügung.

Grundsätzlich werden die quantitativen Angaben in SOLL- und IST-Werte untergliedert. Mit der Q-Klasse erfolgt eine Einteilung gemäß der ABC-Analyse in risikoreiche (A und B) und risikoneutrale (C) Systemelemente, siehe auch Kapitel 3.2.5. Für die risikoreichen Bauteile kann eine mathematische Verteilung gewählt werden, die das Ausfallverhalten beschreibt, z.B. Weibull- oder Exponentialverteilung. Um die Elemente in den nachfolgenden Analysen verwenden zu können, müssen die notwendigen Parameter eingegeben werden.

Die Ablage der eingegebenen Zuverlässigkeitsdaten erfolgt zusammen mit den Geometrieinformationen des CAD-Systems strukturiert und phasenbezogen in der MS Access-Datenbanktabelle „Sketch“. In diesem Fall werden das Backend und das Frontend in einer Datei (kosyma.mdb) von einer Anwendung (MS Access) erstellt und ausgeführt.

5.1.2 Durchgängigkeit der Daten in der Konzeptphase

Die Wiederverwendung der Daten und Ergebnisse von Zuverlässigkeitsanalysen ist durch eine phasenbezogene Verknüpfungsmöglichkeit gegeben. Bei einer weiteren Bearbeitung und Weiterentwicklung der ersten geometrischen Funktionsstruktur im CAD-System steht der Lebensdauermanager mit folgenden Möglichkeiten zur Verfügung: In einem kontextsensitiven Dialog können IST- und SOLL-Daten von vorangegangenen Skizzen übernommen werden oder die Daten zurückgesetzt werden, Bild 5.2. Die Möglichkeit zur Definition oder zum Löschen von Schnittstellenelementen ist weiterhin gegeben.

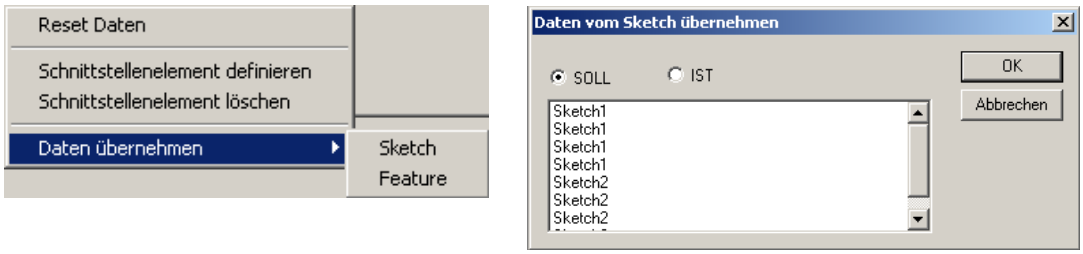


Bild 5.2: Übernahme von Zuverlässigkeitsdaten und -analysen

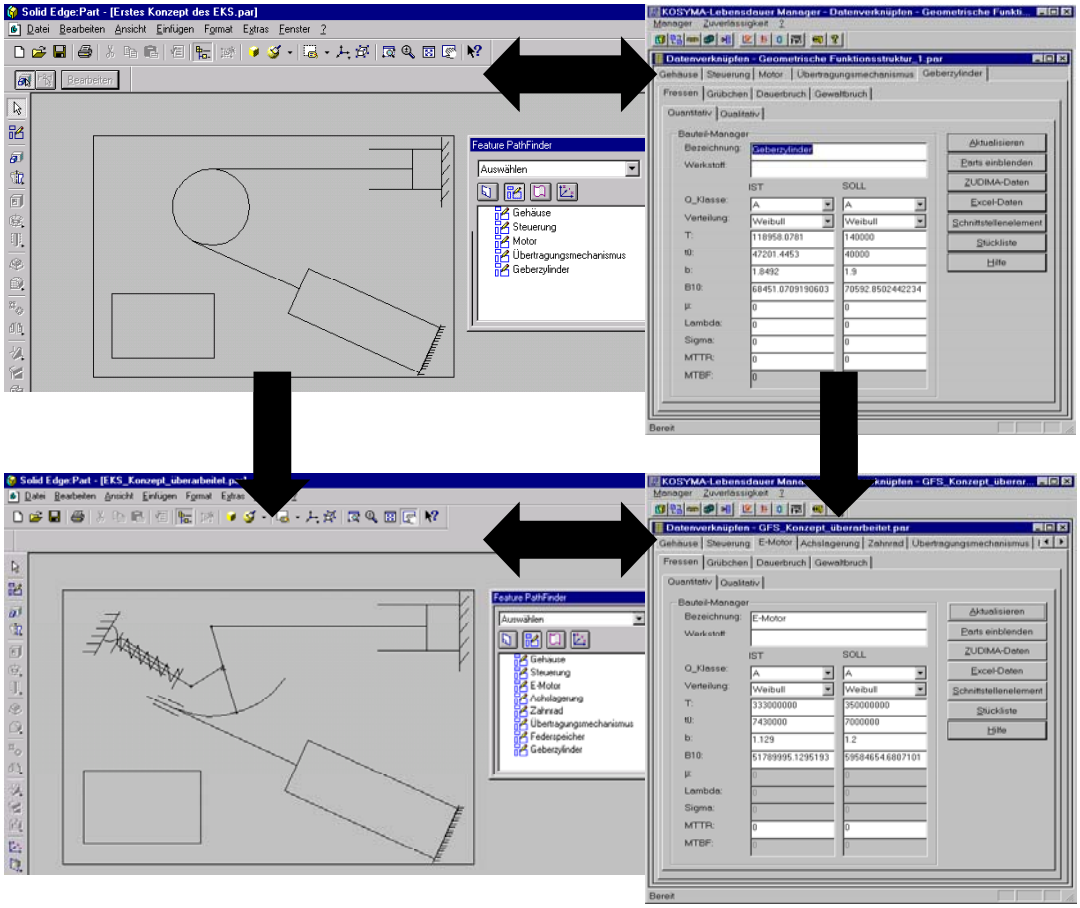


Bild 5.3: Übernahme von Zuverlässigkeitsdaten während den CAD-Konzeptphasen

In dieser ersten Phase der rechnerunterstützten Konstruktion fließen die Hauptforderungen des Lastenhefts in das Konzept ein, wie z.B. Funktion, Eingangs- und Ausgangsgrößen, Bauraum, etc., siehe auch Kapitel 4.2.1. In den weiteren Entwicklungsschritten der Konzeptphase können nun Verfeinerungen bezüglich der Hauptanforderung an das technische System im Sinne einer Detaillierung erfolgen. Dabei können die im ersten Konzeptschritt gesammelten Zuverlässigkeitsdaten übernommen werden, Bild 5.3.

Für zusätzlich erstellte geometrische Objekte werden bei Kopplung mit dem Lebensdauermanager wiederum Datenblätter für die strukturierte Ablage bereitgestellt. Die den geometrischen Objekten hinzugefügten Zuverlässigkeitsdaten stellen die Basis für Zuverlässigkeitsanalysen dar.

5.2 Entwurfsphase

In der darauffolgenden Entwurfsphase erfahren die erstellten Skizzen eine Ausprägung in die dritte Dimension, indem sie als Profile verwendet werden. Dabei entsteht der Übergang von der Skizze in der Konzeptphase zum 3D-Grobmodell, Bild 5.4.

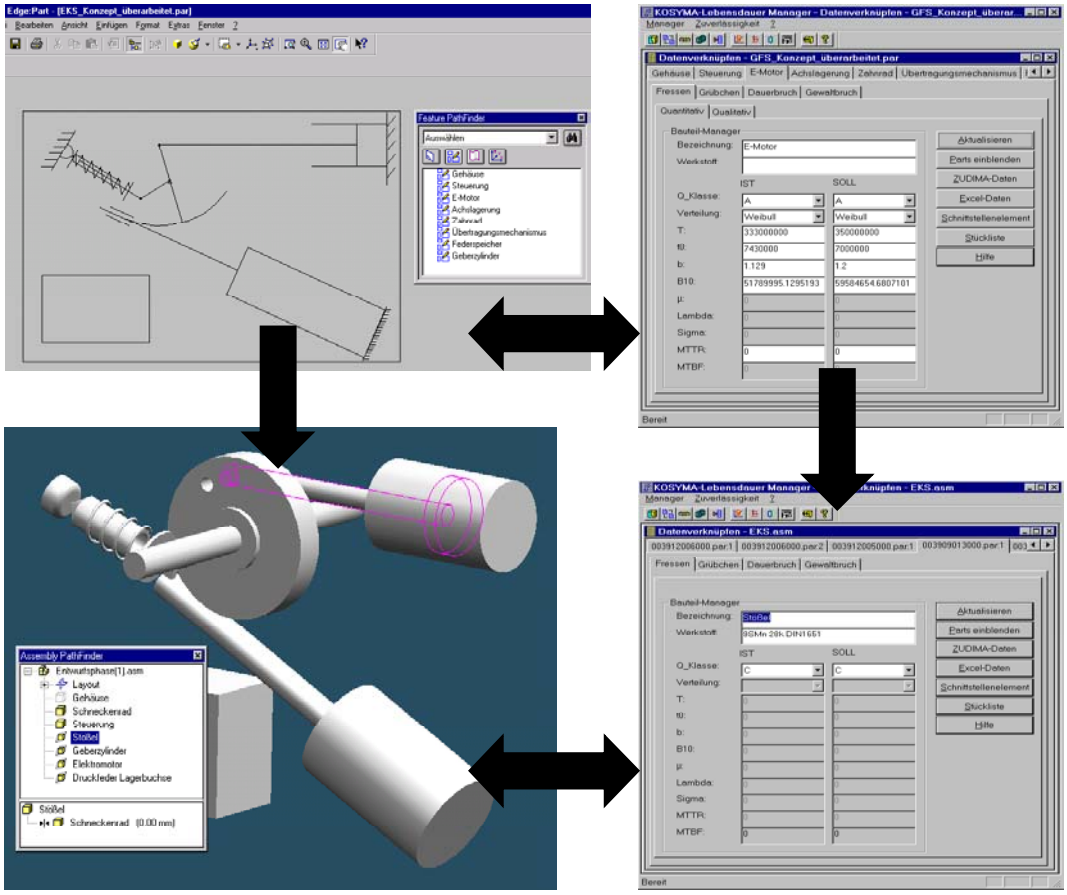


Bild 5.4: Übergang von der Konzept- zur Entwurfsphase

Bereits erstellte Zuverlässigkeitsanalysen können übernommen und verändert werden. So wurde z.B. eine Boolesche Systemstruktur für das Konzept erstellt, die nun als Ausgangsbasis für die Boolesche Systemstruktur des Entwurfs verwendet werden kann, Bild 5.4.

In Bild 5.5 werden die Beziehungen zwischen den einzelnen phasenbezogenen Zuverlässigkeitsinformationen dargestellt. Dabei werden die Zuverlässigkeitsdaten in einzelnen Tabellen übersichtlich abgelegt. Mittels des Datenbankmanagementsystems MS Access werden die Datenübernahmen und Datenbeziehungen realisiert.

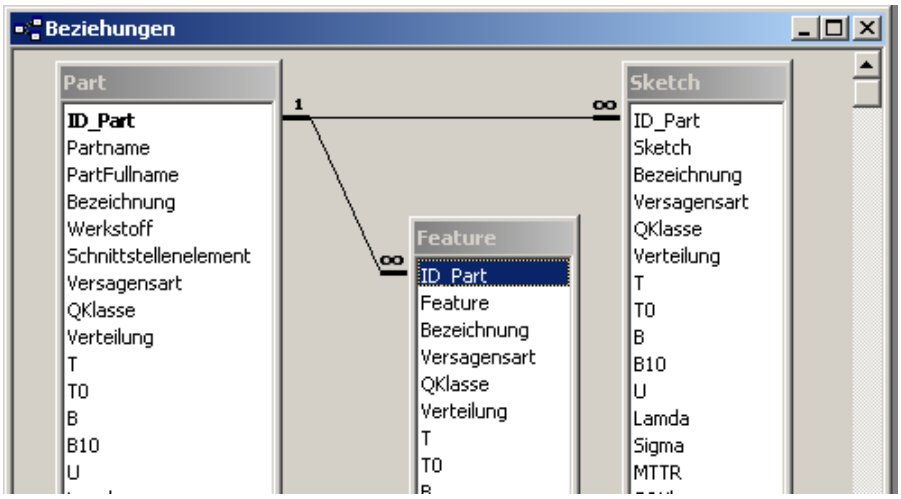


Bild 5.5: Übernahme phasenbezogener Zuverlässigkeitsdaten und -ergebnisse

5.3 Ausarbeitungsphase

Das zuvor erstellte 3D-Grobmodell wird nun aufgegliedert, damit Unterbaugruppen und Einzelteile im Sinne des Gesamtentwurfs konstruiert werden können. Dabei werden wiederum die Zuverlässigkeitsdatenblätter ergänzt und verändert. Für die einzelnen Detaillierungen, d.h. Ausprägungen (z.B. Fasen) oder Ausschnitte (z.B. Bohrungen) können entsprechende Zuverlässigkeitsdaten in Registerkarten abgelegt werden. Diese Daten dienen als Basis für eine mögliche Zuverlässigkeitsberechnung. Strukturinformationen können zuvor mittels eines Booleschen Schaltbildes gewonnen werden, Bild 5.6.

Die gleiche Möglichkeit besteht für die Einzelteile. Alle im CAD-System erstellten Objekte werden mit dem Lebensdauermanager verknüpft und können als Systemelement im Rahmen einer bereitgestellten Zuverlässigkeitsmethode im Strukturedtor verwendet werden. Die aus der Konstruktion, Bild 5.6, herausgegangenen Einzelteile (a, b) werden in Bild 5.7 mit Zuverlässigkeitsdaten und darauf aufbauender Boolescher Struktur verbunden.

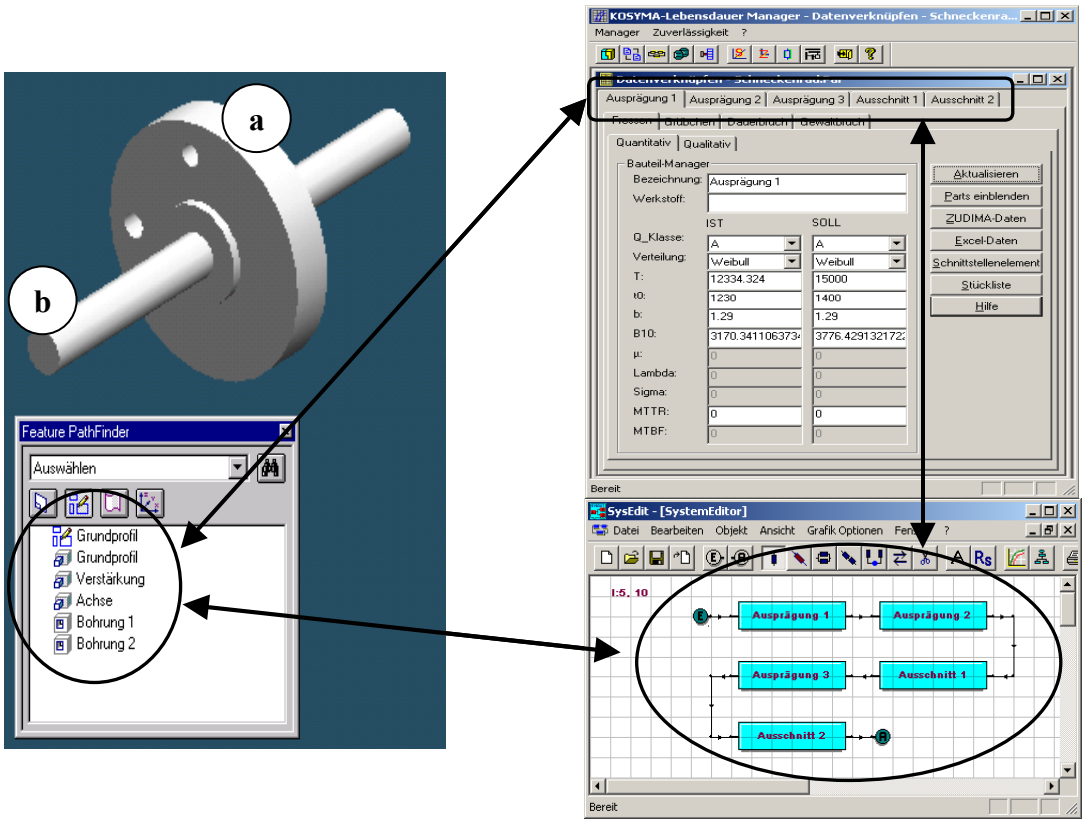


Bild 5.6 Zuverlässigkeitsintegrierte CAD-Ausarbeitungsphase im Partmodus

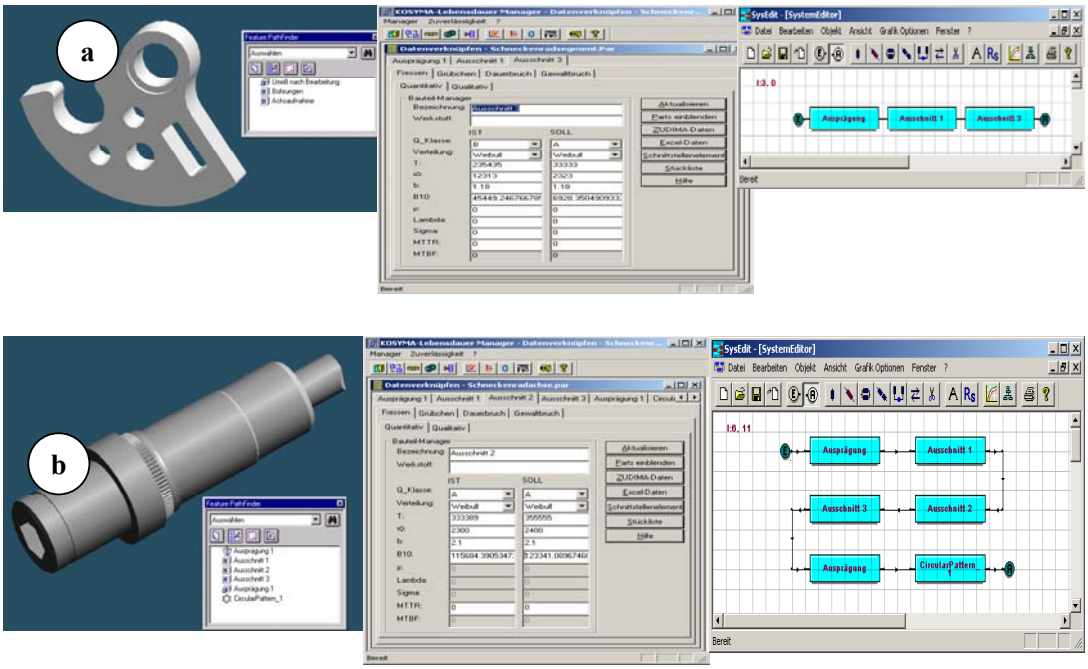


Bild 5.7: CAD-integrierte Zuverlässigkeitsanalyse der Einzelteile in der Ausarbeitungsphase

Nach der Ausarbeitung der Einzelteile entsteht durch deren Zusammenfügen die Zusammenbaukonstruktion. Im CAD-System wird dazu der Assembly-Modus verwendet, Bild 5.8. Dabei können die Zuverlässigkeitsanalysen der Einzelteile übernommen werden. In dem aufgeführten Beispiel wird für die Baugruppe ein Fehlerbaum erstellt.

Der Fehlerbaum für das rechte Bauteil kann übernommen werden, wohingegen für das linke Bauteil die bereits erstellte Boolesche Struktur in einen Fehlerbaum umgearbeitet werden müßte. Für das rechte Bauteil (Deckblech) ist der Ablauf beim Einfügen bereits vorhandener Zuverlässigkeitsanalysen in Bild 5.9 dargestellt.

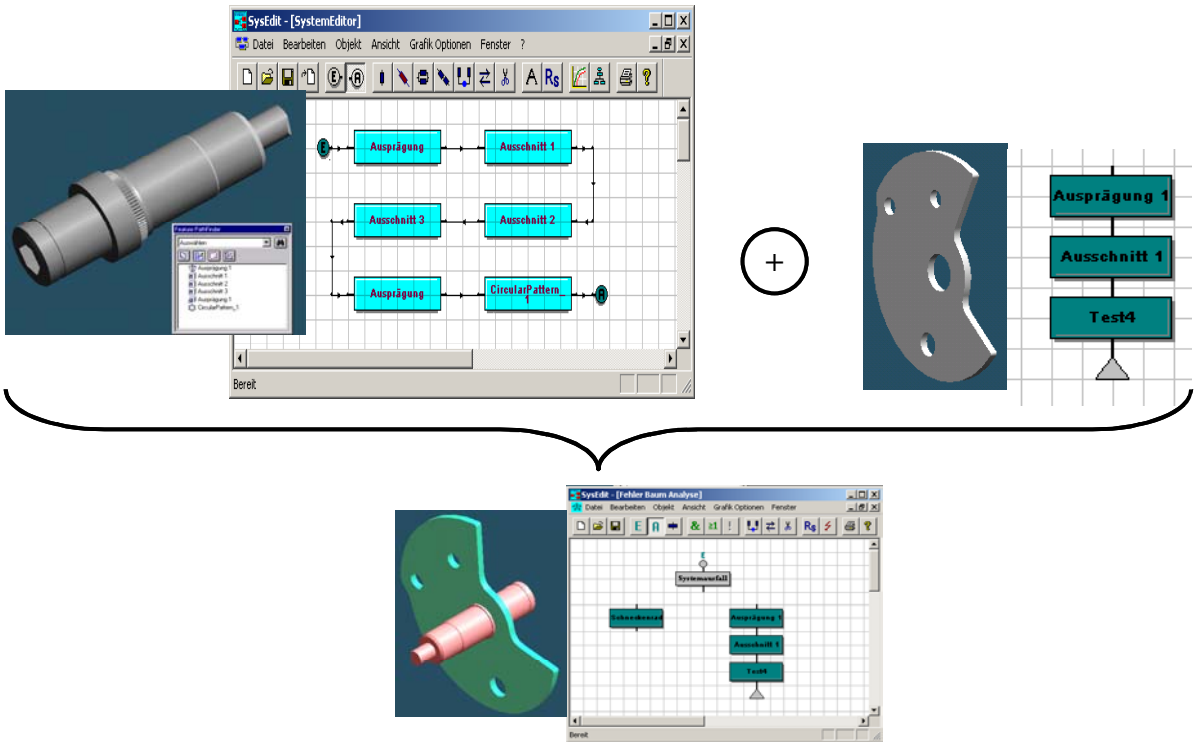


Bild 5.8: „Zusammenbau“ der Zuverlässigkeitsanalysen im Assembly-Modus

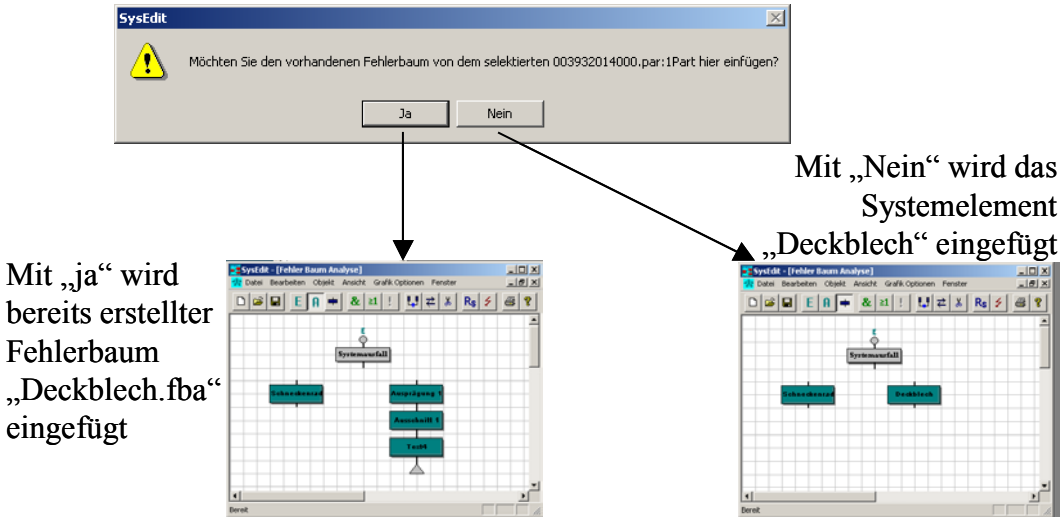


Bild 5.9: Dialog zum Einfügen bereits vorhandener Zuverlässigkeitsanalysen

Beim Zusammenfügen der Baugruppen und Einzelteile zum Zusammenbau werden die bereits erstellten Zuverlässigkeitsanalysen mit der entsprechenden Datenbasis übernommen. Der Status des Lebensdauermanagers für den Zusammenbau des Systems in

der Ausarbeitungsphase ist in Bild 5.10 dargestellt. Dabei sind alle Zuverlässigkeitsinformationen der vorherigen Entwicklungsphasen enthalten.

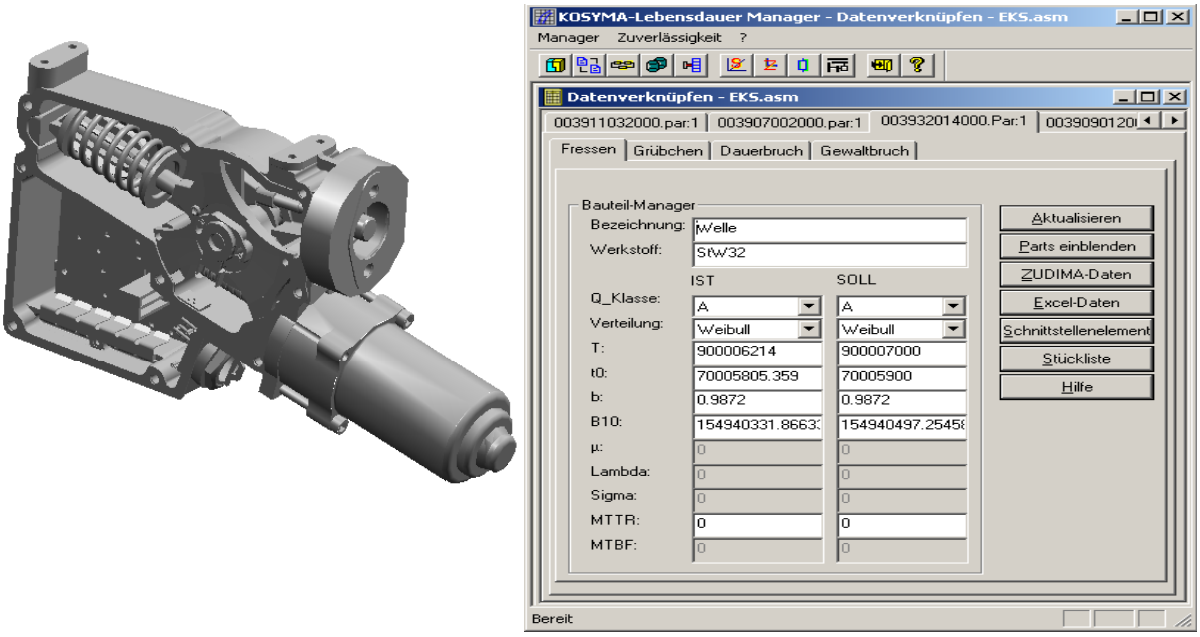


Bild 5.10: Zusammenbau und Lebensdauermanager in der Ausarbeitungsphase

Nach dem Zusammenfügen der Einzelteile können basierend auf der Gesamtkonstruktion Zuverlässigkeitsanalysen des Gesamtsystems durchgeführt werden. Die Ergebnisse dieser Analysen können auch direkt im CAD-System sichtbar gemacht werden durch Ausblenden zuverlässigkeitsunkritischer Bauteile und besonderer Markierung zuverlässigkeitskritischer Elemente. Darüber hinaus können die lebensdauerbestimmenden Baugruppen gesondert analysiert und optimiert werden.

5.4 Weibullbasierte Kostenanalyse

5.4.1 Vorgehensweise

Es ist bekannt, daß bei Zuverlässigkeitsberechnungen die zuverlässigsten Bauteile ein deutliches Kosteneinsparpotential besitzen. Ergänzend zu der phasenübergreifenden, durchgängigen Zuverlässigkeitsanalyse soll überprüft werden, inwieweit Kosteninformationen mit Zuverlässigkeitsaussagen verknüpft werden können, um „Overengineering“ gezielt zu erkennen und zu beseitigen. Damit ließen sich Zuverlässigkeitsaussagen mit Kosteninformationen verbinden.

Eine Kostenanalyse kann auf Basis der Weibullverteilung und des Booleschen Modells erfolgen. Das Ausfallverhalten des Systems sowie der Systemelemente wird im Weibullwahrscheinlichkeitspapier graphisch dargestellt. Bei einer Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems von $F_S(t) = 99{,}9\%$ ermittelt man die Systemlebensdauer $t_{99,9S}$ auf der Zeitachse und erstellt so eine Gerade parallel zur Ordinate (Ausfallwahrscheinlich-

keit). Alle Kurven des Ausfallverhaltens, die komplett rechts von dieser Senkrechten, also im Bereich von Lebensdauern $t > t_{99,9S}$ verlaufen, tragen zum Verlauf des Systemausfallverhaltens bis $F_S(t) = 99{,}9\%$ nichts bei.

Vom rechten Rand des Weibullwahrscheinlichkeitspapiers bis hin zu dieser Senkrechten befindet sich also das Ausfallverhalten aller Systemelemente, die ein Kostenverbesserungspotential besitzen. Nun kann eine Betrachtung dieser Bauteile erfolgen. Am einfachsten erfolgt die Kostenoptimierung von standardisierten Bauteilen, da diese in Katalogen gelistet sind und sich dadurch bestenfalls einfache Variationsmöglichkeiten ergeben. Bei nicht standardisierten Bauteilen kann die Kostenreduzierung mit Hilfe folgender Parameter starten: Baugröße, Wandstärke, andere Materialwahl mit geringerer Festigkeit, etc.

5.4.2 Beispiel

Zur Veranschaulichung der oben beschriebenen Vorgehensweise soll ein einfaches Beispiel dienen. Das in Bild 5.11 dargestellte Schema zeigt die Funktionsweise eines Einstufengetriebes, das die Aufgabe besitzt Drehzahl und Drehmoment zu wandeln und zu übertragen. Die Leistung wird über das Ritzel, das auf der Eingangswelle sitzt, auf das Zahnrad übertragen, das auf der Ausgangswelle sitzt.

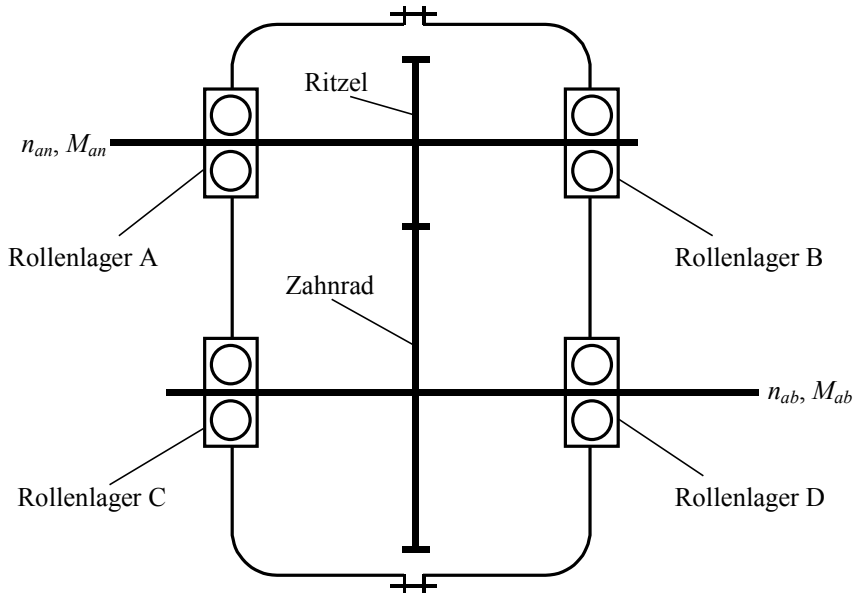


Bild 5.11: Funktionsschema eines Einstufengetriebes mit kritischen Bauteilen

Das Getriebe besteht aus den Hauptbaugruppen Antrieb, Abtrieb und Gehäuseteile. Innerhalb der qualitativen Analyse des Systems wurden die Systemelemente aus den Bauteilen ermittelt und eine ABC-Klassifikation sowie eine FMEA durchgeführt [19]. Mit den sich ergebenden kritischen, d.h. lebensdauerbestimmenden Elementen, wurde

ein Boolesches Reihensystem erstellt. Die vier Rollenlager A, B, C und D sowie das Ritzel und das Rad mit der Ausfallart Grübchen bilden die Reihenschaltung, Bild 5.12.

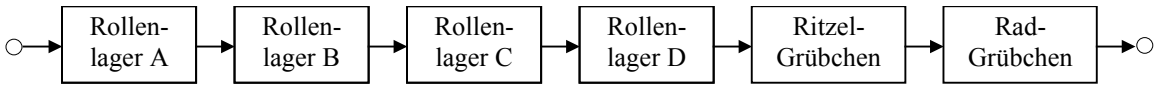


Bild 5.12: Reihensystem der kritischen Systemelemente des Getriebes

Für diese zuverlässigkeitsrelevanten Systemelemente wurden die Weibullparameter ermittelt und das Ausfallverhalten im Weibullwahrscheinlichkeitspapier dargestellt. Die sich ergebende Systemlebensdauer kann im Diagramm abgelesen werden. Bei einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 10% beträgt die B_{10}-Lebensdauer des Systems B_{10S} = 1396h, Bild 5.13.

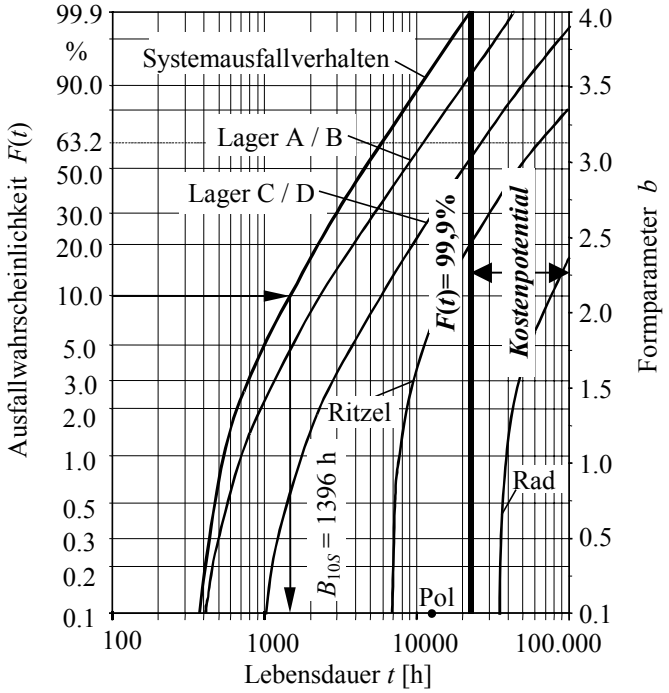


Bild 5.13: Qualitatives Vorgehen bei der Ermittlung des Kostenpotentials

Es wird davon ausgegangen, daß die ermittelte Systemlebensdauer der Soll-Lebensdauer B_{10S} des Lastenhefts entspricht. In Bild 5.13 ist die Senkrechte parallel zur Ordinate bei der Ausfallwahrscheinlichkeit $F_S(t) = 99{,}9\%$ eingezeichnet. Die Systemlebensdauer $t_{99,9S}$ kann auf der Zeitachse abgelesen werden (>20.000h). Das Ausfallverhalten des Zahnrads mit der Ausfallart Grübchen verläuft rechts von dieser Senkrechten ($t_{0Z} > t_{99.9S}$). Das bedeutet, daß innerhalb der zuverlässigkeitsrelevanten Systemelemente ein Kostenpotential besteht. Das Zahnrad als zuverlässigkeitsunkritischste Systemkomponente in Bild 5.13 kann hinsichtlich einer Ziellebensdauer optimiert werden. Beispielsweise kann die Systemlebensdauer $t_{99,9S}$ als mindestens zu erreichende ausfallfreie Zeit t_{0Z} des Zahnrads verwendet werden. Dann kann z.B. in einer

Datenbank oder einem Teilekatalog ein entsprechendes Zahnrad gewählt und in die Konstruktion übernommen werden.

In dem beschriebenen Fall wurde nach der qualitativen Analyse ein Ersatzmodell mit den zuverlässigkeitsrelevanten Systemelementen erstellt, Bild 5.12. Nur mit diesen verbleibenden Elementen wurde eine quantitative Zuverlässigkeitsanalyse durchgeführt. Falls jedoch eine quantitative Analyse für weitere unkritische Systemelemente vorliegt, können diese vorrangig verändert werden. In Tabelle 5.1 sind die Weibullparameter aller leistungsführenden Bauteile des Getriebes aufgeführt.

Tabelle 5.1: Weibullparameter einiger Systemelemente des Getriebes

i	Systemelement	B_{10} [h]	b	f_{tb}	t_0 [h]	T [h]
1	Rollenlager A	2193	1,35	0,15	329	10200
2	Rollenlager B	2193	1,35	0,15	329	10200
3	Rollenlager C	6602	1,35	0,15	992	30700
4	Rollenlager D	6602	1,35	0,15	992	30700
5	Ritzel (Grübchen)	14396	1,15	0,45	6 480	62500
6	Rad (Grübchen)	71681	1,15	0,45	32 300	311000
unkritisch	Ritzel Bruch	13600000	1,6	0,85	11600000	19900000
	Rad Bruch	4900000	1,6	0,85	4170000	7160000
	Eingangswelle	88510000	1,3	0,75	66400000	191000000
	Ausgangswelle	77000000	1,3	0,75	57800000	166000000

Die Kostenreduzierung auf Basis der Weibullanalyse sollte immer bei den zuverlässigsten Bauteilen beginnen. Vorausgesetzt die Weibullparameter für Ausgangs-, Eingangswelle, Ritzel und Rad mit Versagensart Bruch sind bekannt wie in Tabelle 5.1, so müßte die Kostenreduzierung bei den Wellen beginnen, da diese die größte ausfallfreie Zeit besitzen.

6 Beispielhafte Umsetzung

Im folgenden Kapitel werden die CAD-integrierten Zuverlässigkeitsanalysen und Ergebnisse anhand eines Beispiels programmtechnisch umgesetzt und dargestellt. Das Beispiel wird im ersten Unterkapitel 6.1 vorgestellt.

Der Konstrukteur soll die Möglichkeit besitzen, alle Methoden und Techniken der Zuverlässigkeitstechnik in allen Phasen des Konstruktionsprozesses einsetzen zu können. Wichtig dabei ist, daß die gewonnenen Erkenntnisse in der nächsten Phase als Basis herangezogen werden können. In den Unterkapiteln 6.2 und 6.3 wird die durchgängige CAD-integrierte Anwendung der Fehlerbaumanalyse bzw. der Booleschen Methode beschrieben. Dabei werden die Methoden sowohl qualitativ als auch quantitativ angewendet.

Im Kapitel 6.4 wird die CAD-integrierte Anwendung ausschließlich qualitativer Methoden anhand eines Beispiels vorgestellt. Abschließend wird auf Basis der Weibullanalyse eine qualitative Kostenreduzierung der zuverlässigsten Bauteile vorgestellt, Kapitel 6.5.

6.1 Anwendungsbeispiel EKS als komplexes technisches System

Die vorgestellten qualitativen und quantitativen Zuverlässigkeitsmethoden sollen nun, in ihrer durchgängigen CAD-integrierten Anwendung, auf ein reales Produkt angewendet werden. Dazu wird ein elektromechanisches Kupplungssystem (EKS) von Fichtel & Sachs betrachtet. Das EKS ist ein komplexes System, bei dessen Entwicklung einige Methoden der Zuverlässigkeitstechnik Anwendung fanden. Das System EKS liefert einen wichtigen Beitrag für komfortables, sicheres, wirtschaftliches und umweltgerechtes Fahren [100]. Prinzip und Umgebung des EKS zeigt Bild 6.1.

Um Stellbewegungen beim automatisierten Kuppeln und Schalten zu realisieren, können hydraulische oder elektromotorische Aktuatoren eingesetzt werden. Ein Aktuator ersetzt das Kupplungspedal im Fahrzeug. Er wird von einer Elektronik gesteuert, die durch Sensoren an allen wichtigen Schnittstellen über die Schaltabsicht des Fahrers und Fahrsituation informiert ist. Bei dem automatisierten Kupplungssystem EKS bleibt das Schalten die Sache des Fahrers. Er bestimmt, wann und wie der Gang gewechselt wird. Die Dynamik des manuellen Schaltens bleibt voll erhalten. Der Aktuator positioniert die Kupplung in Sekundenbruchteilen auf Zehntelmillimeter genau und sorgt damit für optimales Aus- und Einkuppeln. Der Kupplungsverschleiß wird dadurch reduziert.

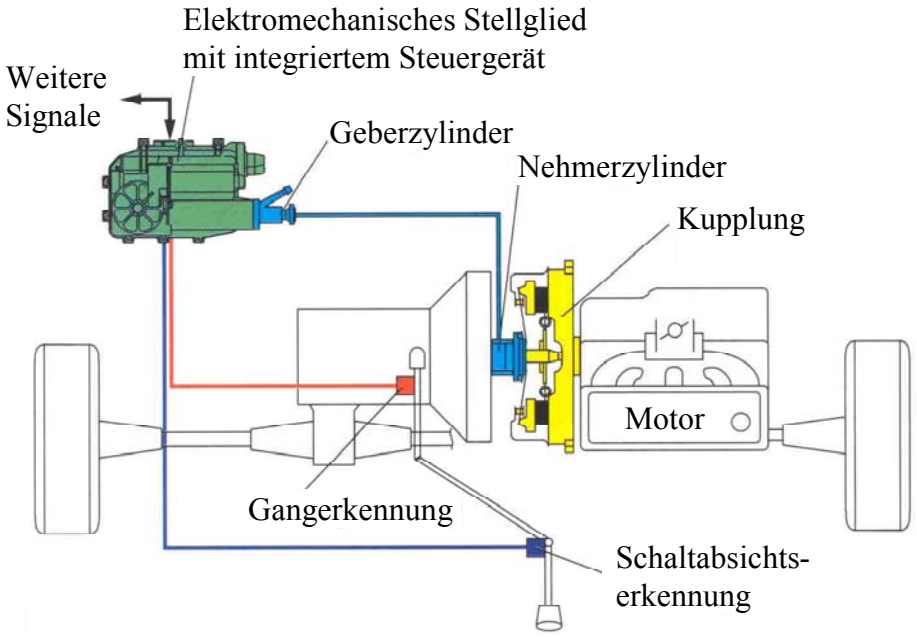


Bild 6.1: Umgebung und Prinzip eines elektromechanischen Kupplungssystems

Aufgrund der unterschiedlichen spezifischen Leistungsfähigkeit und der entsprechenden Herstellkosten bieten sich elektromechanische Systeme für Kleinwagen und hydraulische Systeme für größere Fahrzeuge, Nutzfahrzeuge, Sportwagen und Sonderanwendungen an. Bild 6.2 zeigt eine Schnittdarstellung des bereits ausgearbeiteten elektromechanischen Kupplungssystems EKS, das u.a. bei der A-Klasse der DaimlerChrysler AG Anwendung findet [101].

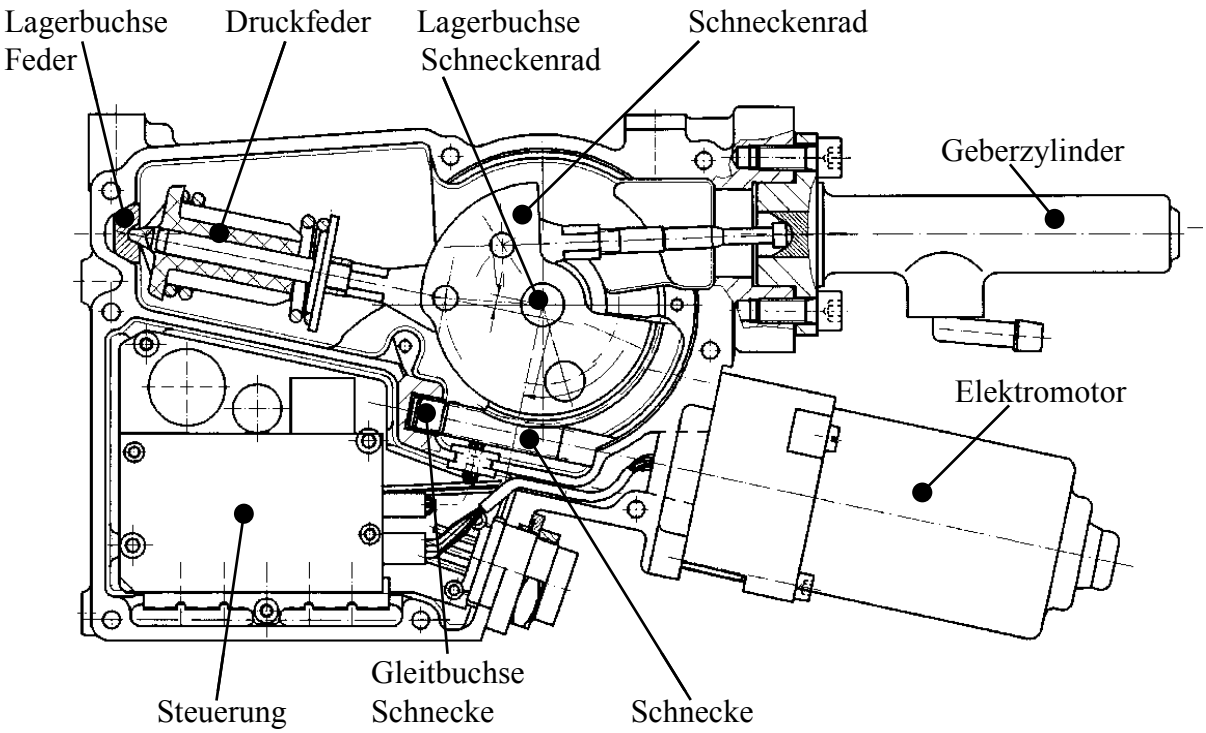


Bild 6.2: Aufbau des elektromechanischen Kupplungssystems

6.2 Durchgängige CAD-integrierte Fehlerbaumanalyse

Das Konzept des Beispiels EKS wird im CAD-System erstellt, das mit dem Lebensdauermanager gekoppelt ist. Die einzelnen geometrischen Objekte werden mit Zuverlässigkeitsdaten verknüpft, auf deren Basis die Fehlerbaumanalyse durchgeführt wird. Dabei wird die Methode gekoppelt mit jeder Phase der CAD-Entwicklung eingesetzt. Die Ergebnisse der Analyse fließen so direkt in die Konstruktion ein.

6.2.1 CAD in frühen Konzept-Phasen

Das erste Konzept eines elektromechanischen Kupplungssystems (EKS) kann sich wie in Bild 6.3 darstellen, bei dem im Sketchmodus des CAD-Programms eine Skizze des Systems erstellt wird. Die Hauptfunktionen werden einer Black-Box Betrachtung unterzogen. Die Funktionsweise, d.h. die Hauptfunktion wird in Teilfunktionen unterteilt, für die Baugruppen oder Bauteile verantwortlich sind, Tabelle 6.1. Die einzelnen Elemente des Konzepts, d.h. die Skizzen werden in einer Stückliste im Feature PathFinder angezeigt, Bild 6.3.

Tabelle 6.1: EKS-Teilfunktionen und entsprechende Baugruppen

Teilfunktionen	*Baugruppe*
Bauraumbegrenzung	Gehäuse
Initiierung	Steuerung
Kraft + Stellweg erzeugen	Motor
Kraft + Stellweg übertragen	Übertragungsmechanismus
Nehmerzylinder betätigen	Geberzylinder

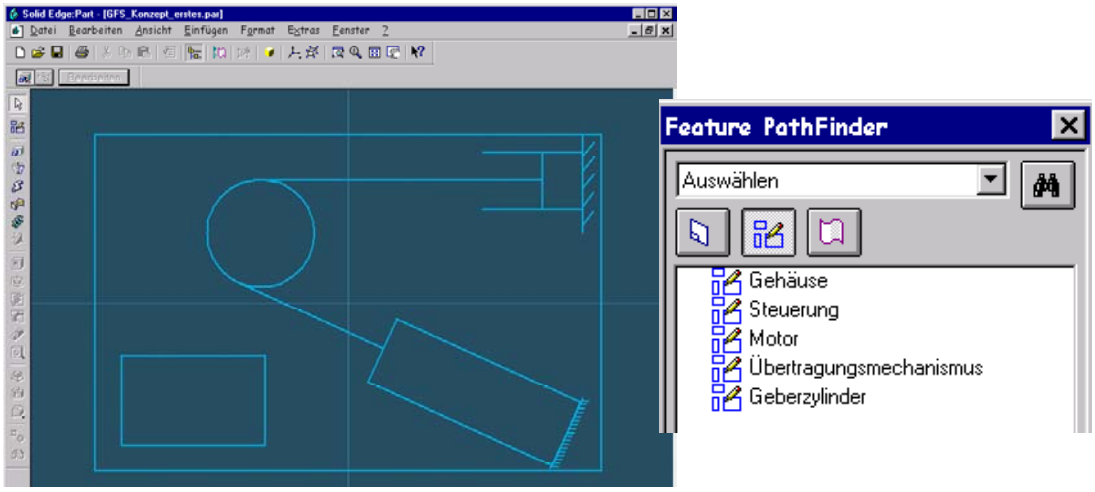


Bild 6.3: Konzept des EKS mit Baugruppen/ Bauteilen im Skizzenmodus

6.2.2 Kopplung mit Zuverlässigkeitsdaten und -analysen

Nun kann, ohne die CAD-Oberfläche zu verlassen, der Lebensdauermanager aufgerufen werden. Nach der Kopplung mit dem CAD-System, bei der je Bauteil eine Regi-

sterkarte (Datenblatt) erstellt wird, erfolgt die Eingabe der relevanten Lebensdauerdaten durch den Konstrukteur, Bild 6.4.

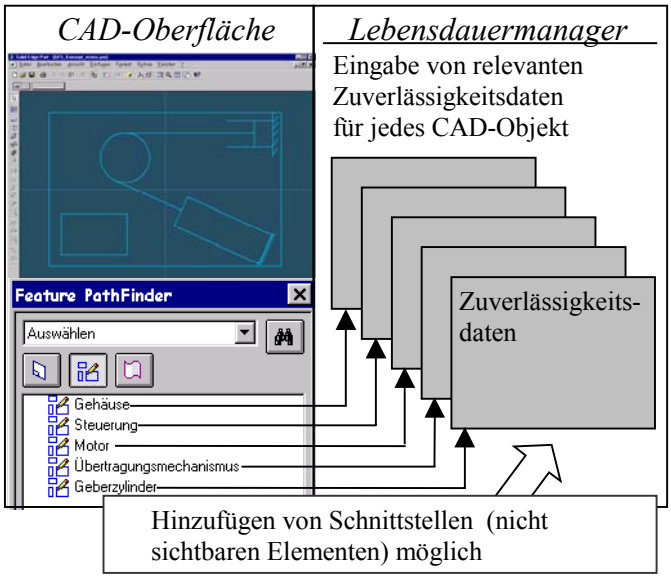


Bild 6.4: Kopplung von CAD und Lebensdauermanager

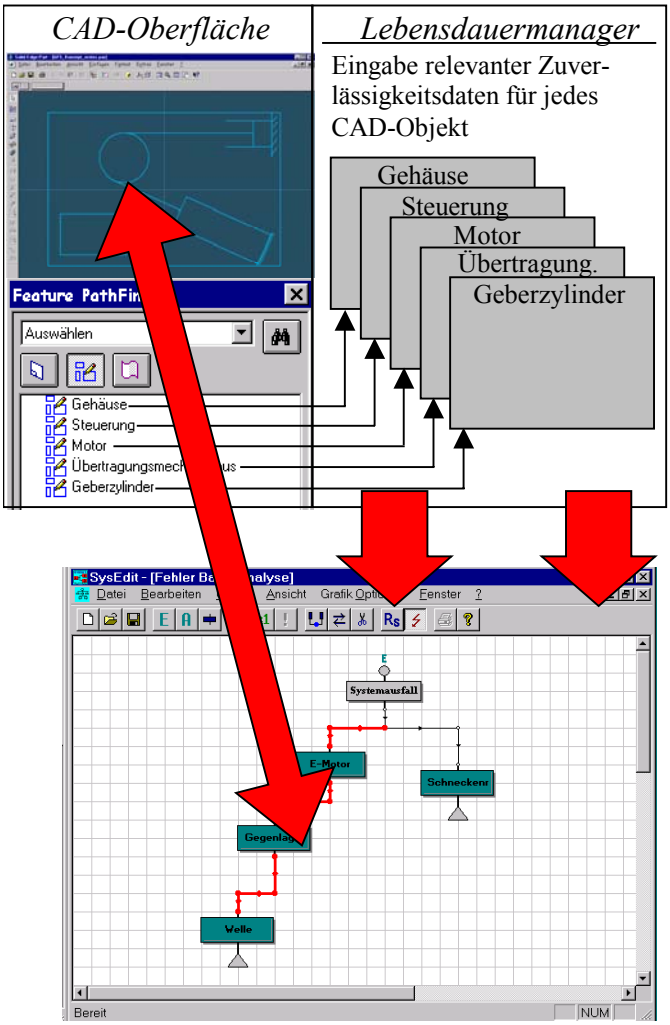


Bild 6.5: Kopplung von CAD-System, Lebensdauermanager und Struktureditor

Durch Einsatz des Strukturedtors SYSEDIT kann wie in Bild 6.5 abgebildet eine Zuverlässigkeitsanalyse mittels Fehlerbaumanalyse (FBA) durchgeführt werden. Dabei werden die Ergebnisse der FBA durch die Schnittstelle *IDisptatch* der OLE-Automation in das CAD-System zurück übertragen. Die Zuverlässigkeitsuntersuchung wird in dieser frühen Phase meist qualitativ erfolgen. Dabei werden die Struktur des Systems und die Abhängigkeiten der Systemelemente untereinander in einem anderen Zusammenhang als im CAD-System sichtbar. Zahlenwerte, wie z.B. Ausfallraten bereits bekannter Bauteile, können in den Lebensdauermanager eingetragen werden.

6.2.3 Modifikationen in der Konzeptphase

Aufgrund der in der Zuverlässigkeitsanalyse gewonnenen Erkenntnisse ergibt sich in der CAD-Umgebung eine Rangfolge der zuverlässigkeitskritischen Bauteile bzw. Baugruppen. Wie in der Einzelteil-Umgebung (Part) des CAD-Systems können auch in der Skizzenumgebung (Sketch) Parametervariationen durchgeführt werden. Die Parameter der einzelnen Skizzen können im CAD-System über Variablentabellen angesprochen werden, Bild 6.6. Über eine Kopplung zu MS Excel besteht die Möglichkeit, die Variablen mittels Formeln zu variieren, Bild 6.7. Von der Excel-Tabelle aus kann die Zuverlässigkeitsdatenbank ZUDIMA aufgerufen werden und passende Daten übernommen werden, Bild 6.8 und Bild 6.9.

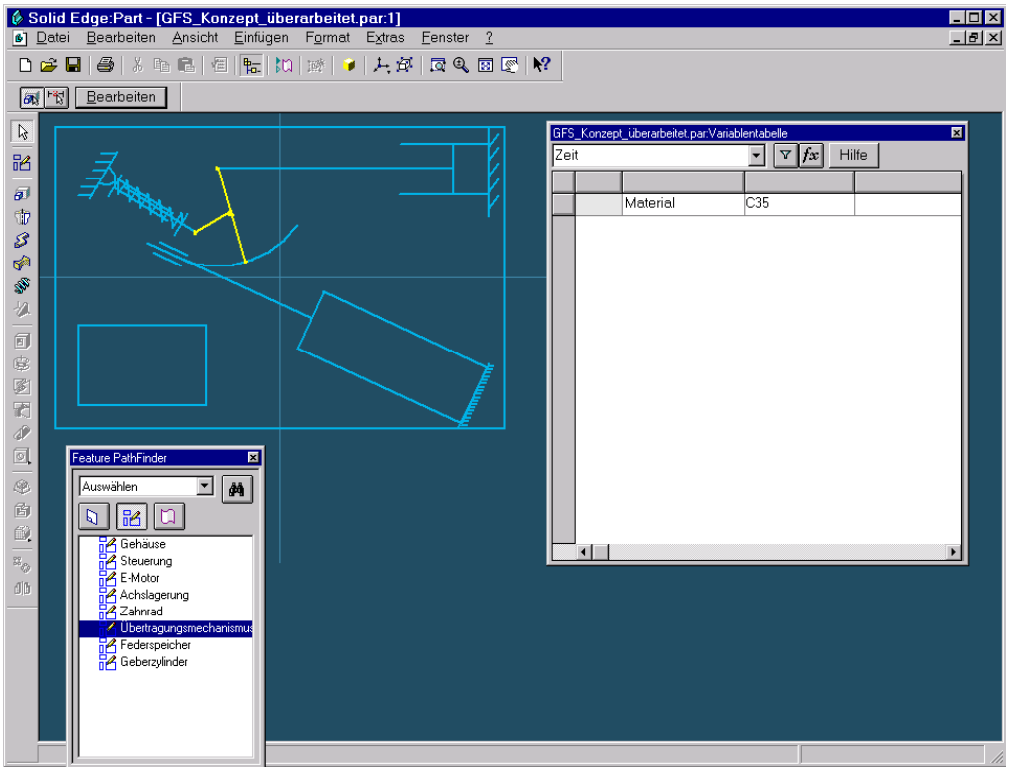


Bild 6.6: Parametermodifikation im CAD-System

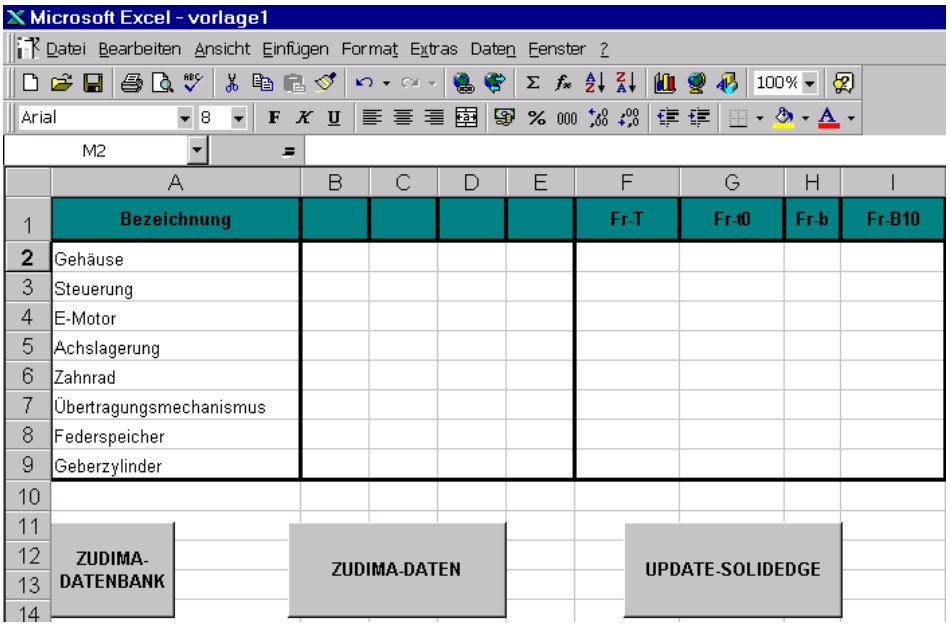


Bild 6.7: MS Excel-Tabelle als Ausgangspunkt der Variationen

In der Zuverlässigkeitsdatenbank ZUDIMA sind Daten aus der Literatur und aus Versuchen über einige Standardbauteile (Wellen, Lager, Zahnräder) abgelegt, die über die Zwischenablage kopiert und in die Datentabelle des CAD-Systems integriert werden können. Bild 6.8 zeigt die Datenbank für verschiedenen Wellen. In Bild 6.9 sind die erweiterten Informationen der Zuverlässigkeitsdatenbank dargestellt.

Suchergebnis Weibull : Formular

Alle Infos anzeigen | Zwischenablage

Element	Angaben zum Element	b :	to/B10 :	T:	B10 :	Spannungen :
Welle	C 35;schwach gekerbt	1,8492	0,6896	118958,0781	68451,0709	380
Welle	C 35;schwach gekerbt	1,4835	0,7799	131004,4688	73474,6333	375
Welle	C 35;schwach gekerbt	1,4294	0,8121	160377,25	93296,0929	370
Welle	C 35;schwach gekerbt	1,2969	0,8096	190363,1875	100757,3226	365
Welle	C 35;schwach gekerbt	1,2686	0,8237	243766,3125	130855,0413	360
Welle	C 35 (schwach gekerbt)	1,0198	0,7962	353484	133487,0294	350
Welle	C 35 (schwach gekerbt)	1,1286	0,7791	387991	161580,8273	345
Welle	C 35 (schwach gekerbt)	0,9984	0,7773	491854	169680,6390	340
Welle	C 35 (schwach gekerbt)	1,129	0,6534	627703	196342,5933	335
Welle	C 35 (schwach gekerbt)	0,781	0,7941	879246	196823,2279	330
Welle	C 35 (schwach gekerbt)	0,7295	0,2927	10141111	643590,9207	325
Welle	C 35 (schwach gekerbt)	0,7681	0,7648	1297742,25	251095,0262	320
Welle	C 35 (schwach gekerbt)	0,9872	0,8376	306214	126313,3168	315
Welle	Ck 45 N (profiliert)	0,56	0,9461	1400000	355151,0012	370
Welle	Ck 45 N (profiliert)	1,53	0,8132	180624	111069,0807	370
Welle	Ck 45 N (profiliert)	1,93	0,8695	280000	217356,7777	370
Welle	Ck 45 N (profiliert)	1,18	0,8648	3900000	2197023,5725	370
Welle	Ck 45 N (profiliert)	1,58	0,8309	2030000	1323833,2752	370
Welle	Ck 45	2,02	0,7080	89430	55975,8126	440
Welle	Ck 45	1,79	0,7657	89250	56155,9353	440
Welle	Ck 45	2,05	0,7039	89530	56257,8548	440

Datensatz: 1 von 77

Bild 6.8: Zuverlässigkeitsdatenbank ZUDIMA, Material- und Formvariation von Wellen

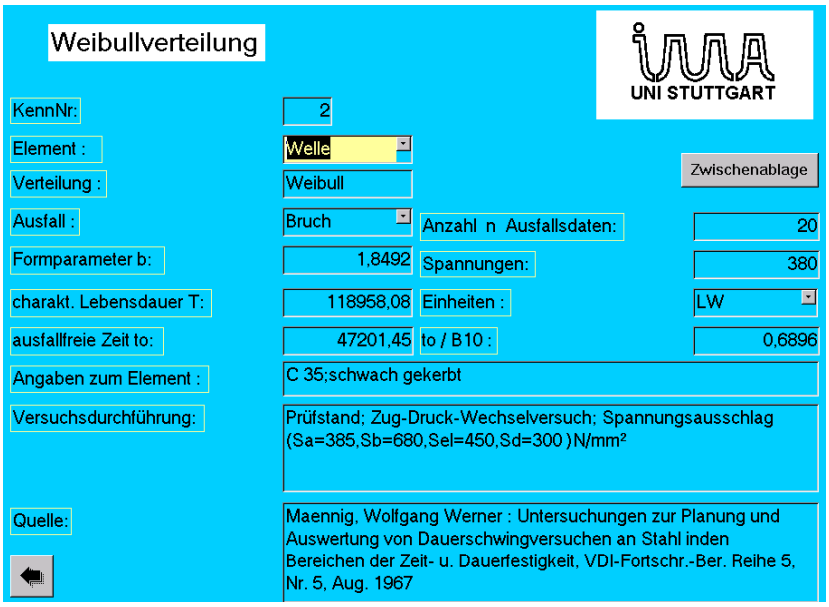


Bild 6.9: Zuverlässigkeitsdatenbank ZUDIMA, erweiterte Informationen für eine Welle

6.2.4 Fehlerbaumanalysen in Entwurfs- und Ausarbeitungsphasen

Ausgehend vom unerwünschten Topevent, d.h. dem Systemausfall, der beim Programmstart schon dargestellt ist, können die anderen im CAD-System abgebildeten Elemente in das Teilprogramm SYSEDIT mittels „Drag&Drop“ übernommen werden. Die Systemelemente können entsprechend den gegebenen Verknüpfungen verbunden werden. Dadurch kann der Benutzer die Systemstruktur abbilden. Die sich ergebende Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems ist Ergebnis der Suche nach dem kritischen Systempfad.

Die Umkehrfunktion von „Geberzylinder betätigen“ wird als Topevent bzw. unerwünschtes Ereignis betrachtet: „Ausfall EKS“ → „Keine Betätigung des Geberzylinders“. Ausgehend von diesem unerwünschten Systemereignis wird nun gefragt, welche Primär-, Sekundär- und Kommandoausfälle auf der nächst tieferen Ebene auftreten können. Auf der Stufe 1 nach der Strukturstückliste steht z.B. der Geberzylinder, für den in Bild 6.10 ein Teilfehlerbaum erstellt wurde. Mit den Ausfalldaten der Einzelkomponenten lassen sich die Überlebenswahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Zusammenbauten errechnen.

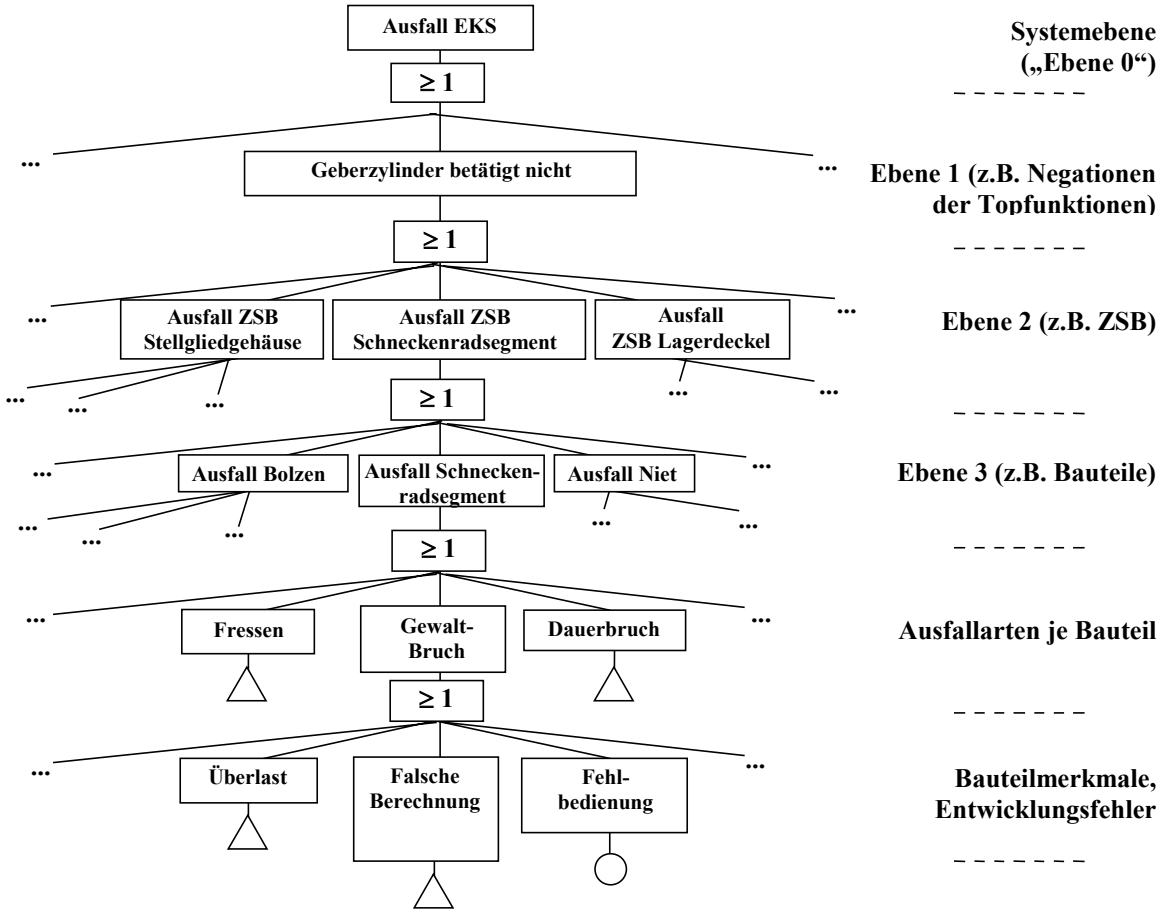


Bild 6.10: Fehlerbaumausschnitt für das EKS

Für das Beispiel des Zusammenbaus (ZSB) „Schneckenradsegment“ wird dies in Bild 6.11 dargestellt (siehe auch Bild 6.10, Ebene 2 und 3). Da der Führungsbolzen und das Niet unkritisch (C-Teile) sind, reduziert sich die Berechnung für den ZSB „Schneckenradsegment“ auf das Schneckenradsegment selbst. Auf dieselbe Weise erhält man die Überlebenswahrscheinlichkeiten für andere Zusammenbauten und somit die Überlebenswahrscheinlichkeiten des gesamten Systems EKS.

Bild 6.11: Systemstruktur für ZSB Schneckenradsegment

Bild 6.12 stellt beispielhaft die Anordnung des Fehlerbaums im Systemstruktureditor SYSEDIT dar, in der als Zuverlässigkeitsmethode die Fehlerbaumanalyse ausgewählt werden kann. Als Ergebnis kann die Ausfallwahrscheinlichkeit ermittelt werden. Dabei wird der aktuelle Fehlerbaum nach dem kritischen Pfad, d.h. demjenigen Pfad mit der größten Ausfallwahrscheinlichkeit, durchsucht. Die Ausfallwahrscheinlichkeit wird dann als Gleichung und als Zahlenwert angegeben.

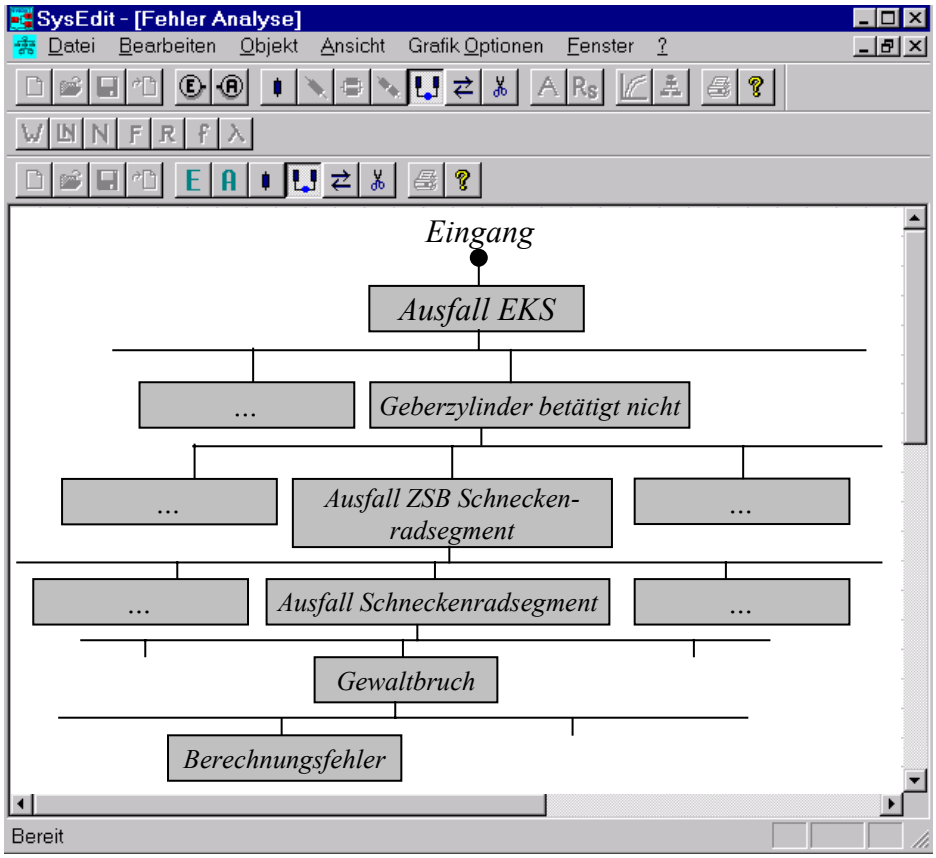


Bild 6.12: Fehlerbaumanalyse in SYSEDIT, Ausschnitt

In Bild 6.13 ist die vollständige Oberfläche für die CAD-integrierte Fehlerbaumanalyse dargestellt. Ausgehend von der CAD-Oberfläche und der Strukturstückliste („Assembly-PathFinder“) werden für die konstruierten Bauteile im Lebensdauermanager sogenannte Registerkarten erzeugt, in welche die dazugehörigen Lebensdauerdaten eingetragen werden können.

Wieder ausgehend von der CAD-Oberfläche können die Einzelteile des Zusammenbaus per OLE-Automation in die Oberfläche des Systemstruktureditors übertragen werden, wo schon das „Topevent“ (Systemausfall) als Anfangspunkt der Analyse angezeigt wird. In Bild 6.13 ist beispielhaft gezeigt, wie sich ein Fehlerbaum eines Produktes aufbauen kann. Durch UND- bzw. ODER-Verknüpfungen werden die Einzelteile der Konstruktion zu einem Fehlerbaum verbunden.

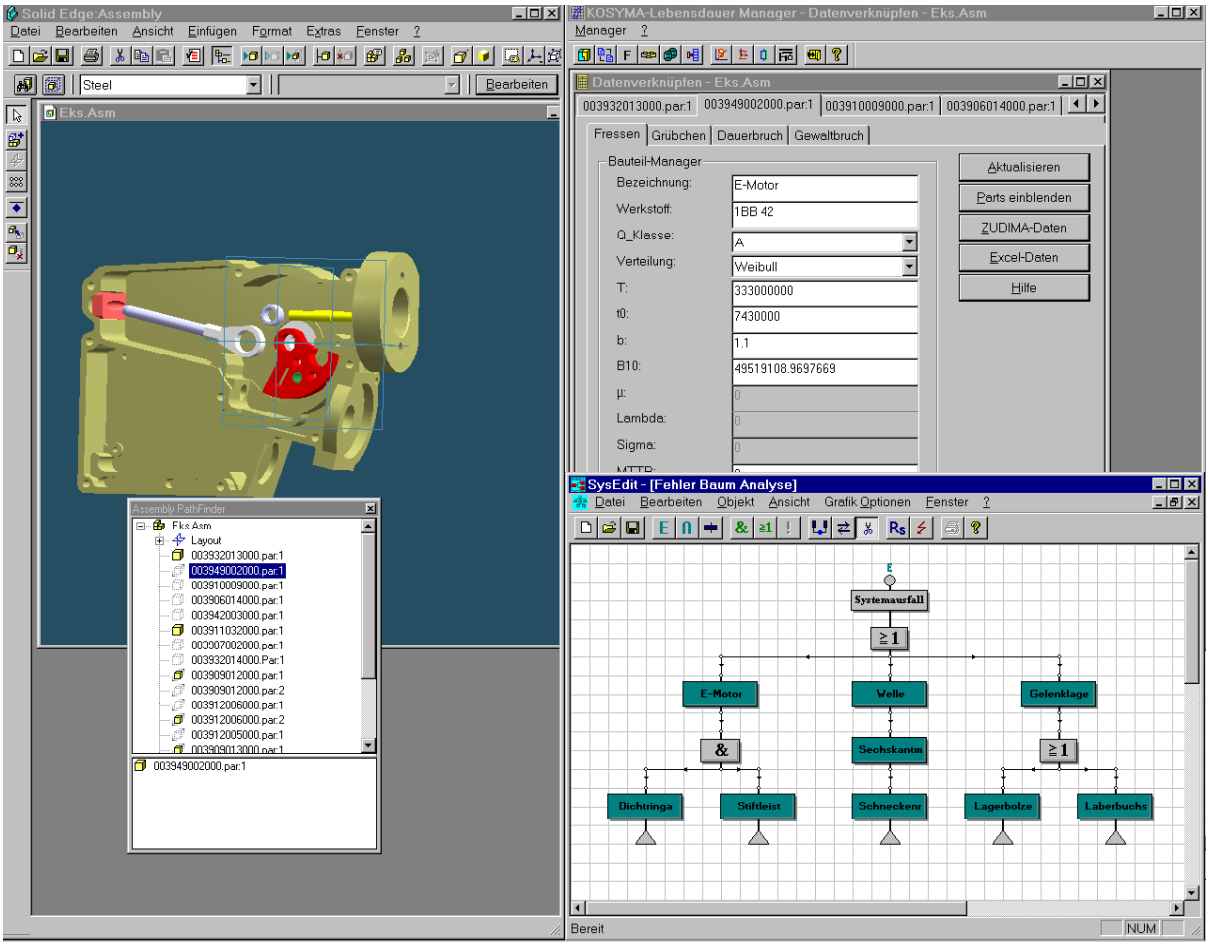


Bild 6.13: CAD-integrierte Fehlerbaumanalyse

Die Fehlerbaumanalyse kann sowohl qualitativ als auch quantitativ durchgeführt werden. Das qualitative Ergebnis gibt Aufschluß über die verschiedenen Fehlfunktionszusammenhänge. Falls Zahlenwerte, wie z.B. Ausfallraten, Ausfallverteilungsparameter, etc. bekannt sind, können diese im Lebensdauermanager eingetragen werden. Weiterhin wurde ein Schalter integriert, der den kritischen Pfad des erstellten Fehlerbaums visualisiert. Zusätzlich ist die Analyse bidirektional assoziativ mit dem CAD-System verbunden, so daß die lebensdauerkritischen Bauteile angezeigt werden. Durch eine Farbkodierung wird dem Konstrukteur angezeigt, welches Bauteil innerhalb des kritischen Pfads lebensdauerbestimmend für das System ist, Bild 6.14.

Die in SYSEDIT im Fehlerbaum verwendeten Komponenten werden im CAD-System ausgeblendet, damit sie nicht mehrfach im Fehlerbaum eingesetzt werden können. Nach oder während der Analyse können diese wieder sichtbar gemacht werden. Der Lebensdauermanager KOSYMA blendet die relevanten Zuverlässigkeitsdaten der jeweils selektierten Bauteile ein. Die graphische Darstellung des kritischen Pfads im Fehlerbaum erfolgt in roter Farbe und das kritischste Bauteil wird im CAD-System ebenfalls in rot angezeigt, Bild 6.14.

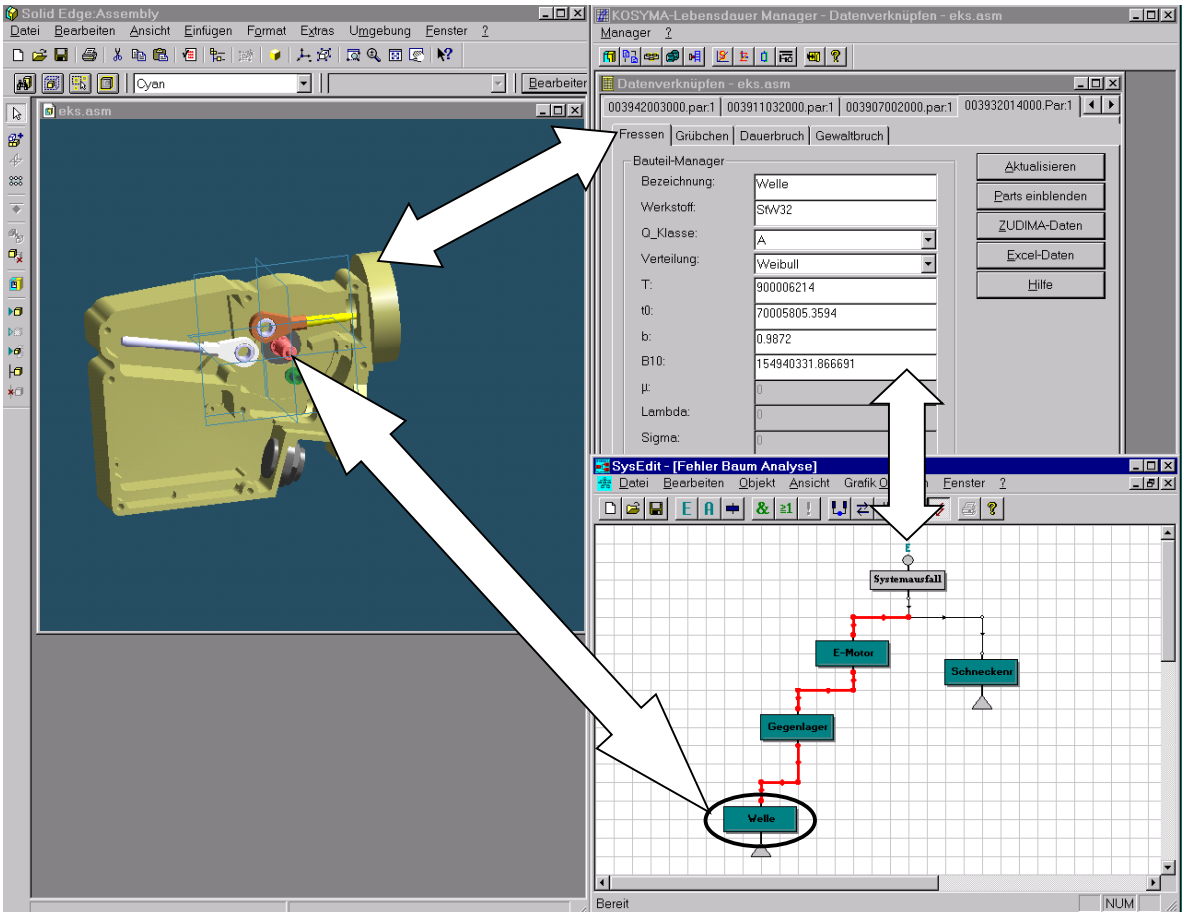


Bild 6.14: CAD-integrierte FBA, Ausarbeitungsphase

6.3 Durchgängige CAD-integrierte Anwendung der Booleschen Methode

6.3.1 Boole in Konzeptphasen

Nachfolgend wird eine Bearbeitungsschleife vorgestellt, wie sie ausgehend von dem ersten Ergebnis der Konzeptphase (siehe auch Bild 6.3) erfolgen kann:

- Konzept wird verfeinert, Skizzen werden hinzugefügt oder bestehende verändert,
- eventuell erfolgt eine neue Unterteilung in Baugruppen oder Bauteile bzw. diese werden neu erstellt,
- Feature Path Finder zeigt die Skizzen an,
- alle Skizzen werden in KOSYMA und in der MS Access-DB als Registerkarten eingelesen und
- dort erfolgt die Verbindung mit Zuverlässigkeitsinformationen.

Das konstruktive Ergebnis der ersten Schleife könnte wie in Bild 6.15 dargestellt aussehen. Wichtig ist nun, daß auf die zuvor erstellten Registerkarten und ihre Inhalte,

d.h. Zuverlässigkeitsinformationen, zugegriffen werden kann. So entsteht ein Regelkreis, in dem dokumentiertes Wissen aufgegriffen und verändert werden kann.

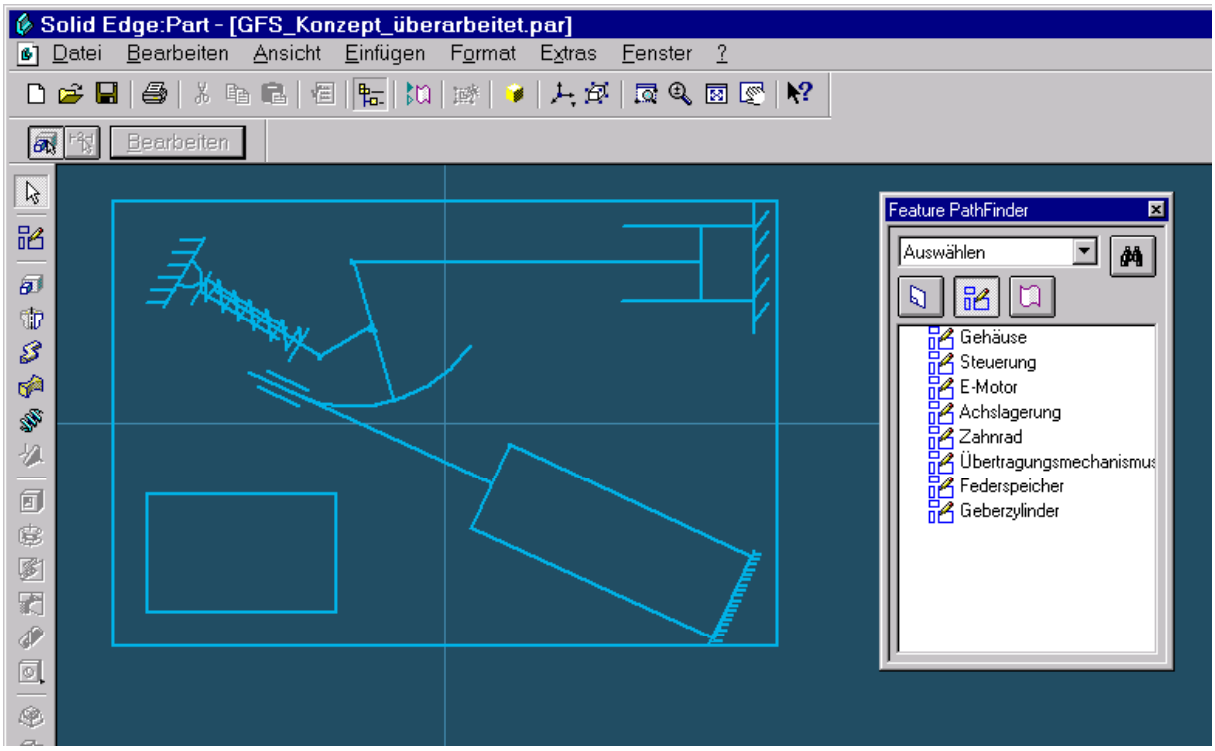


Bild 6.15: Konstruktion in der Konzeptphase

6.3.2 Übernahme der Ergebnisse in Entwurfsphasen

Bei zweidimensionalen CAD-Systemen wird in der Entwurfsphase die 2D-Konstruktion ausgearbeitet. 3D-CAD-Systeme gehen sofort vom zweidimensionalen Konzept in die dritte Dimension über. Der Entwurf ist dreidimensional, die zuvor erstellten Skizzen werden als Profile verwendet und deren Ausprägung in die dritte Dimension erstellt. Materialien werden festgelegt und eine Anwendung qualitativer oder semiquantitativer Zuverlässigkeitsmethoden erfolgt. Dazu muß wiederum das CAD-System mit KOSYMA gekoppelt werden und neue Registerkarten angelegt werden. Dabei kann auf die Ergebnisse der früheren Phasen zugegriffen werden.

In Bild 6.16 wurde die Boolesche Systemstruktur der oberen Skizze als Ausgangsbasis für die Erstellung des Booleschen Systems des dreidimensionalen Entwurfs verwendet. Die Ergebnisse des Booleschen Schaltbilds werden im Weibullnetz dargestellt. Die Rangfolge der zuverlässigkeitskritischsten Bauteile wird im CAD-System mittels einer „Lebensdauerkarte“ bzw. einer Farbkodierung sichtbar gemacht.

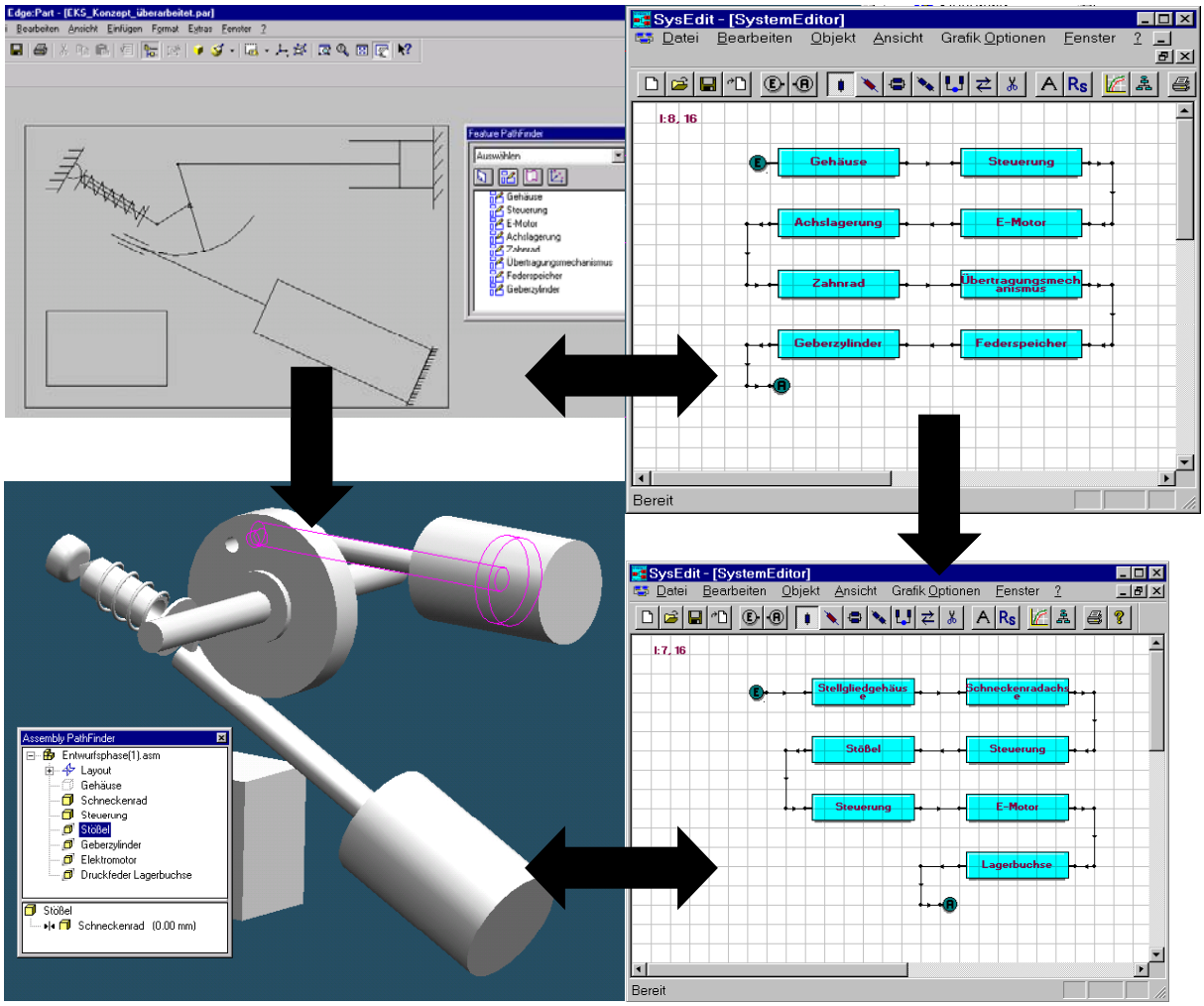


Bild 6.16: Kopplung von CAD-System und Boolescher Zuverlässigkeitsstruktur

6.3.3 Zuverlässigkeitsberechnung in der Ausarbeitungsphase

In der Ausarbeitungsphase der Konstruktion können sowohl qualitative oder semi-quantitative (wie z.B. FMEA) überarbeitet werden, wie auch rein quantitative Methoden der Zuverlässigkeitstechnik angewendet werden.

Die Berechnung der Systemlebensdauer nach Beendigung der Ausarbeitungsphase mittels des Booleschen Modells wird in [6], [102], und [103] ausführlich beschrieben.

6.3.4 Anwendung des Boole-Markoff-Modells

Nach Eingabe der notwendigen Weibullparameter (Formparameter b, charakteristische Lebensdauer T, ausfallfreie Zeit t_0) sowie der *MTTR*-Werte für die einzelnen Systemelemente in den Lebensdauermanager KOSYMA kann die Systemstruktur wie gewohnt in SYSEDIT abgebildet werden. Mit diesen Daten wird der Mittelwert der Betriebsdauer *MTTF* und die Dauerverfügbarkeit A_D sowohl für die Einzelelemente als auch für das System berechnet und tabellarisch ausgegeben. Reparierbare Systeme mit konstanten Ausfallraten können mit dem Verfahren nach Markoff behandelt werden, das in Kapitel 3.3.4 vorgestellt wurde. Das in Bild 3.36 erstellte Boole-Markoff-

Modell kann durch die Angabe einer mittleren Betriebsdauer im Lebensdauermanager KOSYMA erzeugt werden.

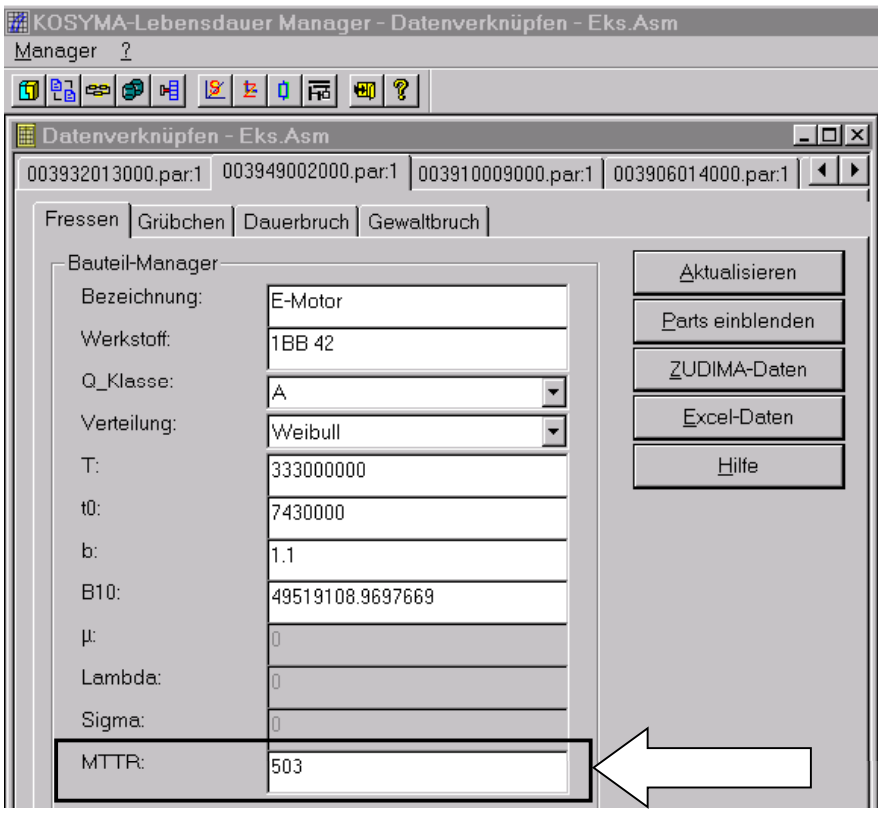


Bild 6.17: Oberfläche von KOSYMA, Ausschnitt

Die bereits erstellte Struktur nach dem Booleschen Modell kann verwendet werden. Danach müssen noch die Parameter eingegeben werden. Für die Berechnung der Dauerverfügbarkeit im stationären Fall müssen folgende Werte bekannt sein: Die mittlere Reparaturdauer *MTTR* und die Weibullparameter (Formparameter b, charakteristische Lebensdauer T, ausfallfreie Zeit t_0). Damit können die *MTTF*-Werte und die Dauerverfügbarkeit der Systemelemente berechnet werden. Bild 6.17 zeigt einen Ausschnitt aus der Oberfläche des Lebensdauermanagers KOSYMA für das Bauteil Elektromotor. In dieser Maske erfolgt die Eingabe der mittleren Reparaturdauer. In SYSEDIT erfolgt eine tabellarische Ausgabe der *MTTF*-Werte und der Dauerverfügbarkeit A_D, die, wie in Kapitel 3.3.4 beschrieben, berechnet werden. Die Darstellung erfolgt sowohl für das Einzelelement als auch für das gewählte System.

6.4 CAD-integrierte Anwendung qualitativer Zuverlässigkeitsmethoden

Nachdem die CAD-integrierte, durchgängige und phasenübergreifende Anwendung einzelner quantitativer Zuverlässigkeitsmethoden beispielhaft gezeigt wurde, wird in

diesem Unterkapitel die phasenübergreifende Anwendung von qualitativen Methoden vorgestellt.

6.4.1 CAD-integriertes QFD

Das Quality Function Deployment (QFD) ist eine Methode, die schon vor dem ersten Entwurf erfolgen sollte. Als Ergebnis der „Übersetzung“ der Kundenwünsche in technische Merkmale ergibt sich die Reihenfolge der Wichtigkeit dieser Qualitätsmerkmale. Entsprechend muß dem Konstrukteur diese Rangfolge visualisiert werden, was über eine Kopplung der QFD-Ergebnisse mit dem Lebensdauermanager KOSYMA erfolgen kann. Denkbar ist eine Verknüpfung im Menü des Programms mit der Möglichkeit, Resultate von QFD in die Datenbank des Lebensdauermanagers zu übernehmen.

6.4.2 CAD-integrierte ABC-Analyse

Bei sehr einfachen Systemen genügt als Vorarbeit für eine quantitative Analyse oft schon eine Einteilung der Komponenten in A-Teile (kritisch und berechenbar), B-Teile (kritisch und nicht berechenbar bzw. statistisch zu betrachten) und C-Teile (unkritisch). Bei komplexen Systemen kann die ABC-Analyse nur eine Vorarbeit für eine Fehler- Möglichkeits- und Einflußanalyse (FMEA) darstellen. Nach der Kopplung der Konstruktion mit dem Lebensdauermanager KOSYMA werden die Registerkarten dargestellt. Dann muß der Konstrukteur das Scrollfeld mit der Auswahl A, B, C selektieren und die Bauteile entsprechend einteilen. Für die Ausarbeitungsphase des EKS ergibt sich eine Einteilung der Einzelkomponenten nach Bild 6.18. Nicht selektierte Bauteile werden dem Konstrukteur getrennt deutlich gemacht.

A-Components	B-Components	C-Components	Not selected Components
1) Compression spring [breakage] 2) Grooved ball bearing, engine [pitting] 3) Grooved ball bearing [pitting] 4) Worm gear [breakage] 5) Worm [gear breakage] 6) Worm gear axle [breakage] 7) Worm gear shaft [breakage] **7 Parts**	1) Counter support [wear] 2) Spring guide [wear] 3) Bearing bush-2x [wear] 4) Bearing bush [wear] 5) Sliding sleeve [wear] 6) Worm gear [wear] **6 Parts**	Casing, Case top, Gasket, Screw, Spring cup, Spacer sleeve, Guide pin, Joint bearing-2x, Bearing pin-2x, Rivet, Stop, Cover sheet, Cover sheet, Retaining ring, Screw, Screw, Bearing cover, Screw, Tappet, Packing, Potentiometer **21 Parts**	**X Parts**

Bild 6.18: ABC-Einteilung des EKS [104]

6.4.3 CAD-integrierte FMEA

Durchführung der FMEA mit einem Datenbankprogramm

Aus dem CAD-Programm Solid Edge lassen sich die erstellten Daten in Form einer Stückliste auslesen. Wie Bild 6.19 zeigt, existiert das Werkzeug „EdgeBar“, das alle erstellten Bauteile (Parts) auflistet, denen Sachnummern zugewiesen werden können. Nach dem Starten des Lebensdauermanagers KOSYMA von der CAD-Oberfläche aus und der Kopplung mit dem CAD-System, werden auch die Sachnummern der Komponenten in die Datenbank eingetragen. In KOSYMA können Bezeichnung, Material, etc. eingetragen werden.

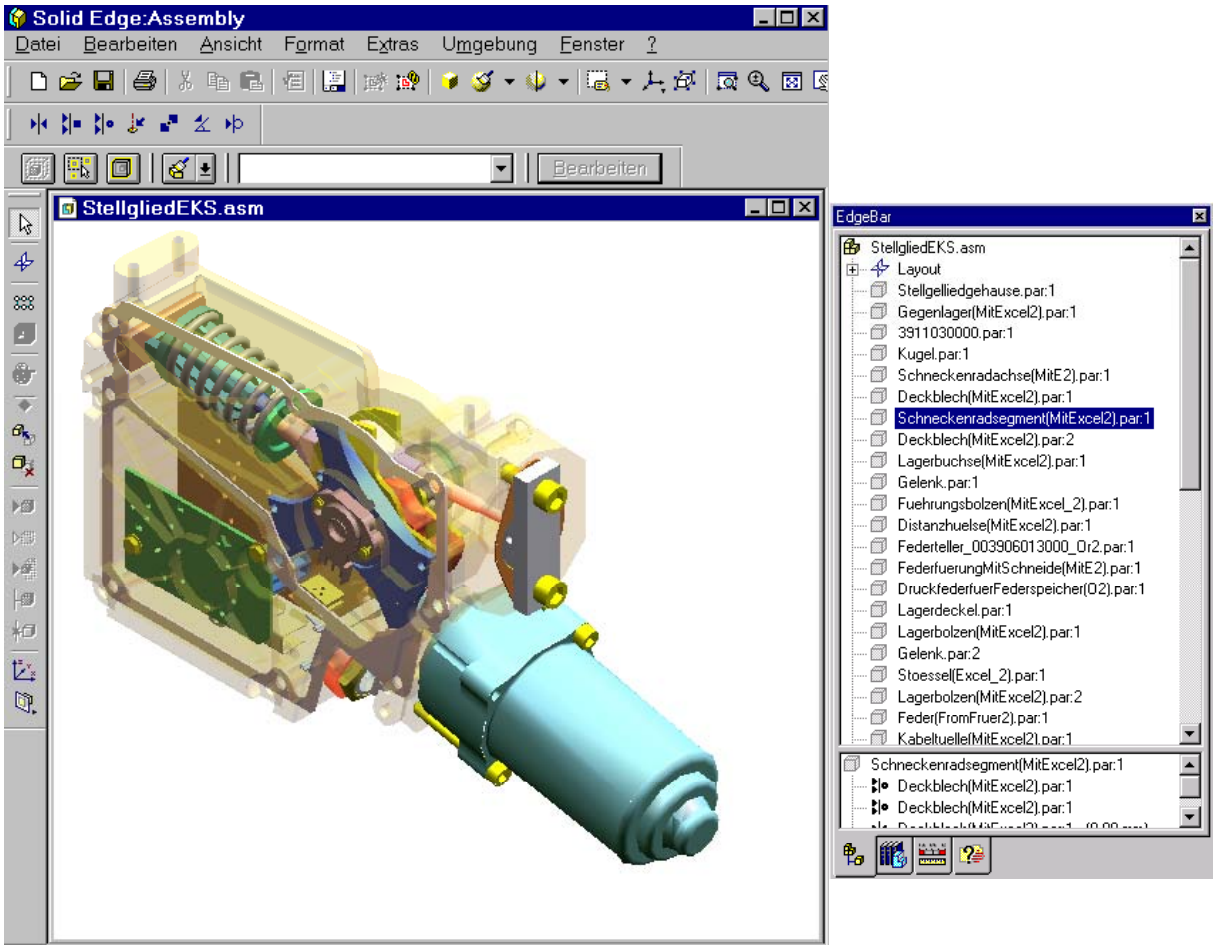


Bild 6.19: CAD-System mit Strukturstückliste „EdgeBar“

Die Daten des Baugruppenmodus, Bild 6.19, werden durch die erstellte Verknüpfung (OLE-Automation) gelesen. Innerhalb der Datenbank von KOSYMA wird eine Tabelle „RPZ-Vorlage“ generiert, die als Vorlage für die Durchführung der FMEA dient, Bild 6.20.

Die FMEA kann nun mittels eines eigenen FMEA-Programmes durchgeführt werden. Zusätzlich werden die einzelnen Schritte, wie z.B. Fehleranalyse durch eine Wissensbasis unterstützt [105].

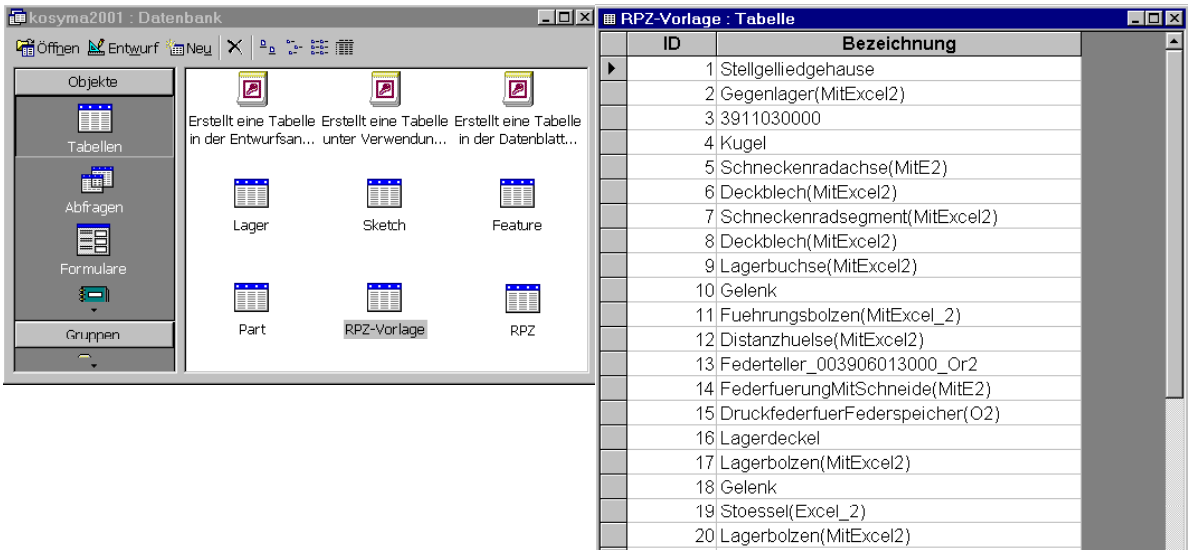


Bild 6.20: Datenbanktabelle für die Durchführung einer FMEA

Das Ergebnis der FMEA, d.h. die den Bauteilen zugeordneten Risikoprioritätszahlen, werden in der Datenbanktabelle „RPZ“ abgelegt. Jedem Element (d.h. Bauteil) wird jeweils die höchste ermittelte Risikoprioritätszahl zugewiesen, Bild 6.21.

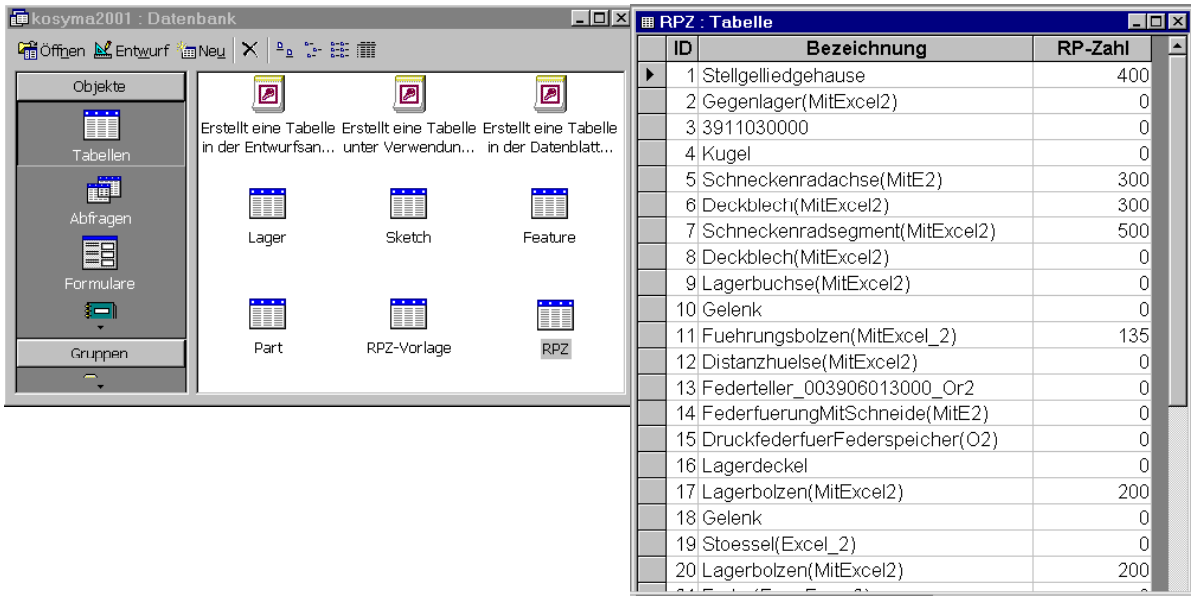


Bild 6.21: Datenbanktabelle mit ermittelten Risikoprioritätszahlen

Die Bauteile, denen eine Risikoprioritätszahl zugeordnet wurde, können entsprechend der RPZ-Größe im CAD-System visualisiert werden. Durch eine unterschiedliche Einfärbung der Komponenten kann deren Kritikalität sichtbar gemacht werden. Bauteile, denen keine RPZ zugeordnet wurde, wurden innerhalb der FMEA nicht betrachtet und können ausgeblendet werden, Bild 6.22. Des weiteren können RPZ-Grenzen definiert werden, um gewisse Bereiche zu verdeutlichen.

Durch diese Möglichkeiten erhält der Anwender, d.h. der Konstrukteur, einen Überblick über die risikobehafteten Bauteile des Systems und kann diese entsprechend verändern.

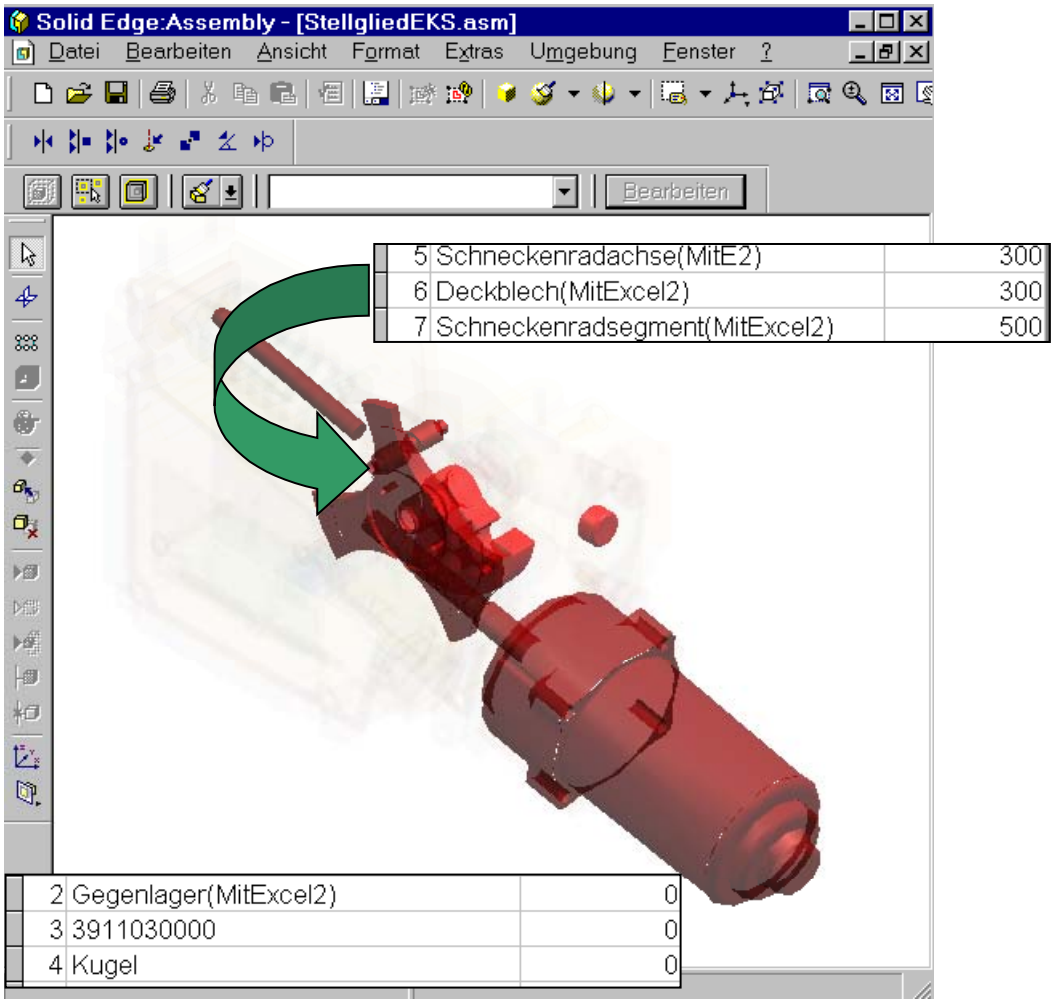


Bild 6.22: Visualisierung der FMEA-Ergebnisse im CAD-System

Durchführung mit IQ-FMEA

Vom Lebensdauermanager ausgehend kann das Programm IQ-FMEA aufgerufen werden, in dem die Struktur des zu untersuchenden Systems analog zu Bild 6.23 erstellt werden kann. Als Basis dient die Stückliste des CAD-Systems („Edgebar“) aus Bild 6.19. In einer Funktionsanalyse wurden drei Topfunktionen gefunden: Geberzylinder betätigen, Lebensdauer gewährleisten und Komfort sicherstellen [100]. Zusammen mit der Struktur des elektromechanischen Kupplungssystems EKS und den ermittelten Topfunktionen ergibt sich in dem kommerziellen Programm IQ-FMEA die Strukturdarstellung wie in Bild 6.23. Davon ausgehend werden die folgenden Schritte der FMEA durchgeführt, siehe auch Kapitel 3.2.6.

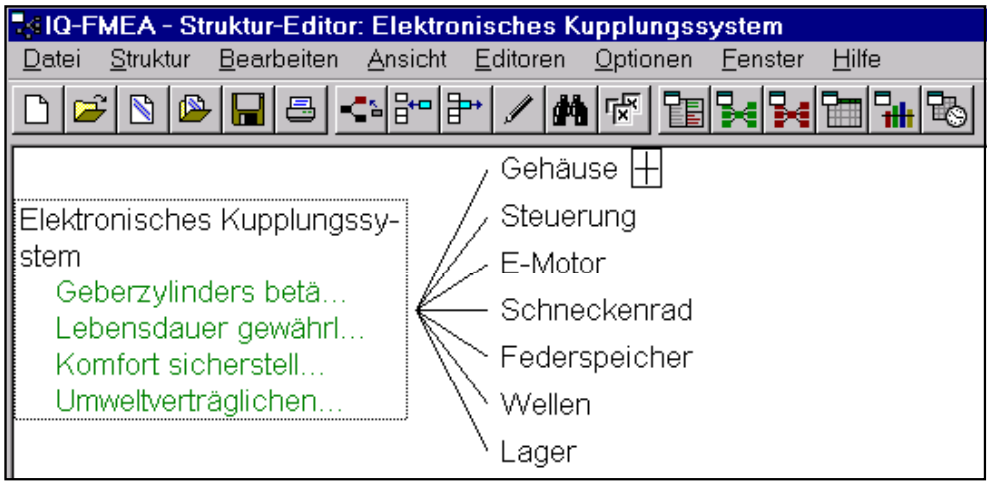


Bild 6.23: Struktur des EKS, Ausschnitt

Die Baumstruktur, die zur Durchführung der weiteren FMEA-Schritte notwendig ist, zeigt Bild 6.23. Beginnend mit der Funktionsanalyse ist eine Unterstützung der Analyse durch Checklisten hilfreich. Eine Leitlinie für auftretende Anforderungen unterstützt die Definition von Funktionen. Bei der Fehleranalyse wird die Arbeit durch eine Liste typischer Fehlerarten vereinfacht. Des weiteren wird in diesem Kapitel auch eine Checkliste typischer Fehlerursachen gezeigt. Entsprechend kann die Suche nach Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen sowie Fehlerfolgen durch geeignete Listen unterstützt werden. Aus den Listen lassen sich die zutreffenden Begriffe mittels Drag&Drop in das FMEA-System plazieren. Das entsprechende Fachwissen des Konstrukteurs ist Voraussetzung für diese Tätigkeit.

Wie in Kapitel 3.2.6 beschrieben führt das Programm IQ-FMEA durch die 5 Schritte nach dem VDA-Standard. Nach der Risikobewertung ergibt sich für das Beispiel EKS eine Risikoverteilung, Bild 6.24, wobei je Bauteil lediglich die am höchsten bewertete Fehlfunktion dargestellt wird.

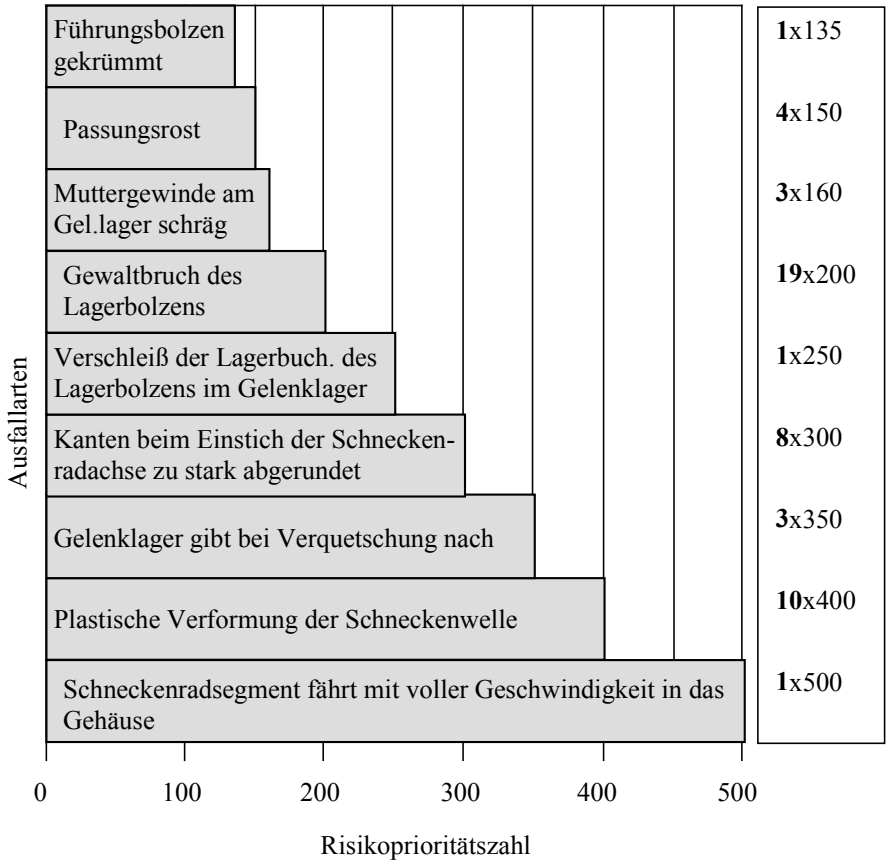


Bild 6.24: FMEA-Ergebnis, Auszug Risikoverteilung

6.5 Weibullbasierte Kostenreduzierung des EKS

Die in Kapitel 5.4 allgemeine Vorgehensweise zur gezielten Kostenreduzierung auf Basis der Weibullverteilung des Systems wird hier auf das elektronische Kupplungssystem EKS angewendet.

Bild 6.25 zeigt das Ausfallverhalten der einzelnen Komponenten sowie des gesamten EKS-Systems. Bei der Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems von $F(t) = 99{,}9\%$ wurde die Lebensdauer $t_{99,9}$ auf der Zeitachse ermittelt. Alle Kurven mit Ausfallwahrscheinlichkeiten, die rechts von dieser Senkrechten, also im Bereich von höheren Lebensdauern als $t_{99,9}$ verlaufen, tragen zum Verlauf des Systemausfallverhaltens bis $F(t) = 99{,}9\%$ nicht bei. In diesem Fall sind das primär die Rillenkugellager, die Druckfeder und teilweise die Lagerbuchse der Feder.

Im folgenden wird das Modul „Cost Design Kit“ (CDK) des Lebensdauermanagers vorgestellt, mit dem eine beispielhafte, gezielte Kostenreduzierung des Wälzlagers erfolgt [106]. Bild 6.26 zeigt eine Übersicht der Vorgehensweise.

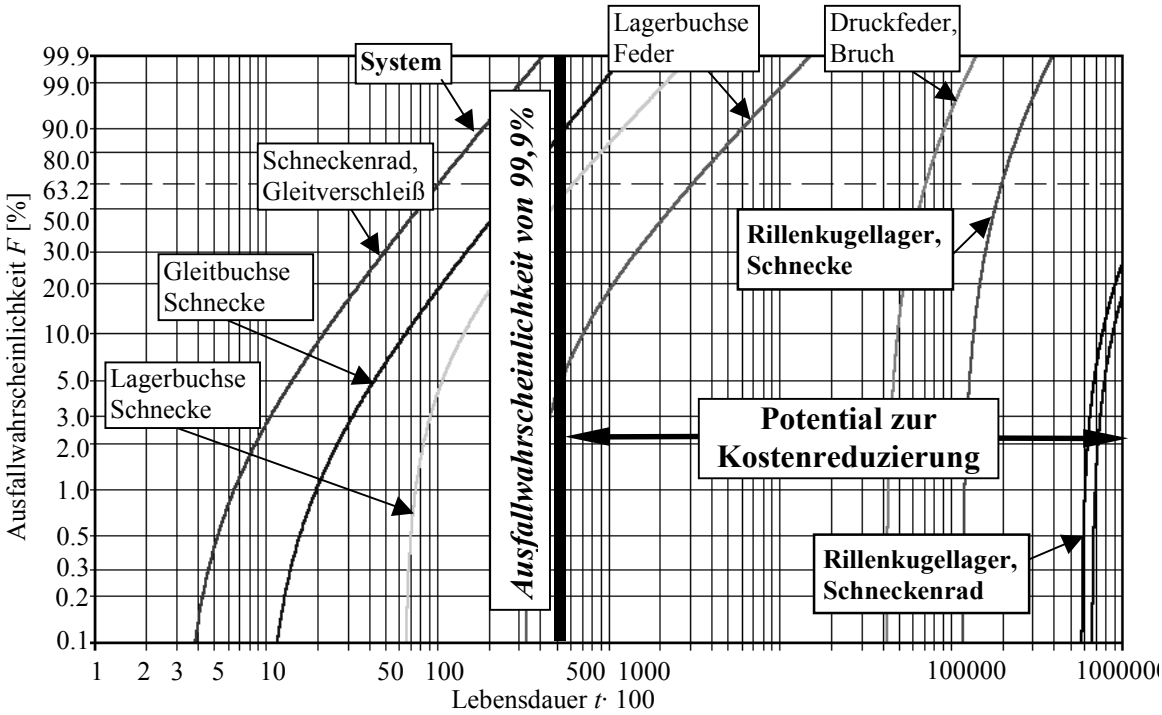


Bild 6.25: Weibullverteilungen der Einzelkomponenten des EKS

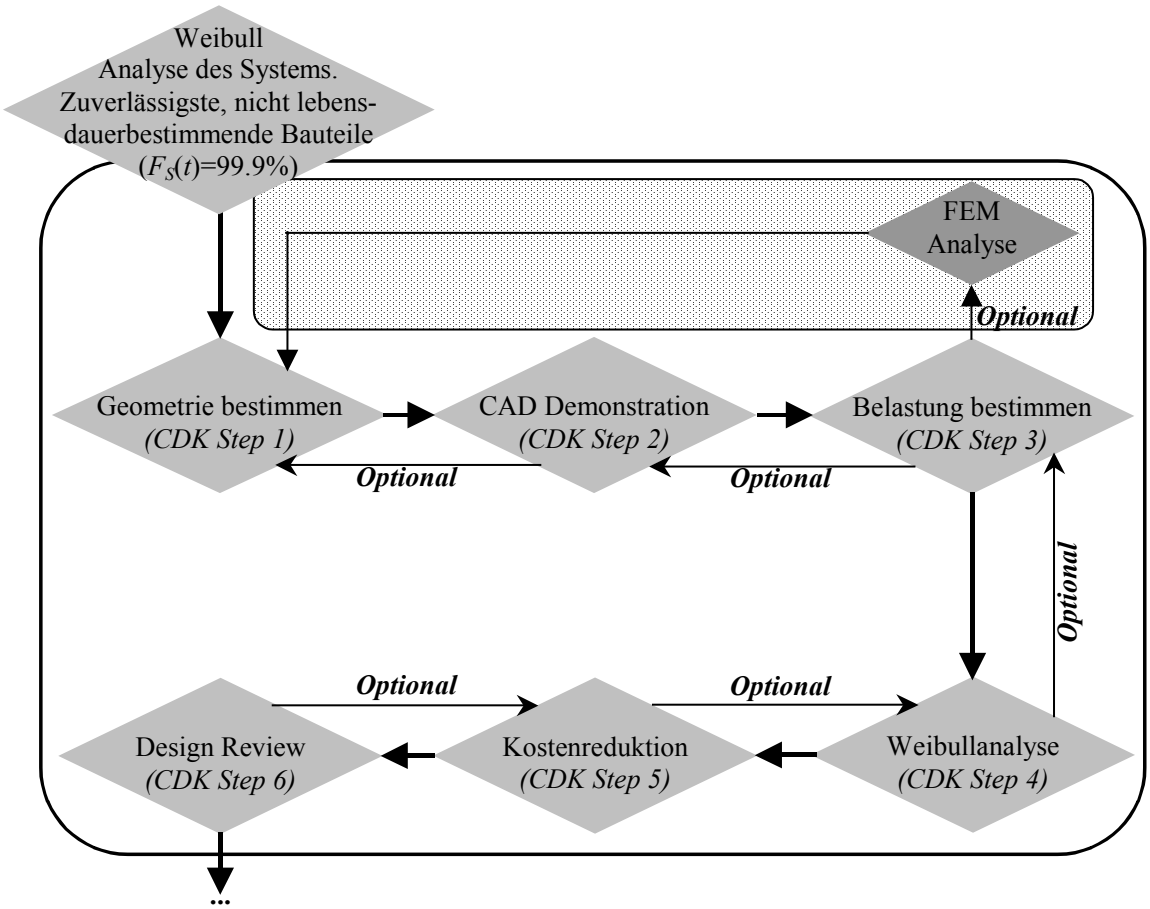


Bild 6.26: Ablaufdiagramm des Cost Design Kit

In den ersten drei Schritten des Moduls CDK wird die Bauteilgeometrie des Wälzlagers bestimmt, das CAD-Modell generiert und die Belastung sowie die Umdrehungsgeschwindigkeit festgelegt. Die B_{10}-Lebensdauer des Lagers wird nach der Formel

$$B_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \tag{6.1}$$

berechnet. Die dynamische Tragzahl C hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab und wird aufgrund zahlreicher Versuche, Untersuchungen und Erfahrungen ermittelt. Sie ist eine Lagerkonstante und wird von den verschiedenen Wälzlagerherstellern angegeben [107]. Aus den radialen und axialen Kräften sowie deren jeweiligen Faktoren errechnet sich die dynamisch äquivalente Lagerbeanspruchung P:

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \,. \tag{6.2}$$

Der Exponent der Lebensdauergleichung ist für Punktberührung (Kugellager) $p = 3$ und für Linienberührung (Rollenlager) $p = {}^{10}/_{3}$.

Der Ablauf der Lagerauswahl bis zur Darstellung der Ausfallwahrscheinlichkeit Lebensdauerkurve des selektierten Lagers im Weibulldiagramm wird in Bild 6.27 anhand der verschiedenen Eingabemasken gezeigt.

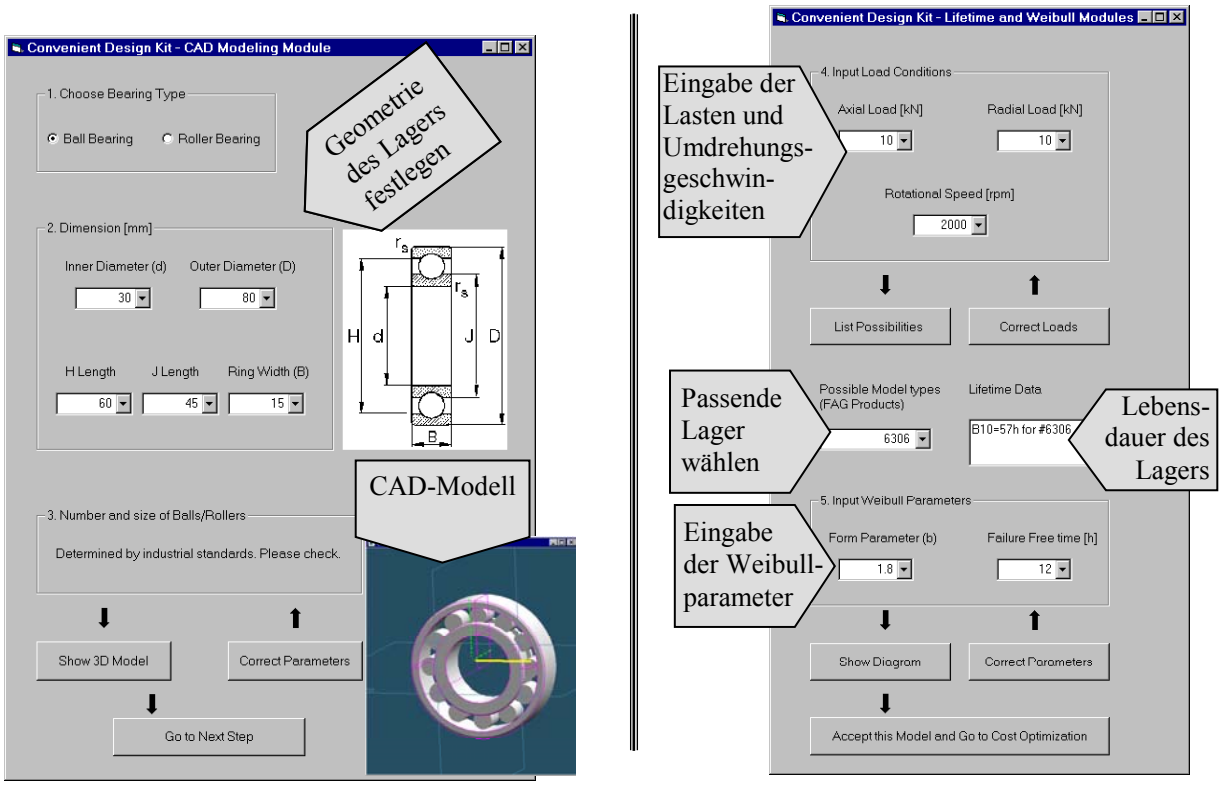


Bild 6.27: Ablauf der weibullbasierten Kostenreduzierung der Lager

Der Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit der unterschiedlichen Lager läßt sich vergleichend im Weibulldiagramm darstellen. In Bild 6.28 sind die Lebensdauerverteilungen von drei verschiedenen Lagern mit unterschiedlichen B_{10}-Lebensdauern von $20h \cdot 10^x$, $66h \cdot 10^x$ bzw. $150h \cdot 10^x$ Betriebsstunden dargestellt. Angenommen, die Senkrechte für $F(t) = 99{,}9\%$ des Systems liegt wie in Bild 6.28 dargestellt, dann ergeben sich folgende Aussagen bezüglich dieser Lager:

- Lager a ist unterdimensioniert,
- Lager b liegt im moderaten Bereich und wäre für das System geeignet,
- Lager c ist überdimensioniert.

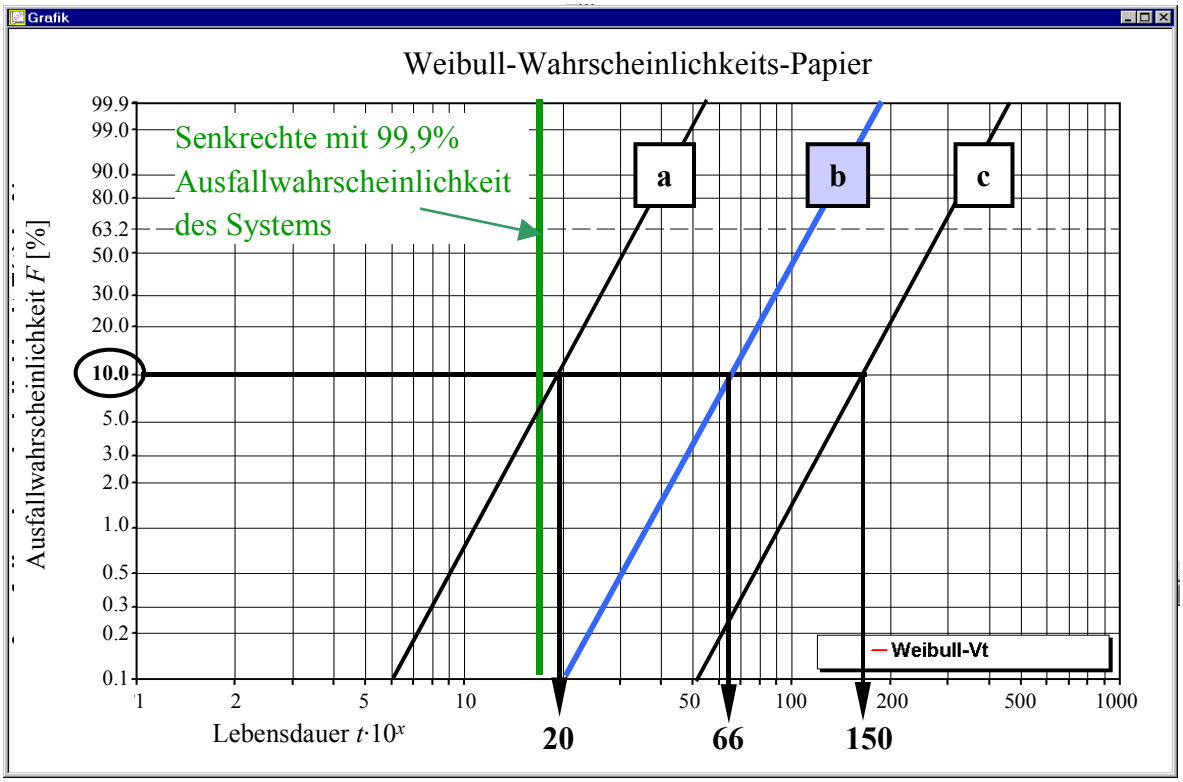


Bild 6.28: Lebensdauerkurven verschiedener Lager

In dem Teilmodul in Bild 6.29 können die optionalen Lager und deren Anzahl ausgewählt werden. Anschließend können die Preise für die selektierten Mengen errechnet und verglichen werden, woraus sich bei größeren Mengen eine erhebliche Kosteneinsparung ergeben kann.

Die Preise für die Lager ergaben sich wie folgt: Für Lager a: 9,67 €/Stück, für Lager b: 15,68 €/Stück, für Lager c: 47,29 €/Stück. In diesem Beispiel ergibt sich somit die Möglichkeit, bei Auswahl von Lager b gegenüber Lager c mehr als 60% der Bauteilkosten zu reduzieren. Der Kostenanteil dieses Lagers am Gesamtsystem wurde nicht errechnet.

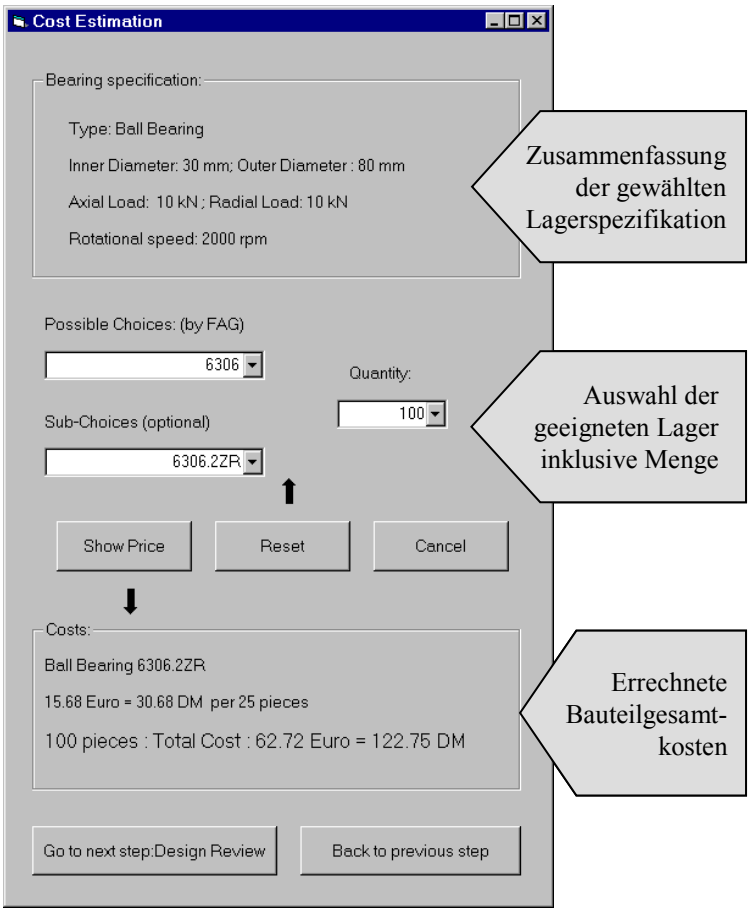


Bild 6.29: Kostenberechnung von Lager b

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Zuverlässigkeit beschreibt unmittelbar die Funktionsfähigkeit eines Produkts. Sie ist als zeitabhängige, d.h. dynamische Komponente der Qualität anzusehen und daher ein entscheidendes Verkaufsargument im Wettbewerb. Um zuverlässige Produkte auch unter sich verschärfenden Randbedingungen, wie z.B. größerer Komplexität und höherer Funktionalität entwickeln zu können, müssen vermehrt Methoden der Zuverlässigkeitstechnik eingesetzt werden.

Die funktionalen Eigenschaften eines Produkts werden, ausgehend von den Kundenforderungen, weitgehend durch die konstruktive Entwicklung bestimmt. Selbst eine ausgereifte Konstruktionsmethodik führt nur durch den Einsatz von Zuverlässigkeitsmethoden zu einer hohen Produktzuverlässigkeit.

Jedoch erfolgt die Ermittlung der Zuverlässigkeit von Bauteilen und Systemen meist spät im Produktentstehungsprozeß sowie isoliert vom rechnerunterstützten Konstruktionsprozeß. Im Sinne einer CAD-integrierten, frühen und konstruktionsphasenübergreifenden Zuverlässigkeitsanalyse und -optimierung soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten.

Basierend auf dem Stand der Konstruktionsmethodik und dessen Abbildung im CAD-System wurde die Anwendung von qualitativen und berechnenden Zuverlässigkeitsmethoden entlang des Produktentstehungsprozesses untersucht. Beginnend mit der Abbildung der Konzeptphase im CAD-System können mittels des Lebensdauermanagers zuverlässigkeitsrelevante Daten zu den geometrischen Objekten in einer Datenbank abgelegt werden. Darauf aufbauend können gängige Zuverlässigkeitsmethoden, wie z.B. Fehlerbaumanalyse und Boolesche Methode, ausgeführt werden. Eine interaktive Zuverlässigkeitsanalyse mit dem CAD-System, bereits in der frühen Phase, kann in der weiteren Entwicklung fortgeschrieben und verfeinert werden. Dadurch soll der Konstrukteur die geforderte hohe Produktzuverlässigkeit früher und genauer erreichen können, verglichen mit einem „CAD-isolierten“ Einsatz der Zuverlässigkeitsmethoden.

Das Software-Werkzeug KOSYMA wurde hinsichtlich einer konstruktionsphasenbezogenen Datenablage weiterentwickelt. Bereits das Konzept in der Entwicklungsphase kann im Skizzenmodus des CAD-Systems abgebildet und mit dem Lebensdauermanager gekoppelt werden. Den erstellten geometrischen Objekten können somit Zuverlässigkeitsdaten zugewiesen werden, auf deren Basis die Zuverlässigkeitsanalyse erfolgt.

Die Ergebnisse werden phasenbezogen und strukturiert in einer Datenbank abgelegt. In späteren Phasen der konstruktiven Entwicklung werden die Resultate als Basis für die weitere Zuverlässigkeitsanalyse verwendet und kontinuierlich verbessert und ergänzt. Diese Durchgängigkeit einer CAD-integrierten Zuverlässigkeitsanalyse wurde anhand der Fehlerbaumanalyse und anhand der Booleschen Methode gezeigt. Die Kopplung des CAD-Systems mit qualitativen Zuverlässigkeitsmethoden wurde am Beispiel der FMEA vorgestellt. Anhand des Beispiels Stellglied des elektromechanischen Kupplungssystems wurde die praktische Anwendung der Vorgehensweise durchgeführt. Abschließend wurde die Möglichkeit einer Kostenreduzierung eines Systems basierend auf der Weibullanalyse am Beispiel der Komponente Lager gezeigt.

In einer Fortsetzung dieser Arbeit soll die Unsicherheit der Zuverlässigkeitsdaten, die sich beispielsweise in den Vertrauensbereichen ausdrückt, berücksichtigt werden. Dabei ist zu prüfen, wie die Datenunsicherheit der einzelnen Komponenten die Zuverlässigkeitsermittlung des Systems beeinflußt. Dabei ist auch auf die Durchgängigkeit der Zuverlässigkeitsinformationen zu achten.

Weitergehende Untersuchungen sollen, aufbauend auf der vorgestellten weibullbasierten Kostenanalyse, hinsichtlich einer früheren Berücksichtigung des Kostenaspekts erfolgen. Mit dem Aufwand der Zuverlässigkeitstechnik kann ein Kosteneinsparpotential einhergehen, so daß ein Einsatz der Zuverlässigkeitsmethoden direkt gewinnbringend ist.

Literatur

[1] N.N.: Handbuch Technische Zuverlässigkeit. Verein deutscher Ingenieure VDI, Berlin: Beuth Verlag, 1985.

[2] Bertsche, B.; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Maschinenbau. Berlin: Springer-Verlag, 1999.

[3] http://www.spiegel.de/auto/news/0,1518,74779,00.html: Pannenstatistik des allgemeinen deutschen Automobilclubs ADAC. Spiegel, 5. Mai 2000.

[4] Bertsche, B.: Zuverlässigkeitstechnik. Unveröffentlichtes Vorlesungsmanuskript, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2001.

[5] Bertsche, B.; Marwitz, H.; Ihle, H., Frank, R.: Entwicklung zuverlässiger Produkte. Konstruktion Jg. 50, H4. S. 41-44, 1998.

[6] Veil, A.: Integration der Berechnung von Systemzuverlässigkeiten in den CAD-Konstruktionsprozeß. Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart 1999.

[7] Breiing, A.; Fleming, M.: Theorie und Methoden des Konstruierens. Berlin: Springer Verlag, 1993.

[8] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre. Berlin: Springer Verlag, 1993.

[9] Rodenacker, W.G.: Methodisches Konstuieren. Berlin: Springer Verlag, 1991.

[10] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Berlin: Springer Verlag, 1994.

[11] Koller, R.: Konstruieren für den Maschinenbau. Berlin: Springer Verlag, 1998.

[12] Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Berlin: Springer Verlag, 1998.

[13] N.N.: Methodik zum Entwickeln technischer Systeme und Produkte. VDI-Richtlinie 2221, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1986.

[14] N.N.: Konzipieren technischer Produkte. VDI-Richtlinie 2222, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1973.

[15] Helm, R.; Janzer, T.M.: Den Markt befragen. QZ Qualität und Zuverlässigkeit Jg. 45, Heft 6, S. 770-773, 2000.

[16] Pfeiffer, T.: Qualitätsmanagement. München: Hanser Verlag, 1996.

[17] N.N.: Quality Function Deployment (QFD). American Supplier Institute, Dearborn, Michigan.

[18] Fessler, M.; Timpe, K.-P.: Der systemtechnische QFD-Ansatz (QFD^S) in der Produktplanungsphase. Berlin: Springer-Verlag, 1999, Konstruktion April 4-1999, S. 45-52.

[19] Ruppert, H.: Systemanalyse, Qualitative und Quantitative Zuverlässigkeitsanalyse. Haus der Technik - Seminar Zuverlässigkeitsmethoden in der Produktentwicklung, München, 21.-22. September 2000.

[20] N.N.: Ausfalleffektenanalyse: Fehler-Möglichkeits- und Einfluß-Analyse, DIN 25 448, 1990.

[21] N.N.: Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz - System-FMEA. VDA-Band 4 Teil 2, Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie, 1. Auflage, 1996.

[22] N.N.: Military Standard 1629 A. Procedures for Performing a FMECA. Department of Defense. USA, 1980.

[23] Bertsche, B.; Loos, S.; Müller, P.; Ruppert, H.: System-FMEA nach VDA 4.2. VDI-Seminar, Stuttgart, 5.-6. Juni 2000.

[24] N.N.: FMEA-Seminar. Skriptum, Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, Fraunhofer Gesellschaft, Stuttgart, 23.10.1997.

[25] Algedri, J.; Frieling, E.: Beurteilung rechnergestützter FMEA-Systeme. München: Carl Hanser Verlag, QZ Qualität und Zuverlässigkeit Jg. 43, Heft 12, S. 1490-1494, 1998.

[26] Braunsperger, M.: Präventives Qualitätskonzept für die Automobilentwicklung. Einführung in die Praxis. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht 1134, S. 171-204, 1994.

[27] Herb, R.; Herb, T.; Kratzer, M.: Potentielle Fehler vollständig erfassen. München: Carl Hanser Verlag, QZ Qualität und Zuverlässigkeit Jg. 43, Heft 2, S. 183-187, 1998.

[28] Kersten, G.: Fehler vermeiden mit System. München: Carl Hanser Verlag, QZ Qualität und Zuverlässigkeit Jg. 44, Heft 7, S. 874-878, 1999.

[29] Kost, N.; Loos, S.: System-FMEA in der Praxis. München: Carl Hanser Verlag, QZ Qualität und Zuverlässigeit Jg. 42, Heft 7, S. 791-794, 1997.

[30] Pfeifer, T.: Rechnergestützte, wissensbasierte Erstellung von Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analysen (FMEA). Berlin: Beuth Verlag, Tagungsband zur Forschungstagung Qualitätssicherung ’93, S. 137-155, 1993.

[31] Pfeifer, T.; Prefi, T.: Präventive Qualitätstechniken in der Produktentwicklung. Düsseldorf :VDI-Verlag, VDI-Bericht 1136, S. 227-241, 1994.

[32] Schloske, A.: Methoden der Qualitätssicherung. Vorlesungsskript, Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Prof. Westkämper, Universität Stuttgart, 1997.

[33] Schmitt, L.: Qualitätsmethoden in der Antriebsentwicklung bei BMW. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift Jg. 97, Heft 10, S. 634-643, 1995.

[34] Schiegg, H.; Viertlböck, M.; Kraus, T.: Prozessbegleitend und frühzeitig. München: Carl Hanser Verlag, QZ Qualität und Zuverlässigkeit Jg. 44, Heft 7, S. 879-884, 1999.

[35] Stockinger, K.-H.: Auswirkungen von FMEA und CAQ auf die Qualitätssicherung eines Zulieferbetriebes. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht 1018, S. 39-62, 1992.

[36] Welsch, D.: Rechnerunterstützte FMEA im Spritzgießbetrieb. München: Carl Hanser Verlag, Kunststoffe Jg. 83 Heft 2, S. 107-111, 1993.

[37] Zebedin, H.: FMEA aus Sicht eines Motorenentwicklers. München: Carl Hanser Verlag, QZ Qualität und Zuverlässigkeit Jg. 43 Heft 7, S. 826-832, 1998.

[38] Ebinger, E.: Analyse und Vergleich kommerzieller FMEA-Software. Unveröffentlichter Bericht, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2000.

[39] Irmler, G.: Fehlerbaumanalyse und FMEA. Konstruktionspraxis Nr. 3, 6. Jg., März 1995.

[40] N. N.: Fehlerbaumanalyse. DIN 25 424, Teil 1, Sept 1981.

[41] N. N.: Ereignisablaufanalyse: Verfahren, graphische Symbole und Auswertung. DIN 25419, 1985.

[42] Kafka, P.; Haak, R.; Culjkovic, M.: Zuverlässigkeitsmanagement in der Produktentwicklung. VDI-Seminar, Düsseldorf, 28.-29. Oktober 1999.

[43] Algedri, J.; Frieling, E.: Human-FMEA. München: Carl Hanser Verlag, 2001.

[44] N.N.: Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten. VDA-Band 3 Teil 2, Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie, 3. Auflage 2000.

[45] Haibach; E.: Betriebsfestigkeit. Düsseldorf: VDI Verlag, 1989.

[46] Härtler, G.: Statistische Methoden für die Zuverlässigkeitsanalyse. Berlin: VEB Verlag Technik, 1981.

[47] Beichelt, F.: Stochastik für Ingenieure. Stuttgart: Teubner Verlag, 1995.

[48] Gaede, K.-W.: Zuverlässigkeit - Mathematische Modelle. München: Carl Hanser Verlag, 1997.

[49] Meyna, A.: Zuverlässigkeitsbewertung zukunftsorientierter Technologien, Braunschweig: Vieweg Verlag, 1994.

[50] Meyna, A.: Einführung in die Fehlerbaumanalyse. Skriptum zum HdT-Seminar, Essen, 18.-19.04.1997.

[51] N.N.: Markoff-Zustandsänderungsmodell mit endlichen vielen Zuständen. VDI-Richtlinien 4008, Blatt 3, August 1983.

[52] Fritz, A.: Berechnung reparierbarer Systeme. Haus der Technik - Seminar Zuverlässigkeitsmethoden in der Produktentwicklung, München, 21.-22. September 2000.

[53] N. N.: Monte-Carlo-Simulation. VDI-Richtlinien 4008, Blatt 6, Dezember 1985.

[54] N.N.: Erneuerungsprozesse. VDI-Richtlinien 4008, Blatt 8, März 1984.

[55] Häussler, U.: Monte-Carlo Simulation und Transportgleichung. Interner Bericht, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 1993.

[56] Birolini, A.: Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme. Berlin: Springer Verlag, 1991.

[57] Fritz, A.: Berechnung und Monte-Carlo Simulation der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme. Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2001.

[58] Engel, B.: Rechnerunterstütztes Konstruieren. Unveröffentlichtes Vorlesungsmanuskript, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 1998.

[59] Sendler, Ulrich: CAD & Office Integration: OLE für Design und Modellierung. Berlin: Springer Verlag, 1995.

[60] N.N.: ERP oder CAD plus PDM – Ende einer Diskussion? CAD/CAM Nr. 3, 19. Jg., Juni 2000.

[61] Meyer, B.: Object-oriented Software Construction. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1998.

[62] Pomberger, G.; Blaschek, G.: Software Engineering. München: Carl Hanser Verlag, 1993.

[63] Stroustrupp, B.: Die C++ Programmiersprache. Bonn: Addison-Wesley, 1992.

[64] Kruglinski, D.J.: Inside Visual C++ Version 5. Unterschleißheim: Microsoft Press, 1997.

[65] Endres, A.; Uhl, J.: Objektorientierte Software Entwicklung - Eine Herausforderung für die Projektführung. Informatik-Spektrum Jg. 15, S. 255-263, 1992.

[66] Hartig, J.: Kostenrelativierte Zuverlässigkeitsoptimierung in der Konzeptphase maschinenbaulicher Produktentwicklung. Universität Rostock, 1996.

[67] Brunner, F.J.: Wirtschaftlichkeit industrieller Zuverlässigkeitssicherung. Braunschweig: Vieweg-Verlag, 1992.

[68] Kececioglu, D.: Reliability Engineering Handbook. Tuscon, University of Arizona, USA, 2000.

[69] N.N.: Solid Edge Version 5.0 von Unigraphics Solutions - Bewährte Schale mit neuem Kern. CAD-CAM Report Nr. 6, S. 32-37, 1998.

[70] N.N.: Modellvielfalt und individuelle Lösungen. CADWORLD, März 1999, S. 78-79.

[71] N.N.: Solid Edge Version 7.0 - Die leistungsfähige Midrange-Lösung. CAD-CAM Report Nr.6, 1999, S. 28-37.

[72] N.N.: Linux Statements. CAD-CAM Report Nr 5, S. 80ff, Mai 2000.

[73] www.omg.org

[74] Brockschmidt, K.: Inside OLE. Unterschleißheim: Microsoft Press, 1995.

[75] Chappell, D.: Understanding ActiveX and OLE. Unterschleißheim: Microsoft Press, 1996.

[76] N.N.: Dokumentation Solid Edge Version 9. Unigraphics Solutions, 2001.

[77] Bertsche, B.: Zuverlässigkeitsmethoden in der Produktentwicklung. Vortrag VDI-Arbeitskreis Entwicklung, Konstruktion und Vertrieb, Mannheim, 1999.

[78] Lenk, R.: Zuverlässigkeitsanalyse von komplexen Systemen am Beispiel PKW-Automatikgetriebe. Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 1995.

[79] N.N.: Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten. VDA-Band 3 Teil 1, Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie, 3. Auflage 2000.

[80] Amberkar, S.; D'Ambrosio, J.G., Murray, B.T.; Wysocki, J.; Czerny, B.J.: A System-Safety Process for By-Wire Automotive Systems. SAE-Paper, 2000-01-1056.

[81] Kraniak, B.; Ammons, D.: Linking the Future to the Past: Closing the Loop Between Yesterday's Failures and Tomorrow's Solutions. Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, S. 103-109, 2001.

[82] Bertsche, B.: Optimierung der Zuverlässigkeit komplexer Maschinenbau-Systeme in frühen Entwicklungsphasen. Antrag auf Einrichtung eines Sonderforschungsbereichs, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2000.

[83] O'Connor, P.D.T.: Practical Reliability Engineering. New York: John Wiley & Sons, 1985.

[84] N.N.: Statistische Auswertung von Daten. DIN 55303 Teil 7: Schätz- und Testverfahren bei zweiparametriger Weibullverteilung, März 1996.

[85] Nelson, W.: Applied Life Analysis. New York: John Wiley & Sons, 1982.

[86] Johnson, L.G.: The statistical treatment of fatigue experiments. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1964.

[87] Nelson, W.: Accelerated Life Testing - Step-Stress Models and Data Analyses. IEEE Transactions of Reliability, Vol. R-29, No.2, June 1980.

[88] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit. Düsseldorf: VDI Verlag, 1989.

[89] N.N.: HALT, HASS and HASA as applied at AT&T. Strategic Technology Group, AT&T Wireless Services, 1997.

[90] Martz, B.; Waller, A.: Bayesian reliability analysis. New York: John Wiley & Sons, 1982.

[91] Kleyner, Bhagath, Gasparini, Robinson, Bender: Bayesian techniques to reduce sample size in automotive electronics attribute testing. Microelectronical Reliability, Vol. 37, No. 6, pp 879-883, 1997.

[92] Beyer, R.; Lauster, E.: Statistische Lebensdauerprüfpläne bei Berücksichtigung von Vorkenntnissen. München: Carl Hanser Verlag, QZ Qualität und Zuverlässigkeit Jg. 35, Heft 2, S. 93-98, 1997.

[93] Duane, J.T.: Learning Curve Approach To Reliability Monitoring. IEEE Transactions on Aerospace, Vol. 2, pp 563-566, 1964.

[94] N.N.: Zuverlässigkeitswachstum bei Systemen. VDI-Richtlinie 4009, Blatt 8.

[95] N.N.: Reliability Growth Management. MIL-HDBK 189, Februar 1981.

[96] N.N.: Qualitätskontrolle in der Automobilindustrie, Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz. VDA-Band 4 Teil 1, 2. Auflage, 1986.

[97] N.N.: Ausfallraten Bauelemente. Siemens-Norm SN 29500 Teile 1 bis 12.

[98] N.N.: Reliability Prediction of Electronic Equipment (+notices 1&2). Military Handbook 217, Department of Defense, USA Reviews A–F, 1991.

[99] Gauggel, T.: Konzeption und Entwicklung einer Datenbank zur Zuverlässigkeitsprojektierung, Interner Bericht, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 1997.

[100] N.N.: Interner Bericht zum EKS. Fichtel & Sachs AG, 1992.

[101] www.daimlerchrysler.com

[102] Veil, A.: Produktoptimierung bei der Entwicklung durch eine die CAD-Konstruktion begleitende Berechnung der Systemlebensdauer. Arbeitsberichte zum Schwerpunktprogramm „Innovative rechnerunterstützte Konstruktionsprozesse“, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 1997.

[103] Ruppert, H.; Veil, A.; Bertsche, B.: Reliability Prediction during CAD. European Safety & Reliability Conference, München, Sep 13-17, 1999.

[104] Ruppert, H.; Bertsche, B.: Reliability Methods in Computer Aided Early Design Stages for Automotive Systems. European Safety & Reliability Conference, Edinburgh, Scotland, May 15-17, 2000.

[105] Gao, J.: Unterstützung der FMEA-Methodik mittels einer Wissensbasis. Unveröffentlichter Bericht, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2001.

[106] Ruppert, H.; Lin, C.; Bertsche, B.: Cost Reduction Based on a CAD-integrated Weibull Analysis. European Safety and Reliability Conference, Turin, Italien, 16.-20. September 2001.

[107] N.N.: FAG Wälzlager Katalog. WL 41 520/3 DB, FAG AG, 1999.

[108] Ruppert, H.; Bertsche, B.: CAD-integrated Evaluation and Calculation of Reliability for Automotive Systems. The Annual Reliability and Maintainability Symposium RAMS, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 22.-28. Januar 2001.

Lebenslauf

Persönliches

Name	Heiko Andreas Ruppert
Geburtsdatum, -ort	8. Juni 1969 in Heilbronn-Sontheim
Familienstand	verheiratet mit Dr. med. Antje Ruppert, geb. Vonderbank
Kinder	Annina Elisa Ruppert, geb. am 9. Juli 2001
Eltern	Heinz Ruppert und Anita Ruppert, geb. Seher

Schulbildung

08/ 76 – 07/ 80	Grundschule in Heilbronn-Frankenbach
08/ 80 – 05/ 89	Elly-Heuss-Knapp-Gymnasium in Heilbronn

Bundeswehr

06/ 89 – 08/ 90	Instandhaltung in Eschweiler und Kühlsheim

Studium

10/ 90 – 09/ 92	Vordiplom Maschinenbau, Universität Stuttgart
10/ 92 – 10/ 96	Hauptdiplom Maschinenbau, Universität Stuttgart Vertiefungsfächer: Fabrikbetrieb (Prof. Warnecke) Kraftwerkstechnik (Prof. Hein) Praktika: Kolbenschmidt AG, Neckarsulm Helsinki University of Technology British Steel, Newport
24. Oktober 1996	Diplomhauptprüfung

Beruf

11/ 96 – 08/ 98	Continental Automotive Systems, Betriebsleiter Ulm
09/ 98 – 09/ 01	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart, Zuverlässigkeitstechnik
seit 10/ 01	Qualitätsingenieur im Bereich Fahrwerk/ Federungssysteme der DaimlerChrysler AG, Entwicklung PkW

Liste der bisher erschienenen Berichte aus dem IMA:

Nr.	Verfasser	Titel
1	H.K. Müller	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion von Hochdruckdichtungen an schnellaufenden Wellen
2	W. Passera	Konzentrisch laufende Gewinde-Wellen-Dichtung im laminaren Bereich
	K. Karow	Konzentrische Doppelgewindewellendichtung im laminaren Bereich
3	F.E. Breit	Die Kreiszylinderschalendichtung: Eine Axialspaltdichtung mit druckabhängiger Spaltweite
	W. Sommer	Dichtungen an Mehrphasensystemen: Berührungsfreie Wellendichtungen mit hochviskosen Sperrflüssigkeiten
4	K. Heitel	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion konzentrisch und exzentrisch betriebener Gewindewellendichtungen im laminaren Bereich
5	K.-H. Hirschmann	Beitrag zur Berechnung der Geometrie von Evolventenverzahnungen
6	H. Däuble	Durchfluß und Druckverlauf im radial durchströmten Dichtspalt bei pulsierendem Druck
7	J. Rybak	Einheitliche Berechnung von Schneidrädern Für Außen- und Innenverzahnungen Beitrag zu Eingriffsstörungen beim Hohlrad-Verzahnen mittels Schneidrad
8	D. Franz	Rechnergestütztes Entwerfen von Varianten auf der Grundlage gesammelter Erfahrungswerte
9	E. Lauster	Untersuchungen und Berechnungen zum Wärmehaushalt mechanischer Schaltgetriebe
10		Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. K. Talke
11	G. Ott	Untersuchungen zum dynamischen Leckage- und Reibverhalten von Radialwellendichtringen
12	E. Fuchs	Untersuchung des elastohydrodynamischen Verhaltens von berührungsfreien Hochdruckdichtungen
13	G. Sedlak	Rechnerunterstütztes Aufnehmen und Auswerten spannungsoptischer Bilder
14	W. Wolf	Programmsystem zur Analyse und Optimierung von Fahrzeuggetrieben
15	H. v. Eiff	Einfluß der Verzahnungsgeometrie auf die Zahnfußbeanspruchung innen- und außenverzahnter Geradstirnräder
16	N. Messner	Untersuchung von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
17	V. Schade	Entwicklung eines Verfahrens zur Einflanken-Wälzprüfung und einer rechnergestützten Auswertemethode für Stirnräder
18	A. Gührer	Beitrag zur Optimierung von Antriebssträngen bei Fahrzeugen
19	R. Nill	Das Schwingungsverhalten loser Bauteile in Fahrzeuggetrieben
20	M. Kammüller	Zum Abdichtverhalten von Radial-Wellendichtringen
21	H. Truong	Strukturorientiertes Modellieren, Optimieren und Identifizieren von Mehrkörpersystemen
22	H. Liu	Rechnergestützte Bilderfassung, -verarbeitung und -auswertung in der Spannungsoptik
23	W. Haas	Berührungsfreie Wellendichtungen Für flüssigkeitsbespritzte Dichtstellen
24	M. Plank	Das Betriebsverhalten von Wälzlagern im Drehzahlbereich bis 100.000/min bei Kleinstmengenschmierung
25	A. Wolf	Untersuchungen zum Abdichtverhalten von druckbelastbaren Elastomer- und PTFE-Wellendichtungen
26	P. Waidner	Vorgänge im Dichtspalt wasserabdichtender Gleitringdichtungen
27	Hirschmann u.a.	Veröffentlichungen aus Anlaß des 75. Geburtstags von Prof. Dr.-Ing. Kurt Talke
28	B. Bertsche	Zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit von Maschinenbauprodukten
29	G. Lechner; K.-H.Hirschmann; B. Bertsche	Forschungsarbeiten zur Zuverlässigkeit im Maschinenbau
30	H.-J. Prokop	Zum Abdicht- und Reibungsverhalten von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
31	K. Kleinbach	Qualitätsbeurteilung von Kegelradsätzen durch integrierte Prüfung von Tragbild, Einflankenwälzabweichung und Spielverlauf
32	E. Zürn	Beitrag zur Erhöhung der Meßgenauigkeit und -geschwindigkeit eines Mehrkoordinatentasters
33	F. Jauch	Optimierung des Antriebsstranges von Kraftfahrzeugen durch Fahrsimulation
34	J. Grabscheid	Entwicklung einer Kegelrad-Laufprüfmaschine mit thermografischer Tragbilderfassung
35	A. Hölderlin	Verknüpfung von rechnerunterstützter Konstruktion und Koordinatenmeßtechnik
36	J. Kurfess	Abdichten von Flüssigkeiten mit Magnetflüssigkeitsdichtungen
37	G. Borenius	Zur rechnerischen Schädigungsakkumulation in der Erprobung von Kraftfahrzeugteilen bei stochastischer Belastung mit variabler Mittellast
38	E. Fritz	Abdichtung von Maschinenspindeln
39	E. Fritz; W. Haas; H.K. Müller	Berührungsfreie Spindelabdichtungen im Werkzeugmaschinenbau. Konstruktionskatalog
40	B. Jenisch	Abdichten mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer und Polytetrafluorethylen

Nr.	Verfasser	Titel
41	G. Weidner	Klappern und Rasseln von Fahrzeuggetrieben
42	A. Herzog	Erweiterung des Datenmodells eines 2D CAD-Systems zur Programmierung von Mehrkoordinatenmeßgeräten
43	T. Roser	Wissensbasiertes Konstruieren am Beispiel von Getrieben
44	P. Wäschle	Entlastete Wellendichtringe
45	Z. Wu	Vergleich und Entwicklung von Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen
46	W. Richter	Nichtwiederholbarer Schlag von Wälzlagereinheiten für Festplattenlaufwerke
47	R. Durst	Rechnerunterstützte Nutprofilentwicklung und clusteranalytische Methoden zur Optimierung von Gewindewerkzeugen
48	G.S. Müller	Das Abdichtverhalten von Gleitringdichtungen aus Siliziumkarbid
49	W.-E. Krieg	Untersuchungen an Gehäuseabdichtungen von hochbelasteten Getrieben
50	J. Grill	Zur Krümmungstheorie von Hüllflächen und ihrer Anwendung bei Werkzeugen und Verzahnungen
51	M. Jäckle	Entlüftung von Getrieben
52	M. Köchling	Beitrag zur Auslegung von geradverzahnten Stirnrädern mit beliebiger Flankenform
53	M. Hildebrandt	Schadensfrüherkennung an Wälzkontakten mit Körperschall-Referenzsignalen
54	H. Kaiser	Konstruieren im Verbund von Expertensystem, CAD-System, Datenbank und Wiederholteilsuch-system
55	N. Stanger	Berührungsfrei abdichten bei kleinem Bauraum
56	R. Lenk	Zuverlässigkeitsanalyse von komplexen Systemen am Beispiel PKW-Automatikgetriebe
57	H. Naunheimer	Beitrag zur Entwicklung von Stufenlosgetrieben mittels Fahrsimulation
58	G. Neumann	Thermografische Tragbilderfassung an rotierenden Zahnrädern
59	G. Wüstenhagen	Beitrag zur Optimierung des Entlasteten Wellendichtrings
60	P. Brodbeck	Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Bauteilzuverlässigkeit und zur Systemberechnung nach dem Booleschen Modell
61	Ch. Hoffmann	Untersuchungen an PTFE-Wellendichtungen
62	V. Hettich	Identifikation und Modellierung des Materialverhaltens dynamisch beanspruchter Flächendichtungen
63	K. Riedl	Pulsationsoptimierte Außenzahnradpumpen mit ungleichförmig Übersetzenden Radpaaren
64	D. Schwuchow	Sonderverzahnungen Für Zahnradpumpen mit minimaler Volumenstrompulsation
65	T. Spörl	Modulares Fahrsimulationsprogramm Für beliebig aufgebaute Fahrzeugtriebstränge und Anwendung auf Hybridantriebe
66	K. Zhao	Entwicklung eines räumlichen Toleranzmodells zur Optimierung der Produktqualität
67	K. Heusel	Qualitätssteigerung von Planetengetrieben durch Selektive Montage
68	T. Wagner	Entwicklung eines Qualitätsinformationssystems Für die Konstruktion
69	H. Zelßmann	Optimierung des Betriebsverhaltens von Getriebeentlüftungen
70	E. Bock	Schwimmende Wellendichtringe
71	S. Ring	Anwendung der Verzahnungstheorie auf die Modellierung und Simulation des Werkzeugschleifens
72	M. Klöpfer	Dynamisch beanspruchte Dichtverbindungen von Getriebegehäusen
73	C.-H. Lang	Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
74	W. Haas	Berührungsfreies Abdichten im Maschinenbau unter besonderer Berücksichtigung der Fanglabyrinthe
75	P. Schiberna	Geschwindigkeitsvorgabe für Fahrsimulationen mittels Verkehrssimulation
76	W. Elser	Beitrag zur Optimierung von Wälzgetrieben
77	P. Marx	Durchgängige, bauteilübergreifende Auslegung von Maschinenelementen mit unscharfen Vorgaben
78	J. Kopsch	Unterstützung der Konstruktionstätigkeiten mit einem Aktiven Semantischen Netz
79	J. Rach	Beitrag zur Minimierung von Klapper- und Rasselgeräuschen von Fahrzeuggetrieben
80	U. Häussler	Generalisierte Berechnung räumlicher Verzahnungen und ihre Anwendung auf Wälzfräserherstellung und Wälzfräsen
81	M. Hüsges	Steigerung der Tolerierungsfähigkeit unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten
82	X. Nastos	Ein räumliches Toleranzbewertungssystem für die Konstruktion
83	A. Seifried	Eine neue Methode zur Berechnung von Rollenlagern über lagerinterne Kontakt-Beanspruchungen
84	Ch. Dörr	Ermittlung von Getriebelastkollektiven mittels Winkelbeschleunigungen
85	A. Veil	Integration der Berechnung von Systemzuverlässigkeiten in den CAD-Konstruktionsprozeß
86	U. Frenzel	Rückenstrukturierte Hydraulikstangendichtungen aus Polyurethan
87	U. Braun	Optimierung von Außenzahnradpumpen mit pulsationsarmer Sonderverzahnung
88	M. Lambert	Abdichtung von Werkzeugmaschinen-Flachführungen
89	R. Kubalczyk	Gehäusegestaltung von Fahrzeuggetrieben im Abdichtbereich

Nr.	Verfasser	Titel
90	M. Oberle	Spielbeeinflussende Toleranzparameter bei Planetengetrieben
91	S. N. Dogan	Zur Minimierung der Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
92	M. Bast	Beitrag zur werkstückorientierten Konstruktion von Zerspanwerkzeugen
93	M. Ebenhoch	Eignung von additiv generierten Prototypen zur frühzeitigen Spannungsanalyse im Produktentwicklungsprozeß
94	A. Fritz	Berechnung und Monte-Carlo Simulation der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme
95	O. Schrems	Die Fertigung als Versuchsfeld für die qualitätsgerechte Produktoptimierung
96	M. Jäckle	Untersuchungen zur elastischen Verformung von Fahrzeuggetrieben
97	H. Haiser	PTFE-Compounds im dynamischen Dichtkontakt bei druckbelastbaren Radial-Wellendichtungen
98	M. Rettenmaier	Entwicklung eines Konstruktionssystems für Rapid-Prototyping-gerechte Bauteile
99	M. Przybilla	Methodisches Konstruieren von Leichtbauelementen für hochdynamische Werkzeugmaschinen
100	M. Olbrich	Werkstoffmodelle zur Finiten-Elemente-Analyse von PTFE-Wellendichtungen
101	M. Kunz	Ermittlung des Einflusses fahrzeug-, fahrer- und verkehrsspezifischer Parameter auf die Getriebelastkollektive mittels Fahrsimulation