





# **Erhöhung der Verfügbarkeit von Daten für die Gestaltung und Berechnung der Zuverlässigkeit von Systemen**

Von der Fakultät Konstruktions- und Fertigungstechnik  
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Lutz Schüppenhauer**

geboren in Dresden

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. G. Lechner  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. G. Bernhardt  
Prüfer: Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche

Tag der Einreichung: 24.05.2000  
Tag der mündlichen Prüfung: 04.04.2003



Meinen Eltern und meiner Frau gewidmet



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Dresden und wurde teilweise von der DFG gefördert. Ich danke Herrn Prof. Dr. G. Ihle für seine Förderung und Anregungen, die mir noch über sein Ausscheiden aus der Hochschule hinaus zuteil wurden.

Ich gedenke meinem verehrten Betreuer Prof. Dr. W. Dietl, der sich meiner Arbeit sogar noch während seiner schweren Krankheit kurz vor dem viel zu frühen Tod widmete.

Besonders bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. G. Bernhardt. Als Leiter des Lehrstuhls Landmaschinen schuf er die Möglichkeiten, damit ich meine Arbeit fortsetzen und beenden konnte, er hatte immer ein offenes Ohr für alle organisatorischen und fachlichen Belange. Mein Dank gilt auch allen Dresdner Kollegen und den studentischen Hilfskräften, mit denen das Zusammensein weit über gegenseitige fachliche Unterstützung hinausging, besonders danke ich Yueming Wu und Jens Teichmann.

Der wichtigste Einfluß auf meine Arbeit kam aber aus Stuttgart, von meinem verehrten Betreuer Herrn Prof. Dr. G. Lechner. Von der Themenfindung an hat er meine Arbeit, deren Abschluß er nicht mehr miterleben durfte, unermüdlich unterstützt. Er vermochten es, die Beziehung so zu gestalten, daß ich mich auch dem Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart immer zugehörig fühlte, weil ich in das Institutsleben trotz der überwiegenden räumlichen Entfernung voll mit einbezogen wurde. Für diese Erfahrung und die freundliche und hilfsbereite Atmosphäre danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts. Besonderer Dank gilt Peter Brodbeck für seine stete Unterstützung.

Bei Herrn Prof. Dr. B. Bertsche bedanke ich mich herzlich für seine Unterstützung, die zum guten Abschluß führte.

Meine Frau Daiva und unsere Kinder haben mich mit ihrer Geduld und ihrem Verständnis sehr unterstützt, wofür ich ihnen herzlich danke.

Heidelberg, im April 2003

Lutz Schüppenhauer

## English Abstract

### **Improvement of data availability for design and reliability simulation of machines**

In the eyes of “The Producer” and of “The User” reliability is an important product quality. Good forecasts of product reliability in the early stages of development could save time and money. Many developed methods for single parts (lifetime distribution) and systems could support these efforts. In reality however the lack of data necessary for the developed methods prevents their broad usage.

“The Producer” creates data via the testing of single components, aggregates and whole machines under laboratory and field conditions. Further data is then collated through after sales channels such as warranty, spare parts sales and service contracts, however during a product lifetime “The Producer” has less and less access to reliability data.

“The User” experiences reliability via failures. Reliability information appears in the form of reliability data, maintenance data, availability data, spare parts usage and part of the running-cost data.

For effective usage of the reliability methods and the reliability data the development of a computer based system is necessary: “**Reliability Forecasting System**” (RFS).

An equal approach of all related departments working on design, reliability testing, and warranty analysis should have access to the RFS.

In the main an information system contains 3 modules: (1) a methods-module, (2) a database and (3) a model-module. The latter eases the repetition of cases, method selection and parameter setting, thus giving definition of necessary data in quality and quantity, an interpretation of calculated results, and a documentation of usage.

Literature articles and a service communication system with documentation of problems and solutions could also be a part of the RFS.

The development of a system to suit producers in various industries, users and scientific institutions would be too complex and not realistic, hence a universal method to develop such an information system is described, furthermore an example of a RFS was carried out.

The RFS software must allow the conventional approach of reaching reliability aims: when knowledge and experience are not sufficient, a reliability model must be used. Therefore one or more methods must be applied, the methods determine the necessary data in quality and quantity. When the data is not available it must be generated or collected. After interpretation and calculation of the results the reliability aim may be reached, if not - an iterative process must be applied.

Three steps make up the software development:

1. The Conception Model; a cutout of the reality is described in an entity-relationship diagram.
2. The Logical Data Model; semantic expressions that can be improved with “Normalisation” rules.
3. The Physical Database Structure; e.g. two-dimensional tables.

Specifications of the software to be developed must be defined via the “Must-Want-Nice” method.

The hardware selection can be aided using “criterion choice tables”.

The correct type of database management system must be selected, either relational or object-oriented, followed by the specific database management system.

The “requirement specification” is the guideline for the software development.

As an example a RFS was developed. One element is the “Database for Design of Reliability” containing:

- a mouse-sensitive tree of machine elements,
- parts identification data,
- stress data (forces, torque's, environmental),
- strength data (geometry, material, technology),
- the parameters of the WEIBULL lifetime curves,

- data describing maintenance and preventive exchange (6 different strategies: exchange after failure; exchange after machine or part lifetime period, both dependent or independent of part condition; permanent condition check).

The lifetime data and maintenance data is exported from the database and imported into the “**R**eliability of **S**erviceable **S**ystems” program (ROSS). ROSS calculates density functions of preventive exchange, failures and spare parts quantity. These charts are then returned into the “Database for Design of Reliability”. Once all concerned parts are calculated, a serial system is created and exported back to ROSS, which calculates system reliability and the curves of participating elements. These results are once again returned into the “Database for Design of Reliability” for documentation.

In additional “assumptions” can be calculated within the RFS, an identifier is used to eliminate the possibility of an “assumption” mixing with “real” data.

So called “Test series” attributes allow the selection of varied stress and strength data test series to analyse trends.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Bezeichnungen, Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>13</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>15</b>
1.1 Problemstellung .....	15
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise .....	16
<b>2 Stand der Forschung</b>	<b>18</b>
2.1 Zuverlässigkeit komplexer Produkte .....	18
2.2 Zuverlässigkeit von Bauteilen .....	20
2.2.1 Interferenz von Belastung und Belastbarkeit .....	20
2.2.2 Lebensdauervertelungen.....	23
2.3 Systemzuverlässigkeit .....	28
2.4 Zuverlässigkeitsinformationssysteme .....	32
2.5 Verarbeitung unscharfer Daten .....	34
2.6 Schlußfolgerungen .....	37
<b>3 Methodik zum Aufbau des „Informationssystems für die Projektierung der Zuverlässigkeit von Maschinen IPZ“</b>	<b>38</b>
3.1 Vorgehensweise bei der Lösung von Zuverlässigkeitsproblemen .....	39
3.1.1 Allgemein.....	39
3.1.2 Konstruktion .....	43
3.1.3 Zuverlässigkeitsbewertung .....	45
3.1.4 Instandhaltung .....	46
3.2 Grobstruktur eines IPZ .....	48

3.3 Elemente des IPZ.....	50
3.3.1 Wissen .....	50
3.3.2 Modelle.....	53
3.3.3 Methoden.....	55
3.3.4 Daten.....	58
3.3.5 Netzwerkeinbindung .....	61
3.4 Planung der Softwareentwicklung .....	62
<b>4 Datenbankdesign</b>	<b>64</b>
4.1 Datenanalyse .....	64
4.2 Anforderungen an Hard- und Software.....	65
4.2.1 Hardware und Betriebssystem .....	65
4.2.2 Arten der Datenbankmanagementsysteme .....	66
4.2.3 Methodik der Auswahl.....	67
4.3 Aufbau des Zuverlässigkeitsdatenmodells.....	69
4.4 Relationales Datenbankschema.....	72
4.4.1 Entwurf.....	72
4.4.2 Verfeinerung und Überarbeitung.....	73
<b>5 Vorstellung eines realisierten Informationssystems</b>	
<b>Zuverlässigkeitsprojektierung □IPZ</b>	<b>75</b>
5.1 Systemsimulationsprogramm ROSS.....	75
5.2 Datenbank □DAZU .....	79
5.3 Anwendungsbeispiel .....	82
<b>6 Ausblick</b>	<b>93</b>
<b>7 Zusammenfassung</b>	<b>95</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>97</b>

## Bezeichnungen, Formelzeichen und Abkürzungen

(nur soweit sie häufiger verwendet wurden, sonst siehe Text)

$B_x$	Lebensdauer, zu der $x\%$ aller Teile ausgefallen sind
$f(\bullet)$	Ausfalldichtefunktion
$F(\bullet)$	Verteilungsfunktion, Ausfallwahrscheinlichkeit
$f_b(\bullet)$	Dichtefunktion der Belastung
$f_M(\bullet)$	Mischverteilung
$f_w(\bullet)$	Dichtefunktion der Belastbarkeit
$R(\bullet)$	Überlebenswahrscheinlichkeit
$t$	Betriebsdauer
$t_0$	ausfallfreie Betriebsdauer
$\beta$	Formparameter der Weibullverteilung
$\eta$	Maßstabparameter der Weibullverteilung
$\lambda$	Ausfallrate
$\mu$	Erwartungswert der logarithmischen Normalverteilung
$\sigma$	Last; Standardabweichung
DAZU	Datenbank Zuverlässigkeitsprojektierung
DBMS	Datenbankmanagementsystem
ER	Entity Relationship
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FTA	Fault Tree Analysis

IPZ	Informationssystem für die Projektierung der Zuverlässigkeit von Maschinen
MDT	Mean Down Time
MTBF	Mean Time Between Failure
MTTR	Mean Time To Repair
RDBMS	Relationales Datenbankmanagementsystem
ROSS	Reliability of Serviceable Systems
□	realisiertes Beispiel
≡	Begriffsdefinition

# 1 Einleitung

Die Produkte des Maschinenbaus werden immer komplizierter und ihr Funktionsumfang immer größer. Maschinen müssen Forderungen nach hoher Materialausnutzung, Leichtbau und einer optimalen Energieausnutzung gerecht werden. Die Sicherheit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Produkte besitzen aufgrund gesetzlicher Auflagen und gesteigener Kundenerwartungen eine große Bedeutung. Bei ständig steigenden Maschinenpreisen verursachen Ausfälle hohe Ausfallfolgekosten.

Bei wachsender Teilezahl kann die Zuverlässigkeit durch die Verwendung von Redundanzen, die Erhöhung der Einzelteilzuverlässigkeit, den Einbau von Überlastsicherungen oder die Überwachung des technischen Zustandes erhöht werden /1/, /2/. Zuverlässige Lösungen zu suchen und zu erproben verursacht hohe Kosten. Damit befindet sich der Hersteller in einem Zielkonflikt, da der Markt einen hohen Einsparungsdruck auf alle Bereiche ausübt. Um wettbewerbsfähig zu sein, müssen auch in der Zuverlässigkeitsprojektierung, im Prozeß der vorausschauenden Gestaltung zuverlässiger Produkte, innovative und kostensparende Wege beschritten werden.

## 1.1 Problemstellung

Je später in der Produktentwicklung Änderungen aufgrund von Schwachstellen vorgenommen werden, desto höher sind die dafür notwendigen Kosten. Am teuersten sind Rückrufaktionen nach Beginn der Serienproduktion, die häufig zu einem Imageverlust des Herstellers führen. Es ist deshalb wichtig, in einer frühen Entwicklungsphase Aussagen über das zu erwartende Produktverhalten treffen zu können.

Wenn verschiedene Konstruktionsvarianten nicht erst im Versuch, sondern vorher auf ihr Zuverlässigkeitsverhalten untersucht werden können, ist eine echte Kostensparnis möglich. Zu diesem Zweck wurden in den letzten Jahren leistungsfähige mathematische Modelle entwickelt und in Softwarelösungen umgesetzt. Zur Verarbeitung von Zuverlässigkeitsdaten stehen Statistikprogramme zur Datenverdichtung, Software zur rechnergestützten Zuverlässigkeitsanalyse und Systemsimulationsprogramme zur Verfügung.

Die breite Anwendung dieser Programme behindert jedoch ein ausgeprägter Datenmangel /3/. Zuverlässigkeitsdaten stehen oft überhaupt nicht oder nicht in der notwendigen Qualität und Quantität zur Verfügung.

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die Erhöhung der Verfügbarkeit von Daten für die Gestaltung und Berechnung der Zuverlässigkeit von Systemen ist Ziel der Arbeit. Das computergestützte Werkzeug dafür wird als Informationssystem für die Projektierung der Zuverlässigkeit von Maschinen (IPZ) bezeichnet. Mit einem IPZ können zuverlässigkeitsrelevante Daten aufbereitet, gespeichert und abgerufen werden, und mit Systemsimulationsmodellen werden Zuverlässigkeitsaussagen für Maschinen bereits in der Konstruktionsphase ermöglicht. Neben Konstruktionsaufgaben findet das IPZ auch bei der Zuverlässigkeitsbewertung von Produkten während ihrer Nutzung und bei Instandhaltungsaufgaben Anwendung.

Die Entwicklung und Einführung eines IPZ stellt ein umfangreiches Projekt dar. Durch das methodische Vorgehen kann es genau geplant werden. Die Vorgehensweise zur Entwicklung der Methodik und die Ziele der Arbeit sind in *Abb. 1.1* schematisch dargestellt.

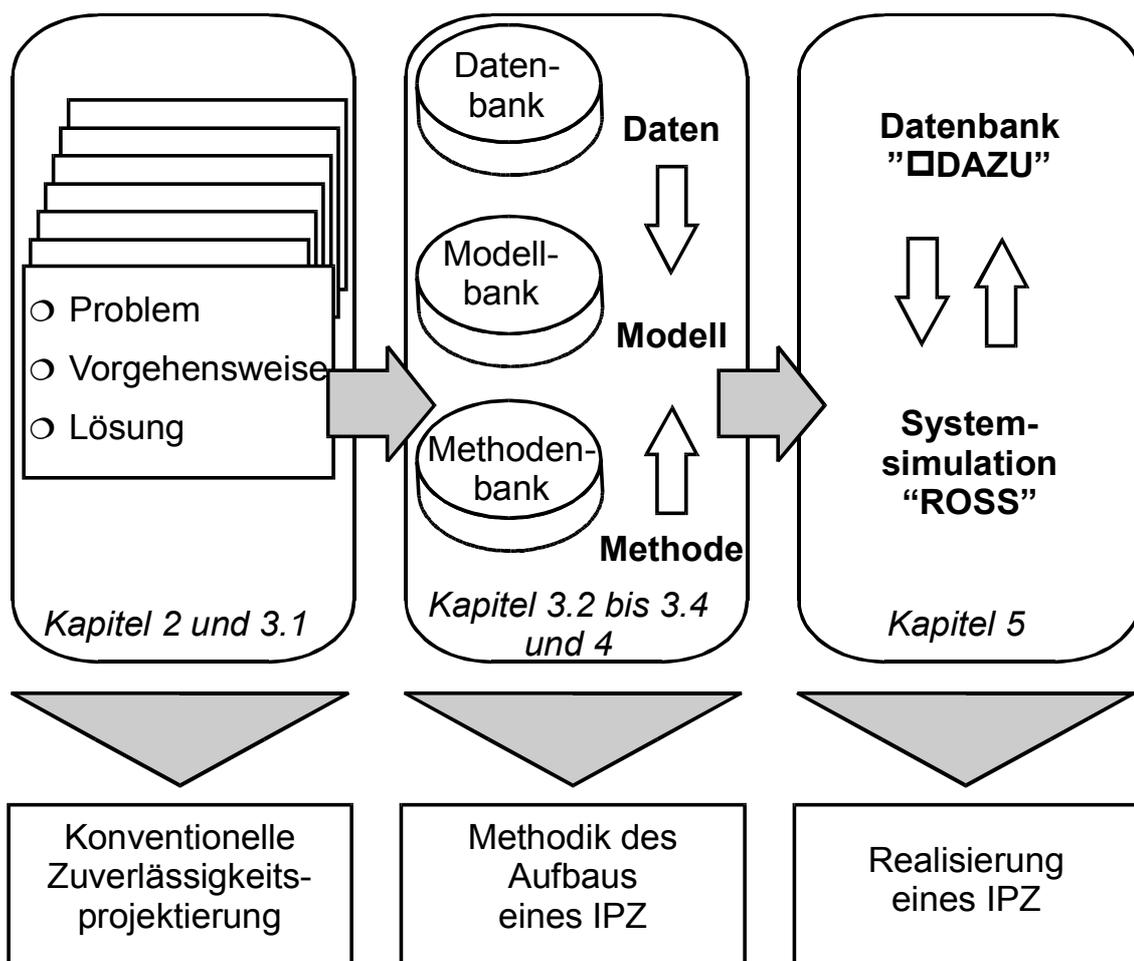
Eine Methode, die die aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisse der Zuverlässigkeitstechnik einbezieht, erlaubt es, die Möglichkeiten eines solchen Systems konsequent zu nutzen. In *Kapitel 2* wird der Stand der Technik analysiert.

Zuverlässigkeitsprobleme werden ohne Einsatz eines IPZ auf konventionelle Weise gelöst, indem zu jeder Problemstellung eine bestimmte Vorgehensweise angewandt und so die Problemlösung gesucht wird. Ein IPZ muß die Lösung dieser Probleme ermöglichen und sollte Vorteile durch die Computernutzung aufweisen. Die Entwicklung der Struktur des IPZ geht von den konventionellen Lösungen aus, *Kapitel 3.1 und 3.2*. Die individuelle Anpassung an die jeweiligen Anwender erfolgt nach Analyse der innerbetrieblichen Datenverarbeitung und der konkreten Aufgaben im Unternehmen, *Kapitel 3.3 und 3.4*.

Aus der Analyse der benötigten Daten und ihrer Struktur wird das Lastenheft für die Datenbank Zuverlässigkeitsprojektierung, die im Zentrum des IPZ steht, abgeleitet. Das weitere Vorgehen beim Erstellen der Datenbank ist in *Kapitel 4* beschrieben. In der Datenbank werden für Maschinenelemente Geometriedaten, Werkstoffdaten, fer-

tigungsbedingte Belastbarkeitseinflüsse, Betriebs- und Umweltbedingungen und Ausfalldaten gespeichert. Hinzu kommen Verfügbarkeits- und Kostendaten sowie Gestaltungslösungen in Form von Skizzen, Zeichnungen und Beschreibungen. Weiterhin sollen simulierte Daten und Protokolle ihres Entstehens erfaßt werden.

Die entwickelte Methodik soll am Beispiel eines IPZ, bestehend aus Datenbank und Systemsimulationsprogramm, umgesetzt werden, *Kapitel 5*. Auf der Grundlage der Bauelementdaten berechnet das Systemsimulationsprogramm das Systemverhalten. So wird die frühzeitige Untersuchung verschiedener Konstruktionsvarianten bezüglich ihres Zuverlässigkeits- und Instandhaltungsverhaltens möglich. Dann kann der Anwender fundiertere Entscheidungen treffen. Diese müssen teilweise durch weitere Versuche abgesichert werden. Durch den konsequenten Einsatz und die Pflege des IPZ kann ein hohes Niveau der praktischen Zuverlässigkeitssicherung trotz Kostenreduzierung erreicht werden.



**Abb. 1.1** Vorgehensweise und Ziele der Arbeit

## **2 Stand der Forschung**

Um Produkte mit einer bestimmten Zuverlässigkeit herstellen zu können, müssen möglichst genaue Informationen über das Ausfallverhalten vorhanden sein. Die Ausfallzeitpunkte von Bauelementen sind nicht exakt vorhersagbar, da sie eine Streuung aufweisen. Die erreichten Lebensdauern können mit statistischen Methoden analysiert und durch Lebensdauerverteilungen angenähert werden. Mit Systemsimulationsmodellen wird der Einfluß von Bauelementausfällen auf das Systemverhalten untersucht. Zur Speicherung von Zuverlässigkeitsdaten dienen Zuverlässigkeitsinformationssysteme. Die Anwendung von Fuzzy-Methoden ermöglicht noch besser an die Realität angepaßte Zuverlässigkeitsberechnungen.

### **2.1 Zuverlässigkeit komplexer Produkte**

Die Lebensdauer eines technischen Produkts ist von einer Vielzahl von Eigenschaften und Ereignissen geprägt, die in ihrer Summe die Zuverlässigkeit und andere Qualitätsmerkmale des Produkts widerspiegeln. Diese Eigenschaften und Ereignisse sind vielfältig, teilweise voneinander abhängig und veränderlich.

Am Beispiel eines Typs Werkzeugmaschinen soll das verdeutlicht werden. Bereits zu Beginn der Nutzung weisen eigentlich identische Maschinen aufgrund von Fertigungstoleranzen, Vorschädigungen, Schwankungen der Materialqualität erhebliche Unterschiede auf. Dies führt zu unterschiedlichem Energieverbrauch, unterschiedlicher Leistung, Geräusentwicklung, unterschiedlicher Belastung der Bauteile bei verschiedenen Exemplaren eines Maschinentyps unter gleichen Einsatzbedingungen.

Während der Lebensdauer der Maschine kann es zu vielen Veränderungen in der Belastung kommen. Die Fertigungsaufgaben wechseln, die Qualität des zu verarbeitenden Materials und der Betriebsstoffe (Kühlmittel, Öl, Filter) ändert sich, die Maschine wird aufgrund organisatorischer Maßnahmen verstärkt oder vermindert gewartet.

Jede Belastung führt zu einer minimalen Schädigung, solange, bis die Lebensdauerreserve eines Bauteils aufgebraucht ist und es zum Ausfall kommt, der Folgeschäden nach sich ziehen kann.

Der Ausfall ist nur bei Sprungausfällen wie Bruch leicht festzulegen - Driftausfälle, also die langsamen Merkmalsänderungen, bedürfen einer Definition der Ausfallmerkmale. Auch sind teilweise komplexe Größen wie Leistungsabfall der Maschine Ursache für den Austausch von Bauteilen. In Maschinen mit Redundanzen können Ausfälle an Bauteilen auftreten, ohne daß die Maschine ausfällt, in ihr erfolgt jedoch eine Belastungsänderung.

Nach dem Ausfall erfolgen Fehlerdiagnose und Austausch von Bauteilen oder ganzen Baugruppen. Nicht immer wird die Ausfallursache (sofort) erkannt. Wenn eine Überlastung aufgrund von Einstellungsfehlern eintrat, werden teilweise nur die ausgefallenen Bauteile erkannt. Parallel werden häufig vorbeugend Bauteile und Baugruppen ausgetauscht.

Im Allgemeinen werden unter Zuverlässigkeit Eigenschaften wie eine hohe Lebensdauer, Ausfallfreiheit, eine hohe Betriebsbereitschaft (Verfügbarkeit) und geringer Instandhaltungsaufwand/ -kosten zusammengefaßt. Davon abweichend wird die Zuverlässigkeit wie folgt definiert:

*Zuverlässigkeit ist die Eigenschaft eines Produkts, während einer definierten Betriebsdauer (auch Laufleistung o.ä.) unter gegebenen Nutzungsbedingungen (einschließlich vorbeugender Instandhaltungsmaßnahmen) nicht auszufallen.*

Diese Zuverlässigkeitsdefinition geht davon aus, daß für die Produkte nur die Zustände "ausgefallen" und "nicht ausgefallen" existieren. In der Verarbeitungstechnik häufige Probleme mit eingeschränkter Funktionsfähigkeit werden hier nicht betrachtet /4/.

Mit der Zuverlässigkeit von Produkten beschäftigen sich zwei Wissenschaftszweige: die Betriebsfestigkeitslehre und die Zuverlässigkeitstechnik.

In der Betriebsfestigkeitslehre wird ein funktionaler Zusammenhang zwischen Belastung, Belastbarkeit und Ausfallverhalten an elementaren Ausfallstellen untersucht. Es wird von deterministischen Größen ausgegangen. Typisch sind die Untersuchung von Probekörpern und Einzelteilen mit hohem Meßaufwand, das Aufstellen von Funktionsgleichungen und die Ermittlung von Kennwerten.

In der Zuverlässigkeitstechnik wird von realen, komplexen Einzelteilen und Systemen ausgegangen. Zentraler Gegenstand der Betrachtungen ist die Wirkung von Änderungen in Belastung und Belastbarkeit, der Einfluß der Struktur auf das Systemverhalten und die Beschreibung des Verhaltens unter realen äußeren Einflüssen. Für die Zuverlässigkeitskenngrößen wird fast ausschließlich ein probabilistischer Ansatz verwendet.

## **2.2 Zuverlässigkeit von Bauteilen**

Die kleinste Einheit, der ein Ausfall ( $\equiv$ Funktionsverlust) zugeordnet wird, ist das Bauteil. Dabei ist es unerheblich, ob dieses wiederum aus mehreren Teilen besteht oder nicht. So wird für die meisten ein Kugellager ein Bauteil sein, das der Lagerhersteller als Baugruppe betrachtet. Er wird den Ausfall also einem Lagerring, dem Käfig oder den Kugeln zuordnen; alle anderen dem Lager.

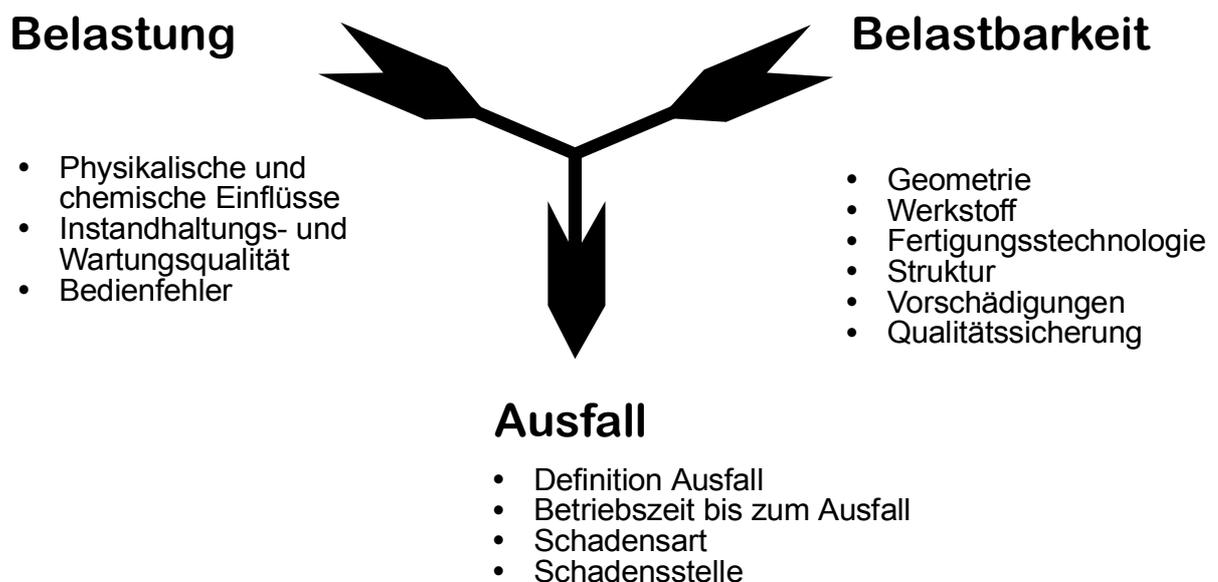
Hierbei gibt es Ausnahmen und Sonderfälle. Wenn ein Bauelement ( $\equiv$  Stichprobe gleicher Bauteile) aufgrund verschiedener Schädigungsmechanismen ausfallen kann, erkennbar an unterschiedlichen Schadensstellen oder Schadenscharakteristika, dann müssen diese unterschieden werden. Weiterhin können in Systemen Ausfälle auftreten, obwohl kein Bauteil ausfällt, z.B. durch Lösen einer Verbindung. Die Erfassung aller Bauteilverbindungen (Schnittstellen) ist fester Bestandteil von Konstruktions-FMEA /5/. Bei allen anderen Betrachtungen werden sie aber regelmäßig vernachlässigt, wodurch kaum Daten zu finden sind. Weitere Ausnahmen sind Folgeschäden und Gewaltausfälle durch unvorhergesehene Einwirkungen von außen. Diese Ausfälle werden bei Maßnahmen zur Zuverlässigkeitserhöhung meist vernachlässigt, da eine Auslegung nur gegen die Ursachen oder die Belastungsweiterleitung wirtschaftlich sinnvoll oder technisch möglich ist. Der Ausfallzeitpunkt für ein Bauteil ergibt sich durch die veränderliche Kombination konkreter Belastung und Belastbarkeit /6/. Er ist nicht vorhersagbar und damit zufällig.

### **2.2.1 Interferenz von Belastung und Belastbarkeit**

Mit der Fertigung eines Bauteils wird seine Belastbarkeit festgelegt. Sie ist abhängig von der geometrischen Gestaltung, dem verwendeten Werkstoff und der Fertigungstechnologie. Qualitätsschwankungen während der Fertigung und Vorschädigungen können durch das Aussondern schlechter Exemplare teilweise ausgeglichen werden.

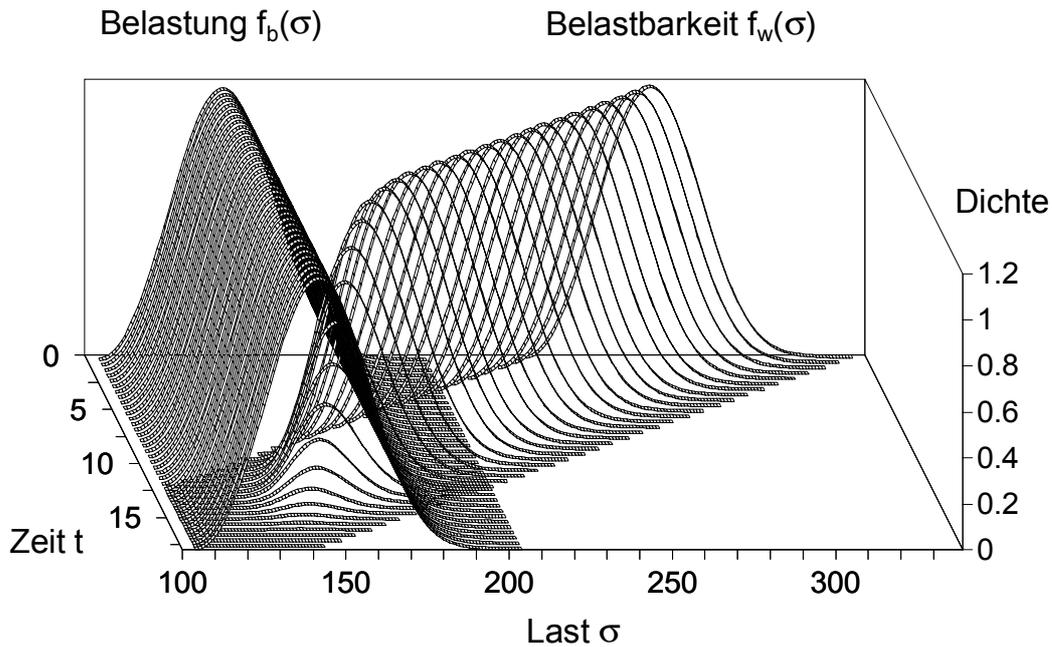
Die Belastbarkeit eines Produkts sei definiert als die Gesamtheit aller mikro- und makrogeometrischen Eigenschaften, die seine Zuverlässigkeit beeinflussen können und bis zu seinem Nutzungsbeginn festgelegt werden. Systemstrukturen und Maßnahmen wie selektive Montage /7/ sollen zur Belastbarkeit gerechnet werden, doch sie besitzen eine Sonderstellung, da die von außen wirkenden Belastungen mit veränderter Intensität weitergeleitet werden. Die Belastbarkeit des Systems und nicht der Bauteile wird erhöht.

Belastung sei die Gesamtheit aller Einwirkungen auf ein Produkt, die während seiner Nutzung die Zuverlässigkeit beeinflussen können. Das sind physikalische, chemische und thermische Einflüsse. Neben der bestimmungsgemäßen Nutzung haben Instandhaltungs- und Wartungsqualität und Belastungen durch Bedienfehler wesentlichen Einfluß.



**Abb. 2.1** Kausalität des Ausfalls (Beispiele)

Ein weit verbreiteter Modellansatz geht davon aus, daß die *Dichtefunktionen der zum Ausfall führenden Belastung*  $f_b(\sigma)$  und die *Dichtefunktion der zugehörigen Belastbarkeit*  $f_w(\sigma)$  bekannt und voneinander unabhängig seien. Die Belastbarkeit, oft auch als Abnutzungsvorrat bezeichnet, nimmt während der Nutzung unter Einfluß der Belastung ab, bis sie kleiner als die wirkende Belastung wird und ein Ausfall eintritt /6/, /8/, /9/, /10/. In *Abb. 2.2* ist ein solches Modell für eine Stichprobe von Produkten dargestellt.



**Abb. 2.2** Interferenz von Belastung und Belastbarkeit

Eine bestimmte Belastbarkeit tritt unterschiedlich häufig auf, in diesem Falle in der Stichprobe normalverteilt, und ändert sich linear über der *Betriebsdauer*  $t$ . Die Belastung ändert sich ständig für jedes Bauteil und nimmt für die Stichprobe die Werte der normalverteilten Belastungskurve an. Die Bauelemente einer bestimmten Belastbarkeit  $f_w(\sigma_x)$  fallen mit der Wahrscheinlichkeit aus, mit der die momentane Belastung die Belastbarkeit überschreitet:

$$f_w(\sigma_x) d\sigma_x \cdot \int_{\sigma_x}^{\infty} f_b(\sigma) d\sigma . \quad (2.1)$$

Für alle Bauelemente über der Betriebsdauer ergibt sich die *Ausfallwahrscheinlichkeit*  $F(t)$ :

$$F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_w(\sigma_x, t) \left( \int_{\sigma_x}^{\infty} f_b(\sigma, t) d\sigma \right) d\sigma_x . \quad (2.2)$$

Durch Veränderung der Dichtefunktionen und der Funktion für die Belastungsänderung über der Betriebsdauer können unterschiedliche Lebensdauerverteilungen dargestellt werden. Wenn am Nutzungsbeginn noch keine Bauteile Belastungen unterworfen werden, die zum Ausfall führen, dann setzen die Ausfälle erst nach einer bestimmten Zeit ein. Diese Betriebsdauer wird als *ausfallfreie Betriebsdauer*  $t_0$  bezeichnet.

### 2.2.2 Lebensdauerverteilungen

Der Ausfall eines Bauelements wird mit den Methoden der mathematischen Statistik beschrieben. Die statistische Auswertung der Lebensdauerdaten ist in der Literatur ausführlich beschrieben und wird hier nicht näher erläutert, siehe O'CONNOR in /6/ und BERTSCHE und LECHNER in /10/. Sie ist nicht standardisiert und variiert in Abhängigkeit von den angewandten mathematischen Methoden, der Art der Daten wie Versuchs- oder Felddaten und der Stichprobengröße. Unterschiedlich sind oft die Behandlung von Ausreißern, Gewaltausfällen oder nichtausgefallenen Bauteilen einer Stichprobe. So können auch bei gleichen Urdaten unterschiedliche Resultate nach der statistischen Auswertung entstehen.

In einigen Arbeiten wird dabei sogar die Anwendbarkeit üblicher, häufig angewandter Verfahren wie der Momentenmethode bezüglich ihrer Genauigkeit in Zweifel gezogen /11/. Im von der Hochschule für Verkehrswesen Dresden entwickelten Programmpaket RESY zur Ermittlung von Zuverlässigkeitsdaten werden die Parameter von 14 zweiparametrischen Funktionen und eine parameterfreie Verteilung ermittelt und anschließend jeweils bis zu fünf verschiedenen Anpassungstests unterzogen /12/, /13/. Wahlweise können zuvor Filter zur Eliminierung von Ausreißern eingesetzt werden. Für die Ermittlung der Abhängigkeit des Mittelwertes der Lebensdauer von Belastungsgrößen stehen 8 Regressionsansätze zur Verfügung. Eine anhaltend hohe Zahl von Publikationen macht deutlich, daß die Entwicklung auf diesem Gebiet nicht abgeschlossen ist. Die Spezifik der Versuchsauswertung von reparierbaren Systemen betrachten besonders ASCHER und FEINGOLD /14/.

Ziel der Verfahren ist meist eine parametrische Verteilungsfunktion. Die nach /6/, /10/, /15/, /16/ in der Zuverlässigkeitstechnik am häufigsten verwendeten Verteilungsfunktionen sind die Weibullverteilung, die Exponentialverteilung und die logarithmische Normalverteilung.

#### Dreiparametrische Weibullverteilung

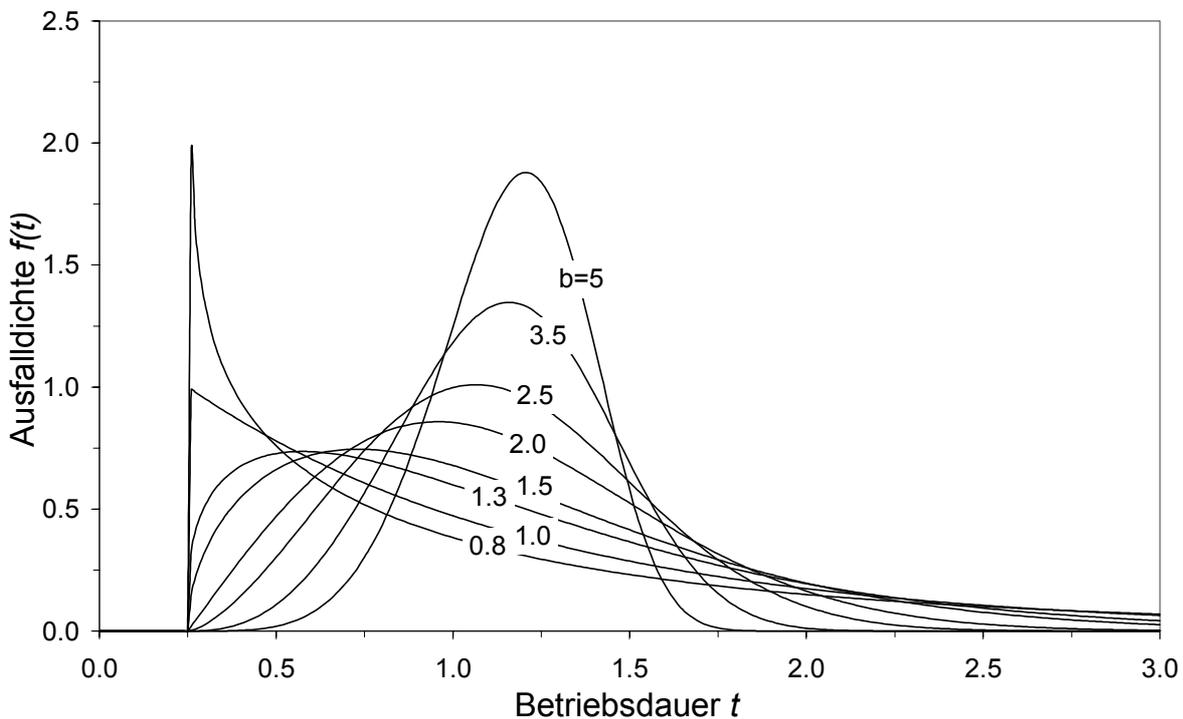
Die Weibullverteilung ist eine universelle Funktion der *Betriebsdauer*  $t$ . Durch Variation des *Formparameters*  $\beta$  können linksschiefe, symmetrische und rechtsschiefe Dichtefunktionen erreicht werden, Abb. 2.3. Der *Maßstabparameter*  $\eta$  skaliert die Verteilung. Er wird auch charakteristische Lebensdauer genannt, da nach  $t-t_0 = \eta$  genau 63,2 % der Grundgesamtheit ausgefallen sind. Die *ausfallfreie Betriebsdauer*

er  $t_0$  verschiebt die Verteilung entlang der t-Achse. Die Weibullverteilung wird durch die folgenden Funktionen charakterisiert. Die Ausfalldichte lautet:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right) \quad \text{für } t \geq t_0 \geq 0, \beta, \eta > 0. \quad (2.3)$$

Durch Integrieren ergibt sich die Ausfallwahrscheinlichkeit:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right]. \quad (2.4)$$



**Abb. 2.3** Dichtefunktion der dreiparametrischen Weibullverteilung für unterschiedliche Formparameter  $\beta$  mit  $\eta=1$  und  $t_0=0.25$

Allgemein gilt, daß sich *Ausfallwahrscheinlichkeit*  $F(t)$  und *Überlebenswahrscheinlichkeit*  $R(t)$  zu Eins ergänzen:

$$R(t) = 1 - F(t). \quad (2.5)$$

Häufig werden Quantile der Überlebenswahrscheinlichkeit in Form von  $B_x$ -*Lebensdauern* angegeben:

$$R(B_x) = 1 - \frac{x}{100}, \quad x \in [0;100]. \quad (2.6)$$

Speziell für die dreiparametrische Weibullverteilung ergibt sich dann:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right]. \quad (2.7)$$

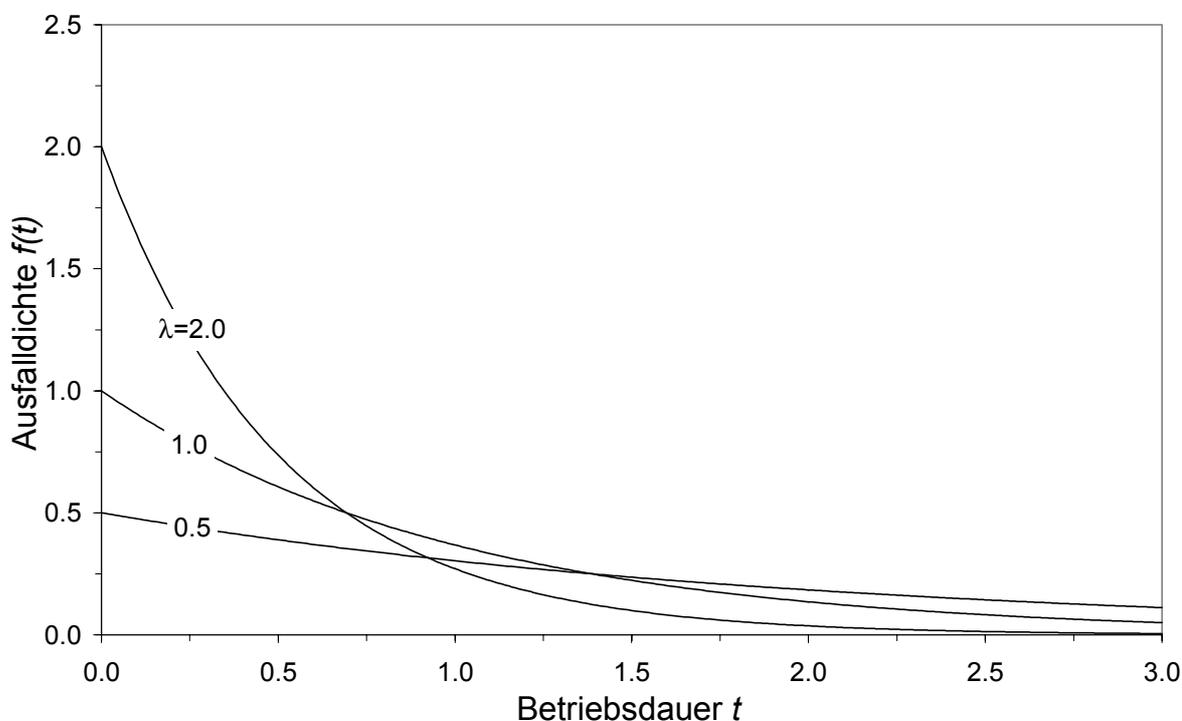
Die Ausfallrate lautet:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^{\beta-1}. \quad (2.8)$$

Die *zweiparametrische Weibullverteilung* ist ein Spezialfall für  $t_0=0$ . Bei  $\beta=3.5$  wird die symmetrische *Normalverteilung* sehr gut angenähert, mit  $\beta=1$  ergibt sich die *Exponentialverteilung*.

### Exponentialverteilung

Für Zufallsausfälle, die eine betriebsdauerunabhängige Ausfallrate besitzen, eignet sich die Exponentialverteilung. Ausfälle elektronischer Bauteile und solche durch Überlastung weisen meist diesen Charakter auf. Das Verhalten über der *Betriebsdauer*  $t$  ist nur von der *Ausfallrate*  $\lambda$  abhängig, *Abb. 2.4*.



**Abb. 2.4** Dichtefunktion der Exponentialverteilung für unterschiedliche Ausfallraten  $\lambda$

Die Ausfalldichte der Exponentialverteilung lautet:

$$f(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot t) \quad \text{für } \lambda, t > 0. \quad (2.9)$$

Daraus ergibt sich die Ausfallwahrscheinlichkeit

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda \cdot t) \quad (2.10)$$

und die Überlebenswahrscheinlichkeit

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp(-\lambda \cdot t). \quad (2.11)$$

Die Ausfallrate ist nicht betriebsdauerabhängig:

$$\lambda = 1/t_m = \text{const.}, \quad t_m \dots \text{mittlere Lebensdauer bzw. mittlerer Ausfallabstand.} \quad (2.12)$$

Die häufig bestimmte *MTTF* (*Mean Time To Failure*) entspricht der mittleren Lebensdauer und wird für nichtreparierbare Produkte verwendet. Für reparierbare Produkte wird der Begriff *MTBF* (*Mean Time Between Failures*) verwendet. Es handelt sich immer um die mittlere **Betriebsdauer** zwischen den Ausfällen.

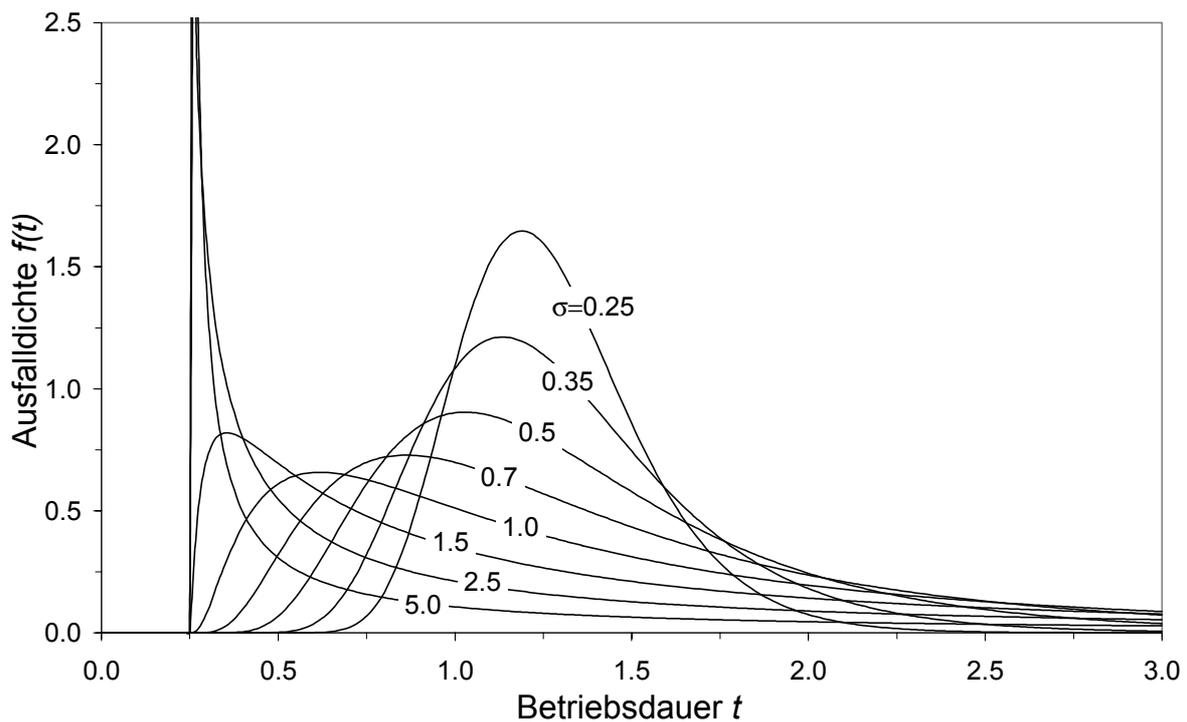
Zusammen mit der mittleren Stördauer *MDT* (*Mean Down Time*, z.T. auch *MTTR* = *Mean Time To Repair*) kann die *stationäre Verfügbarkeit* berechnet werden.

$$\text{Verfügbarkeit} = \frac{MTBF}{MTBF + MDT}. \quad (2.13)$$

Dabei muß beachtet werden, daß nicht nur (ausfallbedingte) Instandsetzungen, sondern auch (vorbeugende) Wartungen erfaßt werden müssen. Gelingt es allerdings, Wartungsmaßnahmen oder Instandsetzungen über Notlaufeigenschaften oder Redundanzen ohne Einschränkung der Nutzung außerhalb der Betriebszeiten durchzuführen, können sie bei der Verfügbarkeitsberechnung auch vernachlässigt werden.

### Logarithmische Normalverteilung

Die logarithmische Normalverteilung ist von der Gaußschen Normalverteilung abgeleitet. Mit der logarithmierten *Betriebsdauer*  $t$  erstreckt sich die Dichtefunktion nicht bis  $-\infty$  und kann durch Variation der Parameter *Erwartungswert*  $\mu$  und *Standardabweichung*  $\sigma$  besser an Zuverlässigkeitsstichproben angepaßt werden. Die Dichtefunktion ist linksschief, *Abb. 2.5*. Damit ist sie besonders zur Beschreibung von Ermüdungsausfällen geeignet. Die Verteilung geht mit  $\mu \gg \sigma$  in die Normalverteilung über /6/.



**Abb. 2.5** Dichtefunktion der Logarithmischen Normalverteilung für unterschiedliche Standardabweichungen  $\sigma$ ;  $\mu=0$ ,  $t_0=0.25$

Die Ausfalldichte lautet:

$$f(t) = \frac{1}{(t-t_0) \cdot \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\ln(t-t_0) - \mu}{\sigma}\right]^2\right) \text{ für } t \geq t_0 \geq 0; \sigma, t > 0 \quad (2.14)$$

und die Ausfallwahrscheinlichkeit:

$$F(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^t \frac{1}{(t-t_0)} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\ln(t-t_0) - \mu}{\sigma}\right]^2\right) dt. \quad (2.15)$$

Daraus lassen sich Überlebenswahrscheinlichkeit

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2.16)$$

und Ausfallrate berechnen:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}. \quad (2.17)$$

Bei  $t_0=0$  wird die Logarithmische Normalverteilung zweiparametrisch.

## Weitere Lebensdauervertellungen

Um die bei großen Stichproben beobachteten Abweichungen der angenommenen Verteilungsfunktion von den Meßwerten zu reduzieren, wurden weitere Modelle eingeführt. Eine mehrparametrische Verteilungsfunktion erlaubt BRODBECK in /16/ eine sehr gute Beschreibung seiner Beobachtungsergebnisse. Bei der verwendeten Mischverteilung  $f_M(t)$  handelt sich um die gewichtete Summe von  $m$  dreiparametrischen Weibullverteilungen.

Ihre Ausfalldichte lautet:

$$f_M(t) = \sum_{k=1}^m c_k \cdot f_k(t) = \sum_{k=1}^m \left[ c_k \cdot \frac{\beta_k}{\eta_k} \cdot \left( \frac{t-t_{0k}}{\eta_k} \right)^{\beta_k-1} \cdot \exp\left( \frac{t-t_{0k}}{\eta_k} \right)^{-\beta_k} \right] \quad (2.18)$$

für  $t \geq t_0 \geq 0, \beta, \eta > 0, \sum_{k=1}^m c_k = 1 ; 0 \leq c_k \leq 1 \quad c_k \dots$  Gewichtungsfaktor.

Trotz umfangreicher Untersuchungen konnte die These unterschiedlicher Ausfallmechanismen oder unterschiedlicher Belastungen nicht erhärtet werden.

Ähnliche Effekte beschreibt auch SCHÄBE in /12/. Er verwendet nichtparametrische, empirische Modelle und kann damit auch nichtmonotone Verläufe der Ausfallrate beschreiben. Darüber hinaus sind in dem von ihm vorgestellten Programm insgesamt 14 verschiedene parametrische Verteilungsfunktionen implementiert.

## 2.3 Systemzuverlässigkeit

Die Analyse der Systemzuverlässigkeit erfolgt mit qualitativen und quantitativen Methoden. Ihre Auswahl ist abhängig von der Zielsetzung der Analyse und dem Entwicklungsstand des Produkts.

Die bekannteste und besonders in der Kerntechnik, Luftfahrt und Automobilindustrie weit verbreitete qualitative Methode ist die Fehlermöglichkeits- und Einflußanalyse FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) /17/. In der englischsprachigen Literatur findet man außerdem die FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis). Es wurden verschiedene Spezialformen wie Konstruktions-FMEA zur Bewertung der Auswirkungen von Bauteilausfällen und Prozeß-FMEA zur Einschätzung von Fehlern im Fertigungsprozeß entwickelt. Die systematischen subjektiven Bewertungen dienen der Schwachstellenanalyse.

Die Fehlerbaumanalyse FTA (Fault Tree Analysis) /18/ nimmt eine Zwischenstellung zu den quantitativen Methoden ein. Wichtigster Gegenstand der Analyse sind Ausfallkombinationen. Dazu werden grafische Darstellungen entwickelt und daraus abgeleitet mit der Booleschen Algebra Nichtverfügbarkeit und Ausfallhäufigkeitsdichte berechnet.

In /19/ findet sich der Hinweis, daß HAASL eine Systematische Methode für das Aufstellen von Fehlerbäumen entwickelte /20/. FUSSEL und VESELY entwickelten diese Methoden weiter bis zur Erstellung entsprechender Software /21/, /22/, /23/. Die Ereignis- oder Störfallablauf-Analyse /24/, eine qualitative Methode, kann hilfreich zur Erstellung einer FTA sein.

Neben den qualitativen Methoden wurden viele Modelle entwickelt, um das Systemausfallverhalten quantitativ zu beschreiben.

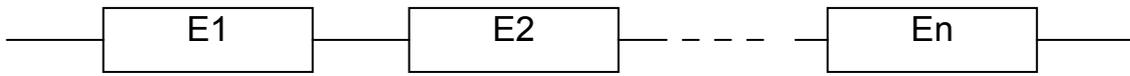
Mit dem Booleschen Modell kann das Ausfallverhalten von Systemen aus dem Bauelementverhalten berechnet werden. Das Bauelementverhalten kann dabei mit einer Lebensdauervertelung wie in *Kapitel 2.2.2* beschrieben werden. Für seine Anwendung müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Das System besteht aus endlich vielen Elementen.
- Die im System vorkommenden Bauelemente sind unabhängig, d.h. das Ausfallverhalten eines Elements wird durch das Ausfallverhalten anderer Bauelemente nicht beeinflußt.
- Die Elemente des Systems nehmen nur die beiden Zustände „funktionsfähig“ oder „ausgefallen“ an.
- Der Zustand des Systems wird nur durch den Zustand der in ihm vorkommenden Elemente bestimmt.
- Das System ist nicht reparierbar, d.h. ein ausgefallenes Element wird nicht durch ein funktionsfähiges ersetzt und der erste Systemausfall beendet die Systemlebensdauer. Reparierbare Systeme können nur bis zum ersten Systemausfall berechnet werden.

Erfüllt ein System die oben genannten Bedingungen, spricht man von der Booleschen Struktur. Diese wird häufig in Blockschaltbildern dargestellt.

Man unterscheidet drei Grundstrukturen, die serielle, die parallele und die kombinierte Struktur:

○ Serienstruktur:



**Abb. 2.6** *Serienstruktur*

Ein System aus  $n$  ( $n = 1$ ) Elemente  $E_1, E_2, \dots, E_i, \dots, E_n$  besitzt Serienstruktur, wenn der Ausfall irgendeines Elements den Ausfall des Systems bewirkt. Die Zuverlässigkeit des Systems ergibt sich nach der Wahrscheinlichkeitstheorie nach

$$R_S(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (2.19)$$

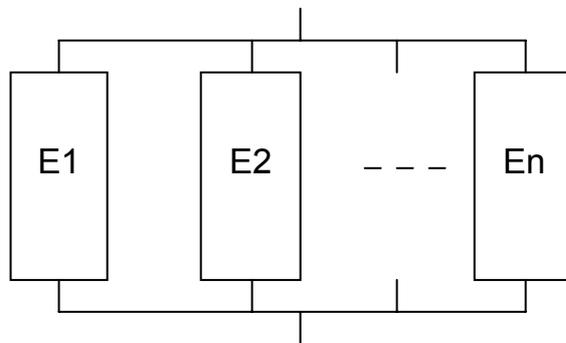
mit:

$R_S(t)$  ... Überlebenswahrscheinlichkeit des Systems

$R_i(t)$  ... Überlebenswahrscheinlichkeit des  $i$ -ten Elements

Mit dem Zunehmen der Anzahl der Systemelemente nimmt die Systemzuverlässigkeit immer weiter ab.

○ Parallelstruktur:



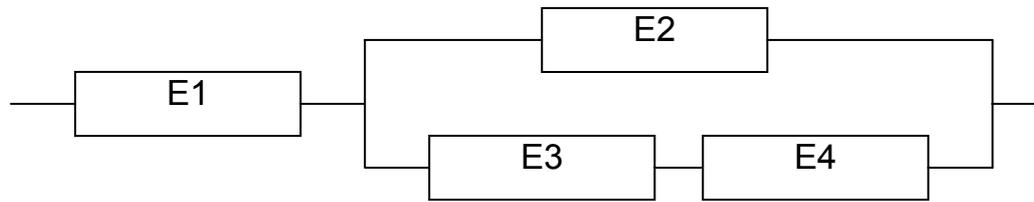
**Abb. 2.7** *Parallelstruktur*

Ein System aus  $n$  ( $n = 1$ ) Elemente  $E_1, E_2, \dots, E_i, \dots, E_n$  besitzt Parallelstruktur, wenn erst der Ausfall aller Elemente den Ausfall des Systems bewirkt. Die Zuverlässigkeit des Systems ergibt sich nach der Wahrscheinlichkeitstheorie nach

$$R_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (2.20)$$

Mit dem Zunehmen der Anzahl der Systemelemente nimmt die Systemzuverlässigkeit immer weiter zu.

- Kombinationen von Serien- und Parallelstrukturen:



**Abb. 2.8** Kombination aus Serien- und Parallelstrukturen

Nach den o.g. Regeln wird die Zuverlässigkeit des Systems schrittweise berechnet. Die Systemzuverlässigkeit der Struktur in wird z.B. berechnet nach:

$$R_S(t) = R_1(t) \cdot (R_2(t) + R_3(t) \cdot R_4(t) - R_2(t) \cdot R_3(t) \cdot R_4(t)) \quad (2.21)$$

Die Überlebenswahrscheinlichkeit  $R_S$  größerer Systeme mit vielen redundanten Elementen kann mit den „cut set“ und „tie set“ Methoden abgeschätzt werden /6/, /25/. Dazu werden alle minimalen Kombinationen von Elementen  $n_i$  ermittelt, die zum Systemausfall führen bzw. entsprechend seine Funktionsfähigkeit ermöglichen. Die exakte theoretische Systemüberlebenswahrscheinlichkeit befindet sich zwischen den berechneten Grenzwerten:

$$R_S > 1 - \sum_{i=1}^C \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad C \dots \text{Anzahl der cut sets} \quad (2.22)$$

und

$$R_S < \sum_{i=1}^T \prod_{i=1}^n R_i \quad T \dots \text{Anzahl der tie sets.} \quad (2.23)$$

Mit Markov-Modellen ist es prinzipiell möglich, auch reparierbare und mehrwertige Systeme zu simulieren. Zu einem bestimmten Zeitpunkt befindet sich das System mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit im Zustand A (funktionsfähig) bzw. im Zustand  $\bar{A}$  (ausgefallen). Es werden die Übergangsraten zwischen beiden Systemzuständen betrachtet: Ausfallraten  $\lambda(t)$  und Reparaturraten  $\mu(t)$ . Bei Systemen aus mehreren Elementen wächst der mathematische Aufwand sehr schnell. Die notwendigen Übergangsraten zwischen den betrachteten Systemzuständen müssen speziell für Markov-Modelle errechnet werden. Oft wird außer acht gelassen, daß diese Übergangsraten betriebsdauerabhängig sind /26/.

Mit der Monte-Carlo-Methode steht ein einfaches mathematisches Instrument zur Verfügung, mit dem selbst komplizierte Zusammenhänge simuliert werden können, sofern sie mathematisch formulierbar sind. Der bei komplexeren Problemen notwendige hohe Rechenaufwand wird mit der Entwicklung der Rechentechnik immer weiter kompensiert. So wurde von SCHMIDT /27/ ein Programm zur Simulation reparierbarer Systeme entwickelt, bei dem der betriebsdauerabhängige Verlauf des Ausfallverhaltens eines Systems aus Elementen beliebiger Ausfallfunktionen und Abnutzungsverläufe realisiert wurde. Die Einbeziehung der Wechselwirkungen zwischen den Elementen ist nach dem gleichen Prinzip möglich.

Die von DUBI in /28/ beschriebenen Grundlagen des Programmpakets AMIR und SPAR /29/ basieren auch auf der Monte-Carlo-Simulation. Hier werden aber analog zu Markov Übergangsraten zwischen interessanten Zuständen betrachtet. Das Grundprogramm geht von der Exponentialverteilung der Bauelementlebensdauern aus.

Die Lebensdauer eines reparierbaren Systems ist von einer Folge von Ausfällen und ihrer Reparatur gekennzeichnet. Diese Ausfälle stellen diskrete Ereignisse dar, die über der Lebensdauer für jedes Bauelement einer stochastischen Verteilung unterliegen. Diese Erscheinung wird als Punktprozeß beschrieben, die *Poissonverteilung* beschreibt einen Prozeß mit konstanter Ausfallrate /6/:

$$f(x) = \frac{(\lambda x)^x}{x!} \cdot \exp(-\lambda x) \quad (\text{für } x = 0, 1, 2, \dots). \quad (2.24)$$

Andere Prozesse beschreiben nichtkonstante oder nicht exponentialverteilte Prozesse. Die Überlagerung mehrerer solcher Prozesse in Systemen führt zum Erneuerungsprozeß, der Grundlage der Erneuerungstheorie /6/, /30/.

Von WU /31/ wurde das Systemmodell ROSS (Reliability of Serviceable Systems) entwickelt und in ein Rechnerprogramm umgesetzt, das die Simulation umfangreicher Einflüsse während der Betriebsdauer bis hin zur Einbeziehung der Instandhaltungsorganisation ermöglicht. Die erforderlichen Eingangsdaten können in der Praxis nur selten ermittelt werden.

## 2.4 Zuverlässigkeitsinformationssysteme

Für die Simulation des Verhaltens technischer Systeme in der Praxis sind neben den Simulationsmethoden entsprechende Eingangsdaten notwendig. Die Anwendung der

weit entwickelten Simulationsmethoden wird heute durch den Mangel an Zuverlässigkeitsdaten und große Informationsunschärfe behindert.

In der Elektronik sind Zuverlässigkeitsdaten z.T. in Datenbanken oder als Qualitätsmerkmal der Bauelemente (Ausfallraten im MIL-Standard) vorhanden. Für mechanische Bauelemente liegt eine Sammlung in /32/ und /33/ vor. Die dort vorhandenen Stichproben sind allerdings klein ( $<20$ ), Angaben zu Betriebs- und Umweltbedingungen, Geometrie und Werkstoff fehlen. Die Auswertung erfolgte lediglich mit konstanter Ausfallrate.

Über den Aufbau einer Schadensstatistik im Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerk berichtet POLL /34/. Die gespeicherten Ausfalldaten werden in einer Datenbank gespeichert und zu Nichtverfügbarkeiten verdichtet.

Der Aufbau überbetrieblicher Datenbanken wird oft behindert, da Ausfalldaten zu den am besten gehüteten Unternehmensgeheimnissen gehören. Bemühungen um einen Ausweg aus dieser Situation mit reglementiertem Informationsumfang und einvernehmlichem Zugang zu Daten beschreibt LAAK in /35/.

Eine Gruppe europäischer Unternehmen der Kraftwerkstechnik, chemischen Industrie und Erdölfirmer bemüht sich in der Vereinigung ESReDA (European Safety, Reliability and Data Association) um die Vereinheitlichung der Datenerfassung, -verdichtung und -speicherung /36/. Die entstandenen Datenbanken (z.B. OREDA- Off Shore Reliability Data /37/ und CEDB- Component Event Data Bank) sind branchenspezifisch und basieren nur auf konstanten Ausfallraten.

Die Entwicklung einer Faktendatenbank für Schwingfestigkeitsdaten beschreibt BUBENHAGEN in /38/. Die Vorgehensweise des Informatikers bei der Lösung dieses Problems wird ausführlich dargestellt.

Für Wälzlager werden Lebensdauerdaten in Wälzlagerkatalogen veröffentlicht /39/. Die Daten beruhen auf der zweiparametrischen Weibullverteilung. Damit ist eine Lebensdauerberechnung und entsprechende Auslegung durch den Konstrukteur möglich.

Um die Aufgaben in der Instandhaltung computerunterstützt und zuverlässigkeitsorientiert lösen zu können, stellt JUNG in /40/ ein komplexes Computerprogramm vor. Zentraler Bestandteil ist die Speicherung von zuverlässigkeitsrelevanten Daten.

In der VDI-Richtlinie zum Aufbau eines Zuverlässigkeitsdatensystems /41/ wurden Hinweise für das methodische Vorgehen und die Inhalte, basierend auf Erfahrungen

der Autoren mit Zuverlässigkeitsdatensystem-Projekten, gegeben. Diese wurden in der vorliegenden Arbeit weitgehend beachtet.

## 2.5 Verarbeitung unscharfer Daten

Lebensdauerinformationen (Beschreibung von Belastungen, Belastbarkeit, Ausfällen) sind geprägt von Unsicherheit. Man unterscheidet drei verschiedene Arten von Unsicherheit, nach BANDEMER /42/:

### Stochastische Variabilität

Diese Daten unterliegen lediglich subjektiven oder objektiven Fehlern (z.B. Geometriedaten), sie sind quantifizierbar und können mit den Werkzeugen der mathematischen Statistik behandelt werden.

### Beobachtungsunschärfe

Es ist bei der Charakterisierung eines Lastkollektives für ein Bauelement unmöglich, auch nur alle Kräfte und Momente über die gesamte Lebensdauer aufzuzeichnen. Falls Daten erfaßt werden, stellen sie Momentaufnahmen, Extremwerte oder verdichtete Werte dar. Die Größen zur Beschreibung des Lastkollektives sind also unscharf. Material und Fertigung besitzen Toleranzen. Über deren konkrete Ausprägung im einzelnen Exemplar ist meist nichts bekannt. Die Belastbarkeit eines Bauteils direkt zu bestimmen ist schwer bis unmöglich, da die Messung selbst diese Belastbarkeit oft irreversibel verändert. Eine ausführliche Gegenüberstellung von Unschärfe und statistischer Streuung und die Auswirkung auf die Modellierung von Systemen gibt DITLEVSEN in /43/.

### Vagheit

Expertenwissen liegt oft als verbale Beschreibung vor. So wird evtl. die Wartungsqualität („sehr gut“) und das Ausfallverhalten („häufig“) verbal eingeschätzt. Dafür wird der Begriff der linguistischen Variablen verwendet. Es ist auch möglich, dass die Daten selbst vage sind, z.B. der subjektiv bestimmte Zustand „verschlissen“.

Einige Ursachen unscharfer Informationen über das Ausfallverhalten von Produkten sind in *Abb. 2.9* dargestellt.



**Abb. 2.9** Mögliche Ursachen der Unschärfe

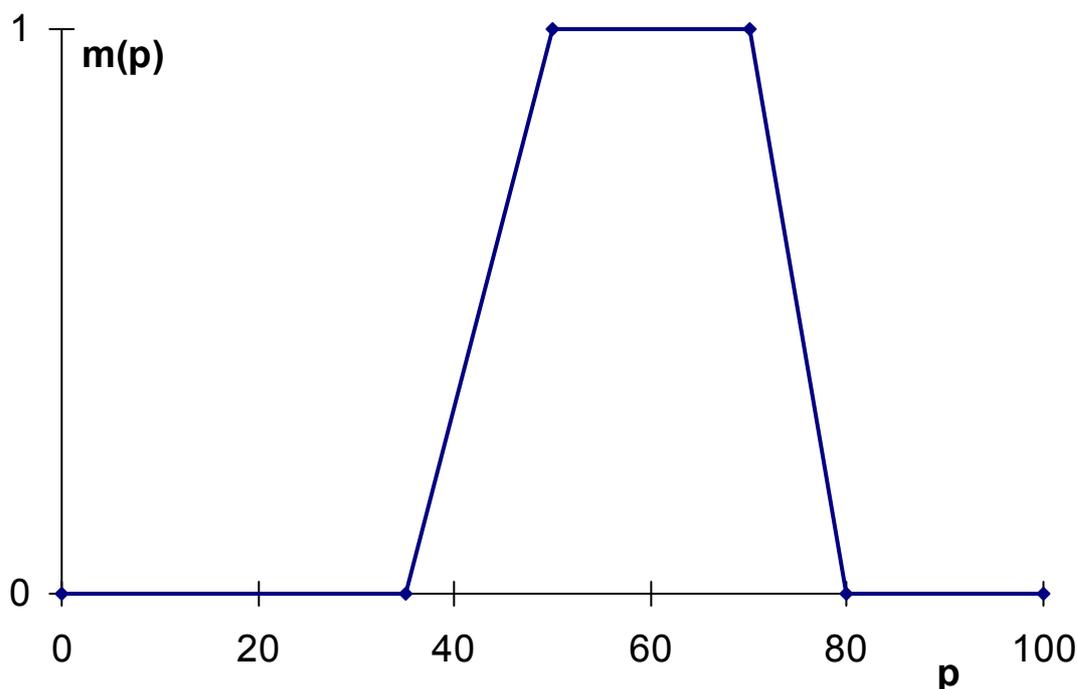
Ausfälle unterscheiden sich darin nicht von anderen Problemen der Realität. Zur Behandlung der Unsicherheit findet die **Fuzzy-Set-Theorie** immer mehr Verbreitung /44/. Grundlage der Fuzzy-Set-Theorie sind unscharfe Mengen.

Die Zugehörigkeit eines *Elements*  $p$  zur *Menge*  $A$  ist keine zweiwertige Ja/Nein-Aussage, sondern wird mit einem *Grad der Zugehörigkeit*  $m_A(p)$  definiert:

$$A = \{p, m_A(p) \mid p \in \mathfrak{R}\} . \quad 2.25$$

Für alle Elemente der Menge ergibt sich so die sogenannte Zugehörigkeitsfunktion, siehe *Abb. 2.10*. Der Wertebereich sogenannter normalisierter Zugehörigkeitsfunktionen liegt zwischen 0 (nicht zugehörig) und 1 (zugehörig).

Die unscharfen Mengen werden mit Mengenoperationen miteinander verknüpft und modifiziert. Über die elementaren Booleschen Verknüpfungen UND, ODER und NICHT hinaus wird eine große Anzahl von Operatoren verwendet.



**Abb. 2.10** Zugehörigkeitsfunktion "hoher Druck"  $m(p)$

Mit Fuzzy ist es möglich, weniger Annahmen und Vereinfachungen zu treffen und Modelle realitätsnäher, intuitiver und schneller zu entwickeln. Das erklärt ihren großen Erfolg in der Regelungs- und Steuerungstechnik. Nach KRUSE /45/ ist eine Vereinfachung von Modellen durch Tolerierung eines bestimmten Maßes an Unsicherheit möglich.

Die Anwendung der Fuzzy-Set-Theorie auf Zuverlässigkeitsprobleme und auf die Speicherung von Daten in Datenbanken (und ihre Abfrage) befindet sich noch im Anfangsstadium. So sind noch keine fertigen Werkzeuge zur Anwendung in den Ingenieurwissenschaften bekannt. Die Vernachlässigung der Unsicherheiten führt allerdings zu übertriebenen Genauigkeitserwartungen /46/. Das zeigen schon die Ergebnisse der Anwendung der Intervallarithmetik, mit der allerdings nur die begrenzte Meßgenauigkeit behandelt werden kann.

Eine Anwendung der Fuzzy-Set-Theorie in der Zuverlässigkeitsanalyse beschreibt VIERTL in /47/. Dabei entwickelt er eine Erweiterung der statistischen Zuverlässigkeitsanalyse. Die Möglichkeiten bei der Erweiterung der Statistik auf unscharfe Zahlen zeigt VIERTL in /48/. Die Ausführungen können direkt auf Histogramm, Ausfalldichte und Ausfallwahrscheinlichkeit, Mehrfaktorenanalyse und parameterfreie, empirische Verteilungsfunktionen angewendet werden.

Neben unscharfen Daten sind linguistische Variablen Gegenstand von Forschungsaktivitäten /44/, /49/. Bei der Darstellung von Sprache in Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktionen ist die Angabe des Bezugssystems wichtig. So werden beispielsweise Belastungen und Genauigkeiten in der Feinmechanik ganz andere sein als in der Landtechnik.

Eine Anwendung der Fuzzy-Methoden auf die Lebensdauerschätzung zeigt HRYNIEWICZ in /50/. Neben den Zuständen „nicht ausgefallen“ und „ausgefallen“ betrachtet er auch dazwischenliegende Zustände wie „erste Schadenssymptome“ und „zu x% ausgefallen (Leistungsabfall)“. Das entwickelte Modell ist viel einfacher zu handhaben als ein entsprechendes Markov-Modell. Alle subjektiven Angaben werden als unscharfe Daten behandelt.

Eine umfangreiche Betrachtung der Verknüpfung von Datenbanken mit der Fuzzy-Set-Theorie gibt PETRY in /51/. Die Nutzung konventioneller relationaler Datenbankmanagementsysteme (DBMS) für unscharfe Daten ist möglich. Dazu werden in der einfachsten Form die Datentypen den Fuzzy-Modellen angepaßt. Konsequente Anwendungen basieren auf veränderten Datenmodellen, den Fuzzy-Extended Entity-Relationships und speziellen Fuzzy-Abfragetechniken. Damit ist es möglich, optimal auf Fuzzy-Modelle abgestimmte Datenbanken aufzubauen.

## 2.6 Schlußfolgerungen

Zusammenfassend ist zum Stand der Technik bei der Lösung von Zuverlässigkeitsproblemen im Maschinenbau festzustellen:

- Es sind viele mathematische Modelle für die Zuverlässigkeitsberechnung von Bauelementen und Systemen bekannt.
- Ihre Anwendung wird oft durch geringe Verfügbarkeit von Daten behindert.
- Ein Computerprogramm, das Schnittstellen zu mehreren Modellen besitzt und die Zuverlässigkeits-Datenbasis gemeinsam nutzt, ist nicht bekannt.

In Unternehmen sind vielfältige Zuverlässigkeitsaufgaben bei der Produktentwicklung und -überwachung zu lösen. Ein Ansatz zur Bündelung des Know-hows und Vereinheitlichung der Datenbasis ist nicht bekannt. Eine höhere Verfügbarkeit von Zuverlässigkeitsdaten würde dem Konstrukteur helfen, die Bauelemente für eine bestimmte Betriebsdauer auszulegen.

### **3 Methodik zum Aufbau des „Informationssysteme für die Projektierung der Zuverlässigkeit von Maschinen IPZ“**

Dem Problem der geringen Verfügbarkeit von Zuverlässigkeitsdaten soll mit einem Computerprogramm begegnet werden, das als einheitliche Arbeitsgrundlage und Datenbasis für unterschiedliche Abteilungen wie Zuverlässigkeitsanalyse, Versuch und Entwicklung/ Konstruktion dient.

In den Unternehmen werden vielfältige Fragestellungen nach der Zuverlässigkeit von Produkten aufgeworfen. Diese Aufgaben wiederholen sich oft, bestimmte Verfahren, Computerprogramme werden immer wieder angewandt. Das geschieht an unterschiedlichen Stellen im Unternehmen durch jeweils andere Mitarbeiter. Dabei werden Erfahrungen gesammelt mit ähnlichen Problemfällen, mit den Anwenderprogrammen und mit Informationsquellen.

Die Lösung dieser Aufgabenstellungen kann mit der allgemeinen Methodik der Lösung ingenieurmäßiger Probleme beschrieben werden. Damit werden Elemente festgelegt, die die Grundlage für eine Vereinheitlichung darstellen. Diese Elemente dienen zur Spezifizierung einzelner Elemente einer Softwarelösung. Diese Software soll als Informationssystem für die Projektierung der Zuverlässigkeit von Maschinen (IPZ) bezeichnet werden.

Eine einheitliche Softwarelösung hat den Vorteil, daß Zuverlässigkeitsinformationen systematisch aufbereitet und größeren Nutzergruppen zugänglich gemacht werden. Durch den Zugriff auf die gleichen Daten können Versuche gebündelt und Erfahrungen genutzt werden. Mit einer entsprechenden Datenbasis ist die Simulation des Systemzuverlässigkeitsverhaltens und damit eine technisch begründete Prognose in einer sehr frühen Entwicklungsphase möglich.

Die Herangehensweise an Zuverlässigkeitsprobleme ist allerdings in verschiedenen Unternehmen unterschiedlich. In verschiedenen Branchen und Betrieben, mit unterschiedlicher Unternehmenspolitik und bei anderer Wertigkeit der Zuverlässigkeit

gibt es unterschiedliche Situationen. Das ist z.B. begründet in anderen Sicherheitsanforderungen an die Produkte und verschiedener Datenerhebung, einer unterschiedlichen Entwicklung der Unternehmen und der Anwendung anderer Software. Ein Universalprogramm wäre zu groß und unhandlich, um all diesen Anwendersituationen gerecht zu werden. Aus diesen Gründen konzentriert sich die vorliegende Arbeit auf die Entwicklung einer Methode zur Gestaltung eines IPZ. Daneben wurde ein IPZ beispielhaft realisiert.

### **3.1 Vorgehensweise bei der Lösung von Zuverlässigkeitsproblemen**

In diesem Abschnitt wird das Charakteristische bei der Lösung von Zuverlässigkeitsproblemen dargestellt. Dabei wurden Zielstellungen und Lösungsansätze, die für alle Zuverlässigkeitsprobleme gültig sind, verallgemeinert. Die Betrachtung der Kategorien Konstruktion, Zuverlässigkeitsbewertung und Instandhaltung ermöglicht eine feinere Unterscheidung der spezifischen Probleme, der verwendeten Modelle und der benötigten Daten.

#### **3.1.1 Allgemein**

Zuverlässigkeitsaufgaben sind immer wieder zu lösen bei der Neu- und Änderungskonstruktion, der Zuverlässigkeitsüberwachung, dem Zuverlässigkeitsnachweis und der Optimierung der Instandhaltung. Die Zuverlässigkeit unterliegt folgenden Einflüssen:

- Auswahl eines störungssicheren Wirkprinzips;
- Dimensionierung (Geometrie, Material, Fertigungstechnologie);
- Strukturierung des Systems (Einbau von Redundanzen, Montage- und Diagnosefreundlichkeit, Verhütung von Folgeschäden);
- Maßnahmen zur Beanspruchungssteuerung (Überlastschutz, Kühlung);
- notwendige Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Fertigung;
- Überwachung des technischen Zustandes der Bauteile während der Nutzung mit vorbeugendem Austausch vor Schadenseintritt.

Bei den notwendigen Entscheidungen treten sowohl qualitative als auch quantitative Problemstellungen der Zuverlässigkeitsanalyse und -prognose auf. Es wird eine Vielzahl von Quellen und Werkzeugen genutzt.

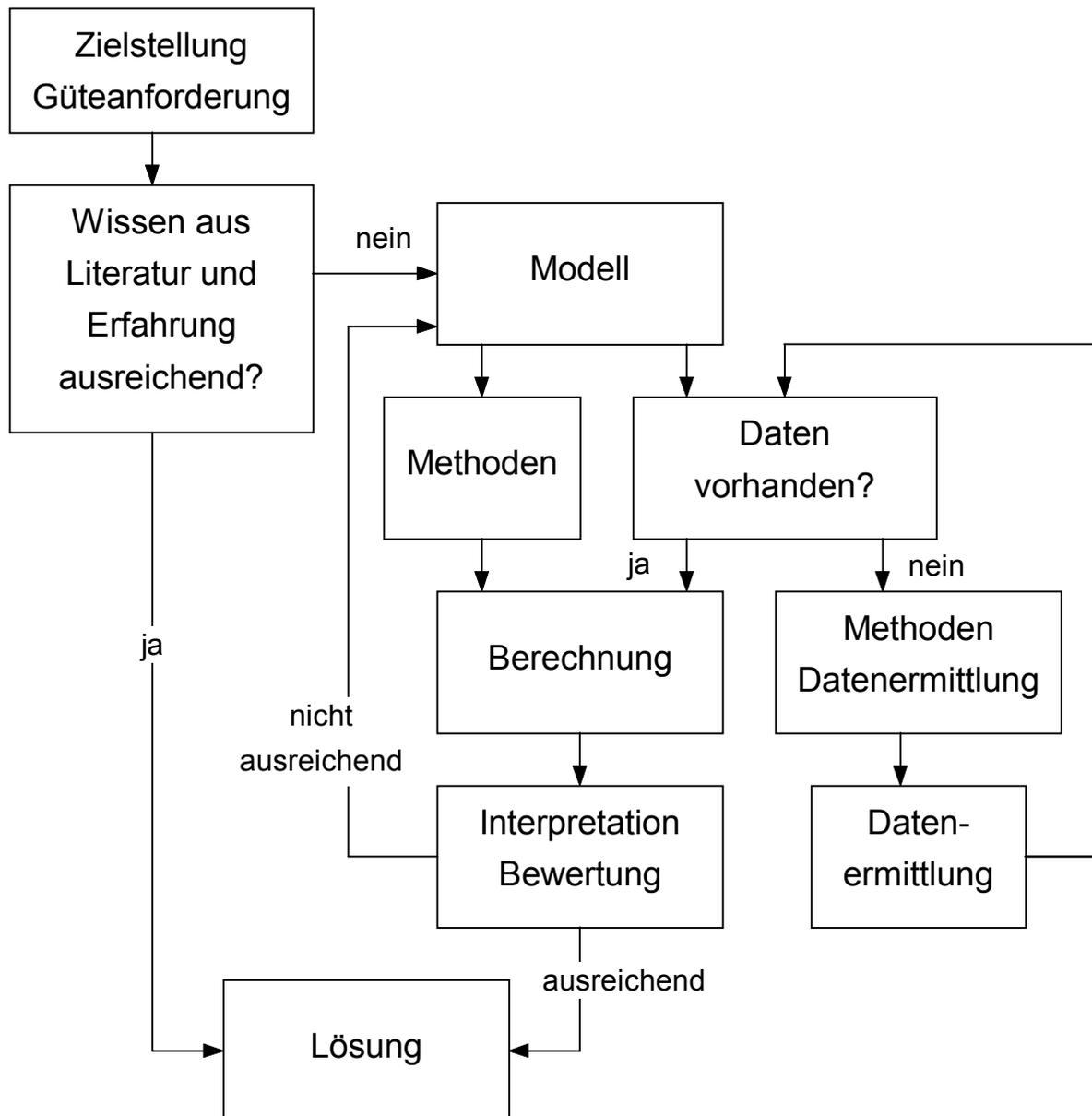
Die theoretische Lösung von Zuverlässigkeitsaufgaben soll mit einer allgemeinen Vorgehensweise bei der Modellierung ingenieurmäßiger Probleme beschrieben werden (nach BANDEMER /52/):

- ① Problemstellung
  - Was soll ermittelt werden?
  - Welche Güte der Aussagen ist für die Lösung erforderlich?
- ② Auswahl des Modells
  - Kann Wissen in Form von Literatur oder Erfahrungen genutzt werden?
  - Welche Methoden werden angewandt, welche Software?
  - Welches mathematische Lösungsverfahren soll angewandt werden?
- ③ Ermittlung der Daten
  - Welche Daten welcher Güte und Quantität werden benötigt?
  - Wo stehen die Daten zur Verfügung oder wie sind sie zu ermitteln?
- ④ Berechnung
  - Modellierung durch Verknüpfung von Methoden und Daten
- ⑤ Bewertung/ Interpretation
  - Was bedeuten die Ergebnisse in Bezug auf das praktische Problem?
  - Wie ist weiter vorzugehen?

In den meisten Fällen wird es nicht nötig sein, ganz neue Antworten auf die Fragen zu suchen. Die Prozeduren zur Lösung spezieller Zuverlässigkeitsaufgaben sind bekannt und erprobt, nur die Zuordnung zu den Schritten des Algorithmus ist vermutlich neu.

In *Abb. 3.1* ist ein vereinfachter Lösungsalgorithmus für Probleme der Zuverlässigkeitsanalyse und -prognose dargestellt. Es kann erforderlich sein, daß ein bestimmtes Modell die Anwendung mehrerer Methoden erfordert. Ein typischer Fall ist die Simulation des Zuverlässigkeitsverhaltens von reparierbaren Systemen. Dazu werden für jedes Bauteil Ausfalldaten ermittelt, statistisch ausgewertet, die Parameter der Lebensdauerverteilungen geschätzt und diese dann entsprechend der Randbedingungen wie Systemstruktur und Instandsetzungsstrategie miteinander verknüpft.

Mit dem Element „Wissen aus Erfahrung und Literatur“ sollen auch Fragestellungen abgedeckt werden, die keine mathematische Modellierung erfordern. In „Modell“ sind sowohl quantitative Modelle als auch qualitative wie die rechnergestützte Bearbeitung von FMEA erfaßt.



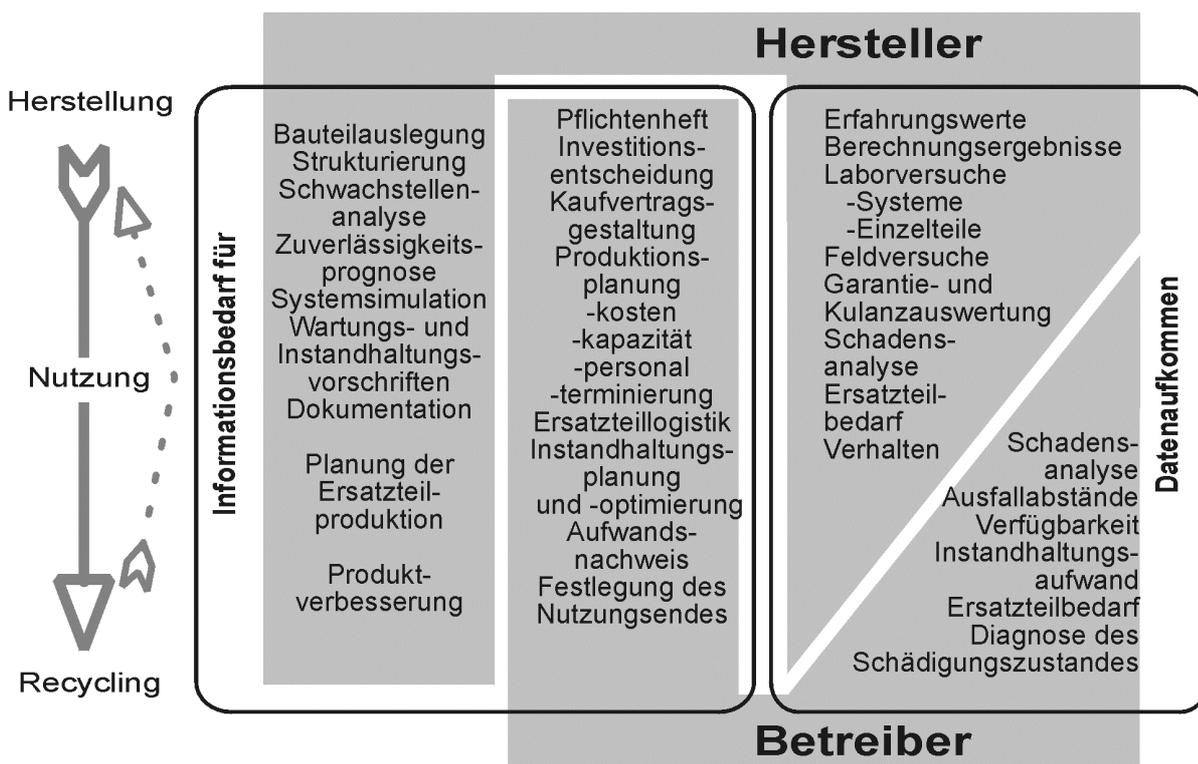
**Abb. 3.1** Lösungsalgorithmus in Zuverlässigkeitsanalyse und -prognose

Werden nun die verschiedensten Zuverlässigkeitsaufgaben im Unternehmen einheitlich analysiert und den einzelnen Schritten des Algorithmus zugeordnet, schafft man damit ein Konzept für das zu erstellende IPZ. Im vorgestellten Ansatz stehen die Problemorientierung und damit die anzuwendenden Modelle im Zentrum. Der in der

VDI-Richtlinie „Struktur eines Zuverlässigkeits-Datensystems“ gewählte Ansatz stellt die Daten in den Mittelpunkt /41/.

Mit der Neustrukturierung durch die Einführung eines IPZ besteht auch die Chance der kritischen Überprüfung einzelner Elemente. Ein Vergleich der Modelle zeigt, ob sich alle auf dem gleichen technischen Niveau befinden, ob die Qualität der Lösungen vergleichbar ist. Bei den Daten kann überprüft werden, ob Überschneidungen oder Redundanzen in der Erfassung oder Speicherung bestehen.

Sowohl der Hersteller eines Produktes beschäftigt sich mit dessen Zuverlässigkeit als auch der Betreiber. Bei beiden besteht die Möglichkeit, zuverlässigkeitsrelevante Daten zu gewinnen. Die Aufgabenstellungen sind allerdings ganz unterschiedlich, und zu ihrer Lösung werden oft Informationen benötigt, über die zu einem bestimmten Zeitpunkt der Produktlebensdauer der jeweils andere verfügt. In *Abb. 3.2* ist das an einigen Beispielen schematisch dargestellt.



*Abb. 3.2* Informationsbedarf und Datenaufkommen während der Produktlebensdauer

Der Hersteller ist bemüht, sein Produkt markt- und funktionsgerecht auszulegen, in immer stärkerem Maße muß er Zuverlässigkeitsnachweise führen können. Er verfügt über Versuchsdaten, während der Nutzung des Produkts nimmt die Möglichkeit der

Datenerfassung aber immer mehr ab. Nur Ausfälle, die ihm bekannt werden, können noch ausgewertet werden. Die Auswertung des Ersatzteilbedarfs zur Bestimmung des Ausfallverhaltens ist mit großen Fehlern behaftet, da sie von Lagerhaltung, Drittanbietern und Gleichteilen bei verschiedenen Modellen verfälscht wird.

Weiterhin sind auch Daten und Erfahrungen anderer, vergleichbarer Produkte und Einzelteile ganz anderer Unternehmen interessant, um bei weitgehend unbekanntem Verhalten neuer Lösungen fundierte Schätzungen vornehmen zu können.

Der Betreiber ist bereits vor der Kaufentscheidung am Zuverlässigkeitsverhalten interessiert, später benötigt er Informationen u.a. zur Produktions- und Instandhaltungsplanung. In einer frühen Phase der Produktlebensdauer hat er nur eingeschränkte Möglichkeiten, die notwendigen Daten zu erhalten. Er lernt aber während der Nutzung das Produkt immer besser kennen.

Es ist bekannt, daß die Zuverlässigkeitsaussagen zu den gehüteten Unternehmensgeheimnissen gehören. Kaum ein Unternehmen wird ohne Not die (Un-)Zuverlässigkeit seiner Produkte den Mitbewerbern bekanntgeben. Zumindest zwischen Hersteller und Anwender von Maschinen und Anlagen besteht bei gegenseitiger Information jedoch ein beiderseitiger Nutzen, wie das MEXIS in /53/, bezogen nicht nur auf Zuverlässigkeitsdaten, zum Ausdruck bringt: „Ein sinnvoller und reibungsloser Informationsfluß zwischen Hersteller und Anwender bringt beiden erhebliche Vorteile. Bessere Maschinen und Anlagen erhöhen z.B. die Absatzchancen des Herstellers und verbessern (z.T. durch höhere Verfügbarkeit) die Produktivität bei dem Anwender.“ Beim Konzipieren eines IPZ sollte geprüft werden, ob es möglich ist, diese Vorteile zu nutzen.

### **3.1.2 Konstruktion**

Während der Konstruktion und Entwicklung eines Produkts wird die geforderte Zuverlässigkeit projiziert. Die Zuverlässigkeit kann erhöht werden, indem man die Belastbarkeit erhöht, die Belastung reduziert oder Redundanzen einbaut. Die Struktur ist auch entscheidend zur Vermeidung der Belastungsweiterleitung und der Einschränkung von Folgeschäden. Die fertigungsgerechte Auslegung verwendet robuste Fertigungsmethoden und erleichtert das Erreichen der notwendigen Qualität. Mit instandhaltungsgerechter Konstruktion /54/, /55/ verbessert man die Diagnoseeignung und damit den vorbeugenden Austausch abgenutzter Bauteile. Demontage,

Montage, Transport und Lagerung werden vereinfacht. Dadurch reduziert sich auch die zur Instandhaltung notwendige Zeit, die Verfügbarkeit wächst.

Die Wege zum Erreichen einer hohen Zuverlässigkeit sind also unterschiedlich. Die Konstruktionsentscheidungen werden nicht selten in bestimmten Sprüngen getroffen. Zum Beispiel existieren bei vielen Abmessungen Vorzugsmaße und Einschränkungen der Dimensionierung. Bauteile sind oft genormt. Eine andere Struktur oder ein anderes Wirkprinzip schaffen veränderte Voraussetzungen in der Zuverlässigkeitssicherung.

Die Bauelemente werden bestimmten Klassen zugeordnet. Allgemein üblich ist die Unterscheidung von Dauerteilen und Verschleißteilen. Eine feinere Klasseneinteilung vertritt IHLE in /56/, *Abb. 3.3*.

Zuverlässigkeitsklasse	Eigenschaften	Lebensdauer
Dauerteil z.B. Rahmen	Bauteil, das im allgemeinen keiner Abnutzung unterliegt	$B_1, B_2$ in $T_p$
Abnutzungsteil I z.B. Motor	Bauteil, mit dessen nicht intensiver Abnutzung gerechnet und welches in einer Grundinstandsetzung überwacht wird	$B_{10}, B_5$ in $T_p$
Abnutzungsteil II z.B. Reifen	Bauteil, welches eine intensive Abnutzung aufweist und erfahrungsgemäß nicht auf die Nutzungsdauer der Maschine projiziert werden kann, so daß Teilinstandsetzungen auftreten können	$B_{10}, B_5$ in einem Teil von $T_p$
Wartungsteil z.B. Filter	Bauteil, dessen Austausch oder Ergänzung periodisch erfolgt	bezogen auf Jahresnutzungsdauer

$T_p$  ... projizierte Nutzungsdauer

**Abb. 3.3** Zuverlässigkeitsklassen einer Maschine nach IHLE /56/

Eine Zuverlässigkeitserhöhung ist entsprechend der Sprung in die nächsthöhere Zuverlässigkeitsklasse. Der jeweils aktuelle Wissensstand erlaubt die wirtschaftliche

Auslegung von Bauelementen in einer bestimmten Zuverlässigkeitsklasse. Diese entsprechen dann dem „Stand der Technik“. Die Entwicklung neuer Materialien, Fertigungsverfahren und gestalterischer Lösungen führt zu einer ständigen Weiterentwicklung.

Aus der Projektierung eines Bauteils in einer bestimmten Zuverlässigkeitsklasse folgen eine Reihe von Bedingungen. Wartungsteile müssen relativ klein, leicht und preiswert sein. Sie müssen leicht demontierbar sein. Ihre ausfallfreie Lebensdauer sollte in der Größenordnung der Nutzungsdauer liegen. Diese Bedingungen gelten für die gesamte Baugruppe, wenn diese gemeinsam ausgetauscht wird. In abnehmendem Maße gelten diese Bedingungen auch für Abnutzungsteile II und I. Deren Zustand bzw. Ausfall muß zudem leicht diagnostizierbar sein.

Damit das IPZ den Konstrukteur in seiner Arbeit unterstützen kann, müssen die gespeicherten Informationen die Zuordnung zu einer Konstruktionsklasse erlauben.

Andererseits ist diese Bedingung auch hinreichend: Die erfaßten Daten brauchen nur so scharf zu sein (oder können die entsprechende Unschärfe besitzen), daß die Zweckmäßigkeit der Zuordnung zu einer dieser Klassen eindeutig nachgewiesen werden kann. So ist es möglich, die Datenmenge zu begrenzen.

### **3.1.3 Zuverlässigkeitsbewertung**

Die Zuverlässigkeitsbewertung hat die Aufgabe, Kenngrößen für die Zuverlässigkeit zu ermitteln. Damit werden Vorgaben für die Zuverlässigkeitsanforderungen überprüft. Diese Vorgaben orientieren sich an der Marktsituation (wo stehen die Wettbewerber, was akzeptiert der Kunde in diesem Preis- und Qualitätssegment), beachten Sicherheits- und Umweltrisiken, gesetzliche Vorgaben, gehen von wirtschaftlichen Aspekten aus (was kosten x% Garantiefälle), bilden einen Teil der Produktspezifik und repräsentieren einen „marktüblichen“ Stand der Technik.

Mit den Aufgaben der Zuverlässigkeitsbewertung beschäftigen sich in den Unternehmen die Versuchsabteilungen als auch Abteilungen, die Ausfalldaten in Form von Meldungen über Ausfälle, Garantiemeldungen und Kulanzanträgen auswerten. Weiterhin gehören spezielle Abteilungen, die Lebensdauerberechnungen durchführen, dazu.

Die Zuverlässigkeitsbewertung begleitet ein Produkt von der Entwicklung bis zur Nutzung. In einer frühen Entwicklungsphase müssen Berechnungen ausreichen. Spä-

ter wird Zuverlässigkeit konstruktiver Lösungen in Versuchen für Bauteile, Baugruppen und komplette Maschinen ermittelt. Die genauesten Daten ergeben Feldversuche unter realen Bedingungen. Aus Zeit- und Kostengründen können sie jedoch erst in einer späten Entwicklungsphase angewandt werden. Eine Kombination aus Versuch und Berechnung hat sich in der Praxis bewährt, um eine ausreichend genaue Lebensdauerbestimmung durchzuführen /57/. Danach kann die Fertigungsfreigabe erfolgen. Durch die Fertigung wird die projektierte Zuverlässigkeit der Produkte geschaffen. Die Erfüllung der notwendigen Qualität durch Fertigung plus Qualitätssicherungsmaßnahmen wird in Versuchen und der Auswertung von Felddaten permanent überprüft.

Nach der Produkteinführung überwacht die Zuverlässigkeitsbewertung das Ausfallverhalten, was durch Analyse der Garantiefälle, Ersatzteilbewegungen und Rapport möglich ist. Die Ergebnisse werden zu laufenden Produktverbesserungen verwandt.

### **3.1.4 Instandhaltung**

Die Instandhaltung gewährleistet die Realisierung der Zuverlässigkeit. Die zentralen Fragen der Zuverlässigkeit in der Instandhaltung sind:

- Welche Produkte müssen vorrangig betrachtet werden?
- Wie kann die Instandhaltungsmethode optimiert werden?
- Welche Konstruktionsänderungen sollen vorgenommen werden?

Die große Zahl der von der Instandhaltungsabteilung betreuten Maschinen und der darin enthaltenen Bauteile macht die Festlegung von Prioritäten notwendig. Nicht alle Produkte können mit der gleichen Intensität betrachtet werden. Diese Wertung wird immer wieder neu durchgeführt.

Die in der Praxis angewandten Kriterien für die Wertung beruhen auf der Erfahrung und sind unterschiedlich komplex. Zuerst werden Schwerpunktmaschinen festgelegt, deren Ausfall hohe Folgekosten durch Stillstand, Produktionsausfall oder die Inanspruchnahme teurer Ersatzkapazitäten nach sich zieht. Diese Maschinen werden vorrangig betrachtet.

Maßnahmen zur Optimierung der Instandhaltung und zur Konstruktionsverbesserung werden getroffen, wenn regelmäßig hohe Instandhaltungskosten auftreten. Sie setzen sich aus den Instandsetzungskosten nach Ausfall, den damit verbundenen Folgekosten und den Kosten für vorbeugende Maßnahmen wie Diagnose, Austausch und

Folgekosten zusammen. Sie können nach den Anteilen an Lohn-, Ersatzteil- und Gemeinkosten weiter differenziert werden.

Neben den Instandhaltungskosten können auch eine geringe Verfügbarkeit oder bestimmte Zuverlässigkeitskenngrößen Anlaß sein, Vorbeugungsmaßnahmen zu treffen oder die Instandhaltungsorganisation zu verändern.

In der Instandhaltung wird zwischen einem normalen Verhalten, das dem momentanen Stand der Technik entspricht, und einem verbesserungsfähigen Verhalten unterschieden. Die Kosten-, Verfügbarkeits- und Zuverlässigkeitsparameter werden also in der Relation zum technischen Kontext gesehen. Daraus ergibt sich dann die Entscheidung zu Maßnahmen der Instandhaltung oder zur Konstruktionsverbesserung.

Während der Nutzung wird das Produkt einer ganz bestimmten Belastung unterzogen. Diese ist nur bei Einzelstücken vom Hersteller genauer vorhersehbar, ansonsten beziehen sich seine Auslegungen und Wartungsempfehlungen auf größere Stichproben. Nach einer bestimmten Betriebsdauer sollen Teile überprüft bzw. vorbeugend ausgetauscht werden. Diese Vorschriften müssen auf das Einzelexemplar nicht optimal zutreffen.

Das Produkt verursacht bei Ausfall Folgekosten, die häufig die Instandsetzungskosten um ein vielfaches überschreiten. Somit unterscheidet sich auch die tatsächliche Bedeutung eines Ausfalls von den Annahmen des Herstellers. Durch bessere Abstimmung der Maßnahmen auf den Einzelfall kann eine höhere Verfügbarkeit und Effizienz erreicht werden.

#### Die Instandhaltungsabteilung

- beobachtet das Abnutzungs- und Ausfallverhalten der Produkte;
- pflegt und wartet die Maschinen ( $\equiv$ Verzögerung der Abnutzung und Wiederherstellung der Betriebsbereitschaft /15/);
- nimmt Schwachstellenanalysen und Konstruktionsverbesserungen vor;
- betreibt Konservierung und Lagerung in Nutzungspausen;
- führt Instandsetzungen ( $\equiv$ Wiederherstellung beeinträchtigter Gebrauchseigenschaften /15/) durch;
- bestimmt einen Großteil der Instandhaltungskosten;
- legt das aus ihrer Sicht optimale Nutzungsende fest.

(Darüber hinaus hat die Instandhaltungsabteilung noch weitere Aufgaben, die aber hier nicht relevant sind.)

Die vom Hersteller vorgeschlagenen Wartungsmaßnahmen können in allen Parametern verändert werden:

- Auswahl der Teile;
- Verlängerung oder Verkürzung der Intervalle oder Veränderung ihrer Bezugsgröße;
- Instandhaltungsmethode: Austausch nach Diagnose oder zustandsunabhängiger vorbeugender Austausch von Teilen;
- Abnutzungsgrenzwert;
- Qualität der ausgetauschten Teile (einschließlich Schmier- und Kühlmittel).

Die bei der Konstruktionsverbesserung zu treffenden Entscheidungen entsprechen den in *Abschnitt 3.1.2* betrachteten.

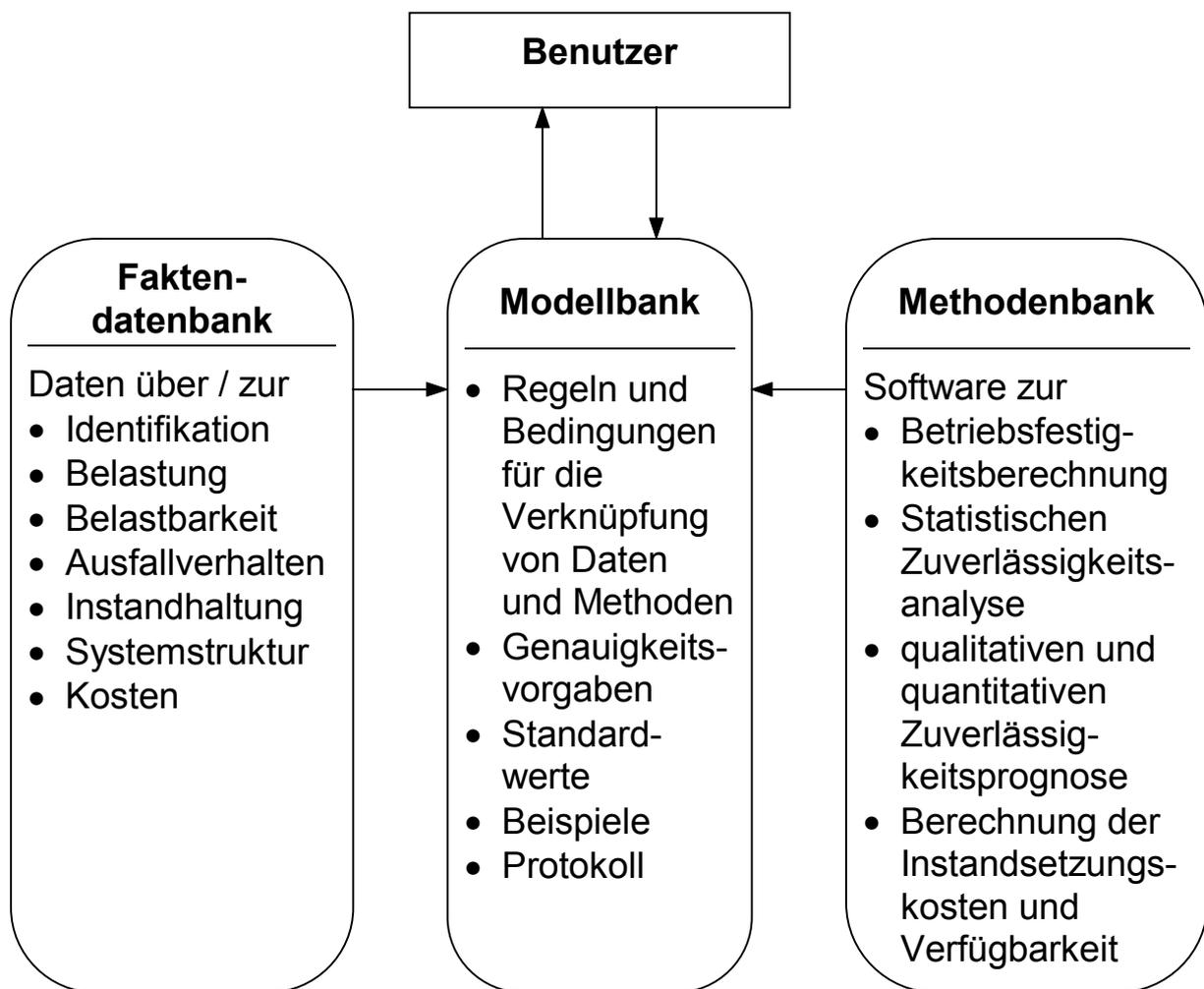
Die Rahmenbedingungen sind allerdings ganz anders: die Lösung bezieht sich auf eine viel kleinere Stückzahl, die Veränderung muß in einem bestehenden technischen System erfolgen, man ist nicht auf den Originalhersteller und seine Zulieferer beschränkt, muß aber mit den eigenen Möglichkeiten oder den von Dienstleitern zugekauften auskommen. Das bezieht sich insbesondere auch auf die verfügbaren Informationen zum Produkt und auf Sicherheits- und Haftungsbedingungen.

Die Kostensituation ergibt sich aus dem ganz konkreten Einzelfall. Ob, wann und wie eine Schwachstellenbeseitigung beim Hersteller des Produktes oder bei seinem Nutzer vorgenommen wird, sieht im Einzelfall also völlig unterschiedlich aus.

## **3.2 Grobstruktur eines IPZ**

Ein rechnergestütztes Informationssystem ist ein Softwaresystem, das einerseits Informationen über eine bestimmte Anwendung speichert und zentral verwaltet sowie andererseits diese Informationen nach bestimmten Gesichtspunkten bzw. mit verschiedenen Zielsetzungen abfragen, auswerten und weiterverarbeiten kann /58/.

Nach SCHEER /59/ kann ein Informationssystem in eine Modellbank, eine Faktendatenbank und eine Methodenbank unterteilt werden. Angewandt auf die Zuverlässigkeitstechnik ergibt sich die Darstellung in *Abb. 3.4*.



**Abb. 3.4** Informationssystem Zuverlässigkeitsprojektierung

In der **Faktendatenbank** sind empirisch und experimentell erhaltene Daten gespeichert sowie die durch die Anwendung bestimmter Methoden daraus gewonnen aufbereiteten Daten. Die Daten werden in einer Struktur gespeichert, die eine Abbildung der Realität darstellt. Hinzu kommen Literaturdaten, Gestaltungshinweise und die Ergebnisse von Betriebsfestigkeitsberechnungen.

In der **Methodenbank** sind Computerprogramme zur qualitativen und quantitativen Auswertung der Daten vereinigt. Dabei werden die Daten so zusammengeführt, dass die Resultate zur Problemlösung genutzt werden können.

Welche Daten mit welchen Methoden behandelt werden, die Regeln, nach denen die Verknüpfung erfolgt und ein Protokoll über die durchgeführten Berechnungen und Simulationen sowie Beispiele werden in der **Modellbank** gespeichert.

Die Lösung einer Aufgabe erfolgt im Zusammenspiel aller drei Komponenten. Bei einigen Informationssystemen sind die drei nicht klar zu trennen. Teilweise ver-

schmelzen Modelle und Methoden oder Datenbank und gespeicherte Modelle sind nicht zu unterscheiden. Der Benutzer kann direkten Zugriff auf die Faktendatenbank oder die Anwendersoftware haben.

Die Grundlage einer kontinuierlichen effizienten Entwicklung und Nutzung von Informationssystemen muß ein unternehmensweites Datenkonzept sein. Andernfalls kommt es unweigerlich zu Redundanzen und Inkompatibilitäten /59/.

### 3.3 Elemente des IPZ

In den folgenden Kapiteln sollen die Anforderungen an einzelne Elemente eines IPZ, ihre Inhalte und ihr Zusammenspiel beschrieben werden. Dabei wird von einer heterogenen Softwarelösung ausgegangen, d.h. soweit es möglich ist wird vorhandene Anwendersoftware über Schnittstellen eingebunden. Die beschriebenen Elemente Wissen, Modelle, Methoden, Daten und Netzwerkeinbindung sind auch nicht als gleichberechtigte Teile eines Ganzen zu verstehen, sondern als verschiedene Sichtweisen auf ein heterogenes Ganzes.

Neben der Einbindung von Programmen über Schnittstellen gibt es noch die Möglichkeit, bestimmte Teile neu zu programmieren und damit als integralen Bestandteil des IPZ zu gestalten. Diese Variante hat sowohl Vor- als auch Nachteile. Positiv sind die einheitliche Bedienung, die Möglichkeit der konsequenten Anpassung an die Spezifik des Unternehmens und eine geringere Abhängigkeit von der Softwarepflege eines Drittanbieters. Nachteilig wirken sich die geringere Flexibilität bei der Anpassung an neue Softwareentwicklungen und der höhere Programmieraufwand aus. Eine Lösung mit der Neuprogrammierung aller Anwendungen wird in den meisten Fällen wegen des hohen Aufwandes unmöglich sein.

#### 3.3.1 Wissen

Viele der in *Kapitel 3.1* aufgezählten Einflüsse auf die Zuverlässigkeit beziehen sich auf Ideen, Gestaltungsvorschläge, Konstruktionslösungen und Regeln, die in der Literatur gefunden werden können. Es existiert eine große Menge an Literatur mit unmittelbarem Bezug zur Zuverlässigkeit aus verschiedenen Gattungen wie:

- Untersuchungen einzelner Bauelemente oder Versagensstellen;
- Konstruktionskataloge;
- Auslegung von Bauelementen;

- Zuverlässigkeitstechnik (Theorie);
- Versuchsplanung.

Diese Literatur kann nur wirkungsvoll genutzt werden, wenn sie als Literatursammlung oder Volltextdatenbank für die tägliche Nutzung unmittelbar zur Verfügung steht. Eine schnelle Auffindung der gesuchten Texte in einer Datenbank wird durch die Schlüsselwörter möglich. *Abb. 3.5* zeigt die Oberfläche der am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart aufgebauten Literaturdatenbank.

The screenshot shows a window titled 'Literatur deutsch' with a search filter set to 'Zuverlässigkeit'. The search results display the following information:

<b>Author:</b>	Hanenkamp, W.	
<b>Titel:</b>	Untersuchungen zur Zeit- und Dauerfestigkeit von hochfesten Schraubenbolzen (10.9) im D	
<b>Deutscher Titel:</b>		
<b>Inhaltsangabe:</b>	Der Autor gibt Werte für die Zeit- und Dauerfestigkeit von Schraubenbolzen in einem Durchmesserbereich an, für den bisher Versuchsergebnisse nur in sehr geringem Umfang verfügbar waren. Ihnen liegen mehr als 100 Dauerschwingversuche an hochfesten Schraub	
<b>Bemerkungen:</b>		
<b>Schlüsselwort 1:</b>	Lebensdauer	<b>Schlüsselwort 2:</b> Wöhlerlinie, Schrauben
<b>Jahr:</b>	1992	<b>Art:</b> Zeitschrift
<b>KV:</b>	Universität Bochum, Institut für Kons	<b>Bibl:</b> Konstruktion 44, S: 255- 260
<b>Standort:</b>	Literaturordner	<b>Signatur:</b>
<b>Kl:</b>		<b>Nr:</b> 73

At the bottom, a navigation bar shows 'Record: 73 of 443' with various control icons.

**Abb. 3.5** Literaturdatenbank

Sehr komfortabel sind Volltextdatenbanken, die Artikel komplett oder exzerpiert mit den Abbildungen enthalten. Dann ist auch meist eine Volltextsuche möglich.

Eine weitere wichtige Wissensquelle sind nichtpublizierte, unternehmensinterne Erfahrungen. Sie liegen oft in Berichten und einer umfangreichen Korrespondenz vor.

Teilweise werden komplette Kommunikationssysteme zum Austausch von Informationen zwischen Kunden, Servicemitarbeitern und Herstellern aufgebaut. Ein solches Beispiel zeigt *Abb. 3.6*, eine Seite des „Service Communication System“ der Fa. Deere and Company.

SC08 UNIT: 27	S C S	09JUN98
JOHN DEERE PRODUCTIVE REPORTS - AG.	TRACTORS, LOADERS	01:32
CASE NUMBER : 101126	AS OF DATE : 080198	
FROM : GUENTER BAUER	DEALER NAME : JDVD	
MACHINE MODEL: 4050	SECTION CODE : 050B	
PART NAME : FRONTANTRIEB	FAILURE : UNDICHT	
REPORT DATE : 080198 (DDMMYY)	DELIVERY DATE: DDMMYY	
13 DIGIT PIN : .....	PART NUMBER : RE150320	
ENGINE SER. #: .....	EQUIPMENT #: .....	
TAG :	HOURS USED : 000000	
TITLE : * SIMMERINGE		
DESCRIPTION: SIMMERINGE DER FRONTACHSE UNDICHT.		
MOD. 4050 - 4450 MIT 1100 VORDERACHSE		
SOLUTION:	ES STEHT EIN NEUER DICHTSATZ RE150320	
PAGE 1/1	ZUR VERFUEGUNG.	
	BESTELLUNG UEBER DEPOT BRUCHSAL:	
	BIS ACHSSN. -022786	
	1 X RE150320 DICHTSATZ	UND
	1 X RE71566 GABELKOPF	
	ODER	
	1 X RE70738 GELENKWELLE KPL.	UND
	1 X JDG1168	

**Abb. 3.6** Informationsaustausch mit Kommunikationssystemen

Tritt ein Ausfall auf, wird er im Kommunikationssystem beschrieben. Diese Meldung wird von anderen Anwendern um eigene Erfahrungen mit dem gleichen Problem, Vermutungen zur Ursache und Lösungsvorschläge ergänzt. Die Servicemitarbeiter und die Konstruktionsabteilungen nehmen an der Diskussion teil. Dabei wird auch entschieden, ob die Zuverlässigkeit des Bauelements ausreichend ist oder ob es sich um eine Schwachstelle handelt. Müssen Änderungen vom Werk her vorgenommen werden, dann veröffentlicht man sie im Kommunikationssystem. Die Spezifik der Kommunikationssysteme geht über den Rahmen dieser Arbeit hinaus, deshalb soll hier nur auf die Literatur verwiesen werden, siehe LOCKEMANN /60/.

Dem Element „Wissen“ können auch dokumentierte Modellierungen zugeordnet werden. Wenn die Übertragbarkeit auf den aktuell bearbeiteten Fall gegeben ist, können die Ergebnisse ohne neue Berechnungen genutzt werden.

### 3.3.2 Modelle

Mit dem Modell wird das reale Problem mit mathematischen Mitteln beschrieben. Dabei wird eine hinreichende Übereinstimmung mit der Wirklichkeit gefordert, die vom Zweck und Ziel der Untersuchung abhängig ist. Für ein Problem können unterschiedliche mathematische Modelle aufgestellt werden. Ihre Qualität ist allein durch Konfrontation mit der Praxis zu bewerten. Es ist zu prüfen, ob die Ergebnisse brauchbar sind /52/.

Die Modelle stehen heute mit leistungsfähigen Computerprogrammen zur Verfügung. Die Modellierung geschieht mit der Entscheidung für ein bestimmtes Programm oder Unterprogramm, der Eingabe von Daten hinreichender Güte und der Entscheidung für mathematische Lösungsverfahren.

In der Modellbank ist das gesamte Erfahrungswissen der Anwender bei der Verknüpfung von Daten und Methoden gespeichert. Diese Erfahrungen werden häufig vernachlässigt. Sie stellen aber den wesentlichen Vorteil bei der Anwendung eines IPZ dar.

Eine besonders effektive Arbeit mit dem IPZ ist möglich, wenn die Aufgabenstellungen zu typischen Fällen zusammengefaßt werden. Diese werden mit bestimmten Modellen, also der Verknüpfung von Daten und Methoden nach einer wiederholt praktizierten Vorgehensweise und anschließender Interpretation der Ergebnisse gelöst. Dazu muß folgendes dokumentiert werden:

- Kriterien, nach denen die Aufgabenstellung einem Modellfall zugeordnet wird: Die Formulierung der Aufgabenstellung ist für eine erste Zuordnung meist ausreichend. Oft sind anzuwendende Methoden und zu ermittelnde Parameter bereits Bestandteil der Aufgabenstellung. Diese Klassifizierung kann aber auch Parameter wie Güteanforderungen enthalten oder Merkmale der Organisationsstruktur des Unternehmens aufweisen. Von entscheidender Bedeutung ist die ausführliche Dokumentation des Modellfalls mit allen relevanten Größen, den Grenzen der Anwendbarkeit und der Güte des Ergebnisses. Alle unveränderlichen Merkmale des Modellfalls müssen mit der Problemstellung konform sein, da der Modellfall sonst nicht angewandt werden kann. Trifft keiner der vorhandenen Modellfälle zu, ist ein neuer zu schaffen. Auf diese Weise wächst die Modellbank.

- Auswahl der Methoden: Es sind die Antworten auf folgende Fragen zu erfassen: Welche Anwendungen werden wofür genutzt? Welche Genauigkeit kann mit dem jeweiligen Programm erreicht werden? Wo ist die Software für bestimmte Aufgabenstellungen gespeichert, wie wird sie genutzt? Welche Eingaben sind erforderlich, für welche Probleme werden die Optionen wie gesetzt? Es sind Defaultwerte und Genauigkeitsvorgaben zu erfassen. Oft sammelt der Anwender Erfahrungen, wie die Software besonders effektiv genutzt werden kann, welche Bugs vorhanden sind und in welchen Grenzbereichen das Programm keine zuverlässigen Resultate liefert. Es werden Makros erstellt und verschiedene Anwendungen kombiniert. Aber auch trivial erscheinende Fragen wie der Standort der Benutzerhandbücher und die Telefonnummer des Softwareservice sind zu dokumentieren.
- Datenquellen: Wo sind die Eingangsdaten gespeichert, wie sehen die dem Fall entsprechenden Datenbankabfragen aus? Nach welchen Kriterien werden die Treffer bewertet? In welcher Form müssen die Daten gespeichert werden, damit sie der Schnittstelle zur Anwendersoftware entsprechen? Wo werden die Resultate zwischengespeichert, wie weiterverarbeitet und wie endgültig gespeichert? Wenn die notwendigen Daten nicht in der Datenbank gefunden werden, müssen sie ermittelt werden. Dazu stehen wiederum Methoden zur Verfügung. Es schließen sich Hinweise zur praktischen Realisierung der Datenermittlung an.
- Interpretation der Ergebnisse: Dazu sollten Standardwerte und die Ergebnisse vorangegangener Modellierungen zum Vergleich zur Verfügung stehen. Oft können auch Regeln zur Prüfung des Ergebnisses auf Plausibilität angegeben werden. Es werden bewährte und übliche Formen der Ergebnisdarstellung angegeben. Die kritische Bewertung der Ergebnisse legt fest, welche Schlußfolgerungen zulässig sind. Möglicherweise sind weitere Daten zu sammeln oder es muß eine veränderte Aufgabenstellung bearbeitet werden.
- Dokumentation: Der gesamte Prozeß von der Aufgabenstellung bis zur Lösung sollte so detailliert dokumentiert werden, daß er reproduzierbar ist. So kann jede Entscheidung nachvollzogen werden. Aufgaben in der Zuverlässigkeitstechnik sind häufig Trendanalysen. Dafür ist die Gleichbehandlung der zu vergleichenden Einzelfälle von größerer Bedeutung als die im Einzelfall bessere Lösung.

Wie kann nun die Modellbank praktisch realisiert werden? Dafür gibt es zwei Lösungen: Entweder man beschränkt sich auf reine Dokumentation, oder die Modellbank tritt mit Datenbank und Methodenbank in Interaktion.

Die Variante der reinen Dokumentation ist einfacher, sie erfordert keine Schnittstellen zu Daten- und Methodenbank. Die Speicherung kann in einer Datenbank erfolgen oder man nutzt ein Software-Entwicklungswerkzeug für Expertensysteme, mit dem Regeln besonders einfach abgebildet werden können. Da die Benutzung der Modellbank in dieser Variante für Problemlösungen nicht zwingend notwendig ist, erfordert es für den erfahrenen Anwender immer eine zusätzliche Motivation, die Modellbank ständig zu pflegen.

Die Gestaltung der Modellbank mit Schnittstellen zu Fakten- und Methodenbank erfordert einen höheren Programmieraufwand unter Verwendung einer Programmiersprache. Dafür können dann gleichartige Problemfälle schneller bearbeitet werden. Da die Benutzung dieser Modellbank Voraussetzung einer Problemlösung mit dem IPZ ist, erfolgt ihre Aktualisierung automatisch. Somit ist ein Hineindenken in länger zurückliegende Problemlösungen oder die Einarbeitung anderer Mitarbeiter einfacher.

### **3.3.3 Methoden**

Es wird eine große Anzahl an unterschiedlichen Anwendungsprogrammen, die oft auch branchenspezifisch sind, eingesetzt. In folgenden Gebieten werden Computerprogramme verwendet, die direkten Bezug zum Produktzuverlässigkeitsverhalten haben:

- Versuchsplanung und Bearbeitung statistischer Daten (Auflisten, Sortieren, Einordnen, Zensieren);
- Statistische Prüfung von Hypothesen;
- Schätzung der Parameter von Lebensdauerverteilungen;
- Rechnergestützte qualitative Methoden (Bewertungen, FTA, FMEA /61/);
- Betriebsfestigkeitsberechnungen;
- Qualitätskontrolle;
- Systemsimulationsprogramme (Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitsverhalten, Einfluß von Instandhaltungsmaßnahmen, Ersatzteilbedarfsprognose);

- Instandhaltungsmanagementsoftware;
- erweiterte CAD und CAQ-Programme /62/, /63/.

Alle diese Programme können Bestandteil eines IPZ sein. Bei der Planung des IPZ muß festgelegt werden, ob diese Komplexität tatsächlich sinnvoll ist. Beispielsweise werden für die Qualitätskontrolle oft hochentwickelte Systeme eingesetzt, die Teile, Werkstoffe und Prozesse untersuchen. Eine Einbindung und Neustrukturierung ist mit hohem Aufwand verbunden, und nur wenige Informationen sind für den Erfahrungszuwachs außerhalb der Qualitätssicherung selbst von Nutzen. Diese Erkenntnisse (z.B. über robuste Fertigungsmethoden) können auch als Daten in das Element „Wissen“ einfließen, ohne Anwendungen der Qualitätssicherung in die Methodenbank aufzunehmen.

Die Einbeziehung von Versuchsauswertungen, Felddaten und Betriebsfestigkeitsberechnungen erlauben dem Konstrukteur, sich einen umfassenderen Überblick über das Zuverlässigkeitsverhalten zu verschaffen und sollten deshalb notwendiger Bestandteil des IPZ sein.

So ist bei der Planung des IPZ zu untersuchen, wer alles (evtl. partiellen) Zugang zu dem System haben soll, welche zuverlässigkeitsrelevanten Anwendungen wofür eingesetzt werden und welche Schnittstellen genutzt werden können. Ziel ist immer die Verbesserung der Informationsbasis, um begründete Entscheidungen bei der Zuverlässigkeitsgestaltung zu treffen.

Das Zusammenwirken von Modell, Methode und Daten soll ein Beispiel verdeutlichen. Die Aufgabenstellung lautet, die Verteilungsparameter einer Lebensdauerverteilung mehrerer Bauteile mit dem Programm Sysleb 1.0 /64/ zu schätzen. Mit diesem Programm ist die Schätzung der Verteilungsparameter von Normalverteilung, Exponentialverteilung, Weibullverteilung, Weibull-Mischverteilung und logarithmischer Normalverteilung möglich, siehe *Kapitel 2.2.2*.

Das impliziert eine ganze Reihe von Bedingungen. Der Modellhintergrund ist immer die Stochastik. Damit müssen die Eingangsdaten statistische Daten sein. Es muß gewährleistet sein, daß sich die Stichprobe wie die Grundgesamtheit verhält, also repräsentativ ist. Dazu müssen die Elemente zufällig gewählt werden und die Stichprobe muß für eine bestimmte statistische Sicherheit eine Mindestgröße aufweisen. Reparierbare Systeme und zensierte Stichproben sind mit speziellen Methoden zu behandeln.

Das Programm Sysleb 1.0 erlaubt nun die Wahl der Lebensdauervertelung und zusätzlich die Wahl des Schätzverfahrens (Momentenmethode, Regressionsanalyse, Maximum-Likelihood). Damit sind für bestimmte Stichproben über 20 verschiedene Kombinationen möglich, die alle mathematisch korrekte Ergebnisse liefern. Dabei handelt es sich um 5 verschiedene Modelle (Anzahl der implementierten Lebensdauervertelungen).

Die Qualität der Modelle kann mathematisch nicht bestimmt werden. „Eine Einschätzung der Qualität eines Modells, seiner Adäquatheit, ist auf theoretischem Wege mit den Mitteln der Mathematik prinzipiell unmöglich, es wird jedoch immer wieder versucht, z.B. mit den Mitteln der mathematischen Testtheorie. Dabei wird vergessen, daß damit höchstens die plausible Verträglichkeit gewisser Annahmen mit gegebenen Daten unter der angenommenen Gültigkeit anderer Annahmen untersucht wird. Eine sachgerechte Überprüfung ist allein durch die Konfrontation der Ergebnisse der Untersuchung mit den praktischen Ergebnissen möglich.“ BANDEMER in /52/.

Um die Modellfindung zu unterstützen, lassen sich eine ganze Reihe von Hinweisen und Regeln aufstellen. Am Beispiel der Beschreibung des Ausfallverhalten sollen hier einige genannt werden, die auf Erfahrungen beruhen:

- Die Stichprobe sollte zuerst in ein Weibullnetz eingezeichnet werden. Dann lassen sich Ausreißer erkennen. Die Ursachen ihres Auftretens müssen geprüft werden.
- Oft erkennt man das Vorhandensein einer ausfallfreien Zeit, dann sollte die Verteilung (mindestens) dreiparametrisch ausgewertet werden.
- „Glatte“ Verläufe der Punkte lassen sich gut mit dreiparametrischen Verteilungen beschreiben.
- Knicke und Plateaus im gedachten Kurvenverlauf sind ein deutlicher Hinweis auf eine Mischverteilung /16/.
- Die Variation der Schätzungsmethoden beim gleichen Verteilungstyp gibt Hinweise auf die Qualität des Modells. Bei einem praxisadäquaten Modell werden die Schätzungen nahe beieinander liegen, im umgekehrten Fall nicht.

- Eine geringfügige Modifizierung der Stichprobe durch Verschieben, Hinzufügen und Weglassen weniger Werte gibt Hinweise darauf, wie empfindlich das Modell auf Ausreißer reagiert und ob die numerischen Verfahren stabil sind.
- Schließlich sollte der Verlauf verschiedener Schätzungen in interessanten Intervallen bewertet werden. Ist die globale Schätzung auch in verschiedenen Intervallen lokal und tendenziell plausibel? Dabei sind besonders Anfang und Ende zu beachten, aber auch Kurvenverläufe.

Ein erfahrener Anwender wird viele weitere, besonders vom Werkstoff, Bauelement, Stichprobengröße und Ausfallart abhängige Gesetzmäßigkeiten aufstellen können.

Die optimale Anwendung der Software Sysleb 1.0 erfordert bereits einiges Wissen. Nur so können die Entscheidungen zum Modell (Verteilungstyp), zum mathematischen Lösungsverfahren (Schätzverfahren) und zu Parametern der Schätzverfahren und Vertrauensbereiche begründet getroffen werden.

Die Anwenderprogramme stellen Werkzeuge dar, deren Umgang erhebliches Know-how erfordert.

### 3.3.4 Daten

In der **Zuverlässigkeitstechnik** werden nur die Ausfallzeitpunkte in Modellen verarbeitet. Alle anderen Daten dienen nur zur Beschreibung der Umstände des Ausfalls. Es sind keine Werkzeuge bekannt, die den Anwender bei der Bewertung und Interpretation aller anderen Daten unterstützen. Die Belastungs-Belastbarkeits-Modelle nach *Kapitel 2.2.1* haben bisher nur akademische Bedeutung, nicht in der praktischen Zuverlässigkeitsprojektierung. Somit ist es für die Lösung singulärer Problemstellungen hinreichend, die Daten zu erfassen, die den Ausfall beschreiben, siehe *Kapitel 2.2*. Hinzu kommen Daten zur Identifizierung des Falles für den Anwender.

Außer der Beschreibung der Lebensdauern von Produkten werden in einigen Modellen der Zuverlässigkeitstechnik Erweiterungen verarbeitet. So ist bei der Betrachtung reparierbarer Produkte der Ersatz von Bauelementen zu erfassen. Die FMEA bewertet den Ausfall hinsichtlich Entdeckenswahrscheinlichkeit und Bedeutung.

Vereinfacht ausgedrückt müssen für die Lösung einzelner Zuverlässigkeitsprobleme alle Daten erfaßt werden, die als Eingangsdaten und Ausgangsdaten in den verwen-

deten Modellen Verwendung finden sowie die zur Identifizierung für den Einzelanwender notwendigen Daten.

Diese Bedingungen müssen beim Aufbau eines IPZ wesentlich erweitert werden. Mit dem IPZ versuchen andere Anwender, Lösungen für ihre Problemfälle zu finden. Die in der Datenbank gespeicherten Fälle müssen auch für sie aussagekräftig sein, die Übertragbarkeit muß einschätzbar sein. Die Daten zur Belastung und Belastbarkeit müssen theoretisch erlauben, den Fall physisch zu rekonstruieren und die erfaßten Ausfalldaten zu erhalten. Dies wird in der Realität aufgrund großer Unschärfen nicht möglich sein, sollte aber als Ideal angestrebt werden. Wenn die exakte Belastung nicht erfaßt werden kann, gibt die Angabe der Baugruppe, Maschine und Funktion Hinweise auf ihre Größenordnung.

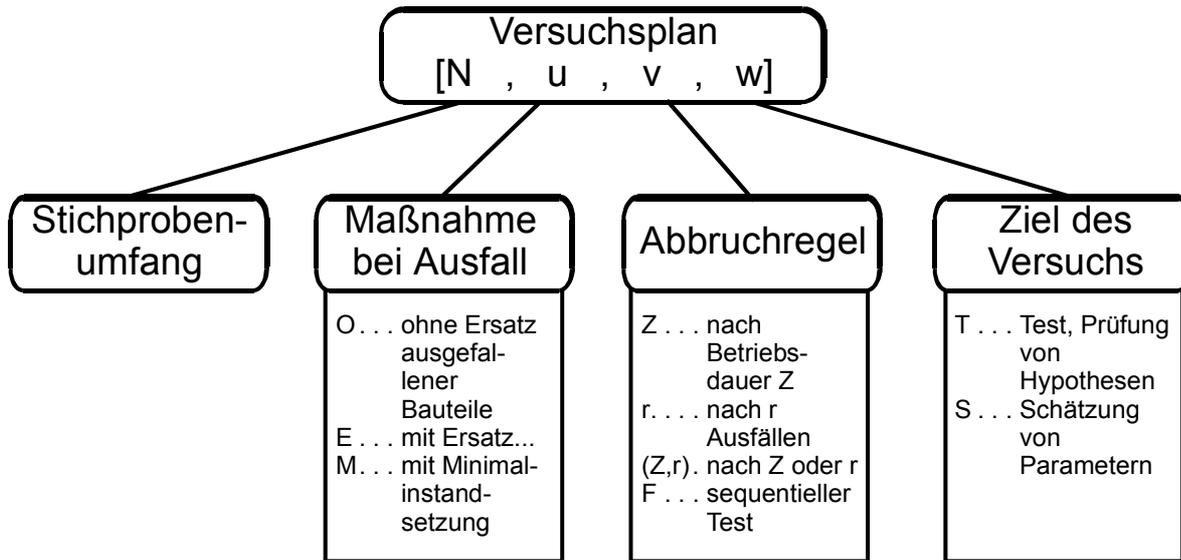
In die Modelle der **Betriebsfestigkeitslehre** fließen die Belastung und Belastbarkeit ein. Am einfachsten ist das am Beispiel der Wöhlerdiagramme zu sehen, wo die Lebensdauer bei einem bestimmten Lastniveau dargestellt wird. Bestandteil des Erfahrungswissens des Konstrukteurs ist es, die Beziehung zwischen der Auslegung eines Bauelementes aufgrund der Betriebsfestigkeitsberechnung (meist duale Logik, ausreichend dimensioniert oder nicht, mit Sicherheitszuschlägen) einerseits und der Kenntnis der Stochastik der Ausfälle andererseits abschätzen zu können.

Die Gewinnung von Daten erfolgt durch Versuche, die empirische Erhebung von Felddaten und Berechnung. Auf die ersten beiden Arten soll näher eingegangen werden.

### **Versuchsdaten**

Zur Ermittlung der Zuverlässigkeit einer Betrachtungseinheit wird deren ausfallfreie Betriebsdauer bestimmt. Um Aussagen über eine bestimmte Grundgesamtheit treffen zu können, werden in der Forschung und Entwicklung Versuchspläne aufgestellt, nach denen die ausfallfreien Betriebsdauern einer zufällig ausgewählten Stichprobe von N Bauteilen ermittelt und statistisch ausgewertet werden. In Abhängigkeit von den Versuchsbedingungen und der Stichprobengröße sind die gewonnenen Aussagen mit einer bestimmten statistischen Sicherheit für die Grundgesamtheit gültig.

Aufgrund der unterschiedlichen Nutzungs- und Testbedingungen werden verschiedene Versuchspläne (nach /65/, /66/) angewandt. Die Versuchspläne können nach einem vierstelligen Kennzeichnungsschlüssel unterteilt werden. In *Abb. 3.7* sind die verschiedenen Parameter der Versuchspläne dargestellt.



**Abb. 3.7** Kennzeichnungsschlüssel der Versuchspläne

Jeder dieser Versuchspläne wird mit unterschiedlichen Verfahren statistisch ausgewertet. Zur statistischen Behandlung der einzelnen Versuchspläne wird an die Spezialliteratur, z.B. /65/, verwiesen. Somit sind auch gleiche Parameter nur vergleichbar, wenn die genauen Entstehungsbedingungen bzw. Versuchspläne bekannt sind.

Hinzu kommt, daß mit der Zuordnung zu einem bestimmten Versuchsplan nicht von einem einheitlichen Verfahren der statistischen Auswertung ausgegangen werden kann. Auch häufig durchgeführte und von den Versuchsbedingungen relativ einfache Versuche, wie z.B. Lebensdauerversuche an Probekörpern auf einem Belastungsprüfstand, werden unterschiedlich ausgewertet.

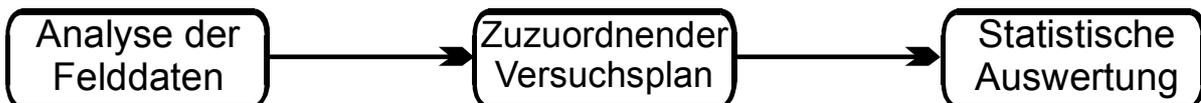
Bereits aufgrund seiner Auswertung weist also das verfügbare Datenmaterial z.B. aus Publikationen erhebliche Unterschiede auf. Da es unmöglich ist, die Quelldaten erneut nach einem einheitlichen Verfahren auszuwerten, gehen diese Unterschiede als Unschärfe in die Datenbank ein. Die Datenbank muß einen Verweis auf die Quelle enthalten.

Zur Unterstützung der Anwender sollte eine Bewertung der Qualität der Quelle im Datensatz enthalten sein. Dazu kann die Vollständigkeit des Datensatzes bewertet werden, die aus der Anzahl und Art der unbekanntenen Werte (NUL-Werte) hervorgeht (bezogen auf das untersuchte Modell).

Weiterhin sollten Bemerkungen zur Korrektheit und Vertrauenswürdigkeit der Quelle möglich sein.

### Felddaten

Die in der Praxis erhobenen, sogenannten Feld- oder betrieblichen Daten müssen im Nachhinein einem Versuchsplan zugeordnet werden, um sie anschließend statistisch auswerten zu können, siehe *Abb. 3.8* (nach /33/).



*Abb. 3.8 Zuordnung zum Versuchsplan*

Dabei hat man es häufig mit zensierten Daten zu tun. BERTSCHE und LECHNER verweisen in /10/ darauf, daß dann von der korrekten Grundgesamtheit ausgegangen werden muß, die Art der Verteilung bekannt sein sollte und gesicherte Kenntnisse über den Ausfallmechanismus in allen Lebensdauerabschnitten vorliegen müssen.

BANDEMÉR betont in /52/, daß die Güte der Daten von besonderer Bedeutung ist. Es müssen die richtigen Daten erfaßt werden, die das Problem tatsächlich beschreiben. Die Daten und der Modellhintergrund stimmen überein, wenn sie in der Form und dem Datentyp vorliegen, wie sie im Modell verarbeitet werden. Die Daten müssen korrekt und frei von Fehlern und Irrtümern sein, und sie sollen die Anforderungen an die Meßgenauigkeit erfüllen.

### 3.3.5 Netzwerkeinbindung

Ein IPZ wird heute typischerweise als verteilte Anwendung konzipiert. Darunter werden Computerprogramme verstanden, die aus verschiedenen Prozessen bestehen, welche auf verschiedenen Rechnern plaziert sind und miteinander über ein Netzwerk kommunizieren /60/.

Folgende Vorteile sind durch die Netzwerklösung möglich (nach /60/):

- Funktionsverbund: Von jedem angeschlossenen Rechner ist die gesamte Funktionalität des IPZ nutzbar, sofern das per Systemadministration zugelassen wird. (Diese Möglichkeit der Begrenzung der Zugriffsrechte gilt für jeden der aufgezählten Vorteile).

- Datenverbund: Es besteht Zugriff auf den gesamten Datenbestand, auch wenn er sich nicht auf dem lokalen Computer befindet. Von jedem Rechner aus kann die Datenbasis unabhängig voneinander erweitert werden.
- Lastverbund: Das Leistungspotential (CPU und Speicher) der angeschlossenen Rechner wird optimal ausgenutzt.

Hinzu kommen Sicherheitsaspekte durch effiziente Backup-Lösungen und die Möglichkeit der Erweiterung oder Reduzierung des Netzwerkes um andere Computer bei Bedarf.

Eine verteilte Anwendung ist Voraussetzung für ein schnelles Wachsen des IPZ bezüglich der implementierten Methoden und des Datenbestandes.

Die Realisierung eines solchen verteilten Systems stellt eine Standardaufgabe der Informatik dar. Die Anforderungen müssen entsprechend spezifiziert werden, ansonsten unterscheiden sich IPZ aber nicht von anderen, vergleichbaren verteilten Systemen. Aus diesem Grund wird auf die Realisierung der Netzwerklösung nicht weiter eingegangen.

### 3.4 Planung der Softwareentwicklung

Der Aufbau eines IPZ ist mit erheblichen Kosten verbunden. Seine konsequente Anwendung hat langfristige Auswirkungen in verschiedenen Unternehmensbereichen. Aus diesen Gründen ist eine sorgfältige Planung des Projektes IPZ notwendig.

Am Anfang der Planung steht meist eine Anforderungsliste. Sie umfaßt drei Bereiche:

- Hauptaufgaben (MUST- unbedingt notwendige Bedingungen/ zu erfüllende Ziele);
- Zur Nutzung notwendig (WANT- erstrebenswerte Bedingungen/ Ziele);
- Die Nutzung erleichternd (NICE- wünschenswert).

Für das beispielhaft entwickelte □IPZ wurde eine Anforderungsliste aufgestellt.

#### ○ MUST

Hauptaufgabe des IPZ ist die Speicherung und Abfrage von Belastungs-, Belastbarkeits- und Ausfalldaten. Unbedingt müssen auch die jeweiligen Quellenangaben erfaßt werden.

### ○ WANT

Notwendiger Bestandteil des IPZ sind Schnittstellen zu einem Systemsimulationsprogramm (Modellbank) und dem Statistikprogramm „Sysleb“. Die Bewertung der Qualität der Daten soll möglich sein, anwenderfreundliche Suchfunktionen und vorgegebene und individuelle Ausgaben auf Monitor und Drucker gehören zum gewünschten Leistungsumfang. In einer Literaturdatenbank mit der Möglichkeit der Suche nach Stichworten wird das „Wissen“ gespeichert.

### ○ NICE

Folgende Funktionen würden die Arbeit mit dem IPZ erleichtern: eine Modellbank (Unterstützung und Protokoll der Verknüpfung von Daten mit Programmen der Methodenbank), die Qualitätskontrolle bei der Dateneingabe, die Speicherung von Grafikdaten (Gestaltungslösungen), Schnittstellen zu Programmen zur Betriebsfestigkeitsberechnung von Bauteilen, komfortable Hilfe und Oberfläche.

Diese Anforderungsliste ist natürlich von der jeweiligen Situation abhängig. So sind in großen Unternehmen die Datensicherheit, die Gestaltung eines Multiusersystems und professionelles Netzmanagement sicher von entscheidender Bedeutung, zur Vermarktung von Resultaten der Informationsrecherche benötigt man Software zur Berechnung der Vergütung. Auch der Export und Import bestimmter Datenformate und Schnittstellen zu Bereichen wie CAD, FMEA, FTA, BDE (Betriebsdatenerfassungssystem) und Instandhaltungsmanagementsystem werden jeweils unterschiedliches Gewicht besitzen.

Aus der Anforderungsliste werden als Standardmethode in der Industrie Pflichtenheft und Lastenheft entwickelt. Sie dienen in erster Linie

- zur Zielfestlegung/ Definition der Aufgabe;
- als verbindliche Arbeitsgrundlage für alle Beteiligten.

Im Lastenheft sind detailliert alle Spezifikationen des zu entwickelnden IPZ aufgezählt. Das umfaßt die Funktionalität, alle zu speichernden Daten und die Schnittstellen zu den Anwenderprogrammen.

Bestandteil der Planungen eines IPZ sind auch Kostenschätzungen. Dabei übersteigen die Aufwendungen zur Pflege des Datenbestandes und der Software regelmäßig die ursprünglichen Investitionen.

## 4 Datenbankdesign

Mit einer Datenbank werden Daten über die reale Welt gesammelt. Dabei soll die Struktur der Daten ein korrektes Modell des gewählten Teilausschnittes der Realität darstellen. Eine Datenbank für die Zuverlässigkeit von Maschinen muß alle Daten und Randbedingungen zur Projektierung, Überprüfung und Überwachung der Lebensdauer von Bauteilen und Systemen enthalten. Es existiert umfangreiche Literatur, die für das Datenbankdesign genutzt werden kann.

### 4.1 Datenanalyse

Die Datenanalyse<sup>1</sup> dient dazu, die für das Informationssystem notwendigen Daten, deren Beziehungen und die zu erwartende Datenmenge zu erfassen /67/.

Der erste Schritt umfaßt eine verbale Beschreibung des Auftrages mit Zielsetzung und eine Liste der relevanten Informationssachverhalte. Ausgangspunkt ist die Menge der gespeicherten Daten, die zukünftig im Informationssystem gehalten werden sollen. Sie werden ergänzt um alle Daten, die nach der Einführung des IPZ notwendig werden. Das sind Daten, die von den Anwendern abgefragt werden sollen und solche, die in bestimmten Anwendungen wie Systemsimulationsprogrammen weiterverarbeitet werden. Diese Ergebnisse sollen möglicherweise wiederum in der Datenbank gespeichert werden.

Die Daten und ihre Zusammenhänge sollen verbal beschrieben werden. Typische Beispiele der Anwender erleichtern die Arbeit.

Im nächsten Schritt werden die Daten und ihre Beziehungen systematisch graphisch dargestellt. Das entstehende Datenmodell muß nun immer weiter verfeinert werden. Dazu ist ein enger Dialog der Informatiker mit den Anwendern notwendig. Dabei

<sup>1</sup> In der Mathematik versteht man unter Datenanalyse die Untersuchung und Bewertung der **gegebenen** Daten, das Ziehen von Schlußfolgerungen aus diesen Daten und die Bewertung dieser Schlußfolgerungen /42/. In dieser Arbeit wird der Begriff „Datenanalyse“ im mathematischen Sinne nicht verwendet.

müssen die formalisierten Beziehungen zwischen den Daten immer wieder verbal ausgedrückt und überprüft werden. Durch das methodische Vorgehen werden „vergessene“ Beziehungen und Daten offensichtlich und Redundanzen, Überschneidungen und Möglichkeiten der Zusammenfassung und Vereinfachung können erkannt werden.

Eine weit verbreitete Möglichkeit zur grafischen Darstellung eines Datenmodells wird im Kapitel 4.3 dargestellt.

Von vielen Ergebnissen der Datenanalyse wie von den zu erwartenden Datenmengen, den Anforderungen an Netzwerknutzung und Schnittstellen sind jedoch auch die Entscheidungen über Hard- und Software abhängig.

## **4.2 Anforderungen an Hard- und Software**

Ein Datenbankmanagementsystem DBMS ist eine Software, die Daten nach integrierten Regeln und Anforderungen verwalten kann. Eine Vielzahl von Werkzeugen erlaubt komfortables und effizientes Arbeiten, so daß die Datenspeicherung in Dateien, die von einer Programmiersprache aus angesprochen werden, heute wohl nur in seltenen Fällen eine Alternative zu ihrer Anwendung darstellen.

Die Grundentscheidung zur Auswahl eines DBMS beinhaltet drei Bereiche:

- Hardware;
- Betriebssystem;
- welches DBMS-Produkt.

### **4.2.1 Hardware und Betriebssystem**

Noch vor wenigen Jahren waren diese Entscheidungen für Hardware und Betriebssystem mit dem DBMS so eng verknüpft, daß Kriterien zur Auswahl des DBMS allein ausreichen, um alles andere festzulegen.

Mittlerweile ist jedoch eine andere Tendenz zu sehen. Zwischen PC und Workstation besteht nur noch ein geringer Leistungsunterschied. Auf PC's sind leistungsfähige UNIX-Betriebssysteme lauffähig (z.B. „Linux“, „NextStep3.3“, „Solaris2.4“ und „SCO Open Server3.0“ /68/) und damit auch die entsprechenden DBMS, sofern sie nicht sowieso bereits nach PC-typischen Plattformen wie „DOS/Windows“, „WindowsNT“ und „OS/2“ portiert wurden. Auch die Nutzung von Netzwerken ist nicht

mehr länger den Workstations vorbehalten. Hinzu kommt, daß immer leistungsfähigere und komfortablere DBMS für PC verfügbar sind. Und die können wiederum über emulierte Betriebssysteme auch auf UNIX-Workstations laufen.

Es ergibt sich also eine unüberschaubare Vielfalt der Kombinationsmöglichkeiten, die eine große Anzahl an konkreten Produkten noch potenziert. SAUER /69/ gibt 1992 an, daß sich ca. 150 Datenbanksysteme auf dem Markt befinden. Die Frage nach der Hardware und dem Betriebssystem ist vergleichsweise untergeordnet und wird sich nach den betrieblichen Gegebenheiten richten.

#### 4.2.2 Arten der Datenbankmanagementsysteme

Die DBMS werden unterschieden

- nach dem Datenmodell (mögliche Struktur der Daten) in:

- Hierarchische DBMS;
- Relationale DBMS (RDBMS);
- Objektorientierte DBMS (ODBMS);

- nach der Netzwerkfähigkeit in:

- Verteilte DBMS (VDBMS);
- Nichtverteilte DBMS.

Weiterhin existiert eine ganze Reihe von Zwischenstufen, Erweiterungen und Sonderfällen, siehe /70/.

Ein Grundbegriff der DBMS ist die Relation, eine zweidimensionale Tabelle. Die Spaltenbezeichnungen entsprechen den Attributen, die Spaltenwerte den Attributwerten (oder „Datum“) und die einzelnen Zeilen den Datensätzen.

Die veralteten und heute kaum mehr gebräuchlichen **Hierarchischen DBMS** speichern Daten zu einem Sachverhalt in *einer* Relation. Deshalb enthalten Datensätze, die sich nur geringfügig unterscheiden, bei vielen Attributen den gleichen Wert und sind damit redundant. Das bedeutet einen hohen Aufwand für die Dateneingabe und eine permanente Fehlergefahr, da ein Schreibfehler oder eine nur an einem Datensatz vorgenommene Aktualisierung zur Inkonsistenz führt. Die in verschiedenen Relationen gespeicherten Daten können nicht verknüpft werden.

Mit dem **RDBMS** ist es möglich, bestimmte Klassen von Daten (z.B. die Belastungsdaten und die Identifikationsdaten von Zuverlässigkeitsversuchen) in eigenen Relationen zu speichern und diese über Schlüssel miteinander zu verknüpfen. Ein Attribut (oder eine Attributkombination) ist Primärschlüssel einer Relation, wenn sein Wert eine eindeutige Identifikation eines Datensatzes erlaubt. Dieses Attribut erscheint dann als Fremdschlüssel in der anderen Relation und erlaubt so die eindeutige Zuordnung.

Dies ist nur der einfache Ansatz, auf dem komplexe Softwareprodukte aufbauen. In /69/ findet man 12 Regeln zur Bestimmung der Rationalität eines DBMS, basierend auf den Veröffentlichungen von E.F.CODD. Anhand dieser Regeln kann man die Qualität eines RDBMS beurteilen. RDBMS sind die heute verbreitetsten und ausgereiftesten DBMS.

Die **ODBMS** folgen dem Trend in den Programmiersprachen zur objektorientierten Programmierung. Die ODBMS haben gegenüber den RDBMS viele Vorteile, gerade im Zusammenspiel mit objektorientierter Programmierung und den daraus entstehenden Anwendungsprogrammen, siehe /70/. Sie befinden sich aber noch in der Entwicklung.

Die **VDBMS** (oder „dezentralen Datenbanken“) unterscheiden sich von den nicht-verteilten dadurch, daß „...sie zwar durch ein einziges logisches Datenbankschema beschrieben, aber durch mehrere physische Tabellenfragmente auf örtlich verteilten Rechnern gehalten werden“, MEIER /67/. An ein solches Konzept wird wiederum ein umfangreicher Anforderungskatalog gestellt, siehe die 12 Regeln für VDBMS nach C.J. DATE in /69/. Einige aktuelle DBMS erfüllen diese Anforderungen zumindest teilweise. Diese Datenbanken können moderne Netzwerke und Hardwarestrukturen besser nutzen, sie werden dezentralen Organisationsformen in der Wirtschaft am besten gerecht.

#### 4.2.3 Methodik der Auswahl

SAUER stellt in /69/ eine umfangreiche Methodik zur DBMS-Auswahl vor. Sie soll im weiteren kurz umrissen werden.

Die Auswahl des DBMS erfolgt aufgrund der systematischen Einschätzungen der DBMS nach einem zuvor aufgestellten Katalog von Kriterien. Es gibt drei Kategorien von Kriterien:

- K.O.-Kriterien;
- Strategische Kriterien;
- Technische Kriterien.

Die technischen Kriterien (144 Einzelfragen) werden am besten in Form einer Tabelle beurteilt, *Abb. 4.1*.

Nr.	Kriterium	W	P1	P1	P2	P2	P3	P3
				*	*	*		
				W		W		W
1	Flexibilität der Anwendungsentwicklung und -wartung							
1.1	Erfüllung der 12 Anforderungsregelungen für RDBMS							
1.2	Datenmanipulationssprache/ -werkzeuge							
1.3	Datendefinitionssprache							
1.4	Integration der SW-Produkte							
1.5	Physische Begrenzung des DBMS							
2	Netzwerkfähigkeit							
2.1	Netzwerk							
2.2	VDBMS							
3	Datensicherheit							
	...							
4	Datenschutz							
	...							
5	Betriebsführung							
	...							
6	Herstellerunterstützung							
7	Endbenutzertools							
	SUMME							

W... Wichtung

P1... Punktzahl für DBMS1

P\*W... Erfüllungsgrad

**Abb. 4.1** Beurteilung der DBMS nach technischen Kriterien

Die Aufnahme der Kriterien in die Tabelle und ihre Wichtung erfolgt nach den individuellen Anforderungen des Anwenders. K.O.-Kriterien (möglichst wenige!) können sein:

- Hardware und Betriebssystemunterstützung (s. *Abschnitt 4.2.1*);
- Kostenvorgaben;
- Verbreitung des DBMS.

Die strategischen Kriterien (es werden 35 aufgeführt) sind solche, die sich nicht mit ja oder nein oder einer vergleichbaren Wertung beantworten lassen. Dazu zählen Fragen der Marktrepräsentanz des DBMS-Hersteller, Hardware-Voraussetzungen, Weiterentwicklung des DBMS und Preisvergleiche inklusive Schulungen und Service.

### 4.3 Aufbau des Zuverlässigkeitsdatenmodells

Bei der Erstellung einer Datenbank muß nach SCHMIDT /70/ zuerst ein Modell des Ausschnitts der realen Welt geschaffen werden („konzeptioneller Entwurf“), anschließend dieses Modell in das relationale Schema („logischer Entwurf“) und danach in die Sprache des DBMS umgesetzt werden („physischer Entwurf“).

Für die Datenmodellierung hat sich die Anwendung von Entity-Relationship-Diagrammen (ER-Diagramme) durchgesetzt /59/, /60/, /69/, /67/.

Die in der Literatur beschriebenen ER-Diagramme stimmen in ihren Grundeigenschaften überein. Sie unterscheiden sich aber in vielen Einzelheiten. Daraus folgen dann auch unterschiedliche Regeln zur Überführung in das Datenbankschema. Eines der Modelle wird in folgenden dargestellt:

Die ER-Diagramme sind grafische Darstellungen und aufgrund der einfachen Grundregeln sehr anschaulich. Ein Gegenstand (engl. entity) ist reales oder virtuelles Objekt, das mit anderen vom gleichen Typ (entity type) in einer Menge oder Klasse (entity set) zusammengefaßt wird. Ein Objekt wird durch Merkmale (attribute) charakterisiert. Zwischen Objekten verschiedenen Typs existieren Beziehungen (relationship), die wiederum zu Klassen zusammengefaßt werden können (relationship type).

Der Schlüssel (key) ist das Merkmal oder die Merkmalskombination, mit der ein Objekt eindeutig identifiziert werden kann. Diese Merkmale werden unterstrichen.

Die einzelnen Elemente der ER-Diagramme werden mit unterschiedlichen geometrischen Symbolen gezeichnet. So entsprechen

- Gegenstandsmenge (entity set): Rechteck;
- Beziehungsmenge (relationship set): Raute;
- Merkmal (attribute): Ellipse.

An den Verbindungslinien zwischen den Rauten und Rechtecken wird weiterhin die Mindest- und Höchst kardinalität in der Form  $\langle g_{\min}; g_{\max} \rangle$  angegeben. Sie kennzeichnet, wie oft ein Objekt jeweils in seinen Beziehungen minimal auftreten muß und maximal vorkommen kann. Eine nach oben offene Kardinalität (degree) wird mit „\*“ bezeichnet.

Am einfachsten läßt sich das ER-Diagramm an einem Beispiel erläutern, *Abb. 4.2*. Der Einfachheit halber sind jeweils nur wenige Attribute dargestellt (sie werden zum Teil bei der Darstellung ganz vernachlässigt).

Das Diagramm wird wie folgt gelesen: Maschinenelement wird die Einteilung von Bauelementen nach physischen Merkmalen genannt, z.B. Wälzlager, Welle, Zahnrad. Ein Bauelement gehört zu genau einem Typ „Maschinenelement“. Ein Bauteil besitzt eine bestimmte Belastbarkeit, doch können auch verschiedenen Bauelemente der gleichen Belastbarkeit zugeordnet werden, z.B. Teile verschiedener Zulieferer. Ein Versuch ist ein Bauelement unter einer Belastung und einer Belastbarkeit. Es kann die gleiche Belastung unter verschiedenen Belastbarkeiten oder Bauelementen auftreten. Analog gilt das für die Belastbarkeit. Ein ganz bestimmtes Ausfallverhalten ergibt sich nur bei einer einzigen Belastungs- Belastbarkeitskombination (hier ist auch  $\langle 1; * \rangle$  vorstellbar).

Um der Forderung nach Schlüsselmerkmalen nachzukommen, ist es oft hilfreich, eine Schlüsselnummer zu definieren („ID“). An der Art der Merkmale wird die starke Vereinfachung deutlich: um eine Faktendatenbank zu erstellen, muß z.B. „Geometrie“ so weit spezifiziert werden, daß ganz konkrete Zahlenwerte, die natürlich für unterschiedliche Maschinenelemente ganz andere Merkmale charakterisieren, in der Datenbank in extra Feldern gespeichert werden.

Ein reales Objekt kann in mehreren Gegenstandstypen auftreten. Vielfach ist zu entscheiden, ob eine Eigenschaft als Merkmal oder als eigener Gegenstandstyp behandelt wird. Für den Gegenstandstyp entscheidet man sich, wenn Abfragen zu dieser

Eigenschaft explizit geplant sind und wenn eigenständige Beziehungen eingegangen werden.

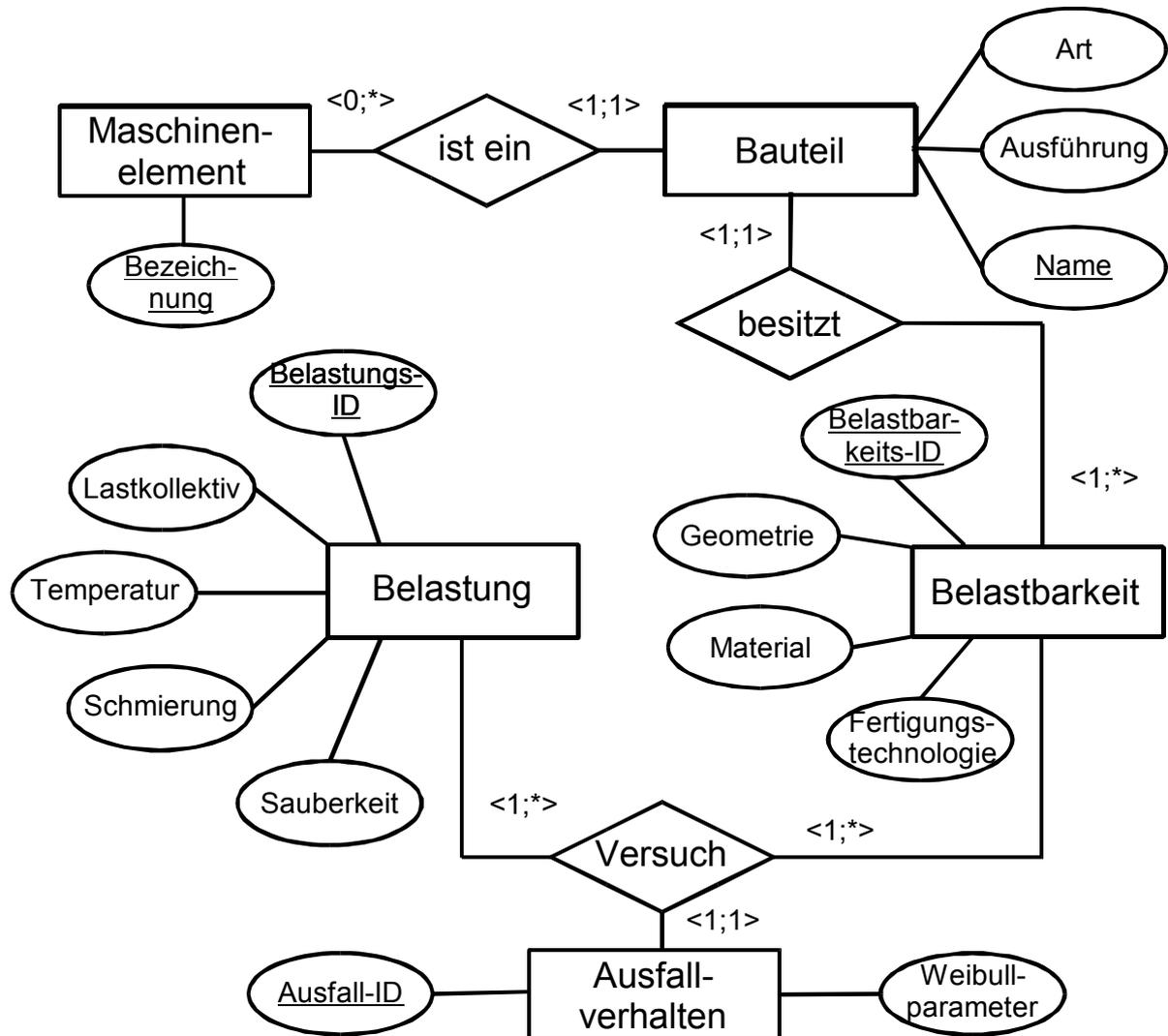


Abb. 4.2 Entity-Relationship-Diagramm

Werden Attribute verschiedener Gegenstandstypen zusammengefaßt und damit Attribute eines neuen Gegenstandstyps, so heißt dieser Prozeß Generalisierung. Die an der Generalisierung beteiligten Gegenstandstypen verbindet die Beziehung „ist ein“, man spricht auch von Vererbungssemantik.

Die Aufspaltung in Teile heißt Aggregation. Dazu werden neue Gegenstandstypen gebildet und über Beziehungen miteinander verbunden.

## 4.4 Relationales Datenbankschema

Für das Überführen des ER-Diagramms in ein Datenbankschema existieren Regeln, die diese Arbeit erleichtern. Dabei wurde das relationale Datenbankschema aufgrund seiner weiten Verbreitung und der ausgereiften Softwareprodukte verwendet. Das ER-Diagramm kann jedoch auch Grundlage für die Überführung in ein anderes Datenbankschema sein /67/.

Das relationale Datenbankschema wird anschließend überarbeitet. Dazu hat sich die Überführung in „Normalformen“ bewährt. Das sind Regeln, die aufgestellt wurden, um die Datenbank immer in weitgehender Übereinstimmung mit der Realität zu halten (Konsistenz), ungeachtet vielfältiger Veränderungen ihrer Struktur und Datenbasis.

### 4.4.1 Entwurf

Das relationale Datenbankschema besitzt andere Strukturelemente als ein ER-Diagramm. Es besteht aus Relationen mit jeweils dem Relationsnamen, den Attributen mit ihrem Wertebereich und der Kennzeichnung der Schlüsselattribute. Die Überführung eines ER-Diagramms in ein relationales Datenbankschema ist also keine eindeutige Abbildung, sondern ein kreativer Prozeß. Die in *Abb. 4.3* dargestellten Regeln unterstützen diesen. Sie sind gültig für die Beziehungsmenge  $B$  zwischen den Relationen  $G_1$  und  $G_2$ , die Relationen werden entsprechend mit  $R_B$ ,  $R_{G_1}$  und  $R_{G_2}$  bezeichnet.

In der Literatur werden oft „Rollen“ verwendet, wenn zwischen einer Gegenstandsmenge und einer Beziehungsmenge mehrere Verbindungen zugelassen werden. Auf diese Rollen kann verzichtet werden, wenn man nur höchstens eine Verbindung zuläßt. Weiterhin sollten nur Verbindungen zwischen Gegenstandsmengen und Beziehungsmengen zugelassen werden. Merkmale werden nur Gegenstandsmengen zugeordnet.

Die Relationen so zu gestalten, daß keine NUL-Werte zugelassen werden, hat den Vorteil, daß Abfragen der Datenbank wesentlich vereinfacht werden. Die Kardinalitäten können nur teilweise durch die Struktur der Datenbank abgebildet werden. Darüber hinaus sind sie durch Konsistenzbedingungen festzulegen /60/.

No.			Relationales Schema
1	<1;1>	<1;1>	eine Relation mit allen Attributen
2 a	<1;1>	<0;1>	eine Relation, NUL-Werte zugelassen
2 b			zwei Relationen $R_{G1}$ und $R_{G2}$ ; in $R_{G2}$ ist Schlüssel von $R_{G1}$ als Fremdschlüssel enthalten
3 a	<0;1>	<0;1>	eine Relation, NUL-Werte zugelassen
3 b			zwei Relationen $R_{G1}$ und $R_{G2}$ ; mit 1 Fremdschlüssel (entweder $R_{G1}$ oder $R_{G2}$ ) und dort zugelassenen NUL-Werten
3 c			drei Relationen $R_{G1}$ , $R_{G2}$ und $R_B$ , $R_B$ enthält $R_{G1}$ , $R_{G2}$ als Fremdschlüssel
4	<1;*>	<1;1>	zwei Relationen $R_{G1}$ und $R_{G2}$ ; in $R_{G1}$ ist Schlüssel von $R_{G2}$ als Fremdschlüssel enthalten
5	<0;*>	<0;*>	wie 3c

**Abb. 4.3** Rationales Datenbankschema in Abhängigkeit von den Kardinalitäten des ER-Diagramms

In die entstehenden Relationen werden sämtliche Merkmale der Gegenstandsmengen als Attribute aufgenommen. Als Schlüssel der Relation wird ein Attribut oder eine Attributkombination ausgewählt, die einen Datensatz eindeutig identifiziert. So können keine zwei gleichen Datensätze in einer Relation enthalten sein. Attributkombinationen müssen außerdem minimal sein, d.h. keines der am Schlüssel beteiligten Attribute darf weggelassen werden können, ohne daß die Eindeutigkeit verloren geht.

#### 4.4.2 Verfeinerung und Überarbeitung

Eine Grundforderung der Strukturierung von Relationen besteht darin, für Attribute nur atomare Werte zuzulassen. Andernfalls sind selbst elementare Funktionen wie Such- und Sortierfunktionen kaum durchführbar, die Feldgröße ist kaum zu beschränken. Diese Forderung wird als „Erste Normalform“ bezeichnet.

Weitere Normalformen werden beschrieben in /60/, /69/, /67/, um Redundanzen und bestimmte Abhängigkeiten von Attributen zu vermeiden. Nicht in Normalform befindliche Strukturen führen zu hohem Aufwand der Datenpflege und der Notwendigkeit, bei Änderungen über Zusatzinformationen zu verfügen. Die Änderung eines Datums muß dann an mehreren Stellen der Datenbank vorgenommen werden. Damit besteht die Gefahr der Inkonsistenz durch Schreibfehler. Punktuelle Änderungen können Änderungen an anderen Daten nach sich ziehen und machen Umstrukturierungen notwendig. Andernfalls gehen bestimmte Informationen unerwünscht verloren.

Ziel der Normalisierung ist es, daß die einzige und stets vorhandene Abhängigkeit die der Nichtschlüsselattribute vom Schlüssel ist.

Dabei werden die ursprünglichen Relationen immer weiter aufgespaltet, wobei vermieden werden muß, daß die entstehenden Relationen mehr (in der Realität nicht vorhandene Beziehungen) oder weniger Informationen enthalten, als tatsächlich vorhanden sind. Alle Informationen sollen in Relationen dargestellt werden.

Das bis zu sechstufige Verfahren führt zu einer großen Anzahl von verknüpften Relationen. Da bei allen an einer Abfrage beteiligten Relationen der Relationsname, das Attribut und die Bedingung genannt und gesucht werden müssen und somit die Zerlegung zurückführen, führt das zu komplizierten und verlangsamten Abfragen. Aus diesem Grund weisen LOCKEMANN /60/ und SAUER /69/ auf die Grenzen der Anwendung der Normalisierungstheorie hin.

## 5 Vorstellung eines realisierten Informationssystems Zuverlässigkeitsprojektierung □IPZ

Neben den methodischen Betrachtungen wurde als Prototyp ein Informationssystem Zuverlässigkeitsprojektierung praktisch umgesetzt. Es wird im folgenden zur Unterscheidung als □IPZ bezeichnet.

Bestandteil des □IPZ sind ein Systemsimulationsprogramm und eine Datenbank. Die realisierte Datenbank Zuverlässigkeitsprojektierung wird analog als □DAZU bezeichnet. Sie enthält Zuverlässigkeitsdaten von Bauelementen. Die Datenbank ist über eine Schnittstelle mit dem Systemsimulationsprogramm verbunden. Dadurch kann sowohl das Zuverlässigkeitsverhalten der Einzelteile unter einer bestimmten Instandhaltungsstrategie prognostiziert werden als auch das Verhalten einer Serienstruktur von Bauelementen.

### 5.1 Systemsimulationsprogramm ROSS

Die Modellierung des Zuverlässigkeitsverhaltens von Produkten während eines Nutzungsprozesses, der die vielfältigen in der Praxis auftretenden Einflüsse realitätsnah einbezieht, ist der Gegenstand umfangreicher Forschungstätigkeiten. Damit entstehen Werkzeuge zur Prognose von Ausfallhäufigkeiten, des Ersatzteilbedarfs, der Optimierung der Instandhaltung. Sie können von der Projektierung bis zur Planung des Produktrecycling eingesetzt werden. Eines dieser Programme ist das Systemsimulationsprogramm ROSS (**R**eliability of **S**erviceable **S**ystems). Die theoretischen Grundlagen und eine Applikation auf der Workstation erarbeitete Wu /31/. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Programm ROSS in das □IPZ eingebunden. ROSS ist ein Programm, das es ermöglicht, vielfältige Einflüsse auf die Nutzung reparierbarer Systeme zu modellieren. In *Abb. 5.1* sind die Ein- und Ausgangsparameter dargestellt. Die unter „realisiert“ genannten Größen sind im geschaffenen Prototypen implementiert, die unter „geplant“ genannten erfordern eine Erweiterung.

	Eingangsdaten ROSS	Ausgangsdaten ROSS
realisiert	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Parameter der dreiparametrischen Weibullverteilung aller „n“ Bauelemente</li> <li>○ relative Betriebsgrenze</li> <li>○ Instandhaltungsstrategie</li> <li>○ Intervalle der zeit- und zustandsbezogenen Instandhaltung</li> <li>○ Verkaufsfunktion des Systems</li> <li>○ Verschrottungsfunktion des Systems</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Ausfallhäufigkeiten</li> <li>○ Häufigkeiten des vorbeugenden Austausches</li> <li>○ Ersatzteilbedarf</li> <li>○ simulierte mittlere Bauteillebensdauer</li> </ul>
geplant	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Instandhaltungszeiten</li> <li>○ Instandhaltungskosten</li> <li>○ Wirkung der Belastungsänderung</li> <li>○ Wechselwirkung zwischen Bauteilen</li> <li>○ Strategieänderung während der Systemnutzung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Verfügbarkeit des Systems</li> <li>○ Kostenentwicklung</li> </ul>

**Abb. 5.1** Ein- und Ausgangsdaten des Programms ROSS

Die Simulation basiert auf den statistischen Lebensdauerverteilungen der Bauelemente und den Instandhaltungsparametern. Es kann der Nutzungsprozeß von einzelnen Bauelementen berechnet werden. Die Ergebnisse werden in der Datenbank gespeichert. Sind die Ausfallverläufe aller an einem Seriensystem beteiligten Bauelemente berechnet, werden sie zur Bestimmung des System-Ausfallverhaltens und der Anteile der beteiligten Elemente an ROSS übergeben. Somit sind Schätzungen des Systemverhaltens in einer frühen Entwicklungsphase möglich, die sich mit genaueren Daten aus der Bauteil- und Baugruppenerprobung und späteren Felderfahrungen immer weiter verbessern lassen.

Mit der Verkaufsfunktion und der Verschrottungsfunktion kann eine sich über der Zeit verändernde Population von Maschinen beschrieben werden. Damit ist eine technisch begründete Prognose des Ersatzteilbedarfs während der veränderlichen

Produktion einer Maschine möglich. Die Altersstruktur der insgesamt genutzten Maschinen hat also direkten Einfluß auf das Simulationsergebnis.

Es ist eine differenzierte Betrachtung unterschiedlicher Instandsetzungsmethoden möglich, *Abb. 5.2*. Für jedes Bauelement kann unter 6 verschiedenen Instandsetzungsmethoden gewählt werden. Nach der Wahl der Methode müssen dann noch die jeweiligen Parameter eingegeben werden.

Instandhaltungsmethode	Termin	Maßnahme
schadensbezogene Instandhaltung	nach Ausfall	Ersatz
zeitbezogene Instandsetzung I	nach Betriebsdauer der Bauteile	Austausch unabhängig vom Zustand
zeitbezogene Instandsetzung II	nach Betriebsdauer der Maschine	Austausch unabhängig vom Zustand
zustandsbezogene Instandsetzung I	nach Betriebsdauer der Bauteile	Austausch abhängig vom Zustand
zustandsbezogene Instandsetzung II	nach Betriebsdauer der Maschine	Austausch abhängig vom Zustand
zustandsbezogene Instandsetzung nach permanenter Diagnose	ständige Überwachung des Zustandes der Bauteile	Austausch abhängig vom Zustand

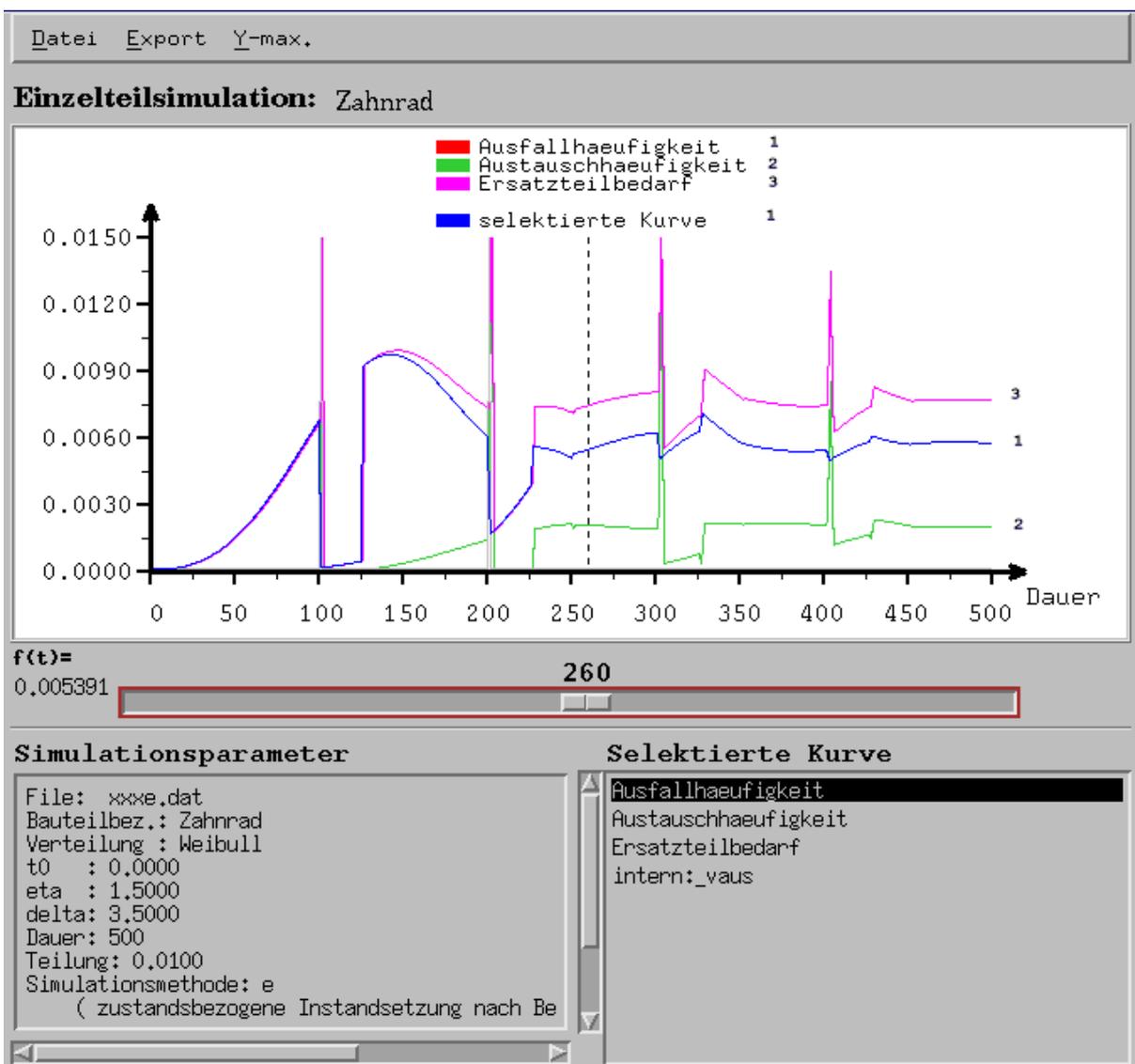
*Abb. 5.2 Betrachtete Instandhaltungsmethoden im Programm ROSS*

Bei der schadensbezogenen Instandsetzung wird das Bauteil bis zum Ausfall genutzt. Nach seinem Ausfall wird es ausgetauscht. Diese Methode wird auch als Ausfallinstandsetzung bezeichnet. Alle anderen Methoden beschreiben Varianten der vorbeugenden Instandhaltung.

Bei der zeitbezogenen Instandhaltung werden die Instandhaltungsmaßnahmen zu planmäßig festgesetzten Terminen durchgeführt. Unabhängig vom Schädigungszustand der Bauteile erfolgt ihr Austausch. Das kommt in der Praxis dann vor, wenn eine sichere Diagnose entweder nicht möglich ist oder einen unverhältnismäßig hohen Aufwand bedeuten würde. Bei der zustandsbezogenen Instandhaltung wird das Bauteil zu einem planmäßig festgelegten Termin auf seinen Zustand überprüft. Der Termin wird entweder auf die Betriebsdauer der Maschine bezogen oder auf die Betriebsdauer des Bauteils. Eine weitere Variante ist die permanente Zustandsüberwa-

chung durch entsprechende Diagnoseeinrichtungen. Bei der zustandsbezogenen Instandhaltung werden die Bauteile nur ausgetauscht, wenn ein bestimmter Abnutzungsgrenzzustand überschritten wird. Die Änderung der Instandhaltungsmethode oder auch schon der jeweiligen Termine und Abnutzungsgrenzzustände hat unmittelbaren Einfluß auf das Zuverlässigkeitsverhalten. Andererseits ändert sich auch der Instandhaltungsaufwand für die Maßnahmen. Da die Simulationsmethoden genau die anteiligen Wahrscheinlichkeiten aller Parameter während des gesamten Prozesses widerspiegeln, wird bei großen Stichproben und genauen Daten das Zuverlässigkeitsverhalten exakt wiedergespiegelt /31/.

Ein Beispiel der Kurven von Ausfallhäufigkeit, Austauschhäufigkeit und Ersatzteilbedarf zeigt *Abb. 5.3*.



**Abb. 5.3** Simulation des Zuverlässigkeitsverhaltens eines Bauelements mit ROSS

Die farbige Darstellung am Bildschirm erlaubt eine deutliche Unterscheidung der Linien.

Alle Eingangsdaten des Simulationsprogramms werden in der Datenbank □DAZU gespeichert. Die Programmsteuerung erfolgt mit dem gleichen Programm wie zur Bedienung der Datenbank. Die Datenübergabe erfolgt über eine ASCII-Datei. Und die Simulationsergebnisse können wiederum in der Datenbank gespeichert werden.

Bei der Systemsimulation erfolgt zuerst die Simulation aller Bauelemente. Anschließend wird aus den Einzelergebnissen das Systemausfallverhalten berechnet.

## 5.2 Datenbank □DAZU

Der Aufbau der Datenbank Zuverlässigkeitsprojektierung □DAZU erfolgt auf der Grundlage des RDBMS „Ingres“ inklusive der Windows4gl-Umgebung unter dem Betriebssystem DEC OSF/1 AXP auf einer Workstation DEC 3000-300AXP.

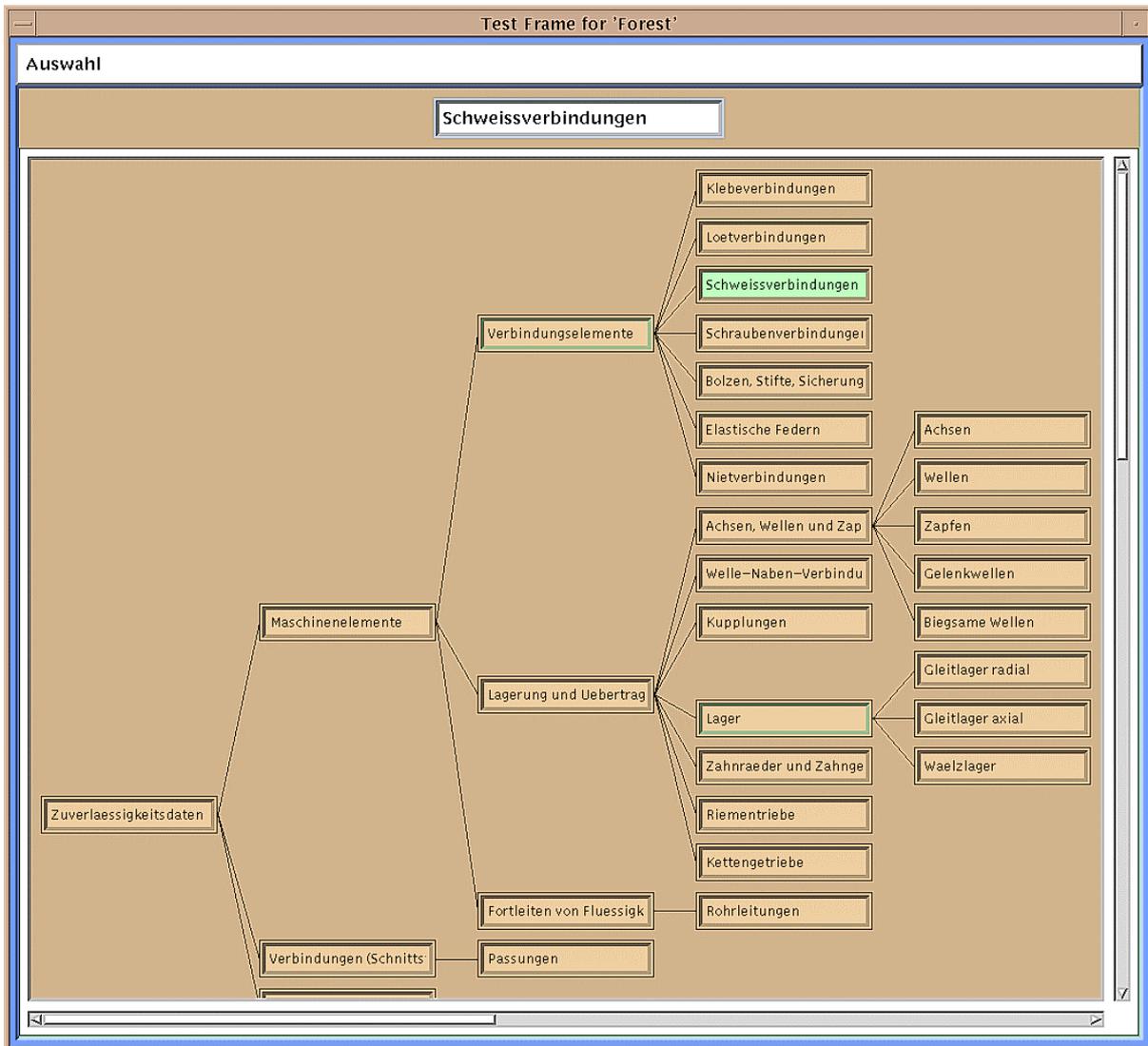
Zielstellung war es, am praktischen Beispiel die erarbeitete Methodik des Aufbaus eines IPZ durchzuführen und zu überprüfen. Dazu mußte zuerst ein konkreter Daten- und Funktionsumfang festgelegt und dann in eine Softwarelösung umgesetzt werden.

Folgende Anforderungen wurden festgelegt:

- Schnelles Finden von Datensätzen durch eine Systematik der Maschinenelemente;
- Einbindung des Programms ROSS;
- Möglichkeit der Speicherung von Zuverlässigkeitsdaten aus Publikationen;
- Menügesteuerte Erweiterungsfähigkeit der Struktur.

Eine Systematik der Maschinenelemente wurde nach /71/ erarbeitet. Die Umsetzung erfolgte in Form eines maussensitiven hierarchischen Baumes und ermöglicht alternativ zu einer Liste die Auswahl des gewünschten Maschinenelementes, *Abb. 5.4*.

Die jeweils benötigten Zweige können aufgeklappt werden, alle anderen werden reduziert. Dadurch bleibt der auf dem Bildschirm dargestellte Teil relativ klein und übersichtlich. Das gesuchte Maschinenelement wird schnell gefunden, und der Baum ist aufgrund seiner sichtbaren Morphologie selbsterklärend.



**Abb. 5.4** Baum zur Auswahl der Maschinenelemente

Die einzelnen Datensätze werden außerdem „Versuchsreihen“ zugeordnet. Oft werden nicht nur Wiederholungen der Versuche unter gleichen Bedingungen durchgeführt, sondern es werden auch Belastbarkeit oder Belastung variiert. Diese Versuchsreihen lassen bestimmte Tendenzen erkennen, und durch die Suche nach Datensätzen, die einer solchen Versuchsreihe angehören, sind diese Zusammenhänge leichter zu finden. Die Relation Versuchsreihe weist die Attribute Name, Datum, Quelle, Bemerkung und als Fremdschlüssel Firma auf. Unter Firma kann die Adresse der untersuchenden Institution gefunden werden.

Die Datenbank wurde so gestaltet, daß alle Ein- und Ausgangsdaten des Programms ROSS gespeichert werden können. Datenbank und die Applikation sind über eine

Schnittstelle miteinander verknüpft, die Bedienung erfolgt unter einer einheitlichen Benutzeroberfläche, *Abb. 5.5*.

The screenshot shows a software window titled "Bauteil-Simulation". At the top, there is a menu bar with "Datei", "Verteilung", "Methode", and "Ausfallverhalten". The main interface is organized into several sections:

- Top Section:** Three input fields with labels: "Bauteilbezeichnung" (value: Rohrhalterungen), "Gewählte Verteilung" (value: Weibull-Verteilung (3 Parameter)), and "Gewählte Methode" (value: Schadensbezogene Instandsetzung).
- Steuerungsparameter Section:** Two input fields: "Teilung" (value: 0.100) and "Dauer" (value: 500).
- Ausfalldaten Section:** Two radio buttons: "Rohdaten" (selected) and "Geschätzt".
- Methodenabhaengige Parameter Section:** A large empty rectangular box.

**Abb. 5.5** Parameterübergabe an die Bauelementsimulation

Die Ausfalldaten werden in Urdaten und „geschätzte“ (berechnete, simulierte und angenommene) Daten unterschieden. Für Urdaten ist die Angabe der Belastung und Belastbarkeit notwendig, es werden Versuchsdaten und Felddaten erfasst. Die verfügbaren Ausfalldaten sind fast ausschließlich Daten, bei denen die Bauteile bis zum ersten Ausfall betrachtet wurden. Werden diese Daten mit einer bestimmten Instandsetzungsstrategie simuliert, werden sie als geschätzte Daten (Simulationsergebnisse) gespeichert mit einem Verweis auf die zugrundeliegenden Urdaten.

Für die Stammdaten der Bauelemente und für die Ausfalldaten wurde eine einheitliche Struktur gewählt. Das ist allerdings für die Belastungs- und Belastbarkeitsdaten nicht möglich, da sie für unterschiedliche Maschinenelemente große Unterschiede aufweisen und andererseits sehr umfangreich sind. Die Folge wären riesige überwie-

gend leere Tabellen. Die Belastungs- und Belastbarkeitsdaten müssen an jedes Maschinenelement individuell angepaßt werden.

Es wurde eine Lösung gefunden, die es erlaubt, zuerst die Belastungs- und die Belastbarkeitstabelle menügesteuert anzulegen. Dazu wird in einer speziellen Tabelle das jeweilige Attribut eingegeben und ein geeigneter Datentyp gewählt. Diese Datensätze werden im nächsten Schritt zum Attribut der Belastbarkeits- und Belastungstabelle. Anschließend können diese Tabellen mit den Datensätzen gefüllt werden.

Dies war möglich, da in relationalen DBMS nicht nur die Daten selbst, sondern auch die Informationen zur Struktur der Datenbank und zu ihrer Verwaltung in Relationen gespeichert wird.

So kann die Struktur der Datenbank selbst über einen längeren Zeitraum wachsen bei uneingeschränkter Funktionalität. Sollen allerdings nach der Erstanlage der Relationen diese editiert werden, ist die nachträgliche Änderung der Relation aufwendig.

### **5.3 Anwendungsbeispiel**

Die Arbeit mit dem □IPZ soll an einem praxisnahen Beispiel gezeigt werden. Dabei wird die Funktionalität des Programms dargestellt. Die verwendeten Werte sind simulierte Daten.

Die Behandlung von Zuverlässigkeitsproblemen erfolgt in betriebsinternen Prozessen, dafür existieren entsprechende Strukturen und Entscheidungskriterien. Wieviel Personen und Abteilungen dabei eingebunden sind und wie die Maßnahmen konkret durchgeführt werden, ist für die folgende Betrachtung von untergeordneter Bedeutung. Entscheidend ist, daß alle beteiligten Personen das gleiche System als Informationsbasis nutzen. Das wird an einer Zuverlässigkeitsaufgabe, die bei einem Traktorenhersteller zu lösen ist, erläutert.

Vom Kundendienst des Traktorenherstellers werden Beschwerden über mangelnde Haltbarkeit der Abgasanlage der Traktorenmodelle 6800 und 6900 gemeldet, *Abb. 5.6*. Die Abgasanlage wird an Traktoren mit Sechszylindermotor verwendet. Die Darstellungen aus dem Ersatzteilkatalog helfen, das Problem zu lokalisieren und von den Traktorenmodellen und den relevanten Seriennummern her einzugrenzen.

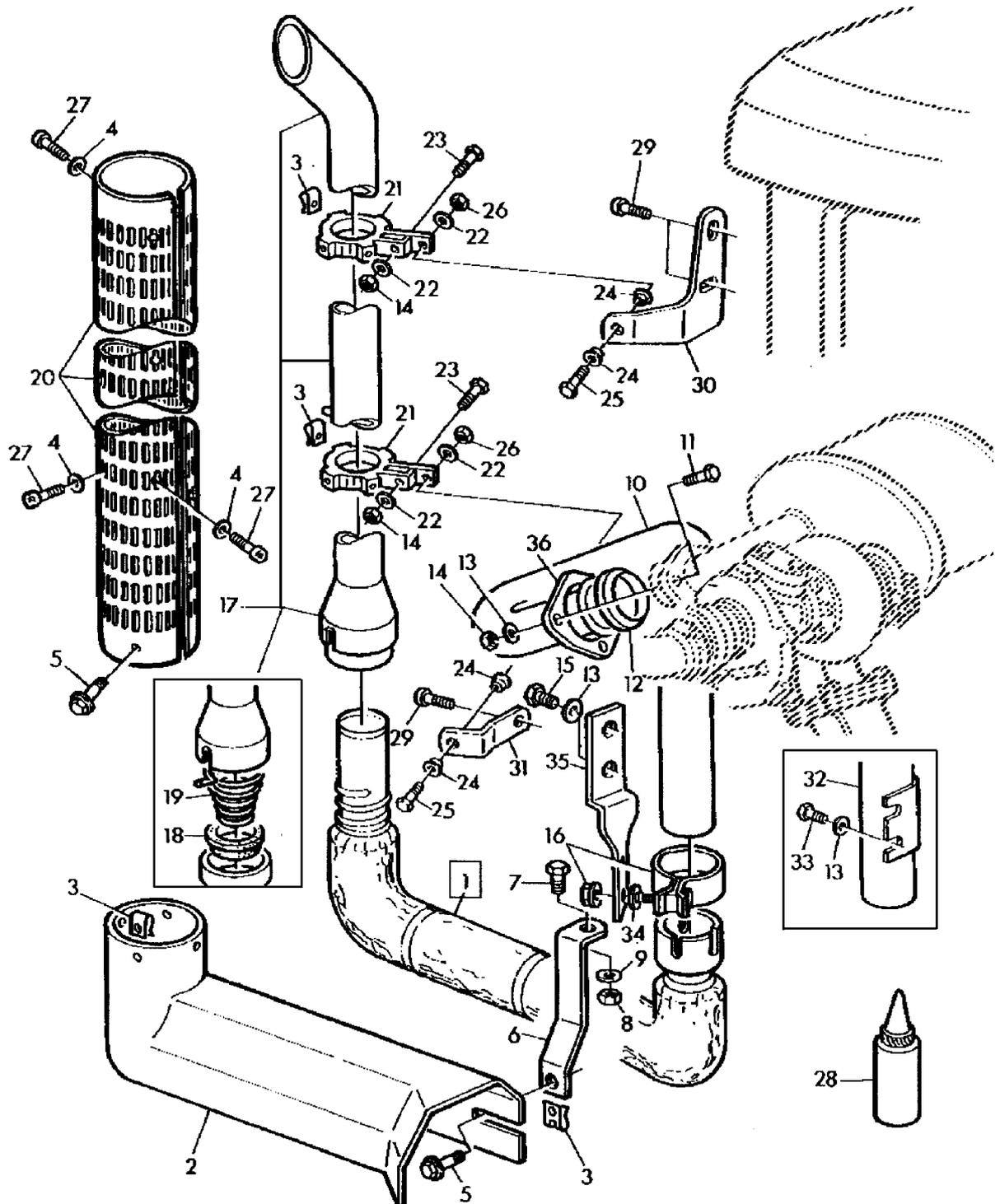


Abb. 5.6 Abgasanlage der Traktorenmodelle 6800, 6900

Die Stückliste der Abgasanlage umfaßt 36 Positionen, *Abb. 5.7*.

EPC - ABGASANLAGE NACH OBEN (RECHTS)							
Datei Übersicht Info über Auswahlliste Optionen Hilfe							
TEIL	STCK.NR.	BEZEICHNUNG	STCK	TRAKTOR SERIEN-NR.	6800	6900	BEMERKUNGEN
<input type="checkbox"/>	1	AL80501 AUSPUFFROHR	1	-182197	X	X	
<input type="checkbox"/>	2	AL80661 SCHUTZ	1	-182197	X	X	
<input checked="" type="checkbox"/>	3	L59800 MUTTER	AR	-182197	X	X	
<input checked="" type="checkbox"/>	4	24M7244 UNTERLEGSCHLEIBE	8	-182197	X	X	
<input type="checkbox"/>	5	19M7774 SCHRAUBE	5	-182197	X	X	M6X12 (10.9)
<input type="checkbox"/>	6	L101370 HALTER	1	-182197	X	X	
<input type="checkbox"/>	7	37M7091 SCHRAUBE	1	-182197	X	X	
<input type="checkbox"/>	8	14M7272 MUTTER	1	-182197	X	X	M6
<input checked="" type="checkbox"/>	9	24M7309 UNTERLEGSCHLEIBE	1	-182197	X	X	
<input type="checkbox"/>	10	L102686 ROHRBOGEN	1	131158-182197	X	X	
<input type="checkbox"/>	11	19M7378 SECHSKANTSCHRAUBE	3	-182197	X	X	M8X45
<input type="checkbox"/>	12	L40898 RING	1	-182197	X	X	
<input checked="" type="checkbox"/>	13	24M7028 UNTERLEGSCHLEIBE	5	-182197	X	X	
<input checked="" type="checkbox"/>	14	14M7273 MUTTER	5	-182197	X	X	M8
<input checked="" type="checkbox"/>	15	19H1936 SECHSKANTSCHRAUBE	2	131158-182197	X	X	3/8"X3/4"
<input type="checkbox"/>	16	AL80714 KLEMME	1	-182197	X	X	
<input type="checkbox"/>	17	AL80953 AUSPUFFROHR	1	-182197	X	X	
<input type="checkbox"/>	18	L100600 AUSPUFFROHR	1	-182197	X	X	
<input type="checkbox"/>	19	L100597 FEDER	1	-182197	X	X	
<input type="checkbox"/>	20	L100795 SCHUTZ	1	-182197	X	X	
<input type="checkbox"/>	21	AL80508 KLEMME	2	-182197	X	X	
<input checked="" type="checkbox"/>	22	24M7055 UNTERLEGSCHLEIBE	AR	-182197	X	X	
<input checked="" type="checkbox"/>	23	19M7163 SECHSKANTSCHRAUBE	2	-182197	X	X	M8X25
<input type="checkbox"/>	24	AL29889 PUFFER	4	-182197	X	X	
<input checked="" type="checkbox"/>	25	19M7168 SECHSKANTSCHRAUBE	2	-182197	X	X	M10X30
<input checked="" type="checkbox"/>	26	14M7274 MUTTER	2	-182197	X	X	M10
<input type="checkbox"/>	27	21M7305 SCHRAUBE	8	-182197	X	X	M6X12
<input type="checkbox"/>	28	L102219 FETT	1	-182197	X	X	(SUB FOR L79717)
<input type="checkbox"/>	29	19M8675 SCHRAUBE	3	-182197	X	X	(A) M8X16 (10.9)
<input type="checkbox"/>		19M8813 SCHRAUBE	3	-182197	X	X	M8X30 (10.9)
<input type="checkbox"/>	30	L78832 KONSOLE	1	-182197	X	X	UP
<input type="checkbox"/>	31	L78833 WINKEL	1	-182197	X	X	LOW
<input type="checkbox"/>	32	AL80507 AUSPUFFROHR	1	-131157	X		(ORD L102686, L40892)
<input type="checkbox"/>	33	19H2038 SECHSKANTSCHRAUBE	2	-131157	X		3/8"X1/2"
<input type="checkbox"/>	34	24H1309 UNTERLEGSCHLEIBE	1	131158-182197	X	X	
<input type="checkbox"/>	35	L111901 HALTER	1	131158-182197	X	X	(SUB FOR L110056)
<input type="checkbox"/>	36	L40892 FLANSCH	1	131158-182197	X	X	

**Abb. 5.7** Stückliste Abgasanlage Traktor Model 6800, 6900

Zuerst ist zu untersuchen, welche dieser Teile für die geringe Zuverlässigkeit verantwortlich sind. Meist beeinflussen nur wenige Teile entscheidend die Systemzuverlässigkeit. Das Ausfallverhalten der anderen Teile hat nur geringen Einfluß und kann entweder zu einem Teilsystem zusammengefaßt oder vernachlässigt werden.

Dabei ist zu beachten, daß bestimmte Teile mehrfach eingebaut werden. Entsprechend größer sind auch die Grundgesamtheiten, die für diese Teile entsprechend der in Betrachtungsintervall hergestellten Traktoren zugrunde gelegt werden müssen.

Die Ausfallzeitpunkte von Bauteilen werden während der Garantiezeit über die Garantieanträge erfaßt. Darin wird das schadenverursachende Teil mit der Betriebsdauer bis zum Ausfall mit dem Computer erfaßt und ausgewertet.

Die zur Verfügung stehenden Garantiedaten weisen allerdings eine bestimmte Spezifik auf. Es wird jeweils **ein** schadensverursachendes Bauelement indiziert, unabhängig davon, ob gleiche Bauteile mehrfach ausgefallen sind oder Folgeschäden an anderen Bauteilen auftraten. Somit ist für jedes Bauelement die Grundgesamtheit gleich der Anzahl der produzierten Traktoren im Betrachtungszeitraum. Es wurden insgesamt 657 Ausfälle bei 8890 produzierten Traktoren ausgewertet.

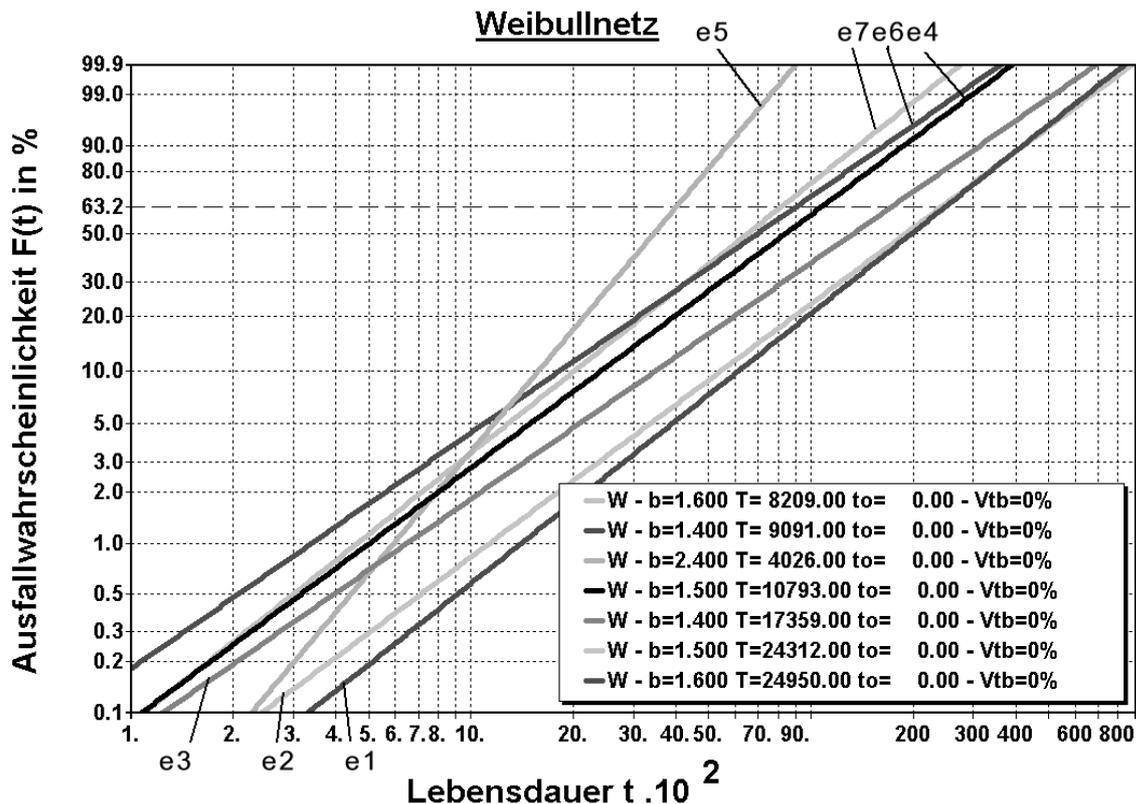
Da der Garantiezeitraum nur einen kleine Teil der gesamten Traktorenlebensdauer umfaßt, ist die Stichprobe zensiert. Mit dem Statistikmodul erfolgte eine Analyse der Garantiedaten und die Extrapolation auf eine Produktlebensdauer von 12000 Betriebsstunden. Die Ergebnisse in Form von Weibullverteilungen siehe *Abb. 5.8*.

Stücknummer	Element	Bezeichnung	QTY	B	T	t0
L102686	e1	Rohrbogen	1	1.6	24950	0
AL80714	e2	Klemme	1	1.5	24312	0
AL80953	e3	Auspuffrohr	1	1.4	17359	0
AL80508	e4	Klemme	2	1.5	10793	0
21M7305	e5	Schraube	8	2.4	4026	0
AL29889	e6	Puffer	4	1.4	9091	0
AL80501	e7	Auspuffrohr	1	1.6	8209	0

*Abb. 5.8*    *Systemelemente: Weibullparameter*

Die Hypothese des Vorhandenseins einer ausfallfreien Lebensdauer mußte abgelehnt werden, es traten bereits Ausfälle bei „0“ oder sehr geringen Betriebsstunden auf. Somit sind die Lebensdauerverteilungen zweiparametrisch. Die Anzahl der erfaßten Ausfälle aller anderen Auspuffteile ist sehr gering (von 1 und 12). Aus diesem Grund werden sie in der weiteren Betrachtung vernachlässigt.

Die Darstellung der Lebensdauerverteilungen im Weibullnetz erlaubt eine Einschätzung des Bauelementverhaltens über der Nutzungsdauer in Betriebsstunden, *Abb. 5.9*. Die Bauelementbezeichnungen e1, e2, ...e6 beziehen sich dabei auf die in *Abb. 5.8* eingeführten Bezeichnungen.



**Abb. 5.9** Ausfallwahrscheinlichkeiten im Weibullnetz

Deutlich ist das unterschiedliche Verhalten in Abhängigkeit von Formparameter und charakteristischer Lebensdauer zu sehen. Die Darstellung bezieht sich auf die Ausfallwahrscheinlichkeit der Bauelemente bis zum ersten Ausfall, d.h. Mehrfachausfälle werden nicht berücksichtigt. Da es sich jedoch um ein reparierbares System handelt, ergäbe die mit einem Booleschen Modell gewonnene Darstellung des Systemverhaltens keine praxisrelevanten Werte für die Zuverlässigkeit.

Um ein besseres Bild vom tatsächlichen Bauelement- und Systemverhalten zu gewinnen und weitere Unterstützung auf der Suche nach einer konstruktiven Verbesserung zu erhalten, werden die Bauteile in das □IPZ eingegeben.

Die Belastungs-, Belastbarkeits- und Ausfalldaten werden nun für alle Bauelemente eingegeben. Sind für das Maschinenelement noch keine Datensätze vorhanden, können die Tabellen für die Belastbarkeits- und für die Belastungsdaten menügesteuert

angelegt werden. Anschließend wird die so kreierte Tabelle mit dem ersten Datensatz gefüllt. Die Belastungs- und Belastbarkeitsdaten werden in der □DAZU nur zur Selektion von Datensätzen verwendet. Die Angaben sind ausreichend, um zu entscheiden, ob ein Datensatz prinzipiell in Frage kommt. Detaillierte Angaben können der jeweiligen Zeichnung entnommen werden.

Die Eingabe des Ausfallverhaltens erfolgt nach einer vorgegebenen Struktur. Das ist am Beispiel des Auspuffrohrs AL80953 gezeigt, *Abb. 5.10*.

**Abb. 5.10** Daten zum Ausfallverhalten des Bauelementes

Neben dem Typ der Lebensdauerverteilung werden in einem anderen Window die Parameter eingegeben. Zur Übergabe an die Bauelement- und Systemsimulation ist die Angabe der Simulationsdauer und der Schrittweite (Teilung = Länge einer Abnutzungseinheit) als Steuerungsparameter notwendig.

Die Systemsimulation erfordert eine normierte Datenübergabe. Im Beispiel wurden die Lebensdauerdaten in  $10^2$  Betriebsstunden eingegeben, die Teilung entspricht  $0.01 \cdot 10^2 = 1$  Betriebsstunden und die Dauer damit 12000 Abnutzungseinheiten =  $12000 \cdot 0,01 \cdot 10^2$  Betriebsstunden.

Aus einer Liste wird der Typ der Instandsetzungsmethode ausgewählt, *Abb. 5.2*. Bei allen vorbeugenden Instandsetzungsmethoden ist anschließend die Angabe der Betriebsdauer (des Bauteils oder des Systems) oder des Abnutzungsgrenzzustandes einzugeben. Diese werden in *Abb. 5.10* „Methodenabhängige Parameter“ dargestellt. Im betrachteten Beispiel werden allerdings keine vorbeugenden Instandhaltungsmaßnahmen vorgenommen. Alle Bauelemente unterliegen dem Austausch nach Ausfall, der „schadensbezogenen Instandsetzung“.

Die Daten werden als Teil einer Versuchsreihe beschrieben. Ein zusätzliches Window erlaubt die Eingabe von Angaben zur Versuchsreihe, *Abb. 5.11*.

The image shows a graphical user interface window titled "INGRES/Windows4GL". Inside the window is a sub-dialog box titled "Angaben zur Versuchsreihe". This dialog contains the following fields and values:

- Name:** A text box containing "Auspuff de luxe 6x00 6cyl. 1996+97".
- Datum:** A text box containing "03.02.1998".
- Quelle:** A text box containing "Warranty system".
- Bemerkung:** An empty text box.
- Firma:** A dropdown menu with "Keine Firma" selected.

At the bottom of the dialog box are two buttons: "OK" and "Cancel".

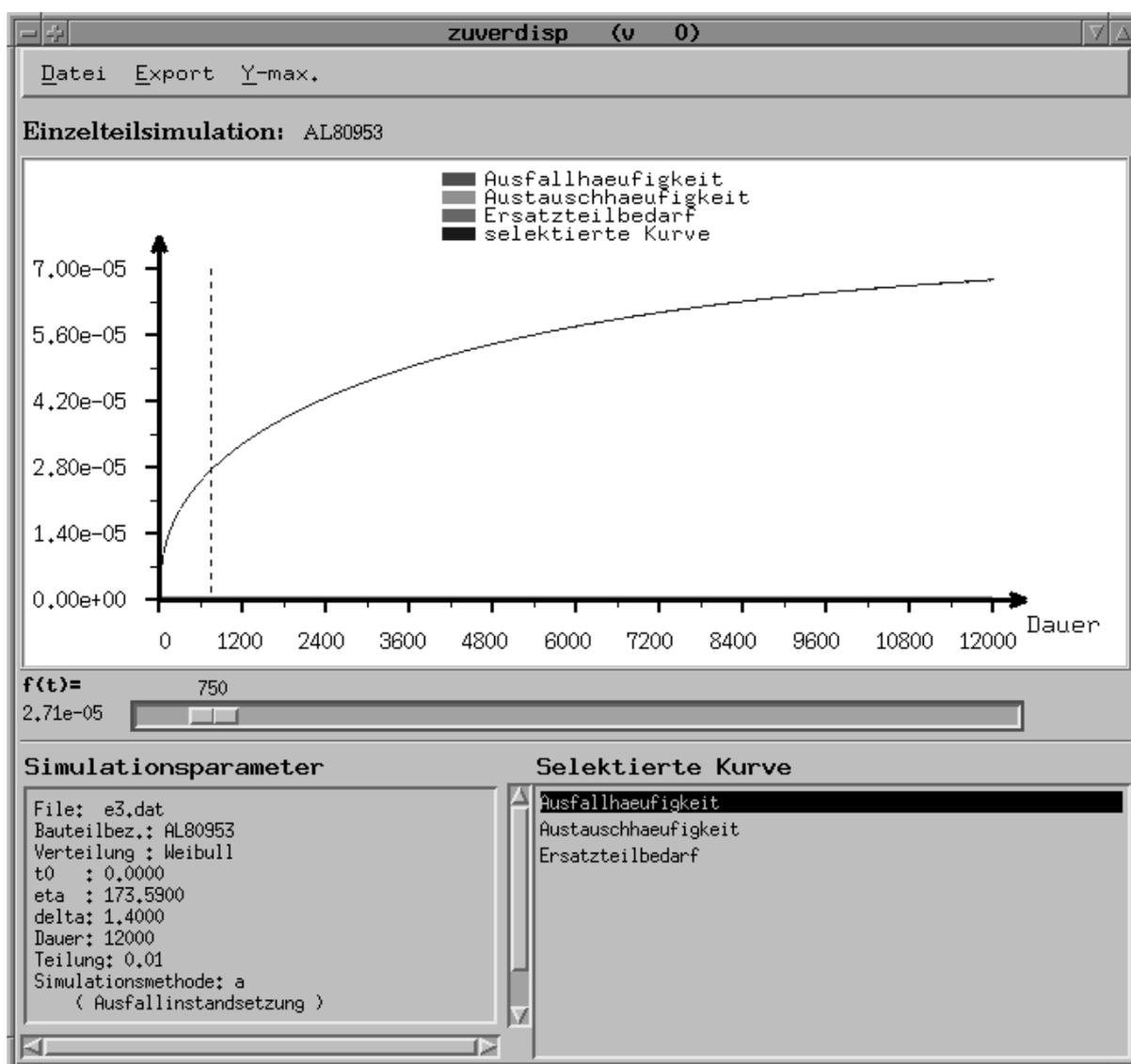
**Abb. 5.11** Versuchsreihe, zu der ein Datensatz gehört

Zusätzlich können in einer Adreßtabelle Angaben zur Firma oder Institution erfasst werden, von der die Versuchsreihe durchgeführt wurde. Die Selektion von Datensät-

zen nach diesen Kriterien hilft, „zusammengehörige“ Datensätze zu erkennen. Auf diese Weise können auch Tendenzen erkannt werden.

Nach der Eingabe der Ausfalldaten wird die Simulation des Einzelteilverhaltens durchgeführt. Dazu werden auf Knopfdruck alle notwendigen Daten über die ASCII-Schnittstelle an das Simulationsprogramm ROSS übergeben, das Programm wird automatisch gestartet und das Ergebnis erscheint auf dem Bildschirm, *Abb. 5.12*.

Aufgrund der hohen charakteristischen Lebensdauer ist die Kurve bis zum projektierten Nutzungsende noch nicht eingeschwungen. Bei Weibullverteilung und Ausfallinstandsetzung müssen sich alle Kurven bei  $1/B_{50}$  einschwingen.



*Abb. 5.12* Simulation des Bauteil-Ausfallverhaltens

Mit der Maus kann eine der Kurven Ausfallhäufigkeit, Austauschhäufigkeit und Ersatzteilbedarf ausgewählt werden und es können einzelne Werte der jeweils aktivierten Kurve angefahren werden. In der Darstellung tritt bei 750 Betriebsstunden eine Ausfallhäufigkeit von  $2.71 \cdot 10^{-5}$  pro Abnutzungseinheit (eine Betriebsstunde) auf. Die Ausfallhäufigkeit entspricht dem Ersatzteilbedarf, die Austauschhäufigkeit ist Null, da kein vorbeugender Austausch vorgenommen wird.

Der Maßstab der Ordinate kann verändert werden, das Diagramm kann in verschiedenen Grafikformaten exportiert werden. Die Kurve selbst kann über die Schnittstelle in der □DAZU gespeichert werden. Das reduziert die Rechenzeit und ist notwendig, wenn das Bauteil zusammen mit anderen in einem System simuliert werden soll.

Nun kann die Auswirkung von verschiedenen konstruktiven Maßnahmen oder Maßnahmen der Instandhaltung betrachtet werden. Werden die Parameter der Lebensdauerverteilung verändert, hat das direkten Einfluß auf das Ausfallverhalten und den Ersatzteilbedarf.

Werden Maßnahmen der vorbeugenden Instandhaltung in Betracht gezogen, wirken sie sich auf alle drei Kurven aus. Die Einführung von vorbeugenden Maßnahmen setzt ihre Akzeptanz durch die Kunden voraus. Ist diese Bedingung prinzipiell erfüllt, müssen die Maßnahmen optimiert werden.

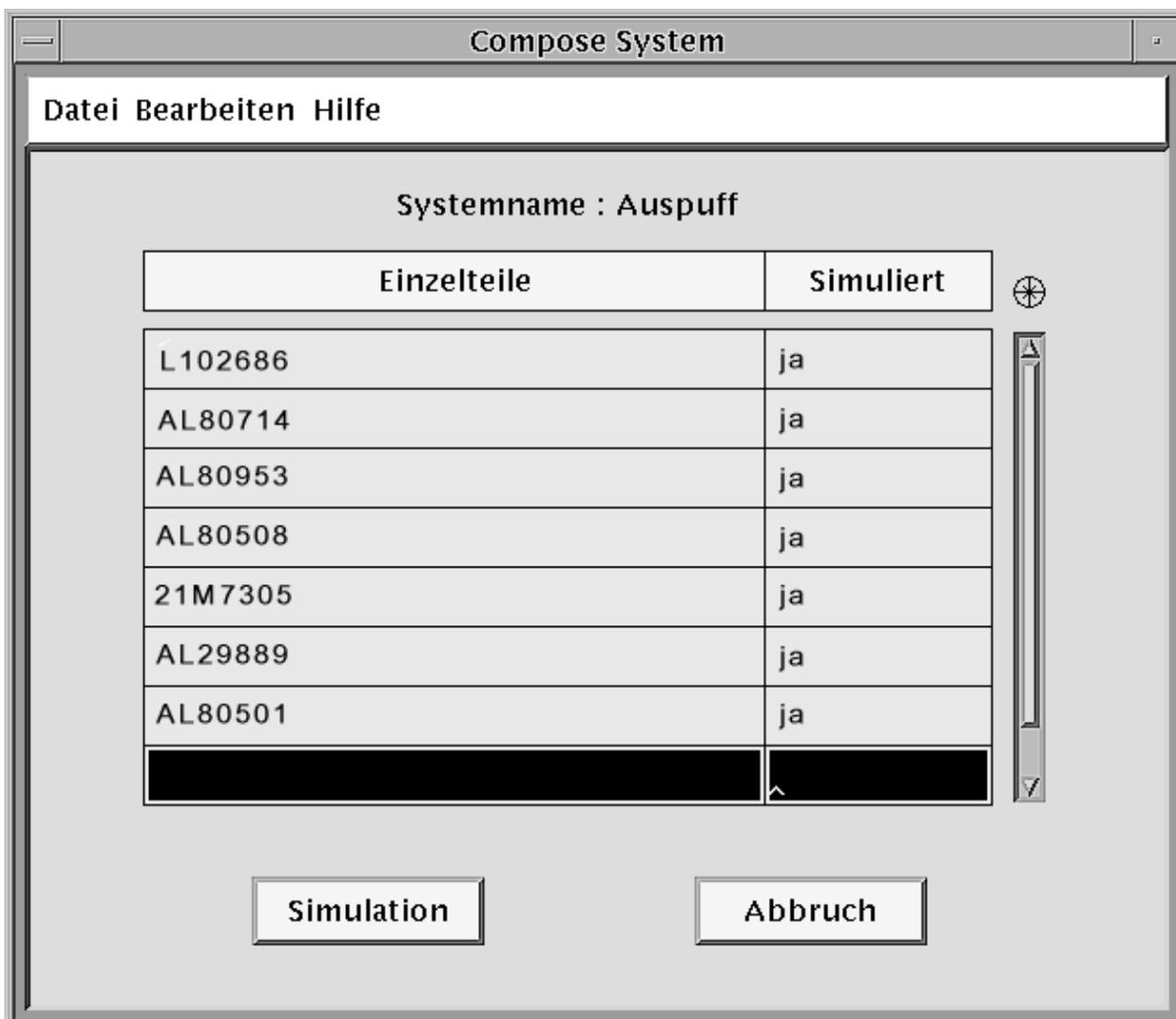
Ziel ist dabei meist:

- mit **wenigen** vorbeugenden Austauschmaßnahmen,
- **geringem Aufwand für die Diagnose** (z.B. Einrichtung der permanenten Überwachung)
- eine starke **Reduzierung der Ausfallhäufigkeit**
- bei nur **geringem Anstieg des Ersatzteilbedarf** zu erreichen.

Da die Auswirkungen von den Parametern der Lebensdauerverteilung abhängig sind, stellt die Simulation die einzige zuverlässige Methode zum Finden einer optimalen Lösung dar.

Die zentrale Fragestellung ist jedoch die resultierende Systemzuverlässigkeit. Voraussetzung ist, daß alle Elemente des Systems in das IPZ eingegeben, als Einzelteile mit identischen Steuerungsparametern simuliert und die Ergebnisse gespeichert wurden.

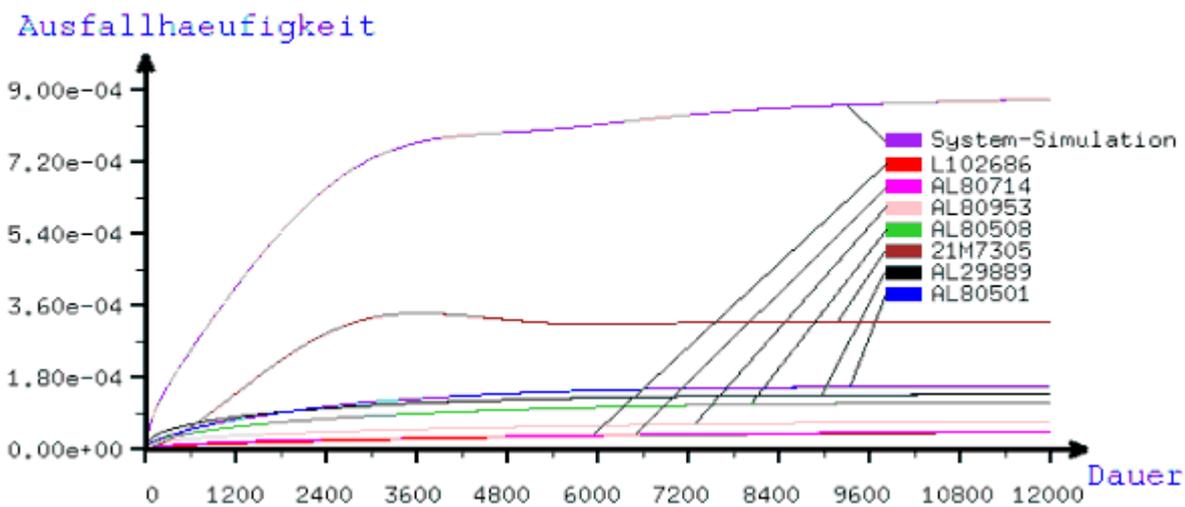
Danach erfolgt die Zusammenstellung des Systems, *Abb. 5.13*. Die Systemelemente werden aus der □DAZU ausgewählt und in einer separaten Tabelle zusammengestellt.



*Abb. 5.13* Serienstruktur der Elemente der Abgasanlage

Dieses System wird ebenfalls an das Simulationsprogramm ROSS übergeben, *Abb. 5.14*. Dabei werden die Ausfallhäufigkeiten aller Systemelemente in ein Diagramm eingetragen. Die Systemausfallhäufigkeit ergibt sich aus dem Produkt aller Elemente in der jeweiligen Abnutzungseinheit.

Bereits simulierte Systeme können wiederum in der Datenbank gespeichert werden. Nun können Systeme so zusammengestellt werden, daß die Auswirkungen von konstruktiven Maßnahmen oder Maßnahmen der Instandhaltung bei einzelnen Teilen direkt in ihrer Wirkung auf das Systemverhalten deutlich werden.



**Abb. 5.14** Simulation des Systems Abgasanlage

Diese Möglichkeit erlaubt dem Konstrukteur, Bauelemente in Bezug auf eine bestimmte Systemzuverlässigkeit auszulegen. Der Anteil des Elements an der Systemzuverlässigkeit kann direkt abgelesen werden, ebenso die Auswirkung von Änderungen.

Die Abbildung zeigt, daß relativ viele Elemente an der geringen Systemzuverlässigkeit beteiligt sind. Die Formparameter der Weibullverteilungen deuten auf Ermüdung als Ausfallursache. Im konkreten Fall der Abgasanlage wurde die Ursache in der steifen Aufhängung gefunden. Eine schwingungstilgende Aufhängung führte zu einer deutlichen Zuverlässigkeitssteigerung.

## 6 Ausblick

In Zukunft wird sich die Tendenz zur weiteren theoretischen Durchdringung der Zuverlässigkeitsprobleme verstärken. Informationen werden immer wertvoller. Damit wächst auch die Bedeutung von Informationssystemen.

Ein IPZ verbessert die Verfügbarkeit von Informationen. Verschiedene Leute, die am gleichen Problem der Produktzuverlässigkeit arbeiten, nutzen das gleiche System. Dadurch wird die interne Kommunikation verbessert und Entscheidungen können auf einer breiteren und einheitlichen Basis von Informationen getroffen werden.

Immer mehr Applikationen werden in die komplexen Systeme eingebunden. CAD und CAQ Programme werden Schnittstellen zu Zuverlässigkeitsdatenbanken besitzen, /63/, /72/.

Die bisherigen Modelle beruhen auf der statistischen Erfassung von Ausfällen und sind aufgrund der Streuung für das Einzelexemplar wenig hilfreich. Mit verbesserten Belastungs-Belastbarkeitsmodellen und einer permanenten Erfassung der Lastkollektive ist aber eine Voraussage des Ausfalls eines konkreten Bauteils möglich. Solche Systeme werden mit Datenfernübertragung auch bei mobiler Technik Anwendung finden.

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit der Weiterentwicklung der Informationssysteme. In Zukunft ist die Entwicklung folgender Tools zur Abfrageunterstützung wünschenswert:

- Als erste Stufe sollte die Vollständigkeit des Datensatzes bewertet werden. Dies ist einerseits durch die Anzahl und Art der NUL-Werte möglich, andererseits könnte bei der Einspeisung von Datensätzen ein Parameter zur Bewertung der Korrektheit, Vertrauenswürdigkeit und Vollständigkeit der Quelle mit erfaßt werden.
- In der zweiten Stufe können bekannte Abhängigkeiten von Parametern zur Abfrageunterstützung herangezogen werden. Die Grundlagen werden durch den

Fortschritt wissenschaftlicher Untersuchungen bestimmt. Besonders weit entwickelt ist die Untersuchung des Schwingfestigkeitsverhaltens /73/.

- In der dritten Stufe sind mit der Entwicklung und Anwendung der Fuzzy-Methoden enorme Möglichkeiten bei der Datenbewertung zu erwarten. Mit der Analyse einer großen Datenbank kann dann sogar bestimmt werden, wie der einzelne Einfluß, repräsentiert durch ein Datum, auf das Ausfallverhalten qualitativ und quantitativ wirkt. Dann ist nicht nur die (zuerst: geringste) Unschärfe selbst als Selektionskriterium denkbar, sondern es könnten sogar funktionale Zusammenhänge für die zuverlässigkeitsrelevanten Daten aufgestellt und damit zusammenfassende Aussagen über mehrere Datensätze getroffen werden. Grundvoraussetzung ist eine umfangreiche Datensammlung, die die Daten möglichst vollständig erfaßt und unverfälscht läßt.

Das IPZ der Zukunft ist als modulares Programmsystem vorstellbar, das aus einer universellen Datenbank mit individueller Zugangsberechtigung besteht, worüber eine lokale Datenbank aktualisiert wird. Diese allgemein zugänglichen Daten werden zusammen mit den eigenen Daten durch Applikationen weiterverarbeitet. Die Programme sind wiederum als Module aufgebaut. So können die komplexen Softwarelösungen leichter individuellen Anforderungen angepaßt werden.

## 7 Zusammenfassung

Die Entwicklung von Produkten erfolgt heute in einem Umfeld, das durch einen sich verschärfenden Wettbewerb infolge Internationalisierung der Märkte, wachsenden Kostendruck und gestiegene Anforderungen an Funktionalität und Qualität geprägt ist. Ein Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit der Produkte ist ihre Zuverlässigkeit. Auch in diesem Bereich des Maschinenbaus sind die Auswirkungen der heutigen Informationsgesellschaft allgegenwärtig: eine hohe Verfügbarkeit der Daten für die Gestaltung und Berechnung der Zuverlässigkeit von Systemen ist unabdingbar. Um eine hohe Zuverlässigkeit kostengünstig zu erreichen ist es notwendig, die gewachsenen Möglichkeiten der theoretischen Durchdringung von Zuverlässigkeitsproblemen anzuwenden und eine hohe Verfügbarkeit der benötigten Daten zu gewährleisten. Das unterstützt ein Informationssystem.

Zur Erhöhung der Verfügbarkeit von Daten für die Gestaltung und Berechnung der Zuverlässigkeit von Systemen wurde eine Methode zur Gestaltung eines Informationssystems für die Projektierung der Zuverlässigkeit von Maschinen (IPZ) geschaffen. Die Entwicklung und Einführung eines IPZ stellt ein umfangreiches Projekt dar. Eine Methode, die die aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisse der Zuverlässigkeitstechnik einbezieht, erlaubt es, die Möglichkeiten eines solchen Systems konsequent zu nutzen. Durch das methodische Vorgehen kann die Entwicklung genau geplant werden.

Folgende Erkenntnisse wurden im Ergebnis dieser Arbeit gewonnen:

- Die Zuverlässigkeit eines Produktes kann in einer frühen Entwicklungsphase kostengünstig beeinflusst werden.
- Dazu stehen mathematische Werkzeuge von Statistikprogrammen bis hin zu Systemsimulationsprogrammen zur Verfügung, die eine Prognose des Zuverlässigkeitsverhalten von Produkten erlauben.
- Die Anwendung dieser Programme wird durch Datenmangel behindert.

- In Unternehmen beschäftigen sich unterschiedliche Abteilungen und Mitarbeiter mit Problemen der Zuverlässigkeit. Die Zusammenfassung der Informationen und des gewonnenen Wissens hilft, Redundanzen zu vermeiden, Entscheidungen auf fundierter Grundlage zu treffen und den Aufwand für Versuche und Änderungen dort zu konzentrieren, wo eine hohe Kosteneffizienz erreicht wird.
- Neben Gemeinsamkeiten weisen die Problemstellungen in der Konstruktion, der Zuverlässigkeitsbewertung und der Instandhaltung Unterschiede auf, die bei der Planung eines IPZ zu beachten sind.
- Grundlage für die Entwicklung eines IPZ ist ein unternehmensweites Datenkonzept.
- Bei der Projektierung eines IPZ geht man von den zu lösenden Problemfällen und den bisher genutzten Methoden und Anwendungsprogrammen aus.
- Das IPZ muß eine Zuverlässigkeitsdatenbank enthalten und den Zugriff auf die Anwendungsprogramme erlauben.
- Eine Modellbank, die diese Verbindung von Datenbank und Anwendersoftware beschreibt, unterstützt oder in Modellfällen zusammenfaßt, macht die Arbeit mit dem IPZ nach höherem anfänglichen Aufwand effektiver. Die Einarbeitung neuer Mitarbeiter und die Rekonstruktion von Problemlösungen wird erleichtert.
- Für den Aufbau der Datenbank wird eine in der Informatik bewährte Methodik beschrieben.

Die beschriebene Methodik wird am Beispiel eines realisierten Informationssystems für die Projektierung der Zuverlässigkeit von Maschinen angewandt. Die dabei gewonnen Erkenntnisse sind in alle Teile der Arbeit eingeflossen. Das entstandene □IPZ erlaubt die Speicherung der Zuverlässigkeitsdaten von Maschinenelementen und die Simulation des Ausfallverhaltens reparierbarer Systeme und seiner Elemente.

## Literaturverzeichnis

- /1/ Bertsche, B.; Lechner, G.- *Einfluß der Teileanzahl auf die Systemzuverlässigkeit.*- In: Antriebstechnik 26 (1987) 7, S. 40-43
- /2/ Dietl, W.- *Theoretische Modellierung und praktische Gestaltung zuverlässiger Materialflußsysteme.*- In: Hebezeuge und Fördermittel.- Berlin 32 (1992) 5.- S. 200- 203
- /3/ Lechner, G.; Hirschmann, K. H.- *Fragen der Zuverlässigkeit von Fahrzeuggetrieben.*- In: Konstruktion 31 (1979) 1.- S. 19 - 26
- /4/ Römisch, P.- *Methoden- und objekttheoretische Grundlagen zur rationelleren Projektierung von Verarbeitungsanlagen.*- 1988.- 214 S.- Dresden, Technische Universität, Sektion Verarbeitungs- und Verfahrenstechnik, Dissertation B
- /5/ Franke, Wolf D.- *FMEA: Fehlermöglichkeits- und -einflußanalyse in der industriellen Praxis.*- Landsberg/Lech: Moderne Industrie, 1987.- 119 S.
- /6/ O'Connor, P.D.T.- *Practical reliability engineering.*- 3rd ed.- Chichester, New York, Brisbane [a.o.]: John Wiley & Sons, 1991.- 409 S.
- /7/ Heusel, K. *Qualitätssteigerung von Planetengetrieben durch Selektive Montage.*- 1996.- 137S.- Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Dissertation
- /8/ Kapur, K. C.; Lamberson, L. R.- *Reliability in Engineering Design.*- New York, Santa Barbara, London [u.a.]: John Wiley & Sons, 1977
- /9/ Прони́ков А. С.- *Надёжность машин.*- Москва: Машиностроение, 1978.- 592 S. (Maschinenzuverlässigkeit)
- /10/ Bertsche, B.; Lechner, G.- *Zuverlässigkeit im Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten.*- Berlin, Heidelberg, NewYork [u.a.]: Springer, 1990.- 187 S.
- /11/ Kitschke, E.- *Wahrscheinlichkeitstheoretische Methoden zur Ermittlung der Zuverlässigkeitskenngrößen mechanischer Systeme auf der Grundlage der statisti-*

*schen Beschreibung des Ausfallverhaltens von Komponenten.*- 1983.- 154 S.- Bochum, Universität, Abteilung für Maschinenbau, Dissertation

- /12/ Schäbe, H.- *Struktur und Aufbau des Programmsystems RESY und Möglichkeiten seiner Anwendung in der Zuverlässigkeitsforschung.*- In: Tagungsmaterial zum 1. Intern. Seminar "Zuverlässigkeit und Instandhaltung".- Győr (1987) S. 21-35
- /13/ Schäbe, H.- *Dokumentation zum Programmsystem RESY.*- Technikum Diagnostik und Zuverlässigkeit, Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List" Dresden, 1986
- /14/ Ascher, H.; Feingold, H.- *Repairable systems reliability: modeling, inference, misconceptions and their causes.*- New York, Basel: Marcel Dekker, Inc., 1984.- 223 S.- (Lecture notes in statistics; v.7)
- /15/ Eichler, Ch.- *Instandhaltungstechnik.*- 5., bearb. Aufl.- Berlin: Verl. Technik, 1990.- 340 S.
- /16/ Brodbeck, P.- *Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Bauteilzuverlässigkeit und zur Systemberechnung nach dem Booleschen Modell.*- 1995.- 114 S.- Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Dissertation
- /17/ Norm DIN 25448: 1990. *Ausfalleffektanalyse*
- /18/ Norm DIN 25424: 1990. *Fehlerbaumanalyse*
- /19/ Barlow, R.E.; Proschan, F.- *Statistische Theorie der Zuverlässigkeit.*- Akademie-Verlag Berlin, 1981.- 255 S.
- /20/ Haasl, D.- *Advanced concepts in fault tree analysis (System safety symposium).*- Seattle, Washington, 1965.- Fortgeschrittene Ansätze in der Fehlerbaumanalyse
- /21/ Fussel, J.B.- *A format methodology for fault tree construction.*- Nuclear Science and Engineering (1973)52.- S.421-432
- /22/ Fussel, J.B.- *Fault tree analysis- concepts and techniques.* Provedings NATO Advanced Study Institute on Generic Techniques of System Reliability Assessment.- Liverpool, 1973
- /23/ Fussel, J.B. and Vesely, W.E.- *A new methodology of obtaining cut sets for fault trees.*- American nuclear Society Transactions, vol. 15, no.1, pp. 262-263, June 1972
- /24/ Norm DIN 25419: 1985. *Ereignis- oder Störfallablauf-Analyse*

- /25/ Birolini, A.- *Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme: Theorie, Praxis, Management.*- 3., bearb. Aufl.- Berlin, Heidelberg, New York [u.a.]: Springer.- 1991.- 507 S.
- /26/ Wu, Z. *Vergleich und Entwicklung von Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen.*- 1992.- 166 S.- Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Dissertation
- /27/ Bothur, S.; Schmidt, M.; Xu, M.Sc.- *Entwicklung eines Konzepts für die flexible Organisation der Instandhaltung.*- Abschlußbericht zum Thema 363D der AiF.- 1993.- 104 S.- unveröffentlicht
- /28/ Dubi, A.- *Stochastic modelling of realistic systems.*- Negev: Malching Sciencs Ltd., 1990.- 59 S.- Stochastische Modellierung realer Systeme
- /29/ *AMIR und SPAR, Monte-Carlo-Programme für die Zuverlässigkeit, Operations Research und Logistik mit unbegrenzten Modellierungsmöglichkeiten.*- Hanau: NIS Ingenieurgesellschaft MBH, 35 S.
- /30/ *Stochastische Modelle der Zuverlässigkeit*, Tagungsmaterial des internationalen Seminars des Arbeitskreises "Stochastische Modelle der Zuverlässigkeit und Sicherheit".- 1992: TU Magdeburg
- /31/ Wu, Y.- *Simulation des Zuverlässigkeitsverhaltens instandsetzbarer Maschinen und Anwendung in der Prognose des Ersatzteilbedarfs.*- 1995.- 125 S.- Dresden: TU, Fakultät Maschinenwesen, Dissertation
- /32/ *Reliability design handbook.*-Herausg. R. T. Anderson.- Chicago: IIT Research Institute, 1976, 392 S.
- /33/ *Nonelectronic parts reliability data.*- Prepared by Roberto G. Arno.- Chicago: IIT Research Institute, 1981, 262 S.
- /34/ Poll, H.- *Aufbau, Pflege und Nutzen einer Schadensstatistik als Basis für die Verfügbarkeitsoptimierung.*- VDI-Berichte Nr. 771, 1989, S. 367ff.
- /35/ *Instandhaltungsmanagement der 90er Jahre* / Hrsg.: Schulte, W.; Küffner, G.- Frankfurt: Frankfurter Allgemeine Zeitung GmbH, 1988, 348 S.
- /36/ *Relibility Data Collection and Use in Risk and Availability Assessment.*- Editor Wingender, H.-J.- Springer Verlag, EuReData conference 1986, 1989
- /37/ *OREDA Off Shore Relibility Data Handbook*, Veritas-Huset, 1984

- /38/ Bubenhausen, H.- *Entwicklung einer Methoden- und Faktendatenbank zur rechnerischen Lebensdauervorhersage*.- 1993.- 150 S.- München: TU, Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation
- /39/ FAG: *Kugellager, Rollenlager, Nadellager/ Wälzlagerkatalog*, 1992.- Firmenschrift
- /40/ Jung, H.- *Die Entwicklung eines zuverlässigkeitsorientierten Informationslogistiksystems für das Instandhaltungsmanagement- Ein Beitrag zur informellen Absicherung der computerunterstützten Instandhaltung*.- 1990.- 156 S. und Anlagenband 122 S.- Dresden: HfV, Fakultät für Technik und Naturwissenschaft, Dissertation
- /41/ Norm VDI 4010: 1986. *Überblick über Zuverlässigkeits-Daten-Systeme (ZDS)*
- /42/ Bandemer, H.; Gottwald, S.- *Einführung in Fuzzy-Methoden: Theorie und Anwendung unscharfer Mengen*.- 4., überarb. und erw. Aufl.- Berlin: Akademie Verlag, 1993.- 264 S.
- /43/ Ditlevsen, O.- *Uncertainty and structural reliability- hocus pocus or objective modelling*.- 1988.- 22S.- Technical University of Denmark, Department of Structural Engineering
- /44/ Tilli, Th.- *Fuzzy-Logik; Grundlagen, Anwendungen, Hard- und Software*.- München: Franzis- Verlag, 1991.- 256 S.
- /45/ Kruse, R.; Gebhardt, J.; Klawonn, F.- *Fuzzy-Systeme*.- Stuttgart: B. G. Teubner, 1993.- 274 S.
- /46/ Viertl, R.; Gurker, W.- *Reliability estimation based on fuzzy life time data*, in *Reliability and safety analyses under fuzziness/ Hrsg. Onisawa, T.; Kacprzyk, J.*- Heidelberg: Physica-Verl, 1995.- 376 S.
- /47/ Viertl, R.- *Statistische Analyse unscharfer Messungen in Zuverlässigkeitsanalysen*. In: VDI-Berichte Nr. 771, 1989, S. 381 - 387
- /48/ Viertl, R.- *Statistical methods for non-precise data*.- Boca Raton, New York, London, Tokio: CRC Press, Inc, 1996.- 191 S.
- /49/ Zimmermann, H.J.- *Fuzzy set theory and its applications*.- 2<sup>nd</sup> revised ed.- Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers, 1991.- 398 S.
- /50/ Hryniewicz, O.- *Lifetime tests for imprecise data and fuzzy reliability requirements*, in *Reliability and safety analyses under fuzziness/ Hrsg. Onisawa, T.; Kacprzyk, J.*- Heidelberg: Physica-Verl, 1995.- 376 S.

- /51/ Petry, F. E.- *Fuzzy databases: principles and applications*.- Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers, 1996.- 226 S.
- /52/ Bandemer, H.- *Ratschläge zum mathematischen Umgang mit der Ungewißheit; Reasonable Computing*.- Stuttgart, Leipzig: Teubner, 1997.- 228 S.
- /53/ *Handbuch Instandhaltung* / Hrsg.: Warnecke, H.-J.- Köln: Verl. TÜV Rheinland.- Bd.1. Instandhaltungsmanagement.- 2., überarb. Aufl.- 1992.- 797 S.
- /54/ Ihle, G.- *Wissenschaftliche Grundlagen für Richtlinien des Instandhaltungsgerechten Konstruierens von Maschinen am Beispiel landtechnischer Arbeitsmittel*.- 1975.- 235 S.- Dresden, Technische Universität, Sektion Kraftfahrzeug-, Land- und Fördertechnik, Dissertation B
- /55/ *Katalog Instandhaltungsgerechtes Konstruieren* / Hrsg.: VEB Rationalisierungen LTI.- Neuenhagen, 1979.- (4 Bde.)
- /56/ Ihle, G.- *Zur Verwendung von Expertenschätzungen in der Zuverlässigkeitssicherung*.- In: Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen, Lehrgangsmappe.- Esslingen: Technische Akademie, Weiterbildungszentrum, 1992.- 46 S.
- /57/ Borenius, G.- *Zur rechnerischen Schadensakkumulation in der Erprobung von Kraftfahrzeugteilen bei stochastischer Belastung mit variabler Mittellast*.- 1990.- 159 S.- Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Dissertation
- /58/ Vossen, G.- *Datenmodelle, Datenbanksprachen und Datenbankmanagementsysteme*.- Bonn: Addison-Wesley, 1988
- /59/ Scheer, A.W.- *Wirtschaftsinformatik: Informationssysteme im Industriebetrieb*.- 3., bearb. Aufl.- Berlin, Heidelberg, New York [u.a.]: Springer, 1990.- 603 S.
- /60/ Lockemann, P.C.; Krüger, G.; Krumm, H.- *Telekommunikation und Datenhaltung*.- München, Wien: Carl Hanser, 1993.- 655 S.
- /61/ Deckers, J.; Schäbe, H.- *FMECA rechnergestützt erstellen*.- In: Qualität und Zuverlässigkeit.- München 37(1992)6.- S. 366-369
- /62/ Ihle, G.- *Modellierung des Ausfall- und Instandhaltungsverhaltens von Landmaschinen für CAD-Projekte*.- In: Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden.- Dresden 38 (1989) 2.- S. 165-176
- /63/ Köster, L.- *CAQ mit der Datenbank: Qualitätsdaten- und -kostenerfassung mit handelsüblichen Datenbanken*.- In: Qualität und Zuverlässigkeit.- München 37 (1992) 8.- S. 501-504

- /64/ Fritz, A.- *Rechnergestützte Methoden in der Zuverlässigkeitsanalyse.*- 1995.- 131 S.- Esslingen: FH für Technik, Fachbereich „Maschinenbau/ Fertigungssysteme“, Dissertation
- /65/ *Versuchsplanung und -auswertung.*- Hrsg.: Rasch, D. u.a. - (Verfahrensbibliothek; Band 2). - Berlin: VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, 1978. - S. 449-1052
- /66/ *Optimale Instandhaltungsmethoden- ein praktischer Leitfaden* / Hrsg.: Beckmann, G. - Berlin: VEB Verlag Technik, 1983.- 133 S.
- /67/ Meier, A.- *Relationale Datenbanken: Eine Einführung in die Praxis.*- Berlin, Heidelberg, New York [u.a.]: Springer,1992.- 179 S.
- /68/ Schmidt, J.; Schlede F.-M.- *Drei treffen das Highend: Pentium-PCI-Rechner mit verschiedenen UNIX-Derivaten.*- In: UNIXopen.- Trostberg (1995) 3.- S. 94-100
- /69/ Sauer, H.- *Relationale Datenbanken: Theorie und Praxis.*- Bonn, München, Paris [u.a.] Addison-Wesley, 1992.- 291 S.
- /70/ Schmidt, D.- *Persistente Objekte und objektorientierte Datenbanken: Konzepte, Architektur, Implementierung und Anwendung.*- München, Wien: Hanser.- 1991.- 156 S.- zugl.: Zürich, Univ.- Diss.
- /71/ Matek, W.; Muhs, D.; Wittel, H.; Becker, M. Roloff/ *Matek Maschinenelemente.*- 13., überarbeitete Auflage.- Braunschweig: Vieweg Verlag, 1994.- 690 S.
- /72/ Ihle, G.- *Modellierung des Ausfall- und Instandhaltungsverhaltens von Landmaschinen für CAD-Projekte.*- In: Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden.- Dresden 38 (1989) 2.- S. 165-176
- /73/ Haibach,E.- *Betriebsfestigkeit: Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung.*- Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989.- 481 S.





# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name	Lutz Schüppenhauer
geboren	am 23.06.1965 in Dresden
Staatsangehörigkeit	deutsch
Eltern	Klaus Schüppenhauer und Regine Schüppenhauer, geb. Rösel
Familienstand	verheiratet seit dem 04.05.1991 mit Daiva Schüppenhauer, geb. Racinskaite
Kinder	Gediminas geb. 20.08.1992 und Justinas geb. 04.03.1996

## Schulbildung

9/72 - 8/80	5. Allgemeinbildende Polytechnische Oberschule in Dresden
9/80 - 8/83	Kreuzschule Dresden (Erweiterte Oberschule)
9/83 - 8/84	Martin-Luther-Universität Halle (ABF) Reifeprüfung am 30.06.1984

## Wehrdienst

11/84 - 4/86	Grundwehrdienst, Kaserne in Basdorf
--------------	-------------------------------------

## Studium

5/86 - 7/86	Martin-Luther-Universität Halle (ABF), Sprachkurs Russisch
8/86 - 2/91	Moskau: Student Maschinenbau/Landtechnik am „Moskauer Institut für Ingenieure der landwirtschaftlichen Produktion“; Diplomhauptprüfung am 20.02.1991

## Berufstätigkeit

3/91 - 5/97	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Dresden, Fakultät für Maschinenwesen, Lehrstuhl Landmaschinen
davon 9/91 - 12/91	Forschungstrainee am IMA der Universität Stuttgart
9/97 - 2/99	Service Representative bei John Deere Export, Mannheim
seit 3/99	Area Service Manager bei der John Deere Central Services GmbH, Mannheim



Liste der bisher erschienenen Berichte aus dem IMA:

Nr.	Verfasser	Titel
1	H.K. Müller	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion von Hochdruckdichtungen an schnelllaufenden Wellen
2	W. Passera	Konzentrisch laufende Gewinde-Wellen-Dichtung im laminaren Bereich
	K. Karow	Konzentrische Doppelgewindewellendichtung im laminaren Bereich
3	F.E. Breit	Die Kreiszyinderschalendichtung: 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-Verzahnem 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 Leakage- 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

Nr.	Verfasser	Titel
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, Einflankenwölzabweichung 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
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 geradzahnten 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 Wiederholteilsuchsystem
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

Nr.	Verfasser	Titel
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 Fanglabyrinth
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 Kontaktbeanspruchungen
84	Ch. Dörr	Ermittlung von Getriebebelastkollektiven 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
90	M. Oberle	Spielbeeinflussende Toleranzparameter bei Planetengetrieben
91	S. N. Dogan	Zur Minimierung der Loseilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
92	M. Bast	Beitrag zur werkstückorientierten Konstruktion von Zerspanwerkzeugen
93	M. Ebenhoch	Eignung von additiv generierten Prototypen zur frühzeitigen Spannungsanalyse im Produkt-entwicklungsprozeß
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 Modellierungs-Hilfssystems 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

---

Nr.	Verfasser	Titel
101	M. Kunz	Ermittlung des Einflusses fahrzeug-, fahrer- und verkehrsspezifischer Parameter auf die Getriebelastkollektive mittels Fahrsimulation
102	H. Ruppert	CAD-integrierte Zuverlässigkeitsanalyse und -optimierung
103	S. Kilian	Entwicklung hochdynamisch beanspruchter Flächendichtverbindungen
104	A. Flaig	Untersuchung von umweltschonenden Antriebskonzepten für Kraftfahrzeuge mittels Simulation
105	B. Luo	Überprüfung und Weiterentwicklung der Zuverlässigkeitsmodelle im Maschinenbau mittels Mono-Bauteil-Systemen