

***Sebastian Wedman***

***Lebensdauerüberwachung in  
mechatronischen Systemen***

**Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar

©Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – 2010

Das Werk einschließlich seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Herausgeber und des Verfassers unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Satz und Gestaltung: Sebastian Wedman

Hersteller: Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG  
Druck · Buch · Verlag  
Münster

Printed in Germany

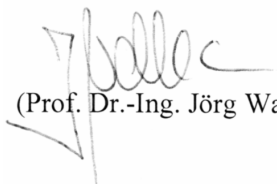
## Geleitwort

Viele technische Systeme und Bauteile werden so ausgelegt, dass sie den im Betrieb wirkenden Belastungen während einer vorgegebenen Lebensdauer standhalten. Bei der Auslegung müssen Annahmen über die zu erwartenden Belastungen getroffen werden. Wenn die im Betrieb auftretenden Belastungen von den Annahmen abweichen, ergibt sich eine gegenüber der Auslegung entsprechend längere oder kürzere tatsächliche Lebensdauer. Diese ist dem Nutzer des Systems jedoch nicht bekannt, so dass die Systeme, aus Sicherheitsgründen, in der Regel zu früh außer Betrieb gesetzt werden oder es in Extremfällen zu vorzeitigem Versagen kommt.

Herr Wedman beschreibt in seiner Dissertation einen Lebensdauerbeobachter, der die im Betrieb tatsächlich auftretenden Beanspruchungen erfasst, sie mit den bei der Auslegung getroffenen Annahmen vergleicht und eine Vorhersage der zu erwartenden Restlebensdauer gibt. Es wird aufgezeigt, welche prinzipiellen Möglichkeiten es gibt, einzelne Komponenten, Baugruppen oder ganze Systeme mit Sensoren und informationsverarbeitenden Prozessoren auszustatten und die dynamische Beanspruchung z. B. anhand von Messungen von Spannungen, Kräften oder Beschleunigungen zu erfassen und auszuwerten. Die verschiedenen Konzepte werden vorgestellt und vergleichend bewertet. Der Schwerpunkt liegt auf Anwendungen in der Verkehrstechnik.

Die Arbeit von Herrn Wedman basiert auf der Methode des funktionsorientierten Entwurfs mechatronischer Systeme und liefert einen wesentlichen Beitrag zur aktuellen Forschung. Das von Herrn Wedman im Rahmen seiner Dissertation entwickelte System wurde zunächst in der Simulation untersucht und optimiert. Anschließend wurde seine Leistungsfähigkeit in einem vereinfachten Versuch nachgewiesen, der auch zur Validierung der Modellbildung und Methodik diente. Die dabei gewonnenen Ergebnisse bilden eine gute Grundlage für den zukünftigen industriellen Einsatz des Systems „Lebensdauerbeobachter“.

Hannover, im April 2010



(Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek)





# **Lebensdauerüberwachung in mechatronischen Systemen**

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)  
der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Paderborn

genehmigte  
DISSERTATION

von  
Dipl.-Ing. Sebastian Wedman  
aus Szczecin (Stettin), Polen

Tag des Kolloquiums:	9. Dezember 2009
Referent:	Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Claus-Peter Fritzen



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Stipendiat im Graduiertenkolleg „Parallele Rechnernetzwerke in der Produktionstechnik“ und anschließend als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik des Heinz Nixdorf Instituts der Universität Paderborn.

Meinem Betreuer, Herrn Prof. Wallaschek, danke ich für die Möglichkeit zur Promotion, für sein Vertrauen in meine Person und für die wertvollen fachlichen Diskussionen. Ohne seine Anregungen, Hinweise und Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Herrn Prof. Fritzen danke ich für das Interesse an meiner Arbeit, die wertvollen Hinweise sowie für die Übernahme des Koreferats.

Ein herzlicher Dank gilt allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik für die kooperative und angenehme Arbeitsatmosphäre, die fachlichen Diskussionen, Anregungen und Hilfsbereitschaft. Stellvertretend seien hier Dr. Hemsel, Dr. Wickord, Dr. Fründ, Martin Liekenbröcker, Marina Kassühlke und Kerstin Hille erwähnt. Weiterhin gilt mein Dank allen Studenten, die mich im Rahmen von Studienarbeiten, SHK-Tätigkeiten und Praktika unterstützt haben.

Des Weiteren möchte ich hier allen Kollegen von der an der Universität Paderborn entstandenen Forschungsinitiative „Neue Bahntechnik Paderborn“ sowie den Stipendiaten im Graduiertenkolleg für die interessanten Diskussionen und Impulse danken. Nicht zuletzt gilt der Dank auch der Institution des Heinz Nixdorf Instituts, die ein außerordentliches Umfeld für interdisziplinäre Arbeit und Forschung an Produkten und Ideen von morgen geschaffen hat.

Darüber hinaus richtet sich mein Dank auch an mein privates Umfeld – an alle Freunde aus Polen und Deutschland sowie an die Verwandtschaft. Sie haben mich moralisch unterstützt, ermutigt und jederzeit an mich geglaubt.

Meiner Frau Agnieszka danke ich herzlich für die Kraft, den Mut und die Unterstützung, sowie für das Verständnis, das sie immer für mich gehabt hat.

Ein ganz besonderer Dank gilt schließlich meiner Mutter, die mich stets engagiert auf dem gewählten Weg unterstützt hat.

Stuttgart, im Juni 2010

*Sebastian Wedman*



## Kurzfassung

Die Aufgabe der Lebensdauerüberwachung stellt sich bei bestimmten Bauteilen und Komponenten, die dynamischer Beanspruchung unterliegen. Fortschritte der Messtechnik und die rasante Entwicklung der Informationstechnologie erlauben heute eine neue Herangehensweise an diese Fragestellung.

In dieser Arbeit wird die Lebensdauerüberwachung von dynamisch beanspruchten Bauteilen untersucht und ihre Anwendung für die Zustandsdiagnose (Condition Monitoring) mobiler Systeme diskutiert. Im Mittelpunkt der Betrachtung stehen dabei Anwendungen in Kraft- bzw. Schienenfahrzeugen.

In heutigen Fahrzeugen werden die dynamisch beanspruchten kritischen Bauteile meist nicht überwacht. Ohne Überwachung ist die tatsächliche Beanspruchung bzw. der aktuelle Schädigungszustand von diesen Bauteilen nicht bekannt, sodass Bauteilversagen durch Werkstoffermüdung unerwartet auftreten kann. Als Lösung bietet sich ein Lebensdauerbeobachter an, d. h. eine Einrichtung, welche die dynamische Beanspruchung überwacht und die geschätzte Restlebensdauer prognostiziert. Im Vordergrund der Betrachtungen stehen dabei das mechatronische Konzept des Lebensdauerbeobachters und insbesondere die damit verbundene Informationsverarbeitung. Das zu entwickelnde System wird dabei aus einem neuen Blickwinkel – des funktionsorientierten Entwurfs – betrachtet. Ein Konzept des Systemaufbaus wird diskutiert und ausgehend von dem heutigen Stand der Technik werden Empfehlungen zur Konzeption, zur Strukturierung und zum konkreten Aufbau formuliert sowie das mögliche Einsatzgebiet bei Fahrzeugen geschildert.



## **Abstract**

The task of lifetime monitoring applies to certain machine elements and mechanical components working under dynamic loading. Both the recent progress of measurement technology and the rapid development of information technology allow a new approach to this issue.

In this work lifetime monitoring of components, which undergo dynamic loading, is investigated, and the application in condition monitoring of mobile systems is discussed. In the main focus are applications in motor vehicles and rolling stock.

In the modern vehicles dynamically loaded critical components are usually not monitored. Thus, the actual stress and the current damage condition of these components are not known. This may lead to fatigue failure. The solution can be a lifetime observer, a device that monitors the dynamic loading and estimates the remaining lifetime. Especially, the mechatronic concept of the lifetime observer is in the centre of interest, with the involved data processing and management. The system to be developed is regarded thereby from a new point of view - the function-oriented design. A concept for the system structure is discussed and, based on the current state of the art, recommendations regarding the system architecture and exemplary implementation are suggested. Finally, the possible field of application in vehicles is presented.





## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINFÜHRUNG.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ÜBERWACHUNG DER LEBENSDAUER.....</b>	<b>3</b>
2.1	CONDITION MONITORING IN MOBILEN SYSTEMEN.....	3
2.1.1	<i>Luft- und Raumfahrt .....</i>	3
2.1.2	<i>Fahrzeuge .....</i>	9
2.2	GRUNDLAGEN DER BETRIEBSFESTIGKEIT .....	14
2.2.1	<i>Konzepte der Betriebsfestigkeitsrechnung.....</i>	20
2.2.2	<i>Berechnung der Bauteillebensdauer .....</i>	21
2.2.3	<i>Schädigungshypothesen.....</i>	23
2.2.4	<i>Lebensdauerrechnung bei Fahrzeugen .....</i>	35
2.2.5	<i>Schwachstellen der heutigen Vorgehensweise .....</i>	38
2.3	FORMULIERUNG DER IDEE DES LEBENSDAUERBEOBACHTERS .....	38
2.4	ZIELSETZUNG UND GLIEDERUNG DER ARBEIT .....	39
<b>3</b>	<b>KONZEPT DES LEBENSDAUERBEOBACHTERS .....</b>	<b>41</b>
3.1	VORTEILE DER LEBENSDAUERÜBERWACHUNG.....	41
3.1.1	<i>Kraftfahrzeugspezifische Belastungen.....</i>	43
3.1.2	<i>Schienenfahrzeugspezifische Belastungen.....</i>	44
3.2	POTENZIELLE ANWENDUNGSFELDER.....	44
3.2.1	<i>Kraftfahrzeuge.....</i>	45
3.2.2	<i>Schienenfahrzeuge.....</i>	46
3.3	LEBENSDAUERÜBERWACHUNG ALS TEIL DER ZUSTANDSDIAGNOSE.....	47
3.3.1	<i>Elemente der Zustandsdiagnose .....</i>	50
3.3.2	<i>Zustandsdiagnose bei Fahrzeugen .....</i>	53
3.4	ZUVERLÄSSIGKEIT UND SICHERHEIT DES GESAMTSYSTEMS .....	54
3.4.1	<i>Zuverlässigkeit.....</i>	54
3.4.2	<i>Fehleranalyse und Sicherheit in überwachten Systemen .....</i>	56
3.5	AUFBAU DES SYSTEMS ZUR LEBENSDAUERÜBERWACHUNG .....	57
3.5.1	<i>Grundaufbau eines Systems zur Lebensdauerbeobachtung .....</i>	57
3.5.2	<i>Funktionsstruktur des Lebensdauerbeobachters .....</i>	60
3.5.3	<i>Lebensdauerbeobachterentwurf vs. Bauteilentwurf.....</i>	64
3.5.4	<i>Anforderungen an das System zur Lebensdauerüberwachung.....</i>	68
<b>4</b>	<b>INFORMATIONSFLOSS UND -VERARBEITUNG IM LEBENSDAUERBEOBACHTER.....</b>	<b>71</b>
4.1	DATENAKQUISITION UND -AUFBEREITUNG .....	72
4.1.1	<i>Datenakquisition.....</i>	72
4.1.2	<i>Sensorik .....</i>	74
4.1.3	<i>Aufbereitung der Daten (Signalkonditionierung).....</i>	76
4.2	INFORMATIONSVARBEITUNG .....	78

4.2.1	<i>Methoden der Signalanalyse</i> .....	79
4.2.2	<i>Datenreduktion</i> .....	81
4.2.3	<i>Ermittlung von Beanspruchungskollektiven</i> .....	84
4.3	MODELLE DER SCHÄDIGUNGSRECHNUNG .....	89
4.3.1	<i>Direkte Vorgehensweise im Zeitbereich</i> .....	90
4.3.2	<i>Modellbasierte Vorgehensweise im Zeitbereich</i> .....	91
4.3.3	<i>Direkte Vorgehensweise mit Datenkomprimierung</i> .....	92
4.3.4	<i>Modellbasierte Vorgehensweise mit komprimierten Daten</i> .....	93
4.3.5	<i>Konzept der Use-Cases</i> .....	94
4.3.6	<i>Vergleichende Bewertung</i> .....	95
4.4	INFORMATIONSFLOSS IN SENSORBUSSYSTEMEN .....	98
4.4.1	<i>Sensorbussysteme</i> .....	99
4.4.2	<i>Datenübertragung</i> .....	100
<b>5</b>	<b>PROTOTYPISCHE UMSETZUNG</b> .....	<b>103</b>
5.1	SIMULATION DER DATENAUFBEREITUNG .....	103
5.2	LEBENSDAUERÜBERWACHUNG AN EINEM PRÜFSTAND .....	105
5.2.1	<i>Aufgabenstellung</i> .....	105
5.2.2	<i>Definition der Belastung</i> .....	105
5.2.3	<i>Aufbau des Prüfstands zur Lebensdauerüberwachung</i> .....	109
5.2.4	<i>Aufbau der Messkette</i> .....	112
5.2.5	<i>Aufbau der Software</i> .....	115
5.2.6	<i>Übersicht der Ergebnisse</i> .....	116
5.3	LEBENSDAUERÜBERWACHUNG IM RAILCAB.....	121
5.3.1	<i>Achse des Einzelachsfahrwerks</i> .....	122
5.3.2	<i>Linearmotorträger</i> .....	122
5.3.3	<i>Spurführungssystem</i> .....	124
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b> .....	<b>125</b>

## 1 Einführung

Die Aufgabe der Lebensdauerüberwachung stellt sich bei bestimmten Bauteilen und Komponenten, die dynamischer Beanspruchung unterliegen. Eine dauerfeste Auslegung dieser Bauteile kann sich z. B. dann sehr schwierig gestalten, wenn die Lastannahmen nur grob abschätzbar sind, wenn das Gewicht eine wichtige Rolle spielt, bzw. wenn stark unterschiedliche Einsatz- und Belastungsfälle auftreten.

Das Bandspektrum von Objekten, die dynamisch beansprucht und demzufolge durch Ermüdung gefährdet sind, ist sehr groß: eine Bohrinself, die durch die Wellen angeregt wird, eine Brücke, die durch den Verkehr oder tektonische Bewegungen beansprucht wird, die Aufhängung der Antriebsturbine in einem Flugzeug, der Rotor im Hubschrauber oder der Achszapfen in einem Kraftfahrzeug, der die Straßenunebenheiten „erleben“ muss, sind nur einige Beispiele. Zahlreiche spektakuläre Schadensfälle zeigen, welche katastrophalen Folgen das Versagen in Folge von Materialermüdung haben kann.

Vor allem im Bereich der Luft- und Raumfahrt, bedingt durch die Masse des zu bewegend Systems, kann man nicht auf die dauerfeste Auslegung ausweichen. Deshalb ist dieser Industriezweig als Vorreiter im Bereich der Überwachung von mobilen Systemen zu bezeichnen. Seit der Serie von Katastrophen von Passagierflugzeugen de Havilland Comet I in der Mitte des 20. Jahrhunderts, die u. a. auf die Materialermüdung zurückzuführen war, wurde an dieser Problematik verstärkt gearbeitet. Bemerkenswert ist dabei, dass man im Bereich der Zivilluftfahrt vor allem den Lösungsansatz der Inspektion mit Sichtkontrolle, Ultraschall- bzw. Wirbelstromprüfung verfolgt hat, und nur in Militärflugzeugen auch automatische, auf mechanischer Basis arbeitende Einrichtungen zur Erfassung der Belastung eingesetzt hat.

Die Fortschritte der Messtechnik und insbesondere die rasante Entwicklung der Informationstechnologie in den letzten Jahren erlauben heute einen neuen Blick auf die Problematik der Lebensdauerüberwachung. Eine Reihe interessanter Anwendungen in Brücken und Gebäuden sowie in der Kraftfahrzeug- bzw. Bahnindustrie zeichnen sich ab.

In dieser Arbeit wird die Lebensdauerüberwachung von dynamisch beanspruchten Bauteilen untersucht und ihre Anwendung bei der Zustandsdiagnose (Condition Monitoring) mobiler Systeme diskutiert. Im Mittelpunkt stehen Anwendungen in Kraft- bzw. Schienenfahrzeugen.



## 2 Überwachung der Lebensdauer

### 2.1 Condition Monitoring in mobilen Systemen

Es gibt nur wenige technische Systeme, bei denen keine Überwachung ihrer Funktion erforderlich ist. Die meisten Anlagen und Maschinen müssen in der einen oder anderen Weise überwacht werden. Dabei ist die Notwendigkeit der Überwachung umso größer, je gravierender die Folgen eines Systemausfalls sind. Regelmäßige manuelle Inspektionen oder Wartung nach festen Zeitplänen sind zeit- und kostenaufwändig und können trotzdem oft nicht verhindern, dass es dennoch zu unvorhergesehenen Ausfällen kommt.

Die Idee einer automatischen, permanenten Systemüberwachung bei mechanischen Strukturen wird deshalb schon seit längerem verfolgt. Auch verschiedene Vorschläge zu einer sensorgestützten Vorhersage der Restlebensdauer technischer Systeme sind seit längerem bekannt. So findet man z. B. verschiedene Anwendungen dieser Art in der Luftfahrt – [US 4336595, 1982], [Tang und Moffat, 1996], [Ellerbrock et al., 1999], [Hunt und Hebden, 2001], [Vachtsevanos et al., 2006] oder in der Kraftwerkstechnik [DE 3314181, 1983], wo diese Systeme zur Erhöhung der Betriebssicherheit eingesetzt werden. Mit zunehmender funktionaler Komplexität ist es bei vielen technischen Systemen notwendig geworden, die ordnungsgemäße Funktion auf bestimmte Weise zu überwachen.

Im Folgenden wird der Stand der Technik von Systemen zur Zustandsüberwachung und Vorhersage der zu erwartenden Restlebensdauer beschrieben. Dabei liegt der Schwerpunkt der Betrachtungen auf Anwendungen in mobilen Systemen. Eine allgemeine Systematik des Aufbaus von Systemen zum Beobachten des Verbrauchs der Lebensdauer dieser Systeme hat sich noch nicht herausgebildet.

#### 2.1.1 Luft- und Raumfahrt

Vor allem im Militärbereich, bedingt durch die oft unvorsehbare Art der Beanspruchung, besteht die Notwendigkeit, kritische Bauteile zu überwachen und deren Lebensdauer zu prognostizieren. Man hat relativ früh bemerkt, dass die Auslegung der dynamisch beanspruchten Bauteile durch die schwer zu treffenden Lastannahmen äußerst problematisch ist. Als Beispiel dafür, dass manchmal die Lastannahmen weit von den realen Bedingungen entfernt sind, sei an dieser Stelle nach [Neubauer und Günther, 2000] das Fahrwerk des Militärflugzeugs Tornado erwähnt. Die Landemanöver auf nasser Landebahn kommen viel häufiger vor als in der Entwicklungsphase angenommen. Die Start- und Landemasse des Flugzeugs ist im Laufe der Betriebszeit gestiegen. Die Annahme, dass die Hälfte der Landungen 3-Punkt-Landungen sind (alle Fahrwerke setzen gleichzeitig auf) hat sich als falsch

erwiesen. Eine Untersuchung hat ergeben, dass nur bei 10 % der Landungen das vordere Fahrwerk die Landebahn gleichzeitig mit den restlichen Fahrwerken kontaktiert. Daraus ergibt sich eine signifikant andere Beanspruchung als angenommen. Nur eine ständige Lebensdauerüberwachung kann in solchen Fällen eine Aussage über die Restlebensdauer erlauben. Bei gleicher Anzahl von Flugstunden (diese Zahl gilt immer noch als ein wichtiger Parameter für die Lebensdauer-schätzung von Flugzeugen) kann die Beanspruchung um den Faktor 5 streuen!

Bei Flugzeugen wird als einer der wichtigsten Parameter die senkrechte Beschleunigung betrachtet. Sie ändert sich ständig während des Fluges (Kraftstoffverbrauch, abgeworfene Ladung). Bereits seit vielen Jahren werden einfache, mechanische Lebensdauerschätzsysteme eingesetzt [Armitage und Holford, 1998]. Sie basieren auf mechanischen Beschleunigungssensoren. Überschreitungen von bestimmten Schwellenwerten werden mechanisch gezählt (*g-counts*, *Fatigue-Meter*). Die Umrechnung der Beschleunigungswerte auf die aufgebrauchte Lebensdauer wird mittels einer sog. *Fatigue Meter Formula* am Boden gemacht. Auf diese ersten, noch recht primitiven Systeme, folgten dann die sog. OLM (*Operation Loads Measurement*) Systeme, bei denen für die Lebensdauerabschätzung Daten aus DMS-Messungen (DMS – Dehnungsmessstreifen) benutzt werden. Auch hier erfolgt die Auswertung der Daten erst nach Flugende am Boden. Zur Beurteilung der Strukturschädigung wird dabei nach [Günther, 2000] bei Safe-Life-Strukturen die lineare Schadensakkumulation (Miner-Regel) eingesetzt. Safe-Life-Strukturen sind durch eine bestimmte, limitierte Lebensdauer charakterisiert, die analytisch und experimentell nachgewiesen wurde; ein Bruch eines Strukturelementes führt zum kompletten Versagen – z. B. Fahrwerk. Für die beim Einsatz eines OLM-Systems erforderlichen Messungen mit Dehnungsmessstreifen wurden einige Flugzeuge nachgerüstet (z. B. Tornado der Luftwaffe); andere werden bereits vom Hersteller mit den erforderlichen Sensoren angeboten (z. B. CF-8, Canadian Forces).

Neben den gemessenen Spannungen werden auch andere wichtige Flugparameter aufgezeichnet, sodass eine individuelle Überwachung jedes Flugzeugs erfolgen kann, und auch im Nachhinein z. B. erkannt werden kann, welche Flugphasen für eine besonders starke Beanspruchung und Schädigung des Systems verantwortlich waren. Als Messpunkte werden kritische Stellen an der Struktur gewählt, wobei sowohl die Zugangsmöglichkeiten als auch die Möglichkeit einer unbeabsichtigten Beschädigung berücksichtigt werden müssen. Zwecks Redundanz werden die Sensoren nach Möglichkeit doppelt angebracht. Es existieren weiterentwickelte Überwachungssysteme, die in das *Operation Loads Measurement* System der Militärflugzeuge integriert werden können [Neumair, 1998]. Diese Systeme arbeiten völlig autonom, die Datenreduktion und Auswertung werden on-board durchgeführt. Mithilfe eines mathematischen Modells wird aus den gemessenen Dehnungen am Fahrwerk des Flugzeugs die Beanspruchung am Flugzeugrumpf errechnet. In einer Beispielsausführung verfügt das System über 20 analoge und 16 digitale Kanäle und arbeitet

mit 12 bit Auflösung und 2 kHz Abtastrate. Die Abtastrate bei der direkten Messung hängt allerdings stark davon ab, um welches Element sich handelt. Bei der Rumpfüberwachung reicht nach [Henkel, 2000] eine Abtastrate von 16 Hz. Auch beim Eurofighter wird diese Abtastrate [Hunt und Hebden, 2001] für die Normalbeschleunigung  $N_z$  als ausreichend bezeichnet. Für andere Stellen und Messgrößen müssen die Abtastraten anhand der Lastanalyse (bei dynamischer Beanspruchung) ausgewählt werden.

Für den Eurofighter [Hunt und Hebden, 2001] wurde ein sog. *Structural Health Monitoring* System (SHM) entwickelt. Es soll neben dem Lebensdauerverbrauch auch ungewöhnliche Betriebsereignisse und Strukturbelastungen überwachen. Der Lebensdauerverbrauch wird online im Flug berechnet. Die kritischen Beanspruchungen können dabei auf zwei unterschiedliche Arten ermittelt werden:

- durch direkte Messung der mechanischen Beanspruchung mittels DMS
- indirekt durch Ableiten der Beanspruchung aus anderen Zustandsgrößen.

Bei der indirekten Methode werden Daten aus Flugdatenschreiber, Bewaffnungssystem und Kraftstoffsystem benutzt. Diese Daten werden mit ca. 17000 Templates (Vorlagen) verglichen, bevor eine Aussage über die Beanspruchung formuliert werden kann. Diese Vorlagen sind anhand von FE-Simulationen und Ermüdungsprüfungen erstellt worden und korrespondieren mit den möglichen Kombinationen von Flugparametern.

Andere bekannte Systeme auf dem Gebiet der Luftfahrt sind:

- HUMS – Health and Usage Monitoring System für Hubschrauber [Azzam, 1996],
- ACMS – Aircraft Condition Monitoring System für den Airbus A3xx [Verhufen, 1998],
- ARMS/ EUROARMS – Aircraft Recording and Monitoring System für schwere Hubschrauber [Foultier et al., 1998],
- OLMOS – On-board Life Monitoring System für das Kampfflugzeug Tornado [Henkel, 2000]. In diesem Fall ist es bemerkenswert, dass die Flugzeuge nachträglich (manche sind schon seit 20 Jahren im Einsatz) mit der Überwachungstechnologie ausgerüstet werden,
- PHM – Prognosis and Health Management [Vachtsevanos et al., 2006], [Cutter und Thompson, 2005] für das Kampfflugzeug JSF (Joint Strike Fighter, F-35).

Das PHM-System des JSF F-35 ist schematisch in Bild 2-1 dargestellt. Im Allgemeinen besteht das System aus drei Ebenen: Zustandsbewertung online an Bord, Zustandsmanagement und Berichterstattung sowie Logistik und Wartung nach der Landung (am Boden). Schon in der Entwicklungsphase des Flugzeugs wurde der Schwerpunkt der Betrachtungen auf Verifizierung und Validierung (V & V) des Überwachungssystems gelegt [Vachtsevanos et al., 2006], das als eine diagnostisch-

prognostische Plattform aufgestellt ist. Besonders interessant ist der Ansatz, dass das System dezentral, durch mehrere Lieferanten verschiedener Flugzeug-Subsysteme entwickelt wird. Gemeinsame Verifizierung und Validierung sollen die gewünschte Präzision des Gesamtsystems ermöglichen.

In der Hubschraubertechnik gibt es schon seit einigen Jahren verschiedene Lebensdauerüberwachungskonzepte, bei denen jedoch zuerst nur das Messen verschiedener Größen während des Fluges vorgesehen war und die Auswertung der Daten am Boden erfolgte. Mit steigender Leistungsfähigkeit mobiler Rechner wurden dann aber auch zunehmend Systeme entwickelt, bei denen auch die Auswertung online in einem on-board Rechnersystem erfolgt. Die Überwachung betrifft mehrere dynamisch beanspruchte Komponenten, deren Lebensdauer anhand der gesamten Laufzeit, der Laufzeit unter bestimmten Bedingungen, der Anzahl der Starts oder auch anhand der Überwachung der Beanspruchung berechnet wird.

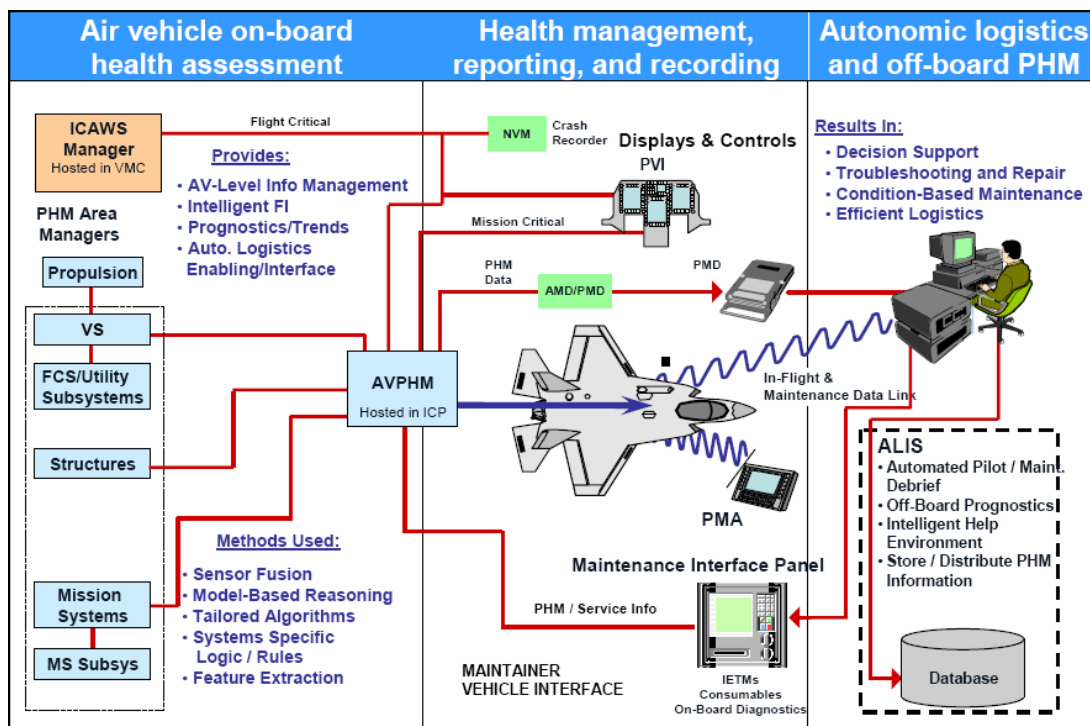


Bild 2-1 Beispiel der diagnostisch-prognostischen Plattform des PHM-Systems (Prognosis and Health Management) für das Militärflugzeug JSF F-35 [Cutter und Thompson, 2005]

Die Firma Lockheed hat schon 1982 [US 4336595, 1982] ein Patent für einen „Structural life computer“ angemeldet. Damit war eine elektronische Einrichtung gemeint, die die Lebensdauer einer Struktur mithilfe von Signalen aus Dehnungsmessstreifen errechnet hat. Die kumulierte Schädigung wurde gespeichert und nach Bedarf angezeigt. In der Patentanmeldung [EP 0339833, 1989] ist ein „load monitoring system with remote sensing“ beschrieben. Dabei werden die zur



Berechnung der Beanspruchung an den rotierenden und messtechnisch schwer zugänglichen Elementen (z. B. Rotorblätter im Hubschrauber) benötigten Informationen aus zusätzlichen Sensoren, die an anderen Stellen der Struktur befestigt sind, gewonnen. Anhand bestimmter definierter Verknüpfungen ermittelt der Prozessor daraus die Beanspruchungen an den interessanten Stellen. In der Patentanmeldung [GB 2233798A, 1990] wird ein sog. „*Aircraft health and usage monitoring system*“ beschrieben. Darunter ist ein Gesamtkonzept für die Überwachung mehrerer Subsysteme (Motor, Übertragungsstrang, Rahmen etc.) eines Helikopters zu verstehen. Die Ergebnisse der Überwachung dienen einerseits zur Diagnose, d. h. zur Überwachung der einwandfreien Funktion der Systeme; andererseits werden die während der Überwachung gewonnenen Daten ausgewertet und zur Festlegung von Wartungsmaßnahmen und zur Lebensdauerabschätzung verwendet. Die Diagnoseeinrichtung funktioniert online (mit zwei parallelen Rechnern), aber ein Teil der Auswertung von Messdaten erfolgt erst nach der Landung (am Boden). Einer der beiden Rechner bearbeitet die Standardaufgaben, der andere befasst sich mit unerwarteten Vorkommnissen. Hauptmodule in diesem Gesamtkonzept sind: Wartungsprozessor, Überwachung im Bereich der Zeitfestigkeit, Überwachung der aufgebrauchten Lebensdauer, Überwachung der Ölverschmutzung und schließlich Schwingungsüberwachung des Rumpfes, Getriebes und Motors. Das Health Monitoring System kann dabei wie folgt aufgeteilt werden:

- Ermittlung eines defektcharakteristischen Signals (es wird von dem Hintergrund, d. h. „normalen“ Vibrationen und Rauschen separiert)
- Merkmalextraktion (aussagekräftige Parameter werden extrahiert)
- Defektisolierung (die Art des Defektes wird bestimmt bzw. klassifiziert)
- Ermittlung der Wichtigkeit des Defektes (es wird eine Prognose gestellt, wie lange das Teil oder die Komponente ohne Beeinträchtigung der Sicherheit standhalten wird; eine Sicherheitsprozedur - *emergency scenario* - wird nach Bedarf durchgeführt)
- post-processing (Datenverwaltung, Ausgabe der Information, Entscheidungen werden getroffen).

[Yen, 1995], [Yen, 1996] beschreibt ein on-board Vibration Monitoring System (VMS) für Hubschrauber, bei dem die Auswertung der während des Fluges aufgezeichneten Daten nach dem Landen erfolgt. Eine Online-Überwachung während des Betriebs ist mit diesem System zwar nicht möglich, jedoch erwartet man dennoch eine zeitnahe Beurteilung der noch zur Verfügung stehenden Restlebensdauer direkt im Anschluss an einem Flug, noch bevor ein neuer Einsatz des Systems erfolgt. In dem beschriebenen System kommen neuronale Netze zum Einsatz und es werden verschiedene Redundanz-Konzepte verwendet, mit denen die Zuverlässigkeit des Überwachungssystems erhöht werden soll. Ähnliche Konzepte werden auch durch [Azzam, 1996] beschrieben. Die Beanspruchung der wichtigsten Teile wird dabei indirekt mithilfe von vorhandenen Flugdaten (Beschleunigungen, Leistung des Motors, Geschwindigkeit usw.) ermittelt. [Tang und Moffat, 1996]

beschreiben ein System, mit dem eine Lebensdauerbeobachtung für ausgewählte mechanische Bauteile in einem Helikopter vorgenommen werden kann. Da es schwierig ist, die Beanspruchungen direkt zu messen, wurde ein Rechenmodell entwickelt, mit dem die aktuellen Beanspruchungen der Bauteile aus den Daten der Helikopter-Steuerung errechnet werden. Im Betrieb werden die für den Lebensdauerbeobachter benötigten Beanspruchungsdaten aus den vorhandenen Signalen unter Verwendung von Mustererkennungsverfahren online berechnet. Damit ist zu jedem Zeitpunkt der „Lebensdauerverbrauch“, bzw. die rechnerische Restlebensdauer jeder überwachten Komponente, bzw. jedes überwachten Bauteils bekannt. Zur Beschreibung der Schädigung wird die Miner-Regel verwendet, wobei die dabei erforderlichen bauteilspezifischen Ausgangsdaten zur Lebensdauerberechnung vorab aus Versuchen gewonnen werden. Der Zusammenhang zwischen der Signalform der Helikopter-Steuerung und den zugehörigen Beanspruchungsspektren wird aus Messungen gewonnen, die während der Flugerprobung des Systems an einem voll instrumentierten Hubschrauber gemacht werden. Bei der beschriebenen Untersuchung werden stark durch schwingende Belastung beanspruchte Strukturelemente ausgewählt, wie z. B. die Rotorblätter des Haupt- oder Heckrotors. Die mit dem „*on-board fatigue processor*“ gemachten Erfahrungen sind positiv. Die durch den Prozessor errechnete Beanspruchung stimmt mit der Lebensdauer anhand einer Lastzyklen-Zählung gut überein. Außerdem kann der Prozessor gut zwischen leicht und stark schädigenden Flugmanövern unterscheiden. Der große Vorteil des in der Veröffentlichung beschriebenen Verfahrens besteht darin, dass keine zusätzlichen Sensoren benötigt werden und nur Signale verwendet werden, die in der Helikopter-Steuerung ohnehin vorhanden sind.

Ein System für die Zuverlässigkeitsvorhersage und Schadensakkumulation in einem Übertragungsstrang eines Helikopters anhand Beanspruchungsüberwachung wird durch [Place et al., 1999] beschrieben. Der Vergleich zwischen den tatsächlichen und zulässigen Werten der Schädigung wird anhand von Wahrscheinlichkeitsverteilungen durchgeführt. Als Schadensakkumulationsmodelle für die Ermüdungsschäden werden das lineare Palmgren-Miner und das nichtlineare Paris-Erdogan Modell eingesetzt. Näher wird das generalisierte Schadensakkumulationsmodell von Cranfield dargestellt. Im Modell, das im Allgemeinen nichtlinear ist, werden stochastische Variablen verwendet, die mögliche Streuung der Materialparameter und unterschiedliche Anwendung berücksichtigen. Für die praktische Umsetzung wird eine lineare Vereinfachung (Miner-Regel) vorgeschlagen. Ein weiteres Beispiel der Zustandsüberwachung sowie der modellbasierten Restlebensdauerprognose des Übertragungsstrangs im Hubschrauber, z.B. mithilfe der sequenziellen Monte Carlo Methode (Partikel-Filter) oder der neuronalen Netze, ist in [Vachtsevanos et al., 2006] beschrieben.

[Azzam, 1996] berichtet über die Anwendung des Use-Case Konzeptes bei Hubschraubern. Dabei handelt es sich um eine Aufteilung des gesamten

Beanspruchungsspektrums in eine begrenzte Anzahl typischer Anwendungsfälle. Bei der Klassifizierung wird die auf Basis der vorhandenen Flugdaten (Beschleunigungen, Leistung des Motors, Geschwindigkeit usw.) ermittelte Beanspruchung einem vordefinierten Anwendungsfall zugeordnet. Eine wichtige Rolle spielen dabei neuronale Netze, die mit Flugdaten und Messungen an einem voll instrumentierten Versuchs-Hubschrauber angelernt wurden. Im späteren Betrieb werden dann nur noch die Daten aus der Flugsteuerung ausgewertet.

Eine permanente Überwachung auf Basis direkter Messung mittels DMS-Technik in Verbindung mit den vorhandenen Flugparametern kann in den modernen Militärflugzeugen als Stand der Technik gesehen werden. Um die Beanspruchung aus den Flugparametern bestimmen zu können, sind gut definierte Lasttransferfunktionen notwendig [Boller, 2001]. Die Lastwechselspele sind dann üblicherweise Rainflow-Zählung (Klassierverfahren) unterzogen. Die Schädigung wird beispielsweise für den letzten Flug und für die ganze Betriebszeit berechnet. Anhand der vorhandenen Modelle kann die restliche Lebensdauer berechnet werden. Das Ermüdungsmonitoring kann anhand der vorhandenen Flugdaten für mehrere Komponenten stattfinden. Die Lebensdauer wird anhand der gesamten Laufzeit, der Laufzeit unter bestimmten Bedingungen und der Startanzahl berechnet.

## 2.1.2 Fahrzeuge

Die Idee der Zustandsüberwachung bei Fahrzeugen betrifft vor allem Kraft- und Schienenfahrzeuge. In beiden Fällen handelt es sich um mobile Systeme auf Rädern. Die Beanspruchung resultiert z. B. aus der Anregung durch die Straße/Strecke; der Lebensdauerverbrauch ergibt sich u. a. als Funktion der transportierten Last. Unterschiede zwischen den beiden Anwendungen ergeben sich aus der Betriebsart (freie Entscheidung des Fahrers in einem Kfz vs. weitestgehende Automatisierung im schienengebundenen Verkehr). Konkrete Anwendungen des Konzeptes eines Lebensdauerbeobachters bei Schienen- oder Straßenfahrzeugen sind bisher nicht bekannt. Es gab zwar schon früh Versuche, mithilfe von Sensor-Signalen auf den momentanen Fahrzustand von Serienfahrzeugen zu schließen, eine Verknüpfung der gemessenen Signale mit der Schädigung des Fahrzeuges, bzw. mit der Restlebensdauer war darin jedoch noch nicht vorgesehen.

Auf ähnliche Weise können auch spezielle Militärfahrzeuge betrachtet werden. Ein Versuch der Implementierung des aus Hubschraubern bekannten HUMS (*Health and Usage Monitoring System*) in einem Transportpanzer ist in [Heine, 2008] beschrieben. Einerseits wird dort das Use-Case Konzept erprobt (bezeichnet als *terrain identification*), andererseits werden Beanspruchungen (direkt und indirekt) ermittelt und nach der Miner-Regel akkumuliert. Die Vorgehensweise wurde am Beispiel eines Bauteils der Radaufhängung gezeigt. Direkte Methoden der Beanspruchungsermittlung wurden dabei als wenig geeignet bewertet (nicht

ausreichend robust für den Militäreinsatz). Es wurden auch Potenziale für weitere Arbeiten genannt. Der Reifegrad des Systems entspricht noch nicht dem im Hubschraubereinsatz.

### **Überwachung in Kraftfahrzeugen**

Eine Idee der Überwachung in Kraftfahrzeugen ist in der Arbeit von [Oswald et al., 1989] beschrieben. Es wird ein speicherprogrammierbares Messsystem zum Erfassen von Betätigungshäufigkeiten und Fahrbetriebszuständen über lange Zeiträume im Flottenversuch vorgestellt. Das Gerät verfügt über die Kapazität von bis zu einem Jahr Aufzeichnungszeit und kann nach Bedarf folgende Operationen durchführen: reine Zählung, Verweildauermessung (ein- und zweidimensionale Klassierung), Streckenzählung, Messung von Maximal-, Minimal- und Mittelwerten. Ziel der Untersuchungen war es, die Schadenquoten für die einzelnen Bauteile (z. B. Kupplung) zu prognostizieren; als Flottenversuchsträger sollten dabei Taxifahrzeuge dienen. [Takahara, 1992] beschreibt ein Datenakquisitionssystem mit Rainflow-Zählung und Lebensdauerschätzung für Kraftfahrzeuge. In einem Fahrzeug wird ein mobiles real-time System für die Drehmomentüberwachung und anschließende Online-Reduktion der Daten eingesetzt. Durch diese prototypische Umsetzung können Aussagen über die Belastungen des Antriebsstrangs im Einsatz für einen LKW gemacht werden. Die gewonnenen Daten konnten danach für die Testphase der einzelnen Bauteile auf dem Prüfstand verwendet werden.

In einer Patentanmeldung der Firma Porsche [DE 4226010, 1994] wird ein Verfahren zum Überwachen der Lebensdauer von Fahrzeugbauteilen (insbesondere Fahrwerksbauteile) vorgeschlagen, das sich jedoch offensichtlich nicht durchgesetzt hat. Die Messelemente (sog. Belastungsaufnehmer) werden an den Bauteilen in hochbeanspruchten Bereichen angeordnet. Die Messwerte werden während des gesamten Fahrbetriebs an eine Auswerteeinheit weitergeleitet und gespeichert. In dieser Einheit wird auch eine kontinuierliche Bewertung der Daten durchgeführt. Wenn die Lebensdauer einzelner Bauteile aufgebraucht ist, wird der Fahrer aufgefordert, diese auszutauschen. Ein Verfahren zur on-board Überwachung von Kraftfahrzeugkomponenten beschreibt [Appel, 1992]. Als Anwendungsbeispiel dient hier die Nfz-Servolenkung. Auf Basis eines mathematischen Modells werden bestimmte Parameter ausgewählt und überwacht. Anhand dieser Veränderungen können die Prozessfehler geortet werden und die Fehlerdiagnose stattfinden. Eine Lebensdauerüberwachung ist jedoch in diesem System nicht vorgesehen.

Die heute in Fahrzeugen eingesetzten Überwachungssysteme werden hauptsächlich zur Überwachung von Komponenten oder Subsystemen mit relativ geringer Lebensdauer eingesetzt und meist ausschließlich zur Festlegung von Wartungs- und Instandhaltungszeitpunkten genutzt. Eine Überwachung der „langlebigen“ Komponenten, d. h. der Strukturbauteile erfolgt bislang, soweit bekannt, nicht. Auch

sind bisher keine Ansätze bekannt geworden, in denen die Verbesserung der Auslegung, die infolge der durch die Überwachung möglichen besseren Kenntnis der Betriebsbeanspruchung erreichbar wäre, aufgegriffen wurde.

Beim Informationsfluss in Kraftfahrzeugen sind in der letzten Zeit große Fortschritte erzielt worden. So kann z. B. der CAN-Bus als Informationsträger auch für zusätzliche Diagnose bzw. Messsysteme genutzt werden. Außer zur Erfüllung der Hauptfunktion, d. h. der Verbindung von verschiedenen Steuergeräten können die vom Bus transportierten Daten auch für andere Zwecke genutzt werden. Außer allgemeinen Signalen, wie z. B. Öltemperatur, Ölstand, Motortemperatur, momentaner Kraftstoffverbrauch, die zu Diagnosezwecken benutzt werden, aber praktisch keine Informationen über die aufgebrauchte Lebensdauer liefern, können auch die für die Lebensdauerberechnung relevante Signale übertragen werden, wie z. B. Eintauchtiefe der Federung, Geschwindigkeit, Beschleunigungen etc.

Das Controller Area Network (CAN) ist in der Norm [DIN ISO 11898] „Austausch digitaler Informationen; Steuergerätenetz (CAN) für schnellen Datenaustausch“ beschrieben. Der CAN-Bus ist charakterisiert durch die Topologie in Form einer Linienstruktur und den zufälligen Buszugriff, d. h. sendewillige Teilnehmer greifen bei Bedarf auf das Übertragungsmedium zu. Die Teilnehmer müssen dementsprechend auch warten, bis das Medium „frei“ ist. Bei einer Länge bis 40 m kann die Übertragungsrate 1 Mbit/s erreicht werden. Die Teilnehmer-Hierarchie ist dezentral (d. h. nach dem Multi-Master Prinzip) aufgebaut. Die maximale Anzahl der Teilnehmer ist nicht spezifiziert und wird durch den Bustreiber bestimmt. Durch die inhaltsbezogene Adressierung wird eine hohe System- und Konfigurationsflexibilität erreicht. Für Nachrichten mit hoher Priorität können die Echtzeitbedingungen erfüllt werden (inhaltsbezogene Priorisierung bei der Busvergabe) – d. h. wenn mehrere Stationen versuchen, gleichzeitig zu senden, setzt sich die Botschaft mit der höchsten Priorität durch. So herrschen z. B. im Bereich Fahrdynamik (Motorregelung, ABS, ESP etc.) die härtesten Echtzeitbedingungen (10 ms), im Bereich Karosserie und Komfort (Anzeigen, Sitze etc.) liegen die benötigten Zeiten dagegen bei 100-200 ms. Das System gilt als in der Regel nicht echtzeitfähig. Auch wenn das Feldbussystem sich durch eine hohe Datensicherheit zeichnet, besteht außerdem die Gefahr, dass zwei Geräte gleichzeitig Informationen senden (Datenkollision).

Der zunehmende Einsatz elektronischer Systeme im Auto erfordert neue Methoden zur Datenübertragung. Als Beispiel kann hier ein neues Bussystem „Byteflight“ [Grießbach et al., 2000] erwähnt werden, das im BMW 7er erstmals zur Ansteuerung von Airbags und Sicherheitsgurten eingesetzt worden ist. Er ist durch Übertragungsraten bis zu 10 Mbit/s charakterisiert und vereinigt die Vorteile von TTP (Time Triggered Protocol) und CAN-Bus (Controller Area Network). Der CAN-Bus ist Ereignis-gesteuert und durch asynchrone Datenübertragung flexibel, er bietet dabei einen einfachen Zugang für neue Netzteilnehmer. TTP ist dagegen

synchron gesteuert, d. h. jedem Teilnehmer steht eine bestimmte Übertragungszeit zur Verfügung. „Byteflight“ ist ein Datenbusstandard mit Kunststofffaserkabel als Übertragungsmedium, bei dem die Signale als Lichtimpulse versendet werden. Das System ist als Sternnetz ausgelegt und bleibt bei Ausfall von einzelnen Komponenten noch funktionsfähig. Im Zentrum des Netzes befindet sich ein Sternkoppler (Single-Master-Prinzip), der die Nachrichten zwischen den Teilnehmer koordiniert und verteilt. Das System stellt wichtigen Nachrichten eine fest synchronisierte Sendezeit zur Verfügung, die restliche Bandbreite wird für asynchrone Datenübertragung benutzt. Volle Systemflexibilität erlaubt nach Bedarf ausschließlich synchrone oder asynchrone Übertragung. Somit ist das System auch für sicherheitskritische Anwendungen geeignet. Die Kommunikation zwischen verschiedenen Bussystemen ist durch einen sog. Gateway ermöglicht. Dessen Aufgabe besteht darin, unterschiedliche Datenformate anzupassen.

### **Überwachung in Schienenfahrzeugen**

Die Entwicklung von Systemen zur Zustandsdiagnose von Schienenfahrzeugen vollzog sich über viele Jahre, beginnend mit isolierten Überwachungssystemen für einzelne Komponenten. Daraus entwickelten sich nach und nach komplexere Systeme, bei denen ein ganzheitlicher Ansatz verwirklicht wurde, mit dem Ziel nicht mehr nur einzelne Komponenten, sondern das gesamte System zu überwachen. In der Bahntechnik werden in der letzten Zeit vereinzelt Versuche gemacht, den gestiegenen Sicherheitsansprüchen gerecht zu werden und auch Instandhaltungsprozesse zu optimieren. Im Zentrum der Aufmerksamkeit sowohl der Hersteller als auch Betreiber liegt dabei die Zustandsüberwachung von Drehgestellen, wie z. B. in [Wiesenhofer und Schmeja, 2001], [Heinisch, 2001] oder [Maly et al., 2001] beschrieben. Die Überwachungssysteme für die Drehgestelle werden zunächst für Personenzüge (insbesondere Höchstgeschwindigkeitszüge) konzipiert, bei den Güterzügen scheitert die Umsetzung bis jetzt an mangelnden Strom- und Busverbindungen. Eine Lösung dafür können autonom und autark arbeitende Überwachungssysteme auf Funkbasis werden. Der Zustand von Federn, Dämpfern, Lagern und Räder kann auf diese Weise detektiert werden. Außerdem liefern die Systeme Informationen über eine mögliche Entgleisung bzw. über den Zustand des Gleises. Zu diesen Zwecken werden vor allem Beschleunigungssensoren eingesetzt. Eine vollständige Überwachung eines Drehgestells sollten 6 bis zu 8 Beschleunigungsaufnehmer ermöglichen. Außerdem werden auch Drehzahlsensoren und Temperatursensoren (insbesondere für die Überwachung des Lagerzustands gegen Heißlaufen) implementiert. Die Überwachung der Lebensdauer bzw. die Prognose der Restlebensdauer steht bei diesen Versuchen nicht im Vordergrund, sie konzentrieren sich eher auf die Aussage über eine korrekte Erfüllung der gewünschten Funktionen. Mit diesen Diagnosesystemen sollte auch die bedarfsgerechte Instandhaltung möglich sein.

Einer der ersten Versuche, ein Sensorsignal zur Beurteilung des Fahrzustandes eines Schienenfahrzeugs zu verwenden, ist im Patent [US 4752053, 1988] beschrieben. Darin ist ein System vorgestellt, bei dem anhand des Signals eines Beschleunigungssensors Rückschlüsse auf den Fahrzustand gezogen werden und eine entsprechende Zustandsmeldung an eine Leitstelle übertragen wird. Die Diagnoseeinrichtung des deutschen Höchstgeschwindigkeitszuges ICE 2 ist in [Schultes und Gau, 1994] ausführlich beschrieben. Bei der Entwicklung dieses Systems konnte bereits auf Erfahrungen, die mit dem ICE 1 sowie bei verschiedenen Reisezugwagen-Diagnosesystemen gemacht wurden, zurückgegriffen werden. Aufgrund der im ICE 2 vorhandenen Leittechnik kann dort die Eigendiagnose der elektrischen Subsysteme relativ einfach verwirklicht werden, wobei fast ausschließlich auf die Messwerte und Steuergrößen zugegriffen wird, die für die Steuerung und Regelung benutzt werden. Das Diagnosetool weist folgende Funktionalität auf:

- Fehlererkennung und -eingrenzung, Erfassung von Fehlerhäufigkeiten
- Erfassung von Umfeldinformationen und Historienspeicher
- Abhilfeprogramme zur Minderung von Fehlerauswirkungen
- Prüfläufe, automatisierte Bremsprobe
- Erfassung statistischer Daten.

In der Veröffentlichung wird auch auf den Zielkonflikt zwischen einem möglichst hohen erkennbaren Fehleranteil und möglichst wenigen Fehlalarmen eingegangen. Die verschiedenen Fehlerarten werden, je nach Schwere und möglicher Konsequenz in Betriebs- und Werkstattprioritäten geordnet. Ein Ziel des Diagnosesystems besteht dabei darin, möglichst nur Signale und Daten zu nutzen, die ohnehin schon anfallen. Zusätzliche Sensoren, die nur für das Diagnosesystem genutzt werden, finden sich jedoch im Bereich der Kälteanlage und der Bremssysteme. Abweichungen vom Normalzustand werden als Fehler bewertet. Zu jedem Fehler wird eine Codierung gegeben, mit der die Art des Fehlers und die kleinste wirtschaftlich tauschbare Einheit charakterisiert werden kann. Das Systemkonzept ist in längerer Entwicklung „historisch gewachsen“, so wird z. B. der Steuerwagen sowohl als Mittelwagen als auch als Triebkopf behandelt und mit zwei Diagnosesystemen (ZEUS und DAVID) ausgerüstet.

Der Zusammenhang zwischen Instandhaltungskonzepten und Diagnoseeinrichtungen bei Triebfahrzeugen wird in [Borchert, 1995] dargestellt. Neben dem Einsatz der Diagnoseeinrichtung zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit des Betriebes wird dort auch die Funktion der Nachweissicherung bei Unfällen, z. B. im funkferngesteuerten oder automatischen Fahrbetrieb genannt. Zu den überwachten Fahrzeugzuständen zählen beispielsweise Parameter des Dieselmotors (Drehzahl, Öldruck) oder des Bremssystems. Für die Überwachung des Dieselmotors werden die Informationen aus der Motorsteuerung verwendet. Die Fehler werden protokolliert, die Signale im Ereignisspeicher abgespeichert, sodass sie danach nach Bedarf abgerufen werden

können. Eine Ergänzung des Diagnosesystems bildet ein Unfallschreiber, wo sicherheitsrelevante Signale und Informationen, z. B. die Bedienanweisungen, Funksignale, usw. ständig protokolliert werden. Mithilfe des Speichersystems ist es ebenfalls möglich, Belastungsprofile der Lokomotive und ihrer Komponenten auch über einen längeren Zeitraum zu erstellen. Es wird darauf hingewiesen, dass es sehr wichtig ist, die Auswertung der aufgezeichneten Daten möglichst einfach und unproblematisch zu gestalten, wobei die dem jeweiligen Bediener entsprechende, am besten geeignete Darstellung der Ergebnisse von hoher Bedeutung ist.

Mit der Erkennung von an Schienenfahrzeugen auftretenden Schäden befasst sich die Patentanmeldung [DE 19837485, 2000]. Auch Gleisschäden können mit dem beschriebenen Verfahren detektiert werden. Verwendung finden dabei örtlich auf den Fahrzeugen verteilte Sensoren zum Erfassen des Schwingungsverhaltens bestimmter Fahrzeugkomponenten. Ziel der Datenbearbeitung ist es, zu unterscheiden, ob eine Störung dem Fahrzeug oder dem Fahrweg zuzuordnen ist. Dabei werden die Sensorsignale zeitlich in Bezug zueinander gesetzt. Wenn sich die Sensormeldungen zeitlich verzögert von Sensor zu Sensor fortsetzen, wird die Störung dem Fahrweg zugeordnet, wenn dies nicht der Fall ist, d. h. wenn nur einzelne Sensoren ansprechen oder keine zeitliche Korrelation besteht, wird die Störung dem Fahrzeug zugeordnet. Streckenseitige Ereignisse, die detektiert werden können, sind z. B. das Überfahren eines Schienenstoßes oder einer Weiche. Am Fahrzeug können Flachstellen der Räder oder Lagerschäden detektiert werden. Für die Ermittlung von streckenseitigen Ereignissen ist es dabei vorteilhaft, die Datenauswertung zentral vorzunehmen.

## 2.2 Grundlagen der Betriebsfestigkeit

Dieser Abschnitt beschreibt ausgewählte Aspekte der Betriebsfestigkeit, die für die Auslegung der Lebensdauerüberwachung von großer Bedeutung sind. Anhand dieser Betrachtung kann man festlegen, welche Größen und/oder Parameter (Spannungen, Dehnungen, Kräfte, Energie etc.) gemessen/ermittelt werden müssen, um die Beanspruchung in den dynamisch beanspruchten Bauteilen zu beschreiben. Anhand der Betriebsfestigkeitsrechnung werden die zu überwachenden Punkte (sog. *Hot Spots*) an der Struktur ermittelt. Die Beanspruchungen werden dann anhand eines ausgewählten Schädigungsmodells kumuliert und schließlich mit den Materialkennwerten verglichen, um eine Aussage über aufgebrauchte und zu erwartende Lebensdauer zu ermöglichen. So gesehen, bildet die Betriebsfestigkeit eine wichtige Grundlage für die Funktion des Lebensdauerbeobachters. Diese Betrachtung muss aus Sicht einer mobilen Anwendung erfolgen. In Frage kommen deshalb Methoden, die auf möglichst einfache Weise zuverlässige Ergebnisse liefern können.

Die Restlebensdauerschätzung in Bezug auf die Betriebsfestigkeit umfasst in Anlehnung nach [McDowell et al., 2000] folgende Punkte:



- Ermittlung der Beanspruchung (rechnerische und experimentelle Ermittlung der Beanspruchung, Wahl der Hot Spots, Rissentstehung, Kerbeinfluss etc.)
- Berücksichtigung der Materialeigenschaften (Mikrostruktur, Herstellungsprozess, Vorgeschichte etc.)
- Anwendung eines Schädigungsmodells (lineare bzw. nichtlineare Akkumulation, Rissfortschrittshypothesen, Modellkonstanten).

Im Folgenden werden die rechnerische Ermittlung der Beanspruchung und die Modelle der Schädigung näher betrachtet.

Die Betriebsfestigkeitsrechnung wird hier vom Gesichtspunkt der technischen Lebensdauerüberwachung aus angegangen. Die Gesamtlebensdauer besteht nach [Gudehus und Zenner, 1999] aus der Anrisslebensdauer, d. h. Lebensdauer bis zum technischen Anriss und der Restlebensdauer, d. h. Rissfortschrittsphase. Ein technischer Anriss ist dabei als ein Anriss definiert, der sich mit den betrieblich anwendbaren und üblichen Inspektionsverfahren vor Ort erkennen lässt. In der Bahn- und Automobiltechnik gilt aus technischer Sicht die Anrisslebensdauer als Grenze für den Lebenszyklus eines Bauteils. Auf diese Lebensdauer werden die Betrachtungen im Folgenden fokussiert.

Ziel der Überlegungen ist es, die vorhandenen Methoden zu analysieren, die am besten geeigneten zu finden und sie in das System zur Lebensdauerüberwachung zu implementieren, bzw. die aus heutiger Sicht kritischen Stellen bei der Betriebsfestigkeitsrechnung in Bezug auf die Auslegung dieses Systems zu zeigen.

### **Parameter- und Kriterienwahl**

Die Auswahl eines Schädigungsparameters (Kenngröße der Schädigung) ist sehr wichtig sowohl für die Modellierung der Schädigung selbst als auch für ihre Erfassung. Nicht jeder Parameter, der eine gute Modellierung des Schädigungsprozesses erlaubt, ist auch als Messwert für eine automatische Überwachung im Betrieb (Beispiel – Rissausbreitungshypothesen) geeignet. Nach [Fatemi und Yang, 1998] kann man folgende Parameter unterscheiden:

- Risse und Versetzungen im Material
- Risslänge und Rissdichte an der Oberfläche
- Mechanische Antwort des Materials – Spannungs-Dehnungs-Beziehung, Härte, elastischer Modul, plastische oder gesamte Verzerrungsenergie.

Die zuletzt genannten Parameter werden am meisten benutzt, um die kumulative Schädigung zu modellieren. Die Verzerrungsenergie, die das Bauteil im gesamten Lebenszyklus erfährt, ist ein Parameter, der die beiden Größen Spannung und Dehnung kombiniert. Daneben können aber auch optische, akustische, thermische, elektrische und magnetische Charakteristiken betrachtet werden.

Wenn möglich, sollen Parameter verwendet werden, die einfach zu erfassen sind und zuverlässige Aussagen über die Schädigung des Werkstoffs erlauben. Die am meisten verwendeten Kriterien für die Lebensdauerberechnung sind:

- Spannungskriterien
- Dehnungskriterien
- energetische Kriterien.

Die Auswahl der zu überwachenden Parameter kann auch durch die Art der Beanspruchung beeinflusst werden. So wird z. B. angenommen, dass die Lebensdauer eines Bauteils bei zyklischer Belastung durch die Phasen der Rissbildung und Rissausbreitung bestimmt wird. Bei hohen Beanspruchungsamplituden (kleine Bruchlastzyklen) überwiegt die Rissausbreitungsphase, bei geringen dagegen (d. h. bei großen Bruchlastzyklen) sind die Rissbildungsprozesse für die Lebensdauer entscheidend.

Die Lage der Hot Spots kann anhand einer Spannungsanalyse bestimmt werden. Voraussetzung dafür sind jedoch genau definierbare Lasten. Dies betrifft insbesondere ihre räumliche Anordnung.

### **Einfluss verschiedener Faktoren auf die Lebensdauer**

Die Streuung von Werkstoffkennwerten ist relativ groß und von mehreren Einflussfaktoren abhängig [Sähn und Göldner, 1993]:

- Werkstoffart und Werkstoffzustand (Korngröße, Beschaffenheit der Korngrenzen, Kornform usw.)
- Bauteilgeometrie
- Fehlerverteilung im Bauteil (Guss-, Schmiede-, Walz-, Schweißfehler usw.)
- Beanspruchungszustand (Mehrachsigkeit, statische Vorbeanspruchung, Eigenspannungszustand im Bauteil usw.)
- Belastungsbedingungen (Belastungsgeschwindigkeit, -frequenz, -form, Haltezeit, Belastungsfolge bei veränderlichen Belastungsamplituden, Phasenlage der Beanspruchungskomponenten)
- Umweltbedingungen (Temperatur, Korrosionseinfluss).

In den Bereichen sehr niedriger Belastungsfrequenz und über 500 Hz, insbesondere bei hohen Beanspruchungsamplituden, kann die Frequenz der Beanspruchung nicht vernachlässigt werden [Sähn und Göldner, 1993] – die Festigkeit nimmt in diesen Fällen ab. Im Allgemeinen verringern große Haltezeiten vor allem im Zugspannungsbereich die ertragbare Lastzyklenzahl (Kriechvorgang), bei hohen Frequenzen spielt dagegen die Erwärmung des Materials eine wichtige Rolle. Auch die Belastungsform hat einen Einfluss auf die Festigkeit – so ist beispielsweise eine sinusförmige Belastung mit mittlerer Festigkeit, eine dreieckförmige mit höherer und eine rechteckförmige mit niedrigerer Festigkeit verbunden. Die Abhängigkeit der Festigkeit von der Reihenfolge der Beanspruchung ist mit der Ausbildung einer

Ermüdungsstruktur an Mikro- und Makrodefekten im Material verbunden. Es ist bekannt, dass ein großer Lastwechsel am Anfang des Lebenszyklus eine Vergrößerung des Anfangsschadens verursachen kann [Luo et al., 1994]. Auf diese Weise verschiebt sich die Grenze für Spannungen, die keine Schäden verursachen, nach unten. In den meisten Schädigungshypothesen wird jedoch der Einfluss der Lastreihenfolge nicht berücksichtigt. Der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Lebensdauer ist in Bild 2-2 zusammengefasst.

### Ausfallwahrscheinlichkeit und Lebensdauer

Die Lebensdauerberechnung kann man als Aufgabe der Wahrscheinlichkeitsberechnung betrachten. Zunächst muss entschieden werden, welche Wöhlerlinie (sie stellt ertragbare Schwingungszahl als Funktion der Spannungsamplitude dar) für die Berechnung genommen wird. Die im allgemeinen Maschinenbau oft verwendete Linie mit 50 % bzw. 10 % Ausfallwahrscheinlichkeit kann bei besonders sicherheitsrelevanten Teilen wie z. B. einem Drehgestell oder einer Fahrzeugachse nicht verwendet werden. Die Lebensdauer kann immer nur in Abhängigkeit einer gewünschten Ausfallwahrscheinlichkeit angegeben werden. Bei der Lebensdauerberechnung der Drehgestelle der Londoner Metro wurde die Ausfallwahrscheinlichkeitsgrenze z. B. auf 2,3 % gesetzt [Luo et al., 1994]. In der Hubschrauber-technik wird sogar die Ausfallwahrscheinlichkeit 0,1 % benutzt [Azzam, 1996].

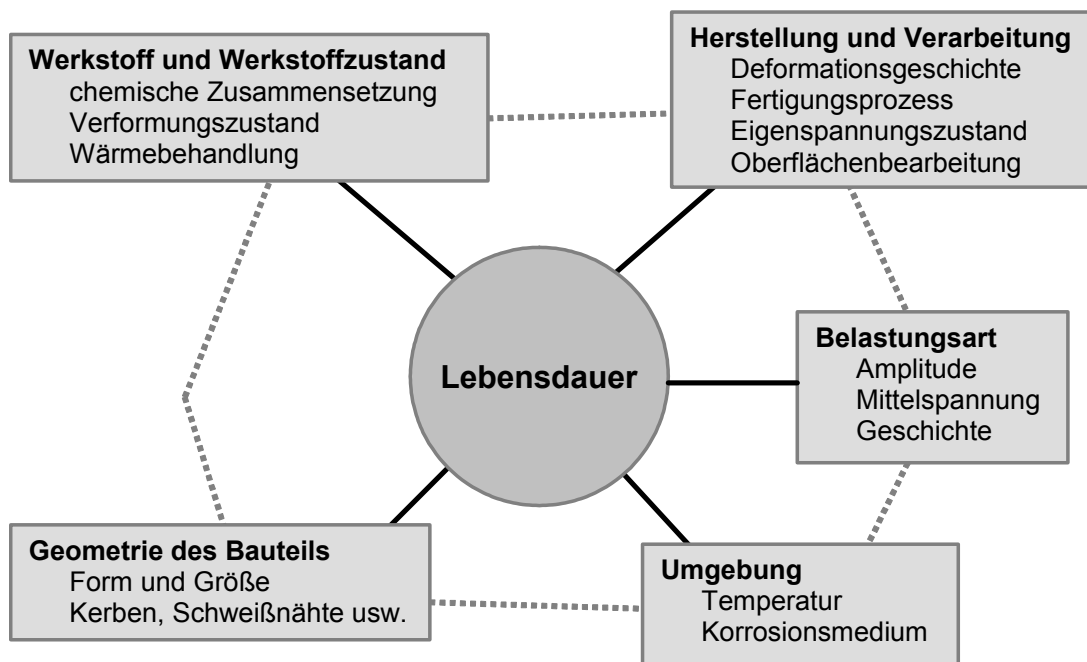


Bild 2-2 Einfluss verschiedener Faktoren auf die Lebensdauer

Aussagen der Lebensdauerüberwachung können immer mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit gemacht werden. Eine wichtige Rolle spielen dabei nicht nur die Materialkennwerte, sondern auch, wie sicher andere Parameter bekannt sind, die die

Lebensdauer beeinflussen. Auch die Modelle der Schadensakkumulation und die Güte der Informationsverarbeitung sind hier von großer Bedeutung. Belastungs- und lebensdauerorientierte Ausfallraten, die aktuelle Beanspruchungen eines Systems mit deren individuellen Beanspruchungsgeschichten beinhalten, werden in der Arbeit von [Söffker, 1999] beschrieben.

### **FEM-Berechnung und MKS-Simulation**

Mithilfe von Ergebnissen aus der Finite Elemente Berechnung (FE) und ggf. Mehrkörpersystem-Simulation (MKS) kann die Überwachung auf Schwachstellen fokussiert werden. Bei der Auswertung von tatsächlichen Belastungen der Bauteile kann die bei der Simulation definierte Vorgehensweise (z. B. Auswertung von auftretenden Kräften, Datenreduktion) verwendet werden. In diesem Fall basiert das Konzept der Lebensdauerbeobachtung direkt auf der Lebensdauerrechnung. So kann diese Rechnung mit der Wirklichkeit ständig verglichen und Abweichungen festgestellt werden.

Die FE/MKS-Simulation kann auch dazu dienen, auf den rechnerischen Modellen in früher Entwicklungsphase auszutesten, inwieweit die im Modell vorhandenen Kräfte, Spannungen, Beschleunigungen bzw. Wege miteinander korrelieren. Die vorhandenen Parameter und deren Beziehungen werden dann analysiert, um die für die Lebensdauerüberwachung relevanten Größen zu finden. So kann beispielsweise anhand der Beschleunigungsmessung an bestimmten Punkten der Struktur eine Aussage über die Belastung und anschließend Beanspruchung gemacht werden. Ein anderes Konzept der Schadensfrüherkennung basiert auf einer Analyse gemessener Schwingungsdaten, um die schadensinduzierte Veränderung des dynamischen Verhaltens der Struktur zu ermitteln [Fritzen und Bohle, 1999]. Diese Vorgehensweise erfordert auch ein FE-Rechenmodell, das mit den aufgenommenen Daten verglichen wird. Diese beiden Arten der Betrachtung bieten eine Basis für die sog. modellbasierte Lebensdauerüberwachung.

Durch eine gemeinsame Betrachtung der Ergebnisse der Mehrkörpersimulation und der FE-Berechnung können auch neue Erkenntnisse für die Lebensdauerrechnung entstehen. Als Beispiel kann man hier die Simulation des Drehgestells erwähnen [Knothe et al., 1996]. Das Bauteil weist ein flexibles Verhalten im Betrieb auf; dieses Verhalten beeinflusst erheblich die Ergebnisse der Belastungssimulation. Zusätzlich zu den äußeren, auf das Drehgestell wirkenden Kräften, werden in der Lebensdauerrechnung auch interne Kräfte berücksichtigt, die sich durch das flexible Verhalten der Struktur ergeben.

[Neubauer und Günther, 2000] beschreiben die Vorgehensweise bei der Berechnung der Lebensdauer am Beispiel eines Militärflugzeugs. Für die Schätzung der Schädigung muss ein Lastmodell aufgestellt werden, die Berechnung erfolgt nach dem Prinzip Top-down, d. h. man startet auf der Ebene der Gesamtstruktur, um am

Ende die Lastverteilung in den einzelnen FE-Knoten zu ermitteln. Diese Prozedur lässt sich folgendermaßen beschreiben:

- Bestimmung des Verhaltens bzw. des Manövers (Gesamtstrukturebene)
- Simulation der Belastung bei dem Manöver auf der Gesamtstrukturebene
- Ermittlung der auf einzelne Komponenten wirkenden Belastung (MKS- oder FE-Simulation)
- Ermittlung der Lastverteilung in einer Komponente (FE-Simulation)
- Berechnung von lokalen Spannungen an einzelnen FE-Knoten (FE-Simulation)
- Ermittlung der Schädigung.

### Gliederung der Schwingfestigkeit

Aus Sicht der Schwingspielzahl kann man unterscheiden zwischen:

- Kurzzeitfestigkeit – bis  $5 \cdot 10^4$  Lastwechsel
- Zeitfestigkeit –  $5 \cdot 10^4 \dots 2 \cdot 10^6$  Lastwechsel
- Dauerfestigkeit –  $> 2 \cdot 10^6$  Lastwechsel.

Für die Grenzwingspielzahl (Schwingspielzahl, die der Dauerfestigkeit entspricht) findet man in der Literatur (z. B. [DIN 50100]) auch andere Werte –  $10 \cdot 10^6$  Schwingspiele für Stähle und  $100 \cdot 10^6$  für Leichtmetalle. Die Gliederung der Schwingfestigkeit ist grafisch in Bild 2-3 dargestellt.

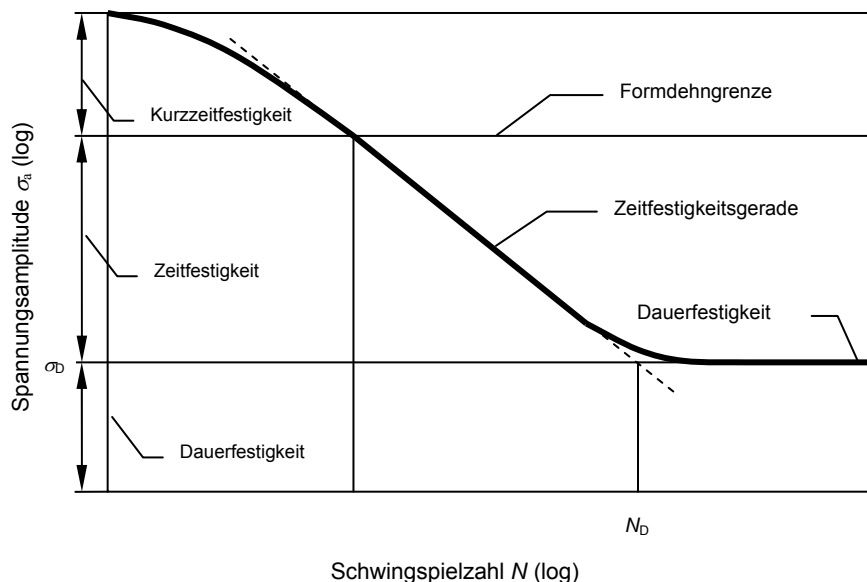


Bild 2-3 Gliederung der Schwingfestigkeit, in Anlehnung an [Gudehus und Zenner, 1999]

Der Bereich der Kurzzeitfestigkeit ist prinzipiell für den Einsatz in der Automobil- bzw. Bahntechnik ohne Bedeutung. Die Kurzzeitfestigkeit ist mit der plastischen Verformung der Bauteile verbunden und wird bei der Berechnung von dynamisch beanspruchten Teilen nicht angewendet. Es kann natürlich nicht ausgeschlossen

werden, dass im Lebenszyklus der Komponenten Beanspruchungen im Kurzzeitfestigkeitsbereich auftreten; die Aufgabe der Lebensdauerüberwachung ist es, solche Vorkommnisse zu registrieren und in der Lebensdauerprognose zu berücksichtigen.

### 2.2.1 Konzepte der Betriebsfestigkeitsrechnung

In der Literatur [Haibach, 1989] findet man mehrere Spannungskonzepte – Nennspannungskonzept, Kerbspannungskonzept, Strukturspannungskonzept, Kerbgrundkonzept, bruchmechanisches Konzept, die bei der Berechnung der Lebensdauer verwendet werden. Zwei davon finden eine größere Aufmerksamkeit. Es sind das Nennspannungskonzept und das Kerbspannungskonzept.

#### **Nennspannungskonzept**

Das Nennspannungskonzept gilt als Grundlage der Bauteildimensionierung und wird dann verwendet, wenn das Bauteil einfache Gestalt hat und sich eine sog. Nennspannung definieren lässt, mit der die Beanspruchung im zu betrachtenden Querschnitt beschrieben wird. Kerben oder andere Abweichungen von der idealen Geometrie werden durch Bauteilwöhlerlinien oder mithilfe entsprechender Koeffizienten (Formzahlen) berücksichtigt. Das Nennspannungskonzept setzt voraus, dass geeignete, möglichst statistisch abgesicherte Nennspannungswöhlerlinien im jeweiligen Anwendungsfall verfügbar sind [Radaj, 1995]. Diese Vorgehensweise gilt als fehlerstabil, aber es besteht die Gefahr, dass die Nennspannung nicht ausreichend die tatsächliche Spannungsverteilung im kritischen Schnitt beschreiben kann. Für die Lebensdauerberechnung anhand des Nennspannungskonzeptes wird die lineare Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner [Haibach, 1989] benutzt.

Das herkömmliche Nennspannungskonzept lässt sich bei komplexen Strukturen nicht anwenden, da es dort keinen Nennquerschnitt und damit auch keine definierbare Nennspannung gibt. Problematisch ist auch der inhomogene Beanspruchungszustand in der Nähe von Rissen und Kerben. Dort liegt ein inhomogener, mehrachsiger Beanspruchungszustand vor, auch wenn in dem Bauteil aus globaler Sicht ein einachsiger Spannungszustand vorliegt [Sähn und Göldner, 1993]. Die Kerbeffekte lassen sich manchmal in Form der Spannungsgradienten aus der FE-Rechnung und anhand der Materialeigenschaften aus einer Datenbank berücksichtigen, oft ist aber die örtliche Betrachtung des Spannungszustands unumgänglich.

#### **Kerbgrundbeanspruchungskonzept**

Das Kerbgrundkonzept bildet die Grundlage der Bauteildimensionierung, wenn die Nennspannungen im Bauteil nicht definiert werden können. Bei diesem Konzept wird die örtliche elastisch-plastische Verformung berücksichtigt. Man geht in diesem Fall von der Erkenntnis aus, dass in den Bereichen, wo die Anrisse entstehen, nicht nur elastische Dehnung, sondern auch plastische Verformung auftritt. Die

Treffericherheit dieses Konzeptes ist nach [Gudehus und Zenner, 1999] nicht höher als die des Nennspannungskonzeptes. Diese Vorgehensweise gilt als fehlerempfindlich und ist mit höherem Rechenaufwand verbunden.

Die Vorteile des örtlichen Konzeptes liegen dann vor, wenn die Kerben nicht anders beschrieben werden können oder wenn die örtlichen Spannungen und Dehnungen durch eine Finite-Elemente-Rechnung bereitgestellt werden. Das örtliche, elastisch-plastische Konzept eignet sich gut für die Bestimmung der Rissentstehung. Als Grundlage für die Berechnung gelten dehnungskontrollierte Wöhler-Versuche.

Insbesondere bei kleinen Beanspruchungsgradienten können die örtlichen Spannungs- bzw. Dehnungsschwingbreiten zur Ermittlung des Schädigungszuwachses benutzt werden [Sähn und Göldner, 1993]. Das Konzept wird oft zusammen mit der linearen Schadensakkumulationshypothese angewendet. Der Einfluss der Mittelspannung und der Beanspruchungsreihenfolge kann in diesem Fall mithilfe von Schädigungsparametern berücksichtigt werden [Haibach, 1989]. Es werden in diesem Zusammenhang u. a. Schädigungsparameter nach Smith-Watson-Topper, Haibach-Lehrke und Heitmann erwähnt. Der Reihenfolgeeinfluss kann mithilfe der Zusatzschädigung nach Hanschmann abgebildet werden.

### **Bruchmechanisches Konzept**

Bei der Betriebsfestigkeitsrechnung können auch Methoden der Bruchmechanik eingesetzt werden. Sie basieren grundsätzlich auf der Bestimmung des Rissfortschritts im belasteten Bauteil. Der Einsatz dieses Konzeptes ist jedoch dadurch beschränkt, dass es oft bei lebenswichtigen Teilen nicht zugelassen wird. Als technischer Oberflächenanriss wird dabei ein Riss mit Oberflächenlänge 1...2 mm und Tiefe 0,5 mm definiert [Radaj, 1995]. Ein großer Teil der Betriebslebensdauer wird dabei im Kurzrisstadium verbracht, d. h. unterhalb dieser Grenze. Die Ermittlung der Lebensdauer kann dann durch die Integration der Rissfortschritts-gleichung erreicht werden.

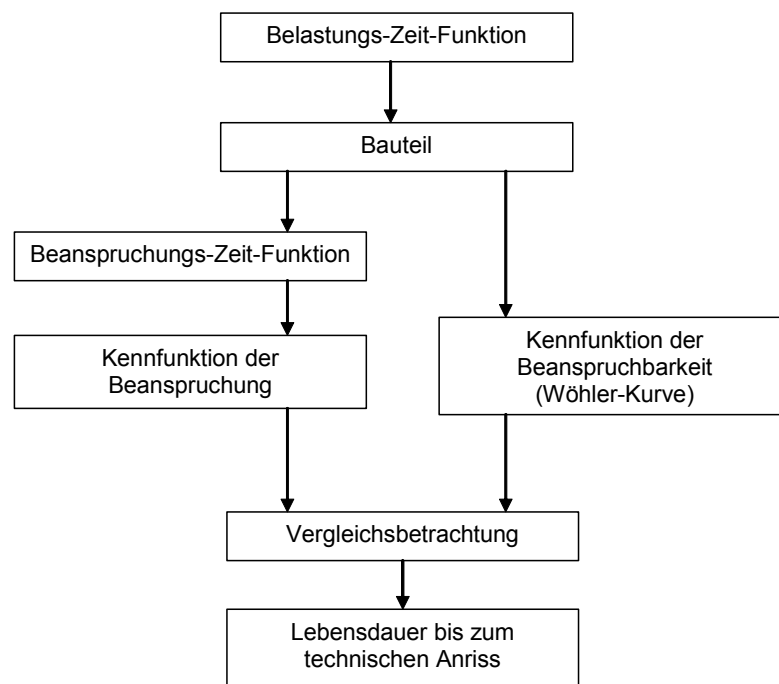
#### **2.2.2 Berechnung der Bauteillebensdauer**

Ein Beispiel der Betriebsfestigkeitsrechnung nach dem Nennspannungskonzept ist nach [Gudehus und Zenner, 1999] im Folgenden beschrieben. Auf ein Bauteil (mit einer definierten Geometrie) wirkt eine Belastungs-Zeit-Funktion. Daraus lässt sich eine Beanspruchungs-Zeit-Funktion ermitteln. Diese Funktion muss für die weitere Auswertung entsprechend vorbereitet werden, üblicherweise wird die Datenmenge reduziert. Es entsteht eine sog. Kennfunktion der Beanspruchung. Als Kennfunktion der Beanspruchung verwendet man das Kollektiv (Häufigkeitsverteilung der Schwingspiele). Das Kollektiv wird mit statistischen Verfahren (Zählverfahren) ermittelt und seine Treppung (Aufteilung) sollte mindestens 8 Laststufen aufweisen.

Die Spannungen im Kollektiv müssen auf die Mittelspannung bzw. das Spannungsverhältnis der Wöhlerlinie umgerechnet werden (die sog. Amplitudentransformation, z. B. in die Mittelspannung  $\sigma_m = 0$ ). Diese Verfahren werden ausführlicher im Abschnitt 4.2.1 als Teil der Informationsverarbeitung dargestellt. Die Wöhlerlinie gilt als Kennfunktion der Beanspruchbarkeit, sie stellt den Zusammenhang zwischen den ertragbaren Spannungen und der Schwingspielzahl. Die Kennfunktion der Beanspruchung wird mit der Kennfunktion der Beanspruchbarkeit verglichen. Folgende Schritte finden dabei statt:

- Aufbereitung des Kollektivs für die Schädigungsrechnung (Schadensakkumulationsrechnung)
- Durchführung der Schädigungsrechnung zur Ermittlung eines Lebensdauerwerts für eine Ausfallwahrscheinlichkeit  $P_A = 50\%$
- Nach Bedarf Ermittlung der Lebensdauer für eine andere, vorgegebene Ausfallwahrscheinlichkeit.

Die gesamte Vorgehensweise ist schematisch in Bild 2-4 dargestellt.



*Bild 2-4 Konzept der Betriebsfestigkeitsrechnung bis zum technischen Anriss nach [Gudehus und Zenner, 1999]*

Bei der Festigkeitsberechnung können außer Amplitudenspannung auch andere Faktoren wie z. B. Spannungsverteilung, Kerbeinflüsse und Spannungsumlagerungen durch lokales Plastifizieren berücksichtigt werden. Oft erfolgt das durch die Modifikation der Bauteilwöhlerlinie. Die Lastgeschichte eines Bauteils kann eine geringe Anzahl hoher Lastspitzen aufweisen. In solchen Fällen kommt es zu lokalem Plastifizieren. Die lokalen Eigenspannungen können sich sowohl positiv als auch



negativ auf die Lebensdauer auswirken. Diese hohen Lasten sollten im Zusammenhang mit der Reihenfolge der Beanspruchung betrachtet werden.

### 2.2.3 Schädigungshypothesen

Die Werkstoffschädigung ist keine Größe, die direkt gemessen werden kann. Es muss deswegen eine quantitative Beschreibung des Schädigungsprozesses verwendet werden, um die Schädigung des Materials in irgendeiner Form bestimmen zu können. Dazu dienen verschiedene Schädigungshypothesen, die als Ziel haben, möglichst genau den Schädigungsprozess zu beschreiben. Jedes Schwingspiel, das durch die dynamische Belastung eines Bauelements verursacht wird, wirkt sich auf die zunehmende Werkstoffschädigung aus. Direkt aus der Wöhlerlinie lässt sich die Lebensdauer nur für einfache Sinus-Zyklen berechnen, andere Lastverläufe verlangen eine Hypothese zur Schädigungsakkumulation. So werden alle entstandenen Teilschädigungen mithilfe einer Schädigungshypothese zur Gesamtschädigung aufintegriert.

Es existiert eine Vielfalt von Schädigungshypothesen, die in einem System zur Prognose der zu erwartenden Restlebensdauer einer mechanisch schwingend beanspruchten Struktur eingesetzt werden kann. Man unterscheidet lineare Modelle, wie z. B. die Miner-Regel, und nichtlineare Modelle, die z. B. auf Kontinuumsmechanik und energetische Ansätze zurückzuführen sind. Je nach Art der Beanspruchung sollten dabei z. B.:

- mehraxiale Lasten
- Kriechvorgänge
- mehrstufige Belastung
- Reihenfolge-Einflüsse

berücksichtigt werden. Die Modelle sind teilweise nur für ganz bestimmte Materialien und ausgewählte Lastfälle gültig, sodass bei der Auswahl geeigneter Schädigungsmodelle ein hohes Maß an Systemkenntnis und technischem Sachverstand erforderlich ist.

Zu den linearen Modellen gehört die Palmgren-Miner Regel mit ihren Modifikationen. Sie werden schon seit Jahren in der Praxis eingesetzt. Die nichtlinearen Modelle werden seltener eingesetzt. Der Einsatz ist auf bestimmte Fälle eingeschränkt, allgemein gültige Ansätze sind noch nicht vorhanden. Keine der nichtlinearen Methoden konnte sich bis jetzt durchsetzen. Aus diesem Grund wurden nichtlineare Hypothesen in den üblichen Regelwerken nicht berücksichtigt [FKM, 1998].

#### **Lineare Akkumulationshypothesen**

Die sog. Palmgren-Miner Regel (auch Miner-Regel genannt, [Palmgren, 1924], [Miner, 1945]) und ihre Modifikationen, sind beispielsweise in [Haibach, 1989]

beschrieben. Diese recht einfachen Hypothesen sind in den üblichen Regelwerken seit Jahren vorhanden, obwohl sie sehr oft zu ungenauen bzw. unsicheren Ergebnissen führen. Eine ausführliche Beschreibung dieser Regeln findet sich auch in [Gudehus und Zenner, 1999].

Die Palmgren-Miner-Regel in ihrer Originalform lautet:

$$D = \sum_i D_i = \sum_i \frac{n_i}{N_i}, \text{ wobei} \quad (2.1)$$

$D$  – Schädigung

$D_i$  – Teilschädigung

$n_i$  – Anzahl der Schwingenspiele beim Belastungsniveau  $i$

$N_i$  – ertragbare Schwingenspielzahl aus der Wöhlerlinie bei der Belastungsstufe  $i$

Das Bauteil wird geschädigt (Bruch, Anriss), wenn die Summe der Teilschädigungen den Wert Eins annimmt:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = 1 \quad (2.2)$$

Grafisch ist die Idee der Miner-Regel in Bild 2-5 dargestellt.

Für die Palmgren-Miner Regel gelten folgende Annahmen:

- Die Schädigung im Einstufenversuch nimmt linear mit der Zahl der Lastspiele  $n$  zu, bis der Wert 1 erreicht wird;
- Bei Beanspruchung mit veränderlicher Amplitude (entsprechende Stufen der Belastung sind durch  $i$  gekennzeichnet) entsteht eine Teilschädigung  $D_i$ , die man mit anderen Schädigungen aufaddieren kann, auch in diesem Fall gilt als Grenzwert der Schädigung die Eins.

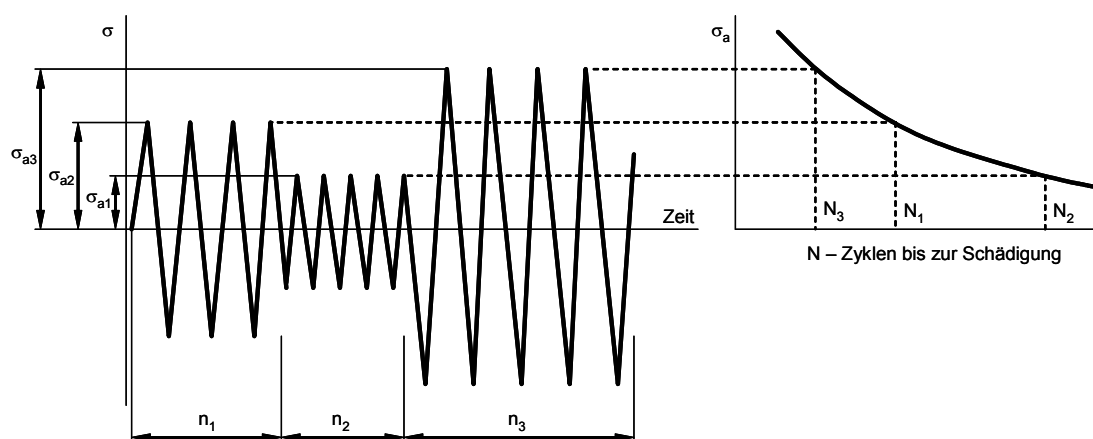


Bild 2-5 Grafische Darstellung der Palmgren-Miner Regel

Die Amplituden unterhalb der Dauerfestigkeit verursachen nach dieser Regel keine Schäden. Damit beschränkt sich die Berechnung nur auf den Zeitfestigkeitsbereich, siehe auch Bild 2-6.

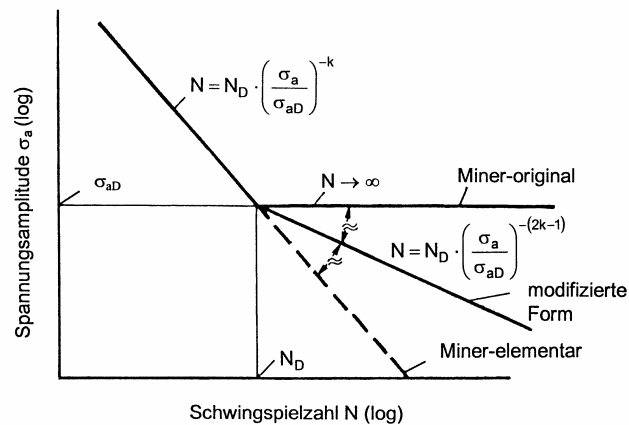


Bild 2-6 Modifikationen der Wöhlerlinie, aus [Gudehus und Zenner, 1999]

Es existieren einige Modifikationen der Miner-Regel, die einen Dauerfestigkeitsabfall als Funktion der fortschreitenden Schädigung berücksichtigen. Unter anderem ist hier die elementare und modifizierte Form nach Haibach zu erwähnen. In der Miner-Regel in Elementarform wird die Schädigung im Bereich unterhalb der Dauerfestigkeit mit der Zeitfestigkeitslinie auch für den Dauerfestigkeitsbereich (Bild 2-6) übernommen:

$$N = N_D \left( \frac{\sigma_a}{\sigma_{aD}} \right)^{-k}, \text{ wobei} \quad (2.3)$$

$\sigma_a$  – Spannungsamplitude

$\sigma_{aD}$  – dauerfest ertragbare Amplitude

$k$  – Neigung der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich

Bei Werkstoffen mit einer ausgeprägten Dauerfestigkeitsgrenze kann das Verfahren zur Unterschätzung der Lebensdauer führen. Trotzdem ist damit keine Abschätzung auf der sicheren Seite gewährleistet.

Bei der nach Haibach modifizierten Miner-Regel wird die Zeitfestigkeitslinie künstlich mit der Neigung  $-(2k-1)$  in den Dauerfestigkeitsbereich verlängert (Bild 2-6). Auf diese Weise kann man den Dauerfestigkeitsabfall als Funktion der fortschreitenden Schädigung berücksichtigen. Die Ergebnisse der Lebensdauerrechnung liegen dabei zwischen denen nach der Miner-Original und Miner-Elementar-Regel. Die Überschätzung der Lebensdauer wie bei der Original-Form der Miner-Regel kann damit teilweise vermieden werden. Die Gleichungen der Festigkeitslinie können folgendermaßen formuliert werden:

$$N = N_D \cdot \left( \frac{\sigma_a}{\sigma_{aD}} \right)^{-k} \quad \text{für } \sigma_a \geq \sigma_{aD} \quad (2.4)$$

$$N = N_D \cdot \left( \frac{\sigma_a}{\sigma_{aD}} \right)^{-(2k-1)} \quad \text{für } \sigma_a < \sigma_{aD} \quad (2.5)$$

Als relative Miner-Regeln werden die originale oder eine der modifizierten Palmgren-Miner Regeln bezeichnet, als Grenzwert der Schädigung  $D$  beim Versagen wird dann allerdings eine andere Zahl als Eins angenommen. Spezifische Angaben, z. B. für geschweißte Bauteile mit bestimmter Beanspruchung, können dann in entsprechenden Richtlinien [FKM, 1998] gefunden werden. Beispielsweise werden dort folgende Minersummen empfohlen: Stahl und Stahlguss 0,3...0,5; Grauguss 1. Die Idee der relativen Miner-Regel kann als Korrektur der linearen Schadensakkumulationsrechnung mit vorliegenden Versuchs- oder Bauteilprüfungsergebnissen betrachtet werden.

Die hier vorgestellten Hypothesen können bei der Auswertung sowohl im Zeit- als auch Frequenzbereich verwendet werden. Bei allen Modifikationen bleibt es jedoch bei einer linearen Schadensakkumulation. Die Reihenfolge der Beanspruchung und damit eine mögliche Wechselwirkung von verschiedenen Schwingungsspannen werden nicht berücksichtigt. Bei stark veränderlicher Mittelspannung und wenn die Reihenfolgeeffekte von großer Bedeutung sind, sind die linearen Schädigungshypothesen nicht anwendbar [Radaj, 1995]. Dennoch wird sehr oft auch in diesen Fällen die relative Form der Miner-Regel eingesetzt.

### Nichtlineare Akkumulationshypothesen

Neben den linearen Modellen existieren im Schrifttum mehrere nichtlineare Akkumulationshypothesen. Eine ausführliche Übersicht nichtlinearer Schädigungshypothesen befindet sich z. B. in [Fatemi and Yang, 1998]. Unter den nichtlinearen Ansätzen sind vor allem folgende Theorien zu erwähnen:

- Nichtlineare Schädigungskurven und zweistufige Linearisierung
- Modifikationen der Lebensdauerlinie
- Risswachstumstheorien (Rissbildungshypothesen)
- Energetische Theorien
- Modelle basierende auf Kontinuumsmechanik.

Zwischen manchen Theorien kann keine eindeutige Grenze definiert werden. So existieren auch Hypothesen (sog. Hybridhypothesen), die sich gleichzeitig mehreren der oben genannten Gruppen zuordnen lassen. Es ist auch nicht ausgeschlossen, dass z. B. energetische Schädigungsparameter linear addiert werden. Besonders interessant sind die energetischen Theorien. Sie entwickelten sich stark innerhalb der letzten 20 Jahre. Die Modelle können den Einfluss der Mittelspannung und der mehraxialen Lasten berücksichtigen, Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich können in

einem Modell zusammen betrachtet werden. Außerdem können auch solche Aspekte wie thermische Belastung und Kriechen berücksichtigt werden.

Trotz der großen Menge von Modellen, konnte keines davon allgemeine Akzeptanz gewinnen. Jedes Modell kann üblicherweise nur einige Aspekte (wie z. B. mehrstufige Belastung, nichtlineare Akkumulation, Überlastung, Zyklen mit kleineren Amplituden unterhalb der Dauerfestigkeit usw.) berücksichtigen. Manche Ansätze benötigen zudem die experimentelle Bestimmung von Parametern in gesondert durchzuführenden Betriebsfestigkeitsversuchen oder sind auf spezielle Bauteilgeometrien bzw. auf einen bestimmten Werkstoff beschränkt und somit nicht auf allgemeine Fälle übertragbar.

Bei den nichtlinearen Hypothesen unterscheiden [Lemaitre und Chaboche, 1990] zusätzlich zwischen nichtlinearer Schädigung (nichtlineare Schädigungsfunktion) mit linearer Akkumulation (Bild 2-7a) und Schädigung mit nichtlinearer Akkumulation (Bild 2-7b). Im ersten Fall existiert nur eine eindeutige Funktion (*damage evolution function*) in Abhängigkeit von  $N/N_F$  (Anzahl der Schwingspiele zu Anzahl der Schwingspiele bei Schädigung). Im zweiten Fall wird die Schädigung zusätzlich nichtlinear akkumuliert.

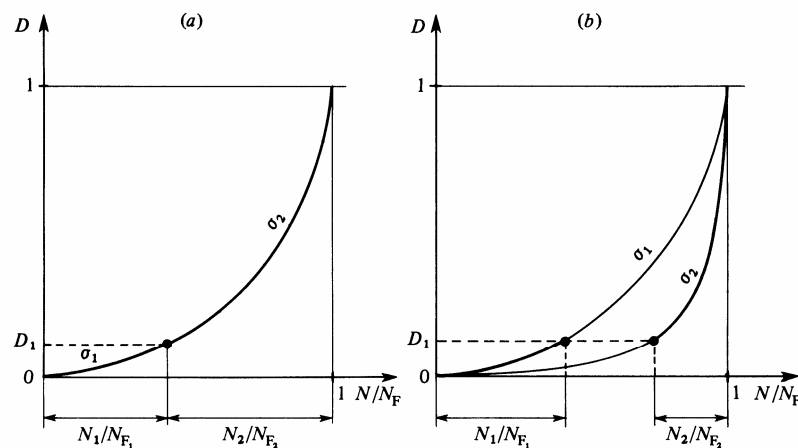


Bild 2-7 a) nichtlineare Schädigung mit linearer Akkumulation, b) nichtlineare Schädigung mit nichtlinearer Akkumulation, aus [Lemaitre und Chaboche, 1990]

Es wird allgemein angenommen, dass die Schädigung hauptsächlich von der Belastung abhängig ist. Sie ist durch globale Variablen (z. B. Amplitude, maximaler Wert usw.) für jeden Zyklus definiert. Eine allgemeine Form der Gleichung für den Schädigungszuwachs in jedem Lastspiel lässt sich nach [Ellyin, 1997] folgendermaßen aufschreiben:

$$dD = F(D, \psi, h, dn; p), \text{ wobei} \quad (2.6)$$

$\psi$  - Kontrollparameter der Schädigung (z. B. Spannung, Dehnung, Energie pro Belastungszyklus)

$D$  – aktueller Schädigungszustand

$h$  – Vorgeschichte der Schädigung

$dn$  – Inkrement von Zyklen

$p$  – Materialparameter.

Es wird dabei angenommen, dass z. B. die Temperatur und die Umgebungsbedingungen konstant bleiben. Im Untenstehenden werden die energetischen Schädigungshypothesen näher betrachtet.

### **Energetische Akkumulationshypothesen**

Seit einiger Zeit versucht man, den Prozess der Schädigung energetisch zu beschreiben. Man erhofft sich dabei, die Nachteile der klassischen linearen Palmgren-Miner Regel zu umgehen. Bei der energetischen Betrachtung wird angenommen, dass die Schädigung im Material von der gesamten mechanischen Eingangsenergie abhängig ist. Ein großer Teil der Energie wird dissipativ verbraucht (Erhitzung, Vibrationen), der Rest verursacht plastische Deformation und später Rissbildung und -ausbreitung. [Ellyin, 1997], [Kujawski und Ellyin 1984], [Golos und Ellyin, 1987] und [Golos und Ellyin, 1988] haben nach einem energetischen Schädigungsparameter gesucht, der gleichermaßen die Schädigung sowohl bei kleinen als auch großen Zyklenzahlen beschreiben kann. Die dafür ausgewählte Verzerrungsenergie pro Belastungszyklus zeigte sich als ein angemessener Parameter, der gut mit den experimentellen Daten korreliert. Auch andere Autoren, wie z. B. [Lagoda, 2001] weisen auf die Vorteile der Anwendung von energetischen Modellen für die Lebensdauerabschätzung hin.

Energetische Modelle basieren im Allgemeinen auf der plastischen oder der gesamten Verzerrungsenergie und können so insbesondere die Schädigungsvorgeschichte und Reihenfolge der Belastung berücksichtigen [Ellyin, 1997]. Es ist besonders wichtig, dass die Schadensakkumulation dabei als stark nichtlinearer Prozess zu betrachten ist. Der Einfluss der Mittelspannung und der mehraxialen Belastung können in dieser Beschreibungsform integriert werden [Macha und Sonsino, 1999]. Die Verzerrungsenergie pro Zyklus ist ein guter Schädigungsparameter bei der Beschreibung von mehraxialen Beanspruchungen. Bei dieser Art der Beanspruchung kann die Energie (insbesondere deren plastischer Anteil) jedoch nicht auf einfache Weise bestimmt werden.

Die energetische Beschreibung kann sowohl die Risseinleitungs- als auch die Rissfortschrittsphase umfassen. Auf diese Weise kann die Beanspruchung bei kleinen und großen Zyklenzahlen (*low & high cycle fatigue*) durch die Summe der plastischen und elastischen Energie beschrieben werden. Die Rissfortschrittsphase kann auch Laststufen unter der Dauerfestigkeitsgrenze berücksichtigen.

Vorteile der energetischen Betrachtung:

- Die ermittelte Energie ist ein Skalar, der von der Orientierung des Referenzkoordinatensystems unabhängig ist; dies ist bei mehraxialer Betrachtung vorteilhaft
- Schädigungen in den Bereichen Zeit- und Dauerfestigkeit können einfach zusammengefasst werden.

Die gesamte Verzerrungsenergie ist als Summe der plastischen und elastischen Verzerrungsenergie definiert (siehe Bild 2-8). Im Bereich der Zeitfestigkeit ( $N_f < 10^5$ ) ist die plastische Verzerrungsenergie  $\Delta W^p$  verantwortlich für die Schädigung ( $\Delta W^e \ll \Delta W^p$ ). Im Bereich der Dauerfestigkeit lässt sich die plastische Energie jedoch nur schwer messen, die Schädigung erzeugende Energie ist aber in diesem Fall  $\Delta W^{e+}$  (Teil der elastischen Verzerrungsenergie, der der Zugspannung entspricht, vgl. Bild 2-8).

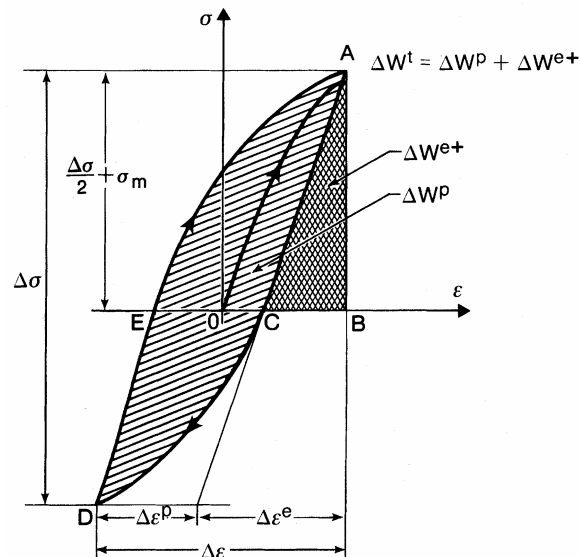


Bild 2-8 Elastische und plastische Verzerrungsenergie, aus [Ellyin, 1997]

Die gesamte spezifische (d. h. pro Materialeinheit und pro Zyklus) Verzerrungsenergie wird im allgemeinen Fall formelmäßig folgendermaßen beschrieben:

$$\Delta W^t = \Delta W^p + \Delta W^{e+} = \frac{1-n^*}{1+n^*} (\Delta\sigma - \delta\sigma_0) \Delta\epsilon^p + \delta\sigma_0 \Delta\epsilon^p + \frac{1}{2E} \left( \frac{\Delta\sigma}{2} + \sigma_m \right), \quad (2.7)$$

wobei

$\Delta W^p$  – plastische Verzerrungsenergie (Hysteresefläche in einem Zyklus)

$\Delta W^{e+}$  – Zuganteil der elastischen Verzerrungsenergie

$n^*$  – zyklischer Verfestigungsexponent der Master-Kurve<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Umhüllende der Belastungs-Hysteresekurve (obere Hysteresekurve), [Ellyin, 1997]

$\Delta\sigma$  – Spannungsdifferenz  $\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$

$\Delta\varepsilon^p$  – plastische Komponente der Dehnung

$E$  – Elastizitätsmodul

$\sigma_m$  – Mittelspannung  $(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$

$\delta\sigma_0$  – Maß der zyklischen Verfestigung

In den energetischen Modellen wird der Begriff der normalisierten relativen Schädigung  $d$  verwendet. Die Formel der Schädigung kann dann wie folgt aufgeschrieben werden:

$$d = \left[ \frac{n}{N_f} \right]^{f(\psi; p)}, \text{ wobei} \quad (2.8)$$

$d$  – dimensionsfreie Schädigung ( $d = 0$  für das „neue“, unbeschädigte Material,  $d = 1$  beim Ausfall);  $d = D/D_f$

$N_f$  – Anzahl der Zyklen bis zur Schädigung

$D$  – aktueller Stand der Schädigung

$D_f$  – Stand der Schädigung beim ermüdungsbedingten Versagen.

Als eine von mehreren möglichen Annahmen für den Schädigungs-Kontrollparameter kann die spezifische Verzerrungsenergie  $\psi = \Delta W^t$  betrachtet werden. Die Schädigungsfunktion ist in diesem Fall definiert als

$$f(\psi; p) = \frac{1}{\log(\Delta W^t / \Delta W^{e+})}. \quad (2.9)$$

Für die mehraxiale Belastung wird durch [Ellyin, 1997] folgende Schädigungsfunktion  $\Psi$  vorgeschlagen:

$$\Psi = \frac{\Delta W^p}{\bar{\rho}} + \Delta W^{e+} = \kappa_u (2N_f)^\alpha + C_u, \text{ wobei} \quad (2.10)$$

$\bar{\rho}$  – Koeffizient der mehraxialen Randbedingungen (*multiaxial constraint factor*)

$\kappa_u$  – Materialparameter (uniaxial)

$\alpha$  – Materialparameter

$C_u$  – Materialparameter.

Die rechte Seite der obigen Gleichung wird aus der Wöhlerlinie für einachsige Belastung ermittelt. Die Terme auf der linken Seite werden rechnerisch ermittelt. Um anhand dieser Gleichung die Lebensdauer berechnen zu können, müssen zuerst die Energieanteile  $\Delta W^p$  und  $\Delta W^{e+}$  aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm oder rechnerisch bestimmt werden. Für Masing-Materialien<sup>2</sup> können die notwendigen Materialparameter in der Literatur, z. B. [Boller und Seger, 1987] gefunden werden, für die anderen sind allerdings oft aufwändige Versuche erforderlich.

<sup>2</sup> Bei Masing-Materialien, nach Schließen einer Hysterese, die auf der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve ( $\sigma - \varepsilon$ ) begonnen wurde, folgt der nächste Spannungs-Dehnungs-Pfad wieder auf der zyklischen  $\sigma - \varepsilon$  Kurve



## Hypothesen der Bruchmechanik

Hypothesen der Bruchmechanik, die auch als Rissfortschrittshypothesen bekannt sind, gehören auch zu den Schädigungshypothesen, mit denen die Restlebensdauer geschätzt werden kann. Die Aufteilung des Rissbildungsprozesses in Bereiche ist in Bild 2-9 dargestellt. Mit den Hypothesen der Bruchmechanik ist jedoch die Problematik verbunden, welche Bereiche des Rissfortschritts für ein bestimmtes Bauteil für seine technische Lebensdauer zugelassen werden. Bei sicherheitsrelevanten Bauteilen, wo makroskopische Risse nicht zugelassen werden, kann nur der Bereich der technischen Risseinleitung interessant sein. Er umfasst die Versetzungsbewegungen von Kristallen, die Risskeimbildung und das Mikrorisswachstum und wird als Kurzriss-Bruchmechanik gekennzeichnet. Die maximale Tiefe des Risses beträgt dabei bis ca. 0,5 mm bei einer Oberflächenlänge von bis zu 1...2 mm. Per Definition kann die technische Lebensdauer mit dem sog. technischen Anriss in der Makroskala enden. Dies betrifft insbesondere Bauteile aus Stahl. Der technische Anriss befindet sich aber immer noch im Bereich des stabilen Rissfortschritts, also einer Phase, die unter bestimmten Voraussetzungen (z. B. bei Leichtmetallen) von Interesse sein kann.

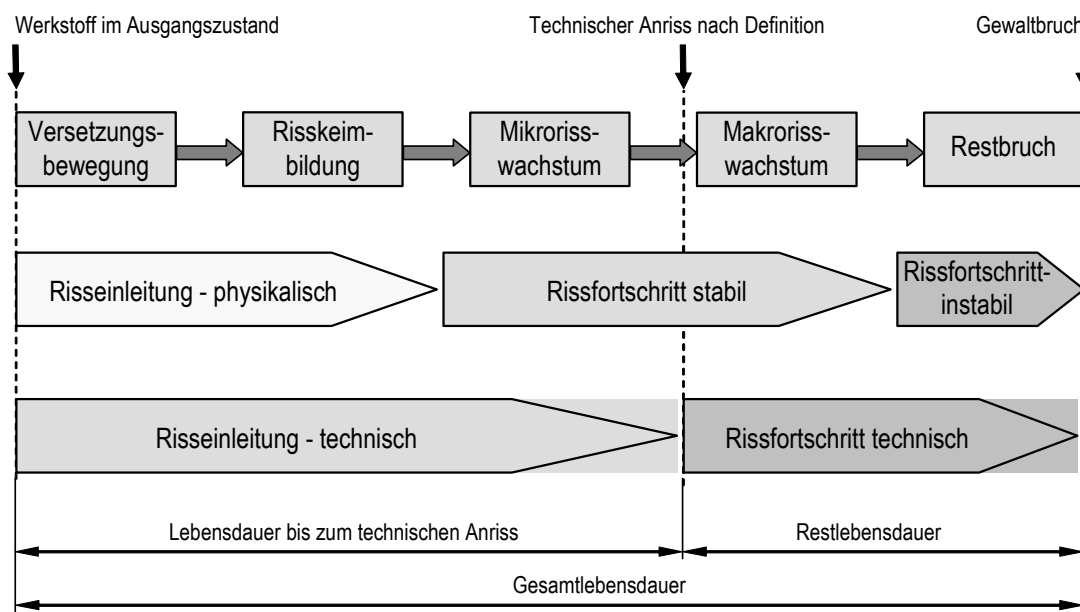


Bild 2-9 Aufteilung des Rissbildungsprozesses, nach [Radaj, 1995] und [Gudehus und Zenner, 1999]

Bei den Hypothesen der Bruchmechanik geht man davon aus, dass die Ausbreitung von Rissen, die entweder infolge nicht optimaler Fertigung oder durch Beanspruchung während des Betriebes entstehen können, als einheitliche Bruchursache anzusehen ist [Blumenauer und Pusch, 1993]. Als Bruch bezeichnet man dabei die Werkstofftrennung in makroskopischen Bereichen, die zum Verlust der

Tragfähigkeit eines Festkörpers führen kann. Bei den Rissfortschrittshypothesen wird angenommen, dass sehr kleine Anrisse (Fehlstellen) von Anfang an im Material vorhanden sind oder nach relativ kleiner Zahl von Schwingspielen eingeleitet werden. Die Reihenfolgeeffekte bei der Belastung können durch Risssschließverhalten oder transiente Dauerfestigkeit (Dauerfestigkeitsminderung) berücksichtigt werden.

Es wurden verschiedene Konzepte der Bruchmechanik entwickelt. Darunter sind u. a. Konzepte der linear-elastischen Bruchmechanik (LEBM) und Fließbruchmechanik (FBM), die auch als elastisch-plastische Bruchmechanik (EPBM) bekannt sind. Das erste Konzept wird bei hochfesten und spröden Werkstoffen eingesetzt, die plastische Zone muss dabei klein gegenüber den Proben oder Bauteilabmessungen sein. Wenn der Radius der plastischen Zone an der Rissspitze nicht klein im Verhältnis zu Risslänge und Bauteilabmessungen ist, wird das FBM-Konzept angewendet.

Solange sich das Bauteil im stabilen Risswachstumsstadium befindet, können die Konzepte der Bruchmechanik zur Abschätzung der Lebensdauer verwendet werden. Die Ermittlung der Restlebensdauer kann entweder durch Integration der Rissfortschrittsgleichung oder durch die Mittelung des Rissbildungsverhaltens von Kurzrissen erfolgen. Als Beispiel kann hier die Paris-Erdogan-Gleichung des stabilen Rissfortschritts erwähnt werden, aus der die Risswachstumsgeschwindigkeit ermittelt wird:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m, \text{ wobei} \quad (2.11)$$

$a$  – Länge des Risses

$N$  – Anzahl der Schwingspiele

$\Delta K$  – Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors

$C, m$  – Werkstoffkonstanten.

Die Lösung ist ein Integral, das zwischen  $a_0$  (Anfangslänge des Risses) und  $a_{\max}$  (maximale zulässige Risslänge) berechnet wird:

$$N = \int_{a_0}^{a_{\max}} \frac{da}{C(\Delta K)^m}. \quad (2.12)$$

Auch wenn die Konzepte der Bruchmechanik in bestimmten Fällen gute Restlebensdauervorhersagen bieten, eignen sie sich u. U. nicht für Systeme der automatischen Lebensdauerüberwachung. Es werden jedoch spezielle Techniken entwickelt, die eine automatische Überwachung der Risslänge, z. B. mittels akustischer Emission erlauben sollen. Zur Datenauswertung können in solchen Fällen z. B. Wavelet-Analyse oder neuronale Netze verwendet werden. Bestimmte Elemente der Bruchmechanikkonzepte können als Ergänzung in den anderen Modellen der Lebensdauerprognose implementiert werden. Die Verbindung der Rissfortschrittshypothesen mit Spannungsanalyse kann die Genauigkeit der Vorhersage positiv beeinflussen

[McDowell et al., 2000]. Auf diese Weise werden sog. Multimodelle für robuste Lebensdauerschätzung entwickelt.

### Vergleichende Betrachtung der Schädigungshypothesen

Auch wenn die linearen Schädigungshypothesen oft verwendet werden, sind die Ergebnisse der Akkumulation manchmal nicht ausreichend genau. Die Nachteile dieser Methoden sind die Unabhängigkeit der Akkumulation von dem Belastungsniveau und von der Lastwechselwirkung. Die Reihenfolge der Beanspruchung wird bei der Lebensdauerrechnung nicht berücksichtigt. Es ist aber bekannt, dass ein großer Lastwechsel eine Vergrößerung eines Anfangsschadens verursachen kann [Luo et al., 1994]. Es wurde mehrmals beobachtet (z. B. [Fatemi und Yang, 1998], [Zheng, 1995]), dass für die sog. Belastungszyklen L-H (*low-to-high*) die Werte der erreichbaren Schädigung größer als Eins sind ( $D > 1$ ) und für die Zyklen H-L (*high-to-low*) kleiner. Man versucht es dadurch zu erklären, dass das erste Beanspruchungsniveau in einem L-H Zyklus nicht in der Lage ist, eine Rissbildung zu initiieren, die für den Gesamtprozess der Schädigung ausschlaggebend ist [Buxbaum, 1992]. Umgekehrt wird bei den H-L Zyklen die Rissausbreitung stärker initiiert und demzufolge sinkt die ertragbare Schädigung. Der Autor übt dort die Kritik an der linearen Palmgren-Miner Regel mit folgendem Satz: „Eine mit der Palmgren-Miner-Regel vorhergesagte Lebensdauer kann nur ein Fünftel oder das Sechsfache der tatsächlichen Lebensdauer betragen“. Auch [Xie, 1999] hat in seinen Untersuchungen festgestellt, dass bei den L-H Zyklen die Miner-Regel zufrieden stellend funktioniert (allerdings nur im Sinne, dass die Ergebnisse auf der sicheren Seite liegen), bei H-L dagegen bedeutende Fehler auf der unsicheren Seite auftreten können.

Die Versuchsergebnisse von [Gudehus und Zenner, 1999] zeigen eindeutig, dass auch die Beanspruchungsstufen im Bereich der Dauerfestigkeit eine Auswirkung auf die Gesamtschädigung haben. Deswegen führt die einfache Palmgren-Miner-Regel oft zu einer Überschätzung der Lebensdauer. [Dudek, 1993] beschreibt häufig verwendete Modifikationen am Beispiel des Nennspannungskonzepts. Da die Ergebnisse der einfachen Palmgren-Miner Regel nicht zufrieden stellend sind, sollte man bei den Berechnungen alle Spannungen berücksichtigen, die größer als  $0,4 \dots 0,7 \sigma_D$  ( $\sigma_D$  – Dauerwechselfestigkeit) sind, im Normalfall größer  $0,5 \sigma_D$ . [Agerskov, 2000] weist auch auf eine weitere Problematik der linearen Hypothese hin. Experimentelle Untersuchungen von geschweißten Strukturen zeigen, dass sich die Miner-Summe verkleinert, wenn die Belastung weniger regulär ist. Wenn das äquivalente Spannungsniveau sinkt, bekommt man größere Werte der ertragbaren Schädigung – das bedeutet, dass die Summe aus der Miner-Regel größer als 1 wird. Man versucht dies damit zu erklären, dass die Beschleunigung des Rissfortschrittes nicht besonders stark ausgeprägt ist, wenn die Beanspruchung insgesamt kleiner ist. Auch [Haibach, 1992] ist der Meinung, dass die Miner-Regel unbefriedigend

hinsichtlich der Verlässlichkeit des errechneten Lebensdauerwerts ist. Die Streuungen der Schwingfestigkeit, die durch die Geometrie des Bauteils und den Herstellungsprozess entstehen, mit den daraus resultierenden Werkstoff-, Eigenspannungs- und Oberflächenzuständen, sprechen für die Notwendigkeit von Bauteilversuchen. Auch die relative Miner-Rechnung auf Basis von Nennspannungen ist häufig zu pauschal.

Schadensakkumulationshypothesen, die auf gesondert durchzuführenden Betriebsfestigkeitsversuchen basieren, bieten oft keine vernünftige Alternative für die linearen Ansätze. Vielen nichtlinearen Hypothesen fehlt sogar noch die experimentelle Validierung. Beispielsweise verfügen die Hypothesen, die die Lastreihenfolge berücksichtigen können, nur über Materialkennwerte für eine zweistufige Belastung und wurden nur dementsprechend validiert. Die Frage, ob die Ergebnisse dieser Versuche mit Proben frei auf reale Bauteile übertragen werden können, bleibt offen. Die Erweiterung auf die mehraxiale Beanspruchung wurde nur anhand theoretischer Angaben erarbeitet [Lemaitre und Chaboche, 1990]. Auch hier müssen entsprechende Versuche durchgeführt werden, um notwendige Materialkennwerte zu bestimmen. Eine weitere Schwierigkeit liegt darin, dass man bei der mehraxialen Beanspruchung die Energie (insbesondere deren plastischen Anteil) nicht auf einfache Weise bestimmen kann. Aus diesem Grund und mangels abgesicherter experimenteller Verifizierung für die mehraxiale und insbesondere stochastische Beanspruchung komplexer Bauteile, ist die Methode noch nicht reif genug für den industriellen Einsatz. Auch [Macha, 2001], der in seiner Arbeit unterschiedliche energetische Kriterien gegenüberstellt, weist darauf hin, dass für die industrielle Anwendung immer noch kein allgemein gültiges Konzept geeignet sei.

Man kann davon ausgehen, dass heutzutage immer noch die linearen Schädigungshypothesen von größter Bedeutung für die Berechnungsverfahren sind. Diese Modelle können ohne weiteres im Konzept der Lebensdauerüberwachung eingesetzt werden. Insbesondere kann die relative Form der Palmgren-Miner Regel vorteilhaft sein, da die Schädigungssumme im Laufe der Überwachung der Lebensdauer korrigiert werden kann.

Die übrigen Hypothesen können aus heutiger Sicht nur bedingt eingesetzt werden. In vielen Fällen muss noch an vorhandenen Modellen gearbeitet werden, um die allgemeine Gültigkeit zu gewährleisten. Entsprechende experimentelle Untersuchungen müssen gemacht werden, um die Hypothesen ausreichend zu verifizieren. Viel verspricht in diesem Zusammenhang die energetische Betrachtung [Fatemi und Yang, 1998], die die Nachteile der linearen Ansätze weitgehend umgeht. Das Modell ist verhältnismäßig einfach und kann durchaus im Lebensdauerkonzept implementiert werden, wenn für die eingesetzten Materialien entsprechende Kennwerte der Schädigung vorhanden sind und sich die Eingangsenergie auf einfache Weise ermitteln lässt.

Die Risswachstumstheorien bilden zwar einen interessanten Ansatz, aber die Messung von Risslängen, insbesondere im Mikrobereich, kann immer noch als eine Barriere für den praktischen Einsatz im Lebensdauerüberwachungskonzept betrachtet werden. Angesichts der messtechnischen Entwicklung einerseits und des steigenden Einsatzes von Leichtmetallen im Fahrzeugbau andererseits, können diese Methoden in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Welche Risse für bestimmte Elemente während der technischen Lebensdauer toleriert werden, hängt von dem Konstruktionsprinzip ab und kann nach Bedarf definiert werden. Es ist dabei nicht ausgeschlossen, dass die Rissfortschritthypothesen im Modell der Lebensdauerüberwachung implementiert werden können; als Input für die Berechnung werden dann dementsprechend andere, nicht direkt mit dem Rissfortschritt verbundene Größen verwendet.

#### 2.2.4 Lebensdauerrechnung bei Fahrzeugen

Bei der Entwicklung eines Systems zur Lebensdauerüberwachung für den mobilen Einsatz in Straßen- oder Schienenfahrzeugen müssen anwendungsspezifische Randbedingungen berücksichtigt werden. Bei Kraftfahrzeugen werden beispielhaft in der Festigkeitsrechnung die Elemente einer Radaufhängung betrachtet. Für die Anwendung des Nennspannungskonzepts werden praktisch ausschließlich Bauteilwöhlerlinien zu Grunde gelegt [Heuler et al., 1987]. In der Berechnung nach dem Kerbspannungskonzept wird in der Schädigungsrechnung überwiegend die lineare Schädigungshypothese eingesetzt. Als Schädigungsereignis werden dabei die geschlossenen Hystereseschleifen bewertet, die einer Rainflow-Zählung äquivalent sind. Die Treffsicherheit der Berechnung ist nach der Basisvariante des Kerbgrundkonzepts nicht oder nicht wesentlich größer als beim Nennspannungskonzept. Die Anwendung von Bruchmechanik-Konzepten im Automobilbau wird überwiegend skeptisch beurteilt. Die Rissfortschritthypothesen bei der Restlebensdauerschätzung werden insbesondere im Bereich des Leichtbaus (Aluminium) bei der Luft- bzw. Raumfahrt verwendet. Diese Ansätze können auch in der Automobil- bzw. Bahnindustrie an Bedeutung gewinnen, da auch dort der Anteil von Leichtbaustoffen ständig wächst. Da aber bei der Rissausbreitung andere Methoden der Überwachung (sie reichen im Flugzeug von der Sichtinspektion bis an die akustische Emission bei der Rissentstehung) eingesetzt werden, kann an dieser Stelle nur auf den potenziellen Einsatz hingewiesen werden. Diese Methoden werden in dieser Arbeit nicht näher diskutiert.

Für die Lebensdauerberechnung im Automobilbau werden die Randbedingungen der Anregung (Straßenzustand), Fahrzeugcharakteristik (Geschwindigkeit, Beladung) und Fahrer („normaler“, sportlicher Typ) definiert. Es wird versucht, den Einsatzspiegel (eine Charakteristik der Art und des Umfangs des Einsatzes) möglichst eindeutig zu definieren, um die Ergebnisse aus verschiedenen Berechnungen vergleichen zu können. Die Simulation der Daten für eine Fahrzeugaufhängung beinhaltet  $2 \cdot 10^7$  Zyklen, sie reicht also in den Bereich der

Dauerfestigkeit. Bei der Simulation werden die Spannungsamplituden und die Mittelspannung berücksichtigt. Zur Datenreduktion wird meist die Rainflow-Zählung verwendet. Für die Simulation der Lebensdauer bei Schienenfahrzeugen werden eine genaue Beschreibung der Gleislage und die weitere Charakteristik der Strecke (Geradeaus-, Bogen-, Bogenein-, Brücken-, Tunnel-, Weichenfahrt), fahrzeug-spezifische Merkmale (Beladung, Bremsen, Beschleunigen) und Umwelteinflüsse (z. B. Seitenwind) in Betracht gezogen.

Die Abschätzung der Lebensdauer, bzw. der Nachweis der Betriebsfestigkeit erfolgt grundsätzlich an den Querschnitten eines Bauteils, an denen die Spannungen die größten Schädigungen verursachen. Dabei kann der Nachweis anhand von Nennspannungen oder örtlichen Spannungen erfolgen [FKM, 1998]. Es ist nicht immer einfach, die kritischen Punkte zu identifizieren. Insbesondere bei Neukonstruktionen von Fahrwerken, in denen von klassischen Kraftleitungspfaden abgewichen wird, kann es sehr schwer sein, die richtigen Nachweispunkte zu finden. Die meistschädigenden Spannungen beim Einwirken mehrerer Belastungen können an anderen Stellen wirken als die meistschädigenden Spannungen bei Einwirkung einzelner Belastungen. Diese Problematik findet in der heutigen Praxis wenig Beachtung, und es ist alleine dem Wissen und der Erfahrung des Konstrukteurs überlassen, die richtigen Nachweispunkte für die jeweilige Auslegung zu erkennen.

Eine Methodik für die Betriebsfestigkeitsberechnung bei Schienenfahrzeugen ist in [Stichel, 1996] dargestellt. Dabei werden die Mehrkörperdynamik- und Finite-Elemente Methode verwendet. Die bei der Fahrt über ein stochastisch oder deterministisch gestörtes Gleis wirkenden Kräfte können mithilfe eines Fahrdynamik-Simulationsprogramms (MEDYNA) berechnet werden. Daraus können die Schnittkräfte und die resultierenden Spannungen an ausgewählten Stellen der Fahrzeugkomponenten ermittelt werden. Die Spannungsverläufe werden klassiert und mithilfe einer Schadensakkumulations-Hypothese der Betriebsfestigkeitsnachweis geführt. Dabei werden die Methoden zur Beschreibung der Gleislagefehler berücksichtigt. Auf die Kopplung von MKS- und FE-Programmen weisen auch [Knothe et al., 1996] hin. Nur so können die elastischen Eigenschaften des Drehgestellrahmens bereits in der MKS-Rechnung berücksichtigt werden. Auf diese Weise kann die Konsistenz der Modellierung des Drehgestellrahmens in der FE-Rechnung einerseits und der MKS-Rechnung andererseits sichergestellt werden. Es werden auch Schwachstellen der heutigen Vorgehensweise geschildert. Beispielsweise werden in einer systematischen Erfassung Einzelfehler in der Anregung, wie Weichenüberfahrten oder Schienenstöße, nicht berücksichtigt.

Eine Beschreibung der Auslegung von TGV-Drehgestellen findet sich in [Raison und Viet, 1998]. Der Drehgestellrahmen wird so dimensioniert, dass alle im Betrieb auftretenden Lasten, also auch ungewöhnliche Lastfälle wie Notbremsungen o. ä., nur zu Beanspruchungen führen, die noch im elastischen Bereich des Werkstoff-

verhaltens ertragen werden. Bei den ersten Fahrversuchen wird das Drehgestell in großem Umfang mit Sensoren bestückt, mit denen u. a. die Beanspruchungen an den kritischen Stellen überwacht wurden. Aus den dabei gewonnenen Ergebnissen können Rückschlüsse auf die zugrunde gelegten Lastannahmen gezogen werden.

Ein Ansatz zur Verbesserung der Lebensdauerabschätzung unter Berücksichtigung der Mittelspannungswechsel befindet sich in [Flach, 1999]. Dabei wird die Folge aller Betriebszustände auf der Einsatzstrecke berücksichtigt. Zuerst werden die Belastungs-Zeit-Funktionen für die Betriebszustände der Einsatzstrecke berechnet. Die Anregung durch Gleislagefehler wird als Realisierung eines stochastischen Prozesses betrachtet. Im nächsten Schritt werden die Beanspruchungs-Zeit-Funktionen für die relevanten Bauteile, bzw. Bauteilquerschnitte aus den Belastungs-Zeit-Funktionen errechnet. Im weiteren Verlauf werden die Beanspruchungs-Zeit-Funktionen bewertet. Für jede Funktion, die einem einzelnen Betriebszustand entspricht, wird eine Rainflow-Zählung durchgeführt. Die Folge der Betriebszustände wird mithilfe der „Methode der Einsatzstrecke“ beschrieben. Es wird auch ein Ansatz angegeben, mit dem das resultierende Gesamt-Amplitudenkollektiv unter Berücksichtigung der Mittelspannungswechsel aus den zuvor bestimmten Rainflow-Matrizen berechnet werden kann. Im letzten Schritt wird die Lebensdauerabschätzung auf Basis von Wöhler-Linien unter Verwendung einfacher linearer Schädigungshypothesen durchgeführt.

Bei Drehgestellrahmen wird oft das Strukturspannungskonzept eingesetzt, das finite Schalenelemente beinhaltet. Es werden dabei die geometrischen Kerben berücksichtigt, aber nicht die Schweißverbindungen. Das Problem bei Drehgestellen sind üblicherweise nicht die normalen Spannungen, wo das Lebensdauerpotenzial nicht so schnell aufgebraucht wird, sondern Torsionsspannungen, wo die Lebensdauergerade schnell erreicht wird [Stichel und Knothe, 1998]. Diese Aussage hängt jedoch stark mit der eingesetzten Festigkeitshypothese zusammen. Die Beanspruchungsfrequenzen von Drehgestellen liegen nach [Flach, 1999] im Bereich 1...30 Hz.

An dieser Stelle soll noch explizit auf die Problematik der Elastomerbauteile bei Fahrzeugen eingegangen werden. Sie werden dort in einer großen Stückzahl verwendet, aber ihre Lebensdauerrechnung lässt noch viele Wünsche offen. Bei Elastomeren ist die nichtlineare Schädigungsakkumulation sehr ausgeprägt (eine Steigerung der Dehnung um 10 % kann die Lebensdauer um 50 % verringern). Auch andere nichtlineare Aspekte müssen bei diesen Elementen berücksichtigt werden – so kann beispielsweise eine Verdopplung der auf ein elastisches Element wirkenden Kraft die Schädigungszone an eine andere Stelle verschieben. Für mehraxiale Belastungen gibt es so gut wie keine Schädigungsansätze. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte ist es nahe liegend, dass die rechnerische Lebensdauerprognose für elastische Verbindungselemente noch keine ausreichende Genauigkeit liefern kann,

insbesondere dann, wenn man die angestrebte Zuverlässigkeit (z. B. 95 %) erreichen will.

### 2.2.5 Schwachstellen der heutigen Vorgehensweise

Ein wesentlicher Schwachpunkt der heutigen Berechnungspraxis ist die Modellierung der Werkstoffschädigung. Die oft gemachte Annahme der linearen Schadensakkumulation berücksichtigt die verschiedenen Beanspruchungen nur in pauschaler Form, sodass u. U. die Ergebnisse sehr unsicher sind. Außerdem wird bei der Lebensdauer-Rechnung oft angenommen, dass nur eine dominante Beanspruchungsform vorliegt. Es ist jedoch möglich, dass insbesondere bei Schienen- oder Kraftfahrzeugen mehrere, in unterschiedlicher Weise zeitveränderliche Belastungen einwirken. Die Beträge und die Richtungen der Hauptspannungen können dabei zeitlich veränderlich sein, was in einfachen Schädigungsmodellen nicht berücksichtigt werden kann. Auch die Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen an genormten Proben können nicht immer auf reelle Bauteile übertragen werden. Zuverlässig sind dann nur Ergebnisse für einfache Belastungsformen für konstante Mittelspannung und Spannungsamplitude.

Problematisch ist nach wie vor die Beschreibung der Schädigung bei nicht metallischen Werkstoffen. Insbesondere sind hier die elastischen Verbindungselemente (Federelemente, Gummi-Metall-Verbindungen etc.) betroffen. [Cordts et al., 2000] beschreiben, dass es heute noch nicht möglich ist, die Bauteil-Wöhlerlinie aus den Wöhlerlinien eines definierten Prüfkörpers zu errechnen. Darüber hinaus ist es für diese Bauelemente auch sehr schwer, Kriterien und Toleranzen im Gebrauchszustand anzugeben, die ein Ende der Lebensdauer anzeigen. Die Witterungsbedingungen und die Montage haben auch einen starken Einfluss auf die Lebensdauer und diese Faktoren werden bei einfachen Modellen nicht berücksichtigt.

## 2.3 Formulierung der Idee des Lebensdauerbeobachters

In Fahrzeugen werden die dynamisch beanspruchten kritischen Bauteile meist nicht überwacht. Anhand von Lastannahmen wird versucht, sie für eine vorgegebene Lebensdauer auszulegen. Andererseits werden die Teile nach bestimmten Zeitintervallen sicherheitshalber ausgetauscht, ohne dass ihr aktueller Zustand berücksichtigt wird.

Diese Vorgehensweise bringt folgendes Problem mit sich – ohne Überwachung ist die betriebliche Belastung von dynamisch beanspruchten Bauteilen nicht bekannt. Als Folge ist der aktuelle Schädigungszustand der Bauteile nicht bekannt und es kann zum ermüdungsbedingten Versagen kommen.



Als Lösung für das hier beschriebene Problem bietet sich ein Lebensdauerbeobachter an, d. h. eine Einrichtung, die die Überwachung der dynamischen Beanspruchung, die zum Versagen führen kann, übernimmt. Die im Betrieb auftretenden Beanspruchungen werden ermittelt und mit den bei der Auslegung getroffenen Annahmen verglichen. Mithilfe von Schadensakkumulationshypothesen wird der Schaden kumuliert, darauf basierend wird der aktuelle Schädigungszustand ermittelt und eine Aussage über die geschätzte Restlebensdauer gemacht. Ein solches System könnte im einfachsten Fall aus einem Sensor, einem Prozessor und einer Datenbank bestehen. Der Sensor erfasst die im Betrieb an den kritischen Stellen auftretenden Beanspruchungen und der Prozessor errechnet aus den gemessenen Beanspruchungen mithilfe eines in der Datenbank vorhandenen Schädigungsmodells, welche Schädigung das überwachte Bauteil erfährt und wie groß die Restlebensdauer noch ist.

## **2.4 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit**

Ziel der Arbeit ist es, die Konzepte der Online-Lebensdauerüberwachung bei mobilen Systemen anhand gemessener Größen und unter Verwendung von mathematischen Modellen, zu untersuchen. Im Vordergrund der Betrachtungen steht dabei das mechatronische Konzept des Lebensdauerbeobachters, insbesondere die damit verbundene Informationsverarbeitung und -verwaltung. Auch Bezüge zu Randgebieten, wie der Sensortechnik oder der Modellierung der Materialschädigung, die den Hintergrund der Funktionalität eines Lebensdauerbeobachters bilden, sollen betrachtet werden. Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Systematik des Aufbaus von Systemen zum Lebensdauerbeobachten diskutiert werden. Ausgehend von dem heutigen Stand der Technik sollen Empfehlungen zur Konzeption, zur Strukturierung und zum konkreten Aufbau solcher Systeme formuliert werden. Dazu werden u. a. Simulationen der Schädigungsrechnung durchgeführt und das mögliche Einsatzgebiet bei Fahrzeugen geschildert.

In Kapitel 3 wird zunächst das Konzept des Lebensdauerbeobachters detailliert vorgestellt. Die Vorteile der Lebensdauerüberwachung und der Bezug zu einem Diagnosesystem werden dargelegt. Schwerpunkt der Betrachtungen bildet der Abschnitt über den Aufbau des Systems zur Lebensdauerüberwachung. Anschließend wird das Thema der Zuverlässigkeit und Sicherheit des Gesamtsystems angesprochen.

In Kapitel 4 wird das Informationsmanagement im Lebensdauerbeobachter diskutiert. Die Problematik der Datenakquisition und Sensortechnik für die Lebensdauerüberwachung wird dabei angesprochen. Ein eigener Abschnitt ist der Datenreduktion gewidmet. Ein weiterer Abschnitt befasst sich mit verwendeten Modellen der Schädigungsrechnung. Anschließend wird der Informationsfluss in Sensorbussystemen diskutiert.

Kapitel 5 befasst sich mit der prototypischen Umsetzung der Lebensdauerüberwachung. Zunächst werden die Berechnungsprozeduren und Algorithmen zusammengestellt und einige Tests mit simulierten Datensätzen beschrieben. In weiteren Abschnitten werden der Aufbau eines Prüfstands zur Lebensdauerüberwachung und Ablauf des Experiments dargestellt. In einem weiteren Abschnitt erfolgen die Validierung der angewendeten Methode und die Diskussion der Ergebnisse.

### 3 Konzept des Lebensdauerbeobachters

In diesem Kapitel wird das Konzept der Lebensdauerüberwachung vorgestellt. Am Anfang werden die Vorteile und Nutzen der Überwachung in Bezug auf Kraft- und Schienenfahrzeuge erläutert und potenzielle Anwendungsfelder geschildert. Ferner wird das Überwachungssystem als Teil eines übergeordneten Diagnosesystems betrachtet. Auch der Bezug auf die Zuverlässigkeit und Sicherheit des Gesamtsystems wird kurz angesprochen. Danach wird der Aufbau des Lebensdauerbeobachters gezeigt.

#### 3.1 Vorteile der Lebensdauerüberwachung

Eine Lebensdauerüberwachung ist immer dann sinnvoll, wenn man eine zeitfeste Auslegung der Bauteile vornehmen muss und sich die zu erwartenden Beanspruchungen nicht eindeutig vorhersehen lassen. Im Automobilbau werden z. B. das Fahrwerk und die Karosserie für eine endliche Lebensdauer ausgelegt [Columbus, 1992]. Auch im Bahnbereich wird diese Vorgehensweise teilweise eingesetzt (auch wenn man die angestrebte Lebensdauer in Höhe von 30 Jahren praktisch als dauerfeste Auslegung verstehen kann). Die Überwachung der Lebensdauer kann auch durchaus sinnvoll bei gewünschter dauerfester Auslegung sein. Wenn die Lastannahmen nicht ausreichend sicher sind, können die reellen Beanspruchungen im Betrieb in den Zeitfestigkeitsbereich fallen. Die wirkliche Beanspruchung der Bauteile im Betrieb lässt sich nur in den seltensten Fällen schon in der Entwicklungsphase vorhersagen. Um überhaupt hierzu Aussagen machen zu können, ist es wichtig, sich einen Überblick über die tatsächliche Beanspruchung (Fahrten ohne Last, mit Passagieren, auf einer Schlechtstrecke usw.) im Lebenszyklus zu verschaffen. Diese Information fällt sozusagen nebenbei an, wenn die Beanspruchung der Bauteile bzw. -gruppen überwacht und ihre Restlebensdauer prognostiziert wird.

Die Aspekte, die für die Lebensdauerüberwachung sprechen, unterscheiden sich nur geringfügig bei den Kraft- und Schienenfahrzeugen; prinzipiell basieren sie auf der gleichen Methodik. In erster Linie ist in beiden Fällen der bestimmungsgemäße Einsatz für die „normale“ Schädigung verantwortlich. Dabei spielen z. B. der Strecken- oder Fahrbahnzustand, Beladung etc. eine wichtige Rolle. Aber auch der nicht bestimmungsgemäße Einsatz (der insbesondere bei Kraftfahrzeugen sehr ausgeprägt sein kann) kann erhebliche Schäden verursachen.

Die Lebensdauerüberwachung bringt auch Vorteile bei der Instandhaltung. Zustandsabhängige Instandhaltung ist gegenüber einer Instandhaltung mit festen Wartungsintervallen wirtschaftlicher, verlangt aber eine ständige Zustandserfassung. Mit der permanenten Diagnose der Bauteile können nicht nur unvorgesehene

Ausfälle und die damit verbundenen Werkstattkosten gespart werden, auch die dadurch manchmal verursachten Folgeschäden können vermieden werden.

Der Lebensdauerbeobachter kann auch dort von Vorteil sein, wo eine detaillierte Simulation der Beanspruchung nicht möglich ist und ein präzises Schädigungsmodell für ein bestimmtes Bauteil oder eine Baugruppe noch nicht bekannt ist. Eine detaillierte Lebensdauersimulation ist z. B. dann nicht möglich, wenn die Randbedingungen (z. B. garantierte oder zulässige Gleisstörung, bestimmte Straßenverhältnisse) in der Simulationsphase nicht genau definiert werden können. Demzufolge kann bei vielen Komponenten (sowohl im Automobilbau als auch in der Bahntechnik) auf Bauteilversuche nicht vollständig verzichtet werden. Wenn schon in dieser Phase der Lebensdauerbeobachter implementiert wird, kann die Information über die Beanspruchungen in der Testphase gewonnen und bei der endgültigen Auslegung berücksichtigt werden. Diese Daten können auch verwendet werden, um die Korrelation zwischen den vorhergesagten und tatsächlich auftretenden Belastung bzw. Lebensdauer zu prüfen. Auch die Überwachung der gesamten Population von Produkten und Bauteilen kann Vorteile bieten. Bei komplizierten Bauteilen, für die keine Bauteil-Wöhlerkurve vorliegt, oder bei komplexen Systemen, deren Ausfallmechanismen nicht vollständig bekannt sind, kann man bei der Lebensdauerbeobachtung eine relative Lebensdauerrechnung vornehmen, bei der die Beanspruchungsgrenze im Laufe der Zeit kalibriert wird, wobei das Ausfallverhalten der anderen Individuen einer Population der Produkte berücksichtigt wird.

Die Überwachung im laufenden Betrieb erlaubt nicht nur direkte Aussagen über die momentane Schädigung, sie liefert auch Information über den betrieblichen Beanspruchungszustand, die bei der Simulation und Berechnung von Bauteilvarianten angewendet werden kann (Rückkopplung der Ergebnisse der Lebensdauerrechnung in den Entwurfprozess). Übliche Vorgehensweise ist es, zuerst zu konstruieren (CAD-Werkzeuge), dann zu berechnen (Lastfunktionen mit MKS, Beanspruchungen mit FEM, Lebensdauer mit anderen Tools). Im Anschluss wird das Ergebnis bewertet und wenn es nicht zufrieden stellend ist (in der Regel wird bei der ersten Auslegung noch nicht das Optimum erreicht werden), wird eine neue Schleife gestartet und eine Konstruktionsänderung vorgenommen. Durch den Einsatz der Lebensdauerüberwachung ist es möglich, die Informationen über den betrieblichen Beanspruchungszustand bei der Neuentwicklung zu verwenden. Die im Lebenszyklus gewonnenen Informationen sind von großer Bedeutung; um statistisch abgesicherte Aussagen über die Belastungen zu machen, können die Langzeitmessungen in mehreren Fahrzeugen (Flottenversuch) durchgeführt werden. Die Idee des on-board implementierten Lebensdauerbeobachters ist dafür sehr geeignet.

Der Nutzen der Lebensdauerüberwachung sowohl bei den Kraftfahrzeugen als auch bei den Schienenfahrzeugen lässt sich in einer Auflistung kurz zusammenfassen:

- Die online berechnete restliche Lebensdauer von Komponenten kann optimal ausgenutzt werden und somit die Effizienz des Betriebs gesteigert werden
- Wartungsintervalle können dynamisch anhand der Beanspruchung im Betrieb festgelegt werden, die Reparaturen können besser geplant werden; Wartungskosten können dadurch gesenkt werden, dass Elemente, die noch in gutem Zustand sind, nicht vorzeitig ausgetauscht werden
- Es können leichtere Strukturen gebaut werden ohne Gefahr, dass die dynamisch beanspruchten Bauteile infolge der Ermüdung plötzlich versagen
- Die Sicherheit im Betrieb kann durch die Schadensfrüherkennung gesteigert werden
- Der Einfluss der Strecken- bzw. Straßenqualität und der Betriebsart (z. B. Beladungszustand, o. ä.) auf die Schädigung des Systems, bzw. Bauteils kann explizit ausgewiesen werden.
- Die Kosten für die Anmietung der Fahrzeuge, bzw. der Restwert des Fahrzeuges können anhand der Kilometerleistung und der Beanspruchung durch den Kunden/Betreiber ermittelt werden
- Bei geeigneter Auslegung des Lebensdauerbeobachters kann man wertvolle Hinweise auf die tatsächlich im Betrieb auftretenden Lastkollektive und ihre Schädigungswirkung erhalten. Durch Rückkopplung der Ergebnisse in den Berechnungsvorgang kann die Qualität der rechnerischen Voraussagen signifikant verbessert werden, bzw. der Entwicklung von anderen Fahrzeugen können bessere Lastannahmen zugrunde gelegt werden.

Im Folgenden wird Bezug auf die Kraftfahrzeug- oder Schienenfahrzeugspezifische Belastungen genommen.

### 3.1.1 Kraftfahrzeugspezifische Belastungen

Die an einem Kraftfahrzeug vorkommenden Belastungen werden durch ein sog. Einsatzprofil definiert. Bestimmend für das Profil sind der Fahrer (vom Gelegenheitsfahrer bis zum Fahrer mit sportlichen Ambitionen), die Straße (von Autobahn bis zur Schotterstrecke), Einsatzzweck bzw. Transportaufgabe (Kurzstrecken, Langstrecken, Universaleinsatz, Freizeitnutzung, Anhängerbetrieb), Umwelteinflüsse (Temperatur, Feuchtigkeit, Seeklima, Staubeinfluss) und das Fahrzeug selbst mit seinen Komponenten (z. B. Bereifung, spezielle Stoßdämpfer) und Bauart (PKW, Allrad, Kleintransporter usw.). Die resultierende Beanspruchung im Einsatz ist stets eine Kombination mehrerer Einflussfaktoren. Bei so vielen Parametern, die oft miteinander nicht korreliert sind, ist eine genaue Festlegung des Einsatzprofils nicht oder nur sehr schwer/selten möglich.

Im Lebenszyklus eines Fahrzeugs können auch weitere Vorkommnisse die Lebensdauer eines Bauteils oder einer Baugruppe beeinflussen. Infolge von Fahr- und Bedienungsfehlern kann das Kraftfahrzeug in bestimmten Fällen wesentlich

stärker belastet werden als bei der Auslegung vorgesehen. Diese nicht bestimmungsgemäßen Belastungen, die im Übergangsbereich zwischen normalen Belastungen und solchen infolge eines Unfalls liegen, werden als Missbrauch bezeichnet [Gersbach und Naundorf, 1987]. Diese nicht bestimmungsgemäße Verwendung des Fahrzeugs kann sowohl gewollt (z. B. Geländefahrt mit einem Straßenfahrzeug) oder auch ungewollt sein (Fehleinschätzung in einer Fahrsituation, mangelnde Beherrschung eines Fahrzeug – beispielsweise wird die Bordsteinkante zu schnell überfahren). Der Missbrauch ist nicht immer auf den Betreiber des Fahrzeugs zurückzuführen, er kann auch während der Montage oder bei Wartung bzw. Pflege entstehen.

### 3.1.2 Schienenfahrzeugspezifische Belastungen

Bei der Simulation und Berechnung der dynamisch beanspruchten Bauteile in Schienenfahrzeugen treten folgende Probleme auf:

- die zu erwartende Qualität der Strecken ist nicht ausreichend bekannt
- die Fahrgeschwindigkeiten können nur grob abgeschätzt werden
- die im Einsatz auftretenden Kräfte sind nicht genau bekannt.

Die größte Schädigung kommt erfahrungsgemäß bei langsamer Fahrt auf schlechter Strecke vor. Bei hohen Geschwindigkeiten und guter Streckenqualität sind die Belastungen dagegen quasistatisch.

Die Schädigung kann auch, ähnlich wie bei den Kraftfahrzeugen, durch falsche Montagetechnik verursacht werden. Wenn die Bauteile schon während des Einbaus beschädigt werden, dann wird die angestrebte Laufleistung nicht erreicht (z. B. nicht fachgerechte Montage von Elastomerbauteilen). Die Aussage über die Ursache (falsche Montage, Material- bzw. Berechnungsfehler) kann später oft nicht mehr getroffen werden. Im Gegensatz zu Straßenfahrzeugen, ist bei Schienenfahrzeugen die Problematik des Missbrauchs im Betrieb jedoch nicht so stark ausgeprägt. Außergewöhnliche Belastungen können durch Überladung oder nicht dem Gleiszustand angepasste Geschwindigkeit entstehen.

Der Einsatz der mobilen Lebensdauerüberwachung ist insbesondere wichtig bei Schienenfahrzeugen im automatisierten bzw. fahrerlosen Betrieb. Die Überwachung muss dann nicht nur die Informationen über den momentanen Zustand liefern, sondern in Verbindung mit einem Diagnosesystem auch sicherheitskritische Entscheidungen bezüglich des weiteren Betriebs treffen.

## 3.2 Potenzielle Anwendungsfelder

Der Lebensdauerbeobachter kann praktisch in jedem System verwendet werden, das dynamisch beanspruchte Elemente beinhaltet, deren Lebensdauer von großer

Bedeutung ist. Besonders sinnvoll ist diese Lösung in sicherheitsrelevanten oder besonders schweren (aufgrund von möglicher Gewichtersparnis) Bauelementen. Auch stationäre Anlagen oder Bauwerke wie z. B. Brücken, Rohrleitungen, Bohrinseln können von dieser Lösung profitieren. Der Fokus dieser Arbeit liegt allerdings auf mobilen Systemen, insbesondere auf Fahrzeugen.

### 3.2.1 Kraftfahrzeuge

Bei einem Kraftfahrzeug gibt es sehr viele Bauteile bzw. Bauteilgruppen, die dynamisch beansprucht werden und von sicherheitstechnischer Relevanz sind. In dieser Übersicht werden die PKW und Nutzfahrzeuge zusammen betrachtet, auch wenn in Einzelfällen bestimmte Elemente bei einer Fahrzeuggruppe nicht vorhanden sind. Außer in Lastkraftwagen, kann der Einsatz der Lebensdauerüberwachung in gewerblich genutzten Personenkraftwagen interessant sein (Taxi, Streifenwagen, Mietauto), die hohe Leistung aufweisen, bzw. aus anderen Gründen stark belastet werden. Die sog. Hot Spots, also besonders beanspruchte Punkte kann man in folgenden Baugruppen erwarten:

**Tragrahmen bzw. selbsttragende Struktur:** Die Baugruppe unterliegt starker Beanspruchung. Sie ist im Normalfall für die Gesamtlebensdauer des Fahrzeugs ausgelegt und wird nicht ausgetauscht. Bei der selbsttragenden Struktur von Interesse sind z. B. Säulen, Schwellen und Stellen, wo Federbeine oder Motor befestigt sind.

**Achsen und Aufhängung:** Die Achsen werden intensiv beansprucht und gehören gleichzeitig zu den sicherheitsrelevanten Bauteilen. In den Lastpfaden sind auch Gummi-Metall-Verbindungen vorhanden, die von großem Interesse sind. Von Bedeutung sind beispielsweise: Befestigung der Federung, Achszapfen, elastische Verbindungen, Kräfte an den Achsschenkeln, Spannungen am Stabilisator, Kräfte an Federn bzw. Stossdämpfern (Domkräfte in Längs-, Quer- und Vertikalrichtung), Kräfte in den Führungsgelenken, Radwege, Spannungen an der Hinterachse, Längs- und Seitenkräfte an der Hinterachse, Kräfte an der Spurstangen, Federeintauchtiefe.

**Lenkung:** Die Lenkung gehört zu den besonders sicherheitsrelevanten Baugruppen, hier wird vor allem der Teil zwischen dem Lenkgetriebe und dem Achsschenkel beansprucht (z. B. Fahrt mit geringer Geschwindigkeit, Parkmanöver). Die Überwachung dient in diesem Fall der Sicherheit, eine Gewichtersparnis spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Besonders interessant kann die Überwachung der Lebensdauer von üblicherweise kurzlebigen Gummi-Metall-Verbindungen bzw. Gelenken sein. Die Struktur eignet sich auch für indirekte Überwachung (z. B. anhand des Drucks in der Servopumpe).

**Anhänger- bzw. Sattelkupplung:** Diese Baugruppen werden besonders dynamisch beansprucht und sind für Sicherheit und Vollständigkeit des Gespanns wichtig. Die

Überwachung der Beanspruchung kann auch verwendet werden, um den Abnutzungsgrad des Zugfahrzeugs in Abhängigkeit von der tatsächlichen Anhängerlast zu bestimmen. Eine besondere Rolle kann in diesem Zusammenhang die Überwachung der Anhängerkupplung in einem PKW haben. Diese Fahrzeuge sind nicht für den ständigen Betrieb mit einem Anhänger ausgelegt, die Anhängerkupplung wird an der selbsttragenden Struktur nachträglich montiert.

**Bremsen und Antriebsstrang:** Die Elemente werden entsprechend bei den Bremsmanövern oder beim Anfahren stark belastet. Bei den Bremsen kommt zusätzlich die Beanspruchung durch das Antiblockiersystem hinzu. Das Versagen im Bremssystem kann katastrophale Folgen haben. Der Antriebsstrang muss hohe Drehmomente übertragen, insbesondere sind dann die Kardangelenke stark beansprucht.

Je nach Parameter, die überwacht werden können, werden direkte oder indirekte Methoden der Lebensdauerüberwachung ausgewählt. In der folgenden Tabelle 3-1 werden die Potenziale der Lebensdauerüberwachung bei Kraftfahrzeugen kurz zusammengefasst.

*Tabelle 3-1 Charakteristik der Lebensdauerüberwachung bei Kraftfahrzeugen*

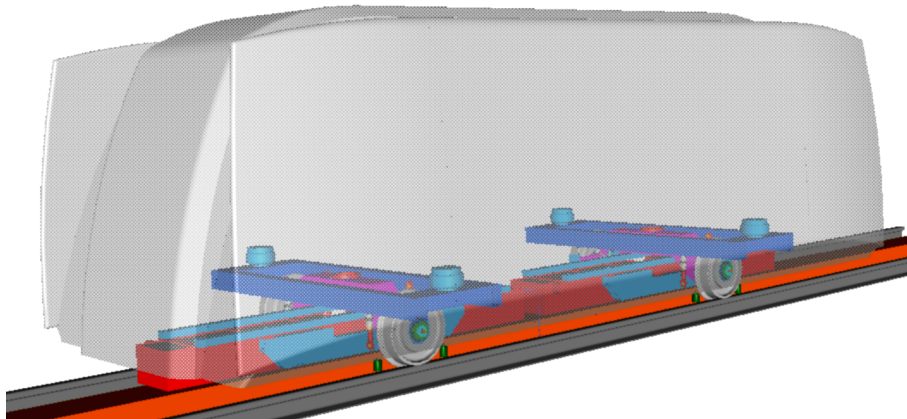
	Hohe Beanspruchung	Sicherheitsrelevanz	Große Variabilität der Beanspruchung	Hohes Leichtbaupotenzial	Geringer Modellierungsaufwand
Tragrahmen	✓		✓	✓	
Achsen	✓		✓	✓	✓
Lenkung		✓	✓		✓
Anhängerkupplung	✓		✓		✓
Antriebsstrang			✓	✓	✓
Bremsen	✓	✓	✓		✓

### 3.2.2 Schienenfahrzeuge

Bei den Schienenfahrzeugen können prinzipiell die gleichen Baugruppen wie bei den Kraftfahrzeugen vorkommen, auch wenn sich die konstruktive Lösung von Fall zu Fall stark unterscheiden kann. Bezüglich der Tatsache, dass bei der Entwicklung eines neuen Verkehrskonzeptes [Neue Bahntechnik Paderborn, 2005] ein völlig neues Schienenfahrzeug konzipiert und aufgebaut werden soll, hat es sich angeboten, dieses als Anwendungsfeld für die weiteren Untersuchungen auf dem Gebiet der Lebensdauerüberwachung zu verwenden. NBP – Neue Bahntechnik Paderborn – ist



ein gemeinsames Projekt von sechs Lehrstühlen der Universität Paderborn. Dieses Vorhaben kombiniert ein Shuttle-Konzept (autonomes Fahren ohne Führer mit relativ kleinen Fahrzeugen – sog. RailCabs) mit entsprechenden logistischen Konzepten und interessanten mechanischen bzw. mechatronischen Lösungen wie z. B. aktive Lenkung, Linearmotorantrieb, aktive Feder-Neige Technik. Die Verbindung von Informationstechnik, Sensorik und Aktorik ermöglicht ein solches vollkommen neuartiges System.



*Bild 3-1 RailCab der Neuen Bahntechnik Paderborn*

Die in Leichtbauweise ausgeführte Konstruktion der Shuttles in Verbindung mit voll automatisiertem Betrieb verlangen nach einem neuen Ansatz für die Überwachung der Fahrzeuge. In diesem Zusammenhang gewinnt die Idee des Lebensdauerbeobachters eine wichtige Rolle. Besonders interessant ist dabei das neu entwickelte mechatronische Einzelachs-fahrwerk. Die Fahrwerke können, bedingt durch die modulare Bauweise, prinzipiell frei mit verschiedenen Aufbauten kombiniert werden. Verschiedene Ansätze können an diesem Beispiel gut simuliert und für den zukünftigen Probeversuch vorbereitet werden. Das komplexe Fahrwerk wird noch in einem weiteren Abschnitt dieser Arbeit näher betrachtet.

### **3.3 Lebensdauerüberwachung als Teil der Zustandsdiagnose**

Die Idee des Lebensdauerbeobachters hat ihre Wurzel in der allgemeinen Maschinenüberwachung und -diagnose. Dort besteht das primäre Ziel darin, kritische Betriebszustände rechtzeitig zu erkennen und durch Abschalten oder ähnliche Maßnahmen Schäden an der Maschine, der Umwelt bzw. an Menschen zu verhindern [Kolerus, 1995]. Diese Aufgabe entwickelte sich dann in vielfältiger Weise weiter und wurde z. B. um den Aspekt „Vermeidung unerwarteter Ausfälle“ ergänzt (zustandsabhängige Wartung). [Natke und Cempel, 1997] erwähnen folgende Schwerpunkte der Zustandsdiagnose:

- Zustandsorientierte Wartung
- Systemüberwachung (unter Berücksichtigung der System- sowie Überwachungsmodelle)
- Wissensbasierte Systeme für Condition Monitoring.

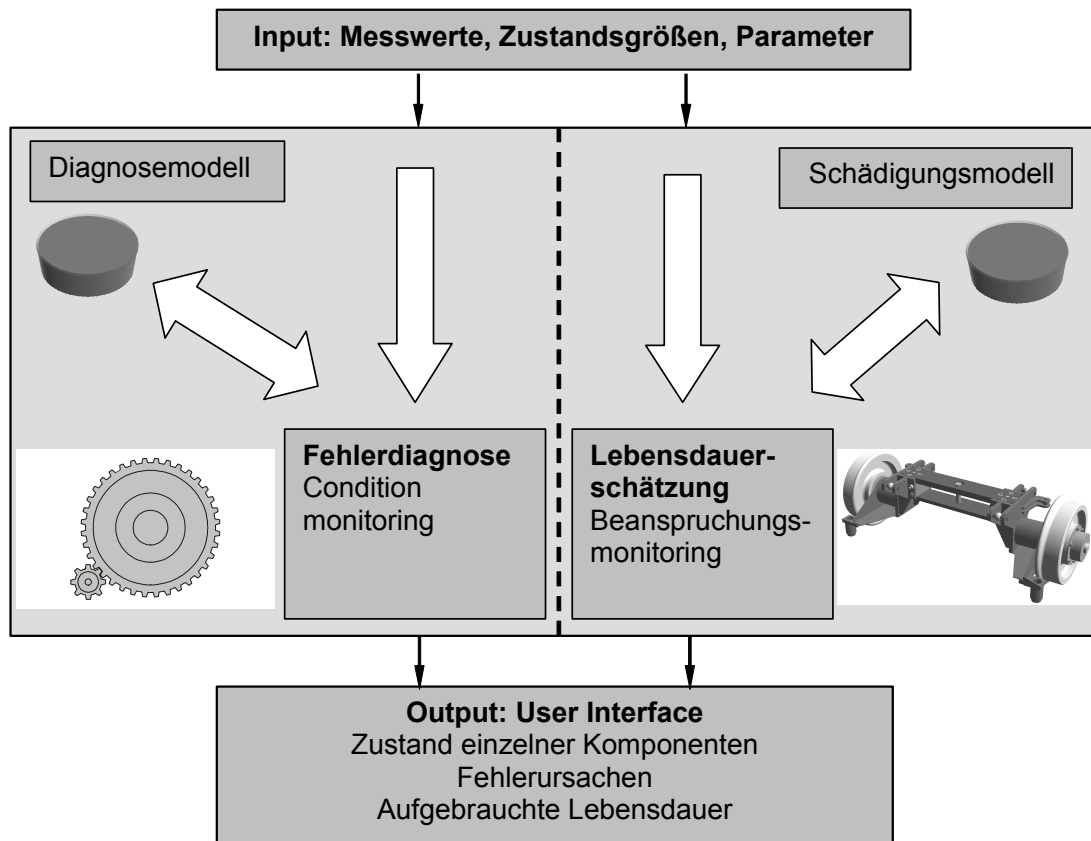
Eine vollständige Diagnose des technischen Zustands beinhaltet nach [Cempel, 1990] die laufende Zustandsbewertung (Diagnose), die Bestimmung der Ursachen dieses Zustands (Genese) sowie die Bestimmung des zeitlichen Horizontes zukünftiger Änderungen dieses Zustands (Prognose). Das Zusammenspiel zwischen der Diagnose und Prognose, insbesondere in Bezug auf den mobilen Einsatz bei Fahrzeugen wird hier näher diskutiert.

Bei der Diagnose werden die zu erfüllenden Funktionen überwacht (z. B. indem die Abweichungen zwischen der Soll- und Ist-Funktion ermittelt werden) mit dem Ziel, die Fehlerart oder/und defekte Komponenten anhand der Analyse von Fehlerzusammenhängen und Erfahrungswissen zu ermitteln. Auch wenn das Ziel der Diagnose vom Ziel der Lebensdauerüberwachung abweicht, werden in beiden Fällen ähnliche Techniken, z. B. bei der Informationsgewinnung oder -verarbeitung eingesetzt. Es können oft gleiche Sensoren und Prozessoren verwendet werden, und das ist ein Grund dafür, dass man die Lebensdauerüberwachung mit langfristiger Prognose der Restlebensdauer oder -gebrauchsdauer als Teil oder Ergänzung eines Diagnosesystems betrachten kann. Die starke Integration bietet dabei den Vorteil, dass wenige Sensoren viele nutzbare Daten erfassen können. Die vorhandenen Signale können dann nach Bedarf durch entsprechende Teile des Diagnosesystems auf- und verarbeitet werden.

Das Bild 3-2 zeigt schematisch ein Condition Monitoring System mit Diagnose und Lebensdauerüberwachung.

Die Diagnoseverfahren kann man im Allgemeinen folgendermaßen aufteilen:

- signalgestützte (merkmalgestützte) Verfahren, bei denen z. B. bestimmte Schwingungsmerkmale den Fehler repräsentieren
- analytische (modellgestützte) Verfahren, bei denen parallel zum Prozess oder dem Objekt ein mathematisches Modell analysiert wird, anhand dessen die Aussage über einen Fehler getroffen wird.



*Bild 3-2 Komplexes Condition Monitoring System mit Diagnose und Lebensdauerüberwachung*

Wie man in der Tabelle sehen kann, entsprechen mehrere Komponenten in der Diagnoseeinrichtung denen in der Lebensdauerüberwachung. Dies spricht für die gemeinsame Betrachtung der beiden Systeme.

Derzeit überwiegen Überwachungs- und Diagnosesysteme, die mit signalgestützten Verfahren und einer Wissensbasis arbeiten [Klein, 1998]. Die Wissensbasis kann als eine Regel-Sammlung (kausale Wirkungsketten) oder als Fehler-Symptom-Bäume definiert sein. Bei der Lebensdauerüberwachung werden dagegen oft analytische Modelle verwendet. Die hierarchisch strukturierten Komponenten für die Anlagenüberwachung sind in Tabelle 3-2 zusammengestellt. Sie sind dort den Komponenten der Lebensdauerüberwachung gegenübergestellt.

Tabelle 3-2 Vergleich Anlagenüberwachung - Lebensdauerüberwachung

Typische Anlagenüberwachung	Lebensdauerüberwachung
Anlage und Prozess	Mobiles System und dessen Komponenten
Sensortechnik und Signalgewinnung	Sensortechnik und Signalgewinnung
Signalverarbeitung und Visualisierung, Datenreduktion, Merkmalgewinnung, Archivierung	Signalverarbeitung, (Visualisierung), Datenreduktion, Archivierung
Anlagenschutz und konventionelle Überwachung	Systemschutz
Datenbasis/Wissensbasis: Konstruktionsdaten, Wirkmodelle, Referenzvektoren	Datenbasis für Lebensdauerschätzung (Materialkenndaten, Schädigungsmodell), Wissensbasis für Systemschutz
Interpretationskomponenten zur Fehlerdiagnose und -bewertung: Klassifikationsverfahren, Schlussfolgerungsverfahren, Erklärungskomponente	Interpretationsmodelle (Schädigungsschätzung anhand von Prozessdaten), Interpretation kritischer Zustände, Lebensdauervorhersage

### 3.3.1 Elemente der Zustandsdiagnose

In einem komplexen Diagnosesystem werden mehrere Aufgaben realisiert. Unter anderem kann man bei der Zustandsdiagnose folgende Ziele unterscheiden:

- **Wartung:** Bestimmung der optimalen Wartungszeitpunkte und Umfänge anhand der Betriebsbeanspruchungen; Verschleiß und Alterung von Komponenten bzw. Betriebsstoffen werden dabei berücksichtigt
- **Überwachung:** Erkennung von unzulässigen Betriebszuständen und Fehlfunktionen im System. Die Information über erkannte Ereignisse wird weitergegeben und Geräte durch bestimmte Maßnahmen geschützt; die Verfügbarkeit wird durch die Vermeidung von unvorhergesehenen Betriebsunterbrechungen gesichert
- **Schadensfrüherkennung:** Vor dem Auftreten von Fehlfunktionen des Systems soll erkannt werden, dass es in absehbarer Zeit mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zur Fehlfunktion bzw. zum Schaden kommen kann, es dient zur Erhöhung der Betriebssicherheit. Das System muss möglichst noch vor dem Auftreten von Fehlfunktionen stillgesetzt und/oder repariert werden
- **Fehlerdiagnose:** Feststellen der Ursache einer (bereits aufgetretenen oder prognostizierten) Fehlfunktion
- **Lebensdauerprognose:** Vorhersage, wie lange ein System unter bestimmten Betriebsbedingungen wahrscheinlich noch ohne Fehlfunktion betrieben werden kann.

Diese einzelnen Elemente werden im Folgenden kurz beschrieben.

## **Wartung**

An allen Fahrzeugen müssen bestimmte Wartungsarbeiten durchgeführt werden. Diese bestehen hauptsächlich darin, Betriebsmittel zu erneuern wie z. B. Öle, Fette, Beläge, usw., die während des Betriebs verschleißern und damit ihre Funktionsfähigkeit verlieren. Außerdem werden bestimmte Einstellungen überprüft und verschlissene Bauteile erneuert oder überarbeitet (z. B. Austausch des Zahnriemens, Überdrehen von Radprofilen usw.).

Üblicherweise sind die Zeiten für die Durchführung der Wartungsarbeiten fest vorgeschrieben, z. B. in Form einer Fahrstrecke bzw. bestimmter Arbeitszeit. Die Wartungsintervalle basieren dabei auf Erfahrungswerten des Herstellers oder Betreibers und sind mit der Einsatzart schwach bzw. überhaupt nicht gekoppelt. Meist werden die Wartungsmaßnahmen nach dem „worst-case“ definiert und in vielen Fällen die Wartungsarbeiten früher ausgeführt, als eigentlich notwendig wäre. Bei unvorgesehenen schweren Einsatzbedingungen dagegen kann es trotzdem sein, dass die notwendigen Arbeiten nicht rechtzeitig durchgeführt werden.

Wesentliche Verbesserungen der Wirtschaftlichkeit und der Betriebssicherheit verspricht man sich von automatischen Diagnosesystemen, mit denen eine Zustandserkennung und -überwachung durchgeführt werden kann. Flexible Wartungssysteme werden schon teilweise in PKW und vor allem in Nutzfahrzeugen eingesetzt (z. B. „Telligent WS“ im Actros). Diese Systeme stellen anhand von verschiedenen Informationen während des Fahrbetriebes fest, wie stark die „Beanspruchung“ und der Verschleiß der einzelnen Systemkomponenten sind und ermitteln anhand manchmal recht einfacher Rechenalgorithmen den Zeitpunkt für die Durchführung der Wartungsarbeiten. Bei stabilen Einsatzbedingungen lassen sich auf diese Weise ziemlich genaue Prognosen erzeugen.

## **Überwachung**

Durch die Überwachung sollen unzulässige Betriebszustände (Abweichungen des Systemzustands vom Normalzustand) und Fehlfunktionen im System erkannt werden. Der zulässige Betriebsbereich soll eingehalten werden; das System soll außerhalb dieses Bereichs nicht betrieben werden. Die Abweichungen und andere relevanten Ereignisse werden dem Betreiber angezeigt und der Fehlerdiagnose zur Verfügung gestellt. Entsprechende Abhilfemaßnahmen bis hin zur Außerbetriebsetzung werden eingeleitet (Geräteschutz). Dadurch wird auch die Verfügbarkeit durch die Vermeidung von unvorhergesehenen Betriebsunterbrechungen gesichert.

Bei der Überwachung werden üblicherweise Pegelüberschreitungen (z. B. von Schwingungen) als Ereignisauslöser betrachtet. Es wird dabei nicht zwischen einem Schaden oder Überlastung als Ursache unterschieden.

Permanente Überwachungssysteme wurden zuerst in der Kraftwerkstechnik zur Wellenschwingungsüberwachung von Rotoren und Turbosätzen eingesetzt. Verbreitet sind solche Schwingungsüberwachungssysteme auch bei Flugzeugtriebwerken. In der letzten Zeit werden erste Versuche mit Schwingungsüberwachungssystemen bei Schienenfahrzeugen durchgeführt.

### **Schadensfrüherkennung**

Ergänzend zu flexiblen Wartungs- und Überwachungssystemen können Methoden der Schadensdiagnose eingesetzt werden, um die Früherkennung von Schäden zu ermöglichen. Anhand von bestimmten Merkmalen aus dem Überwachungssystem (z. B. bestimmter Pegel der Schwingung), oft in Verbindung mit der Fehlerdiagnose (Schwingung an bestimmter Stelle bedeutet Fehlfunktion oder Schaden eines bestimmten Lagers), können mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit Prognosen über mögliche Fehlerauswirkungen gestellt werden, die in absehbarer Zeit im System vorkommen können. Dabei ist nicht nur der sich nähernde Schaden selbst vom Interesse, aber auch die Prognose, wie lange das System, mit oder ohne Sicherheitsvorkehrungen, betrieben werden darf. Besonders wichtig ist die Schadensfrüherkennung bei den sicherheitskritischen Komponenten.

Bei Diagnosesystemen zur Schadensfrüherkennung ist für die Festlegung der Diagnosekriterien die Kenntnis des Normal- und Fehlzustandes erforderlich. Diese beiden Zustände lassen sich nicht immer eindeutig definieren. Bei Schienenfahrzeugen können die Einsatzbedingungen und der Zustand des Gleises im Laufe des Betriebes stark variieren. Als Aufgabe stellt sich dann, die vorhandenen Merkmale dem Gleiszustand oder dem Fahrzeugzustand zuzuordnen.

### **Fehlerdiagnose**

Ziel der Fehlerdiagnose ist es, anhand von bestimmten Merkmalen die Ursache einer bereits aufgetretenen oder prognostizierten Fehlfunktion zu ermitteln. Wenn das Überwachungssystem eine entsprechende Information liefert (z. B. Pegelüberschreitung oder ein anderes Indiz für einen abnormalen Betrieb), wird nach der Ursache des Fehlers (schadhafte Komponente, Fehler im Programmablauf etc.) gesucht. Dabei können Fehler-Bäume eingesetzt werden, wo in einer bestimmten Reihenfolge die Komponenten oder Funktionen nacheinander kontrolliert werden. Bei komplexen Systemen kann der Umfang von Fehlerbäumen sehr groß sein. Die daraus resultierende Teststrategie kann sehr kompliziert sein, insbesondere, wenn der Baum von oben (Symptom) nach unten (Ursache) durchsucht werden muss (top-down). Es existieren auch Teststrategien von unten nach oben (bottom-up), die manchmal eine interessante Alternative bieten. Dabei geht man von den einzelnen Komponenten aus und untersucht, welche Symptome durch ihren Ausfall verursacht werden. Diese Verfahren können softwareunterstützt auf Basis von Ausfallwahrscheinlichkeiten aufgebaut werden. Bei der Fehlerdiagnose können auch andere Techniken eingesetzt werden, wie z. B. Lernen, Expertensysteme, fall-

orientiertes logisches Schließen, Mustererkennung. Bei der Diagnose ist heute auch der Begriff Heuristik verbreitet. Bei heuristischen Methoden wird eine Aussage über die Ursache eines Fehlers gesucht, ohne dass dafür eine logische Begründung vorliegen muss.

### **Lebensdauerprognose**

Die Lebensdauerprognose beschäftigt sich mit der Vorhersage, wie lange ein System unter bestimmten Betriebsbedingungen ohne Fehlfunktion noch weiter betrieben werden kann. Die Lebensdauerprognose ist ein Bestandteil des Lebensdauerbeobachters und wird daher in dieser Arbeit ausführlich beschrieben.

#### **3.3.2 Zustandsdiagnose bei Fahrzeugen**

Die Anwendung von Methoden der Zustandsdiagnose hat sowohl bei Kraftfahrzeugen als auch bei Schienenfahrzeugen in den letzten Jahren stark zugenommen und wird in den nächsten Jahren weiter an Bedeutung gewinnen. Prinzipiell können bei Fahrzeugen alle aus der Maschinenüberwachung bekannten Methoden eingesetzt werden. Die Grundlagen dieser Methoden stammen aus den 70er und 80er Jahren des 20. Jahrhunderts, aber sehr oft scheiterte damals die breitere Anwendung noch an Problemen mit der Datenerfassung und -auswertung. Infolge der Fortschritte in der Sensortechnik und der digitalen Signalverarbeitung konnten sich diese Methoden in den letzten Jahren stark entwickeln. Bei den Diagnosesystemen im mobilen Einsatz müssen dessen spezifische Einsatzbedingungen berücksichtigt werden.

Die Zustanddiagnose bei Schienenfahrzeugen kann im Allgemeinen die Überwachung von einzelnen Baugruppen (z. B. Radsatz, Bremse) oder von Komponenten (z. B. Wagenkasten, Drehgestell bzw. Einzelachsfahrwerk, Antriebs-einheit) umfassen. Die hier zu Grunde liegende Problematik ist im Wesentlichen ähnlich wie bei der Maschinen- bzw. Flugzeugüberwachung. Die Zielsetzung bei der Diagnose von Schienenfahrzeugen beinhaltet Sicherheitsaspekte (ggf. Einschränkungen bei der Weiterfahrt), Verfügbarkeit (Fehlerfrüherkennung vor dem Ausfall) und Kostenreduktion (zustandsorientierte Wartung, Vermeidung von Folgeschäden). Man kann zusätzlich unterscheiden zwischen der statischen Diagnose (wird im stehenden Zug durchgeführt) und dynamischer Diagnose (im Betrieb während der Fahrt). Bei den Kraftfahrzeugen lassen sich praktisch dieselben Merkmale wieder finden.

Bei Fahrzeugen wirkt die Gleis- bzw. Straßenanregung auf das zu überwachende System. Für die Erkennung von unzulässigen Betriebszuständen bei einzelnen Komponenten müssen dann die von der Fahrbahnanregung stammenden Signale ausgefiltert werden (es sollen ja die sich am Fahrzeug befindlichen Bauteile diagnostiziert werden und nicht die Strecke).

Bei den Diagnoseverfahren im Maschinenbau zählt [Klein, 1998] u. a. folgende Verfahren auf:

- Analysen von Betriebsbeanspruchungen mittels Dehnungsmesstechniken
- Analysen von Strukturschwingungen (absolute und relative Schwingungen von Maschinen).

In mobilen Systemen können diese Verfahren auch eingesetzt werden. Es bietet sich an, vor allem das erste Verfahren zu verwenden. Es wird später gezeigt, dass u. U. auch das zweite Verfahren, oder genau genommen indirekte Techniken (da nicht nur Schwingungen eine Aussage über den Zustand erlauben) für die Bestimmung der Beanspruchung durchaus sinnvoll eingesetzt werden können, insbesondere dann, wenn in einem mobilen System bestimmte Signale ohnehin vorhanden sind.

In mobilen Systemen kann auch zwischen lokalem und globalem Condition Monitoring unterschieden werden. Dieser Sichtpunkt ist von besonderem Interesse für einen Flottenbetreiber. Dies gilt genauso für die Nutzfahrzeuge als auch Schienenfahrzeuge, insbesondere solche, die autonom ohne Führer verkehren. In diesem Kontext bedeutet lokales Condition Monitoring die Zustandsüberwachung in jedem Fahrzeug on-board. Globales Condition Monitoring bezieht sich auf die ganze Flotte (z. B. alle Fahrzeuge eines Betreibers). Auf diese Weise lässt sich das bestimmte Fahrzeug in Verbindung mit der Telematik nicht nur orten, sondern auch bezüglich seines Zustands abfragen. Die Fahrzeuge können nach Bedarf automatisch mit der zentralen Überwachungseinheit in Verbindung treten. Solche Systeme werden als Remote Condition Monitoring (RCM) bezeichnet [Fararooy, 1998]. Die Daten können über lange Wege übersendet werden und die Wartung kann logistisch geplant und nach bestimmten Kriterien optimiert werden. Bestimmte Grenzwerte für Einzelfahrzeuge können aus dem Verhalten der gesamten Flotte abgeleitet werden.

### **3.4 Zuverlässigkeit und Sicherheit des Gesamtsystems**

Zuverlässigkeit und Sicherheit stehen bei technischen Systemen oft im Vordergrund der Betrachtungen. Im Folgenden wird diese Problematik in Bezug auf den Lebensdauerbeobachter näher diskutiert.

#### **3.4.1 Zuverlässigkeit**

Zuverlässigkeit ist die Eigenschaft des Systems, in vorgegeben Grenzen und Zeiten seine Funktion zu erfüllen. Die Zuverlässigkeit hängt mit den Betriebsbedingungen zusammen. Da die sicherheitsrelevanten Funktionen und/oder Komponenten überwacht werden, müssen die Überwachungssysteme auch entsprechend zuverlässig sein. Unterschiedliche Redundanzkonzepte, sowie verschiedene Methoden zur Speicherung und Übertragung der Daten stehen prinzipiell zur Verfügung.



Schon in der Entwicklungsphase muss berücksichtigt werden, dass manche Elemente für viele Jahre Betrieb ausgelegt werden. Das Überwachungssystem muss dementsprechend angepasst sein, wobei es eine Reihe von Details, z. B. die Problematik der Alterung von DMS-Sensoren zu beachten gilt. Auch hier zeigt sich der Vorteil der Mehrfachauswertung von Sensordaten. So können z. B. die Daten aus mehreren Sensoren innerhalb einer Baugruppe zentral auf ihre Konsistenz geprüft werden, um offensichtliche Fehler auszuschließen und individuelle systematische Messabweichungen einzelner Sensoren zu kompensieren.

Da im System zeitkritische Vorgänge zu erwarten sind, die sofortige Maßnahmen nach sich ziehen, muss aus Sicherheitsgründen eine redundante Auslegung des Systems erfolgen. Eine Redundanz bedeutet, dass im System funktional gleiche oder vergleichbare Ressourcen vorhanden sind, die bei einem störungsfreien Betrieb für die vorgesehene Funktion nicht benötigt werden. Erst im Fall einer Störung übernehmen diese Ressourcen die Aufgabe, die Funktion zu erfüllen. Es handelt sich dabei sowohl um die Redundanz des zu überwachenden Systems als auch um die Redundanz des Überwachungssystems selbst. Die Überwachung spielt auch bei redundanter Ausführung des Grundsystems eine wichtige Rolle. Im Falle, dass die Redundanz dieses Systems in Anspruch genommen wird, muss das Überwachungssystem dies feststellen können. Unter Umständen kann es vorkommen, dass bei der ausfalltoleranten Auslegung die Funktion ununterbrochen erhalten bleibt, die Sicherheit des Systems wird jedoch nicht mehr gewährleistet, da die Redundanz fehlt. Es handelt sich in diesem Fall um sog. versteckte Fehler (*hidden failures*).

Bei der sog. Hardware-Redundanz der Überwachung werden mehrere Sensoren eingesetzt, deren Signale dann entsprechend verglichen werden (es können 3 Sensoren gleichzeitig eingesetzt werden, so genannte *2 aus 3 Auswahl*). Nur wenn 2 Sensoren die kritische Grenze bzw. einen ähnlichen Zustand signalisieren, werden Schutzmaßnahmen eingeleitet, bzw. ist damit die Plausibilität der Messung gegeben. Dabei handelt sich um eine sog. aktive parallele Redundanz. Es besteht auch die Möglichkeit, das entsprechende Teil des Systems nur im Falle eines Ausfalls einzuschalten (standby-parallele Redundanz). In vielen Situationen ist jedoch die Auslegung mit Hardware-Redundanzen nicht möglich oder nicht sinnvoll. Diese Vorgehensweise ist oft teuer und bietet auch nicht immer die maximale Zuverlässigkeit (z. B. Überhitzung der Antriebseinheit infolge eines elektrischen Kurzschlusses verursacht den Ausfall aller dort vorhandenen Überwachungssensoren, inkl. Redundanzsensoren).

Eine andere Möglichkeit bietet die sog. analytische Redundanz, wo moderne Informationsverarbeitung ihre Vorteile ausspielt. Bei den analytischen Redundanzen (sog. virtuelle Redundanzen) wird modellbasiert nach der Fehlerursache gesucht. Nach einem bestimmten Muster werden vorhandene Signale auf Plausibilität verglichen. Es existieren entsprechende Techniken zur robusten Fehlererkennung

und -isolierung (*robust failure detection and isolation*), die z. B. in der Arbeit von [Mangoubi, 1998] beschrieben werden. Unabhängig davon, wie das System realisiert ist, muss es so ausgelegt werden, dass die Fehlererkennungsrate groß gegenüber der Ausfallrate der Überwachungseinheit ist.

### 3.4.2 Fehleranalyse und Sicherheit in überwachten Systemen

Die Informationen aus dem Lebensdauerbeobachter können eine für die Sicherheit des Systems grundlegende Bedeutung haben. Wird ein Fehler (Abweichung von einem optimalen, definierten Zustand) erkannt, ist u. U. eine sofortige Handlung erforderlich. Mit der Verwaltung von solchen Ereignissen beschäftigen sich die Fehleranalyse (FMEA – *Failure Modes and Effects Analysis*), Fehlerbaumanalyse (FTA – *Failure Tree Analysis*) oder ähnliche Werkzeuge [Biolini, 1999]. Fehler sind üblicherweise mit einem Ausfall verbunden. Als Ausfall bezeichnet man einen Zustand, wenn eine dazu vorgesehene Einheit (Bauelement, Baugruppe, Software-prozedur etc.) ihre Funktion nicht mehr erfüllen kann.

In einem einfachen Fall können die Fehler entweder als kritisch oder nicht kritisch qualifiziert werden. Die Fehler können auch weiter heuristisch unterteilt werden, z. B.:

- Unbedeutende Fehler (bestimmte Funktion kann nicht erfüllt werden, aber ohne Rückwirkung auf das Gesamtsystem)
- Geringfügige Fehler (Fehler beeinflusst zwar das System, aber das System bleibt noch einsatzfähig)
- Kritische Fehler (Der Fehler hat den Ausfall des Systems zur Folge)
- Katastrophale Fehler (Der Fehler hat katastrophale Folgen für Menschen, Umwelt und Güter).

Bei der Fehlerbetrachtung ist es wichtig, welches technische System betrachtet wird. Es gibt nicht-kritische („*non-critical*“) und sicherheitskritische („*safety-critical*“) Systeme. Die Überwachung und Diagnose findet vorrangig in den letzteren statt. Außerdem kann man unterscheiden zwischen „*fail-safe*“ (das System kann in den sicheren Zustand versetzt werden) und „*fail-operational*“ (das System muss noch eine bestimmte Zeit im Betrieb bleiben). In mobilen Systemen muss dann, abhängig von dem durch den Fehler betroffenen Subsystem, die Entscheidung getroffen werden, wie es in einen sicheren Zustand möglichst schnell überführt wird. Im Gegensatz zu typischen Maschinen, wo man davon ausgehen kann, dass sie sich im sicheren Zustand befinden, wenn sie energielos stehen bleiben (Not-Aus), ist es in mobilen Systemen oft anders (z. B. Flugzeug mit Triebwerkschaden). Ein auf der Strecke abgebremstes Schienenfahrzeug oder ein auf der mittleren Autobahnspur stehendes Fahrzeug befindet sich noch nicht in einem sicheren Zustand. In diesen Anwendungen wird der sichere Zustand erreicht, indem der energielose Status an einem bestimmten Standort zu Stande kommt. Die Fehleranalyse, zusammen mit

konstruktiven Maßnahmen, Redundanzen usw. muss die Antwort geben, welche Handlung (z. B. weitere Fahrt zur Werkstatt mit verringerter Geschwindigkeit oder Notbremsung und Weitergabe dieser Information an die Umgebung) eingeleitet werden muss. Für diese Entscheidung steht oft nur eine sehr begrenzte Zeit zur Verfügung.

Sicherheit ist eine Eigenschaft des Systems, in vorgegebenen Grenzen und vorgegebenen Zeiten keine Gefahren zu erzeugen oder zuzulassen, aus denen Schäden entstehen können. Kontrollierte Sicherheit ist dann gewährleistet, wenn jeder Systemfehler bei seinem Auftritt erkannt wird, und das System nach Fehlererkennung innerhalb einer tolerablen Zeit in einen sicheren Zustand überführt wird. Kontrollierte Sicherheit besteht im Allgemeinen, in Anlehnung an [Steinhorst, 1999], aus folgenden Teilfunktionen:

- Fehlererkennung durch Detektoren (ständige Überwachung des Sicherheitsstatus des Systems, Fehlerfrüherkennung)
- Fehlerverwaltung durch Management (es wird entschieden, welche Handlung notwendig ist)
- Fehlerschutz durch Protektoren (automatische Überführung des Systems im Fehlerfall in einen für das System und die Umgebung sicheren Zustand).

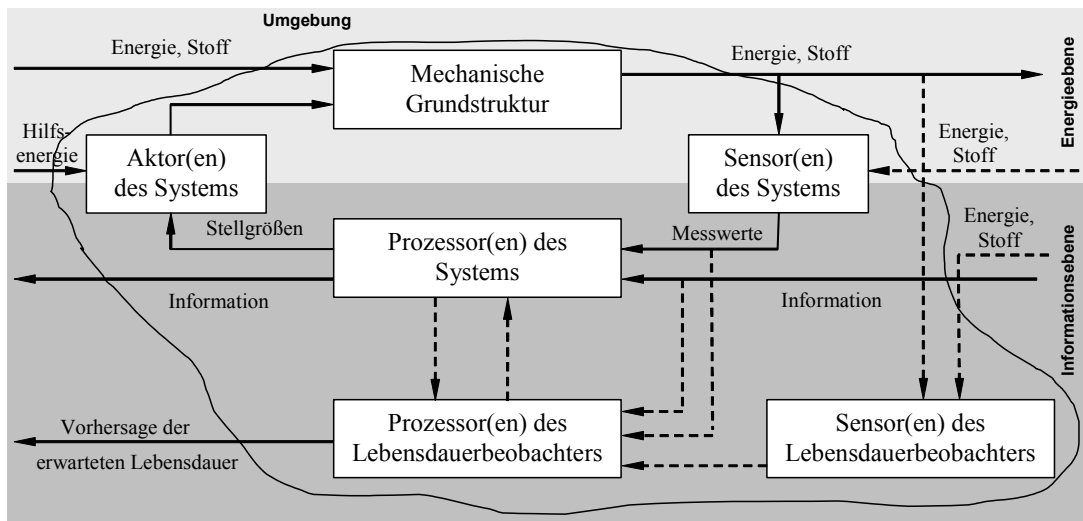
Das System zur Lebensdauerüberwachung findet sich dann in den ersten beiden Funktionen wieder, d. h. damit können die Fehler entdeckt, an die Fehlerverwaltung weitergeleitet und dort verarbeitet werden, sodass im Anschluss entsprechende Prozeduren bei den Schutzeinrichtungen vorgenommen werden können.

### **3.5 Aufbau des Systems zur Lebensdauerüberwachung**

#### **3.5.1 Grundaufbau eines Systems zur Lebensdauerbeobachtung**

Unter Mechatronik versteht man eine Ingenieurwissenschaft, die die Funktionalität eines technischen Systems durch eine enge Verknüpfung mechanischer, elektronischer und datenverarbeitender Komponenten erzielt [Kraftfahrttechnisches Taschenbuch, 1998]. Im Gegensatz zu bisherigen Konstruktionen, steht hier die nichtmaterielle Informationsverarbeitung im Vordergrund. Sie erlaubt eine neue, „mechatronische“ Sicht auf viele alte, „mechanische“ Probleme. Auf diese Weise können auch Aufgaben wie Online-Lebensdauerüberwachung in mobilen Systemen in Betracht gezogen werden. Der Lebensdauerbeobachter weist viele Merkmale eines mechatronischen Systems auf, sodass es sich anbietet, ihn in diesem Kontext zu untersuchen.

Der typische Aufbau eines Systems zur Lebensdauerüberwachung ist in Bild 3-3 dargestellt. Die Darstellung orientiert sich an der Grundstruktur eines mechatronischen Systems, wie sie z. B. in [Wallaschek, 1995] dargestellt ist.



*Bild 3-3 Grundaufbau eines Systems zur Vorhersage der zu erwartenden Restlebensdauer (Flussverkettung)*

Die Wirkketten sind durch Pfeile gekennzeichnet, sie werden im Allgemeinen durch die Kräfte-, Energie- und Informationsströme gebildet. Die Sensoren bilden dabei die Schnittstelle zwischen dem Prozess bzw. der mechanischen Grundstruktur (Energieebene; Energie- und Materialfluss) und der abstrakten Informationsebene (Informationsfluss). Durch die Erweiterung des Grundsystems wird die Möglichkeit geschaffen, mechatronische Systeme immateriell zu koppeln und in größere, übergeordnete Systeme zu integrieren.

Das Grundsystem bilden bestimmte Komponenten, die dynamisch beansprucht werden und hohe Anforderungen an die Sicherheit erfüllen müssen. Die Sensoren messen die Beanspruchungen direkt (z. B. DMS-Technik) oder indirekt (z. B. Beschleunigungen, Federwege, Ströme im Regelkreis eines Motors) und liefern den Input für eine Schädigungsrechnung, die im Prozessor stattfindet. Die Prozessoreinheit beinhaltet ein entsprechendes mathematisches Modell, das die Prognose der restlichen Lebensdauer vornimmt. Die Information über die Lebensdauerprognose kann auch weiter bearbeitet werden, z. B. um entsprechende Wartungsmaßnahmen einzuleiten.

Das zu überwachende System verfügt in der Regel bereits über eigene Sensoren und Prozessoren, die in das Konzept hereinfließen. So gesehen, ist es nicht immer notwendig, für die Lebensdauerbeobachtung zusätzliche Sensoren in das System zu integrieren. Im Idealfall ist es sogar möglich, nur mit den Sensoren zu arbeiten, die im System ohnehin schon vorhanden sind, bzw. nur die Informationen auszuwerten, die im Prozessor des Grundsystems verfügbar sind. Einige Beispiele dafür werden im Folgenden noch gegeben.

Als wichtigste Konsequenz des in Bild 3-3 gezeigten Grundaufbaus folgt, dass es sich beim Lebensdauerbeobachter im Wesentlichen um ein informationsverarbeitendes System handelt, und dementsprechend Repräsentation, Verarbeitung und ggf. Speicherung der zur Verfügung stehenden Sensorsignale im Mittelpunkt der Betrachtung stehen. Gleichwohl kann der Sensorik eine entscheidende Rolle zukommen, denn jeder Lebensdauerbeobachter kann nur so gut sein, wie die Signale, die ihm zur Verfügung gestellt werden.

Ein typischer Aufbau eines Lebensdauerbeobachters ist in Bild 3-4 schematisch dargestellt. An den zu überwachenden Bauteilen sind entsprechende Sensoren angebracht. In diesem Beispiel findet auch die Datenkonditionierung und Digitalisierung bereits in dem integrierten Sensor statt. Als integrierter Sensor wird dabei nach [Taylor, 1997] die Einheit von Sensorelement, Signalverarbeitung, Analog/Digital-Wandlung und Mikroprozessor bezeichnet. Es wird dabei angenommen, dass der integrierte Sensor eine valide (soweit möglich, bereits auf Plausibilität geprüfte und zuverlässige) digitale Information liefert, die nach Bedarf weiter verarbeitet werden kann. Die Signalübertragung zur CPU des Lebensdauerbeobachters erfolgt über einen Bus. Die Signalfilterung und die Datenreduktion finden anschließend im Prozessor statt. Die Signalfilterung und eine erste Datenreduktion können je nach Ausführung in dem integrierten Sensor stattfinden, wenn nur die reduzierte Datenmenge für die weitere Datenverarbeitung gebraucht wird. Dies kann z. B. bei der Verwendung von Schädigungsmodellen der Fall sein, die mit komprimierten Datensätzen arbeiten. Vorteilhaft ist dabei die geringe Belastung des Datenbusses. Nach der Erstellung der Lebensdauerprognose werden die Informationen weiter an User Interface bzw. Systeme zur zustandsabhängigen Wartungsplanung geleitet. Die Datenakquisition, -aufbereitung und -auswertung sind von zentraler Bedeutung und werden daher genauer in Kapitel 4 diskutiert.

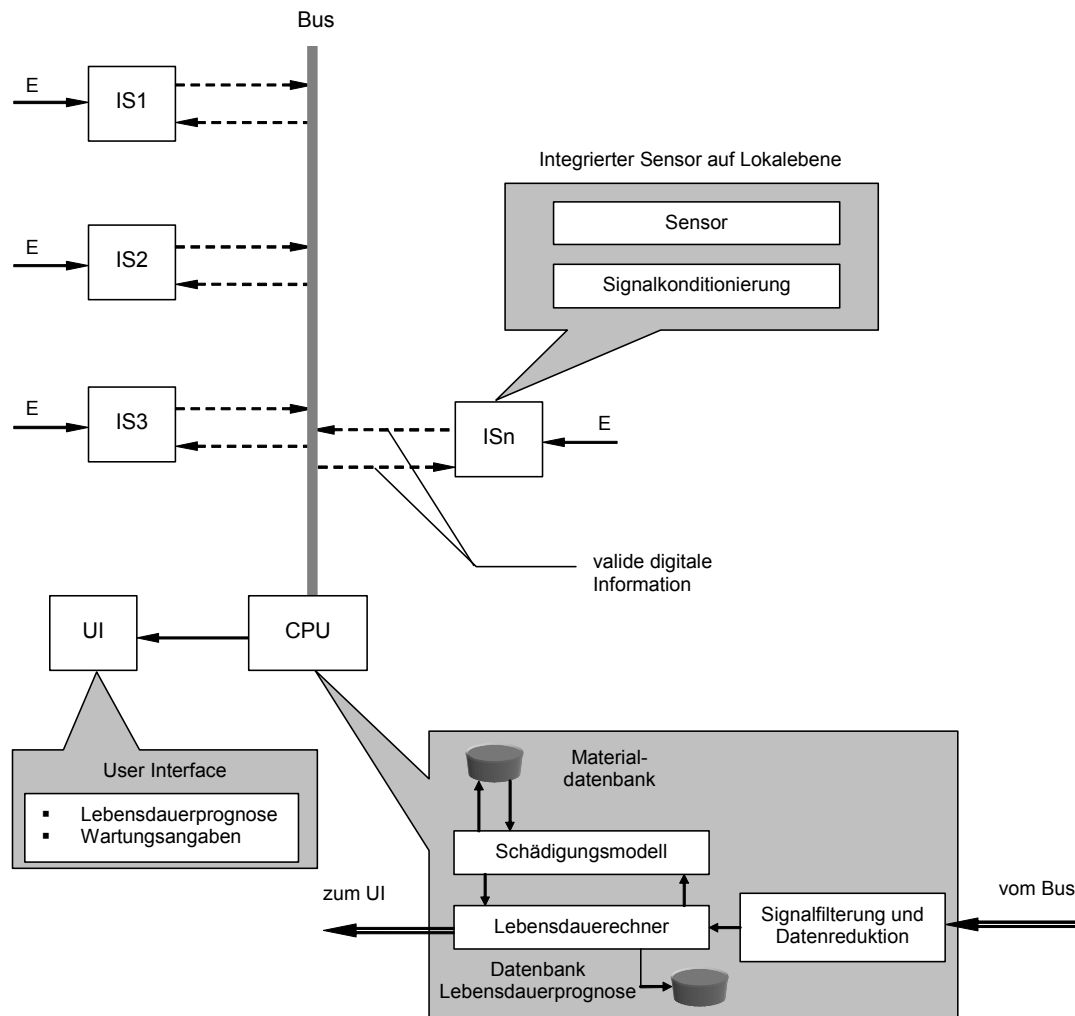


Bild 3-4 Typischer Aufbau des Lebensdauerbeobachters (IS – Integrierter Sensor, UI – User Interface, E – Energiefluss, CPU – Prozessor)

### 3.5.2 Funktionsstruktur des Lebensdauerbeobachters

Um den Entwurf des Lebensdauerbeobachters nach der zu erfüllenden Funktion zu verwirklichen, muss zuerst das System analysiert werden. Aus diesem Grund werden hier die Hauptfunktion und die wichtigsten Teilfunktionen betrachtet. Die Hauptfunktion des Lebensdauerbeobachters ist es, jederzeit eine Information über die „aufgebrauchte“ Lebensdauer abzugeben und die Vorhersage der zu erwartenden Restlebensdauer eines Systems zu machen. Was dabei mit „Restlebensdauer“ gemeint ist, kann von Fall zu Fall verschieden sein. So kann damit zum Beispiel die Zeit bis zum Eintritt eines Schadens gemeint sein, der den endgültigen Ausfall des Systems zur Folge hat, oder es kann die Zeit gemeint sein, während der das System noch ohne Wartungs- oder Reparaturarbeiten ordnungsgemäß betrieben werden kann.

Wenn die Lebensdauer eines Systems im Wesentlichen von den im Betrieb auftretenden mechanischen Beanspruchungen abhängt, und die Schädigung des Systems durch Akkumulation vieler Schadensereignisse erfolgt – wovon im Folgenden ausgegangen wird – kann die Hauptfunktion „*Restlebensdauer vorhersagen*“, wie in Bild 3-5 gezeigt, in die Teilfunktionen zerlegt werden:

- (kritische) Beanspruchung ermitteln
- Schädigung berechnen und akkumulieren
- verbleibende Lebensdauer errechnen.

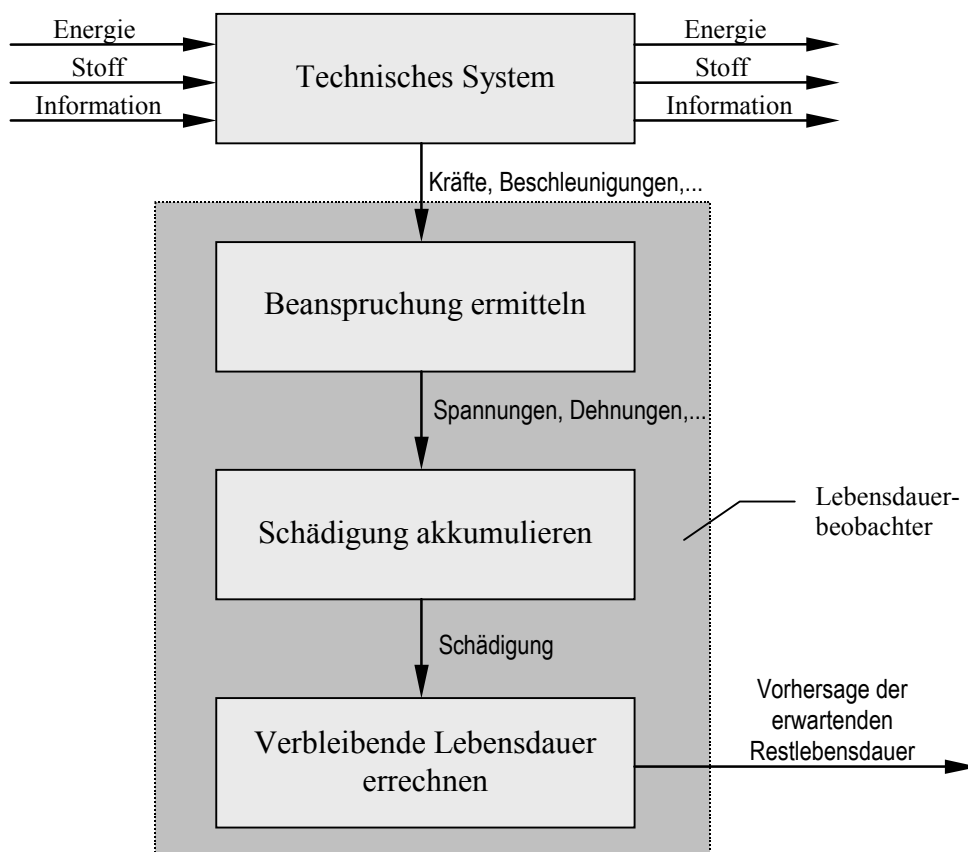


Bild 3-5 Funktionsstruktur eines Systems zur Lebensdauerbeobachtung

Hinzu kommen untergeordnete Funktionen, wie z. B.:

- Sensorsignale verstärken, filtern und ggf. vorverarbeiten,
- Ergebnisse speichern oder zwischenspeichern,
- Informationen für die zustandsabhängige Wartung ausgeben, usw.

Dabei gibt es zu jeder einzelnen Funktion und Unterfunktion mehrere Lösungsalternativen, sodass die Gesamtheit aller denkbaren Konzepte von Lebensdauerbeobachtern schnell unübersichtlich wird. Anstelle einer möglichst vollständigen und lückenlosen Darstellung aller denkbaren Alternativen sollen deshalb im Folgenden nur die wichtigsten, erfolgversprechendsten Lösungsmöglichkeiten näher betrachtet

werden. Bezüglich der Funktion „*Beanspruchung ermitteln*“ werden dabei die zwei Möglichkeiten

- direkte Messung der kritischen Beanspruchung,
- Berechnung der kritischen Beanspruchung aus Messungen anderen Zustandsgrößen

unterschieden, während für die Funktion „*Schädigung berechnen und akkumulieren*“ die Alternativen sind:

- direkte Berechnung der Schädigung aus Zeitsignalen der Beanspruchung,
- Berechnung der Schädigung aus komprimierten Signalen, z. B. Rainflow-Kollektiven, der Beanspruchung, und
- pauschalisierte Berechnung der Schädigung anhand von sog. „*Use-Cases*“ bzw. „*Templates*“, die aus bestimmten charakteristischen Betriebszuständen abgeleitet sind.

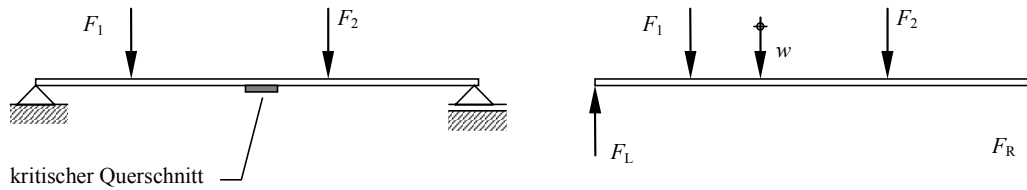
Eine Funktionsanalyse des Lebensdauerbeobachters kann im Sinne der Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme [Kallenbach, 1997] vorgenommen werden. Die Gesamtfunktion wird dabei in Teilfunktionen zerlegt, mit dem Ziel, eine modulare Struktur des Gesamtsystems abzuleiten.

Die Teilfunktion „*Beanspruchung ermitteln*“ kann auf unterschiedliche Weise erfüllt werden, so z. B. durch:

- direkte Messung der relevanten Beanspruchungsgrößen, etwa mithilfe von Dehnungsmessstreifen,
- indirekte, modellbasierte Aufbereitung von Sensordaten, etwa indem die Beanspruchungen unter Verwendung von Mehrkörperdynamik- oder Finite Elemente-Modellen aus gemessenen Lagerkräften oder Beschleunigungen o. ä. errechnet werden.

Die beiden hier genannten Möglichkeiten lassen sich an dem in Bild 3-6 gezeigten Beispiel erläutern. Bei der direkten Messung wird die mechanische Spannung unmittelbar im kritischen Querschnitt ermittelt. Wenn eine solche Dehnungsmessung nicht möglich ist, besteht die Alternative in diesem Fall darin, z. B. die Belastungen  $F_1$  und  $F_2$  zu messen und daraus die Beanspruchung zu errechnen. Sollte auch eine Messung der Belastung nicht möglich sein, so könnte man ersatzweise die Lagerkräfte  $F_L$  und  $F_R$  oder andere geeignete Größen, z. B. die Auslenkung  $w$  messen und daraus die auftretenden Beanspruchungen ermitteln. Unter Umständen können auch ganz andere Größen gemessen werden, wie z. B. Beschleunigungen, Prozessparameter etc. In jedem Fall wird dann ein Modell benutzt, um die auftretenden Beanspruchungen zu ermitteln.





*Bild 3-6 Einfaches Beispiel zur Illustration der Teilfunktion „Beanspruchung ermitteln“*

Bei der direkten Ermittlung lässt sich die für die Schädigungsrechnung notwendige Information verhältnismäßig leicht bearbeiten. Nach einer notwendigen Anpassung können oft die Daten direkt in das Schädigungsmodell einfließen und dort verarbeitet werden. Der wesentliche Nachteil dieser Methode besteht darin, dass die entsprechenden Sensoren zusätzlich benötigt werden und ein großer Aufwand an Messverstärkern, Kompensationsmitteln, Verkabelung usw. anfällt. Bei der indirekten, modellbasierten Bestimmung der Beanspruchung können sehr viele unterschiedliche Messgrößen benutzt werden, wie z. B. Beschleunigungen, Verformungen, elektrische Ströme, usw. Vorausgesetzt ist jedoch, dass sie auf irgendeine Weise mit der Beanspruchung in den zu betrachtenden Elementen korreliert sind. Die Schwierigkeit dieser Methode besteht darin, dass oft sehr komplizierte mathematische Modelle erforderlich sind, um aus den Messwerten die Daten, die für die Schädigungsrechnung notwendig sind, zu gewinnen.

Auch für die Teilfunktion „Schädigung akkumulieren“ existieren unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten, von denen als Beispiel nur folgende genannt werden sollen:

- Online-Akkumulation mithilfe eines direkten Schädigungsmodells, und die
- Offline-Akkumulation durch Anwendung der Rainflow-Zählmethode in Verbindung mit einer Schadensakkumulationshypothese.

Weitere Beschreibungen der Akkumulationsmethoden aus Sicht der Informationsverarbeitung finden sich in Kapitel 4. Je nachdem, welche Lösungsprinzipien für die Teilfunktionen dieser Betrachtungsebene ausgewählt werden, können die Teilfunktionen weiter zerlegt werden, bis schließlich die Elementarfunktionen und ihre Verknüpfung vorliegen.

In Verbindung mit den unterschiedlichen Möglichkeiten zur Ermittlung der Beanspruchungen entsteht eine große Anzahl von potenziell Erfolg versprechenden Lösungen. Die wichtigsten davon werden in Kapitel 4 näher betrachtet, in ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen charakterisiert, sowie einer vergleichenden Bewertung zugeführt.

### 3.5.3 Lebensdauerbeobachterentwurf vs. Bauteilentwurf

Beim Entwurf mechatronischer Systeme steht die funktionsorientierte Betrachtung im Vordergrund und sie spielt natürlich auch eine wichtige Rolle für die geplante Lebensdauerüberwachung. Beim Entwurf des Lebensdauerbeobachters kann man unterscheiden zwischen einer Entwicklung für ein bereits bestehendes System und dem Fall, wo beide Systeme, mehr oder weniger gleichzeitig (simultan) entwickelt werden. Die bereits beschriebenen Funktionen des Lebensdauerbeobachters bleiben dabei weitgehend erhalten. Im Falle einer bestehenden Konstruktion erleichtert eine funktionsorientierte Beschreibung die Auswahl und die Anpassung der Schnittstellen, die zwischen dem Überwachungssystem und dem zu überwachenden System angewendet werden. Bei der Neukonstruktion, in früheren Phasen der Entwicklung, ist auch die Strategieerarbeitung auf Basis des funktionsorientierten Entwurfs sehr sinnvoll.

Die lebensdauerorientierte Auslegung von Bauteilen oder Systemen ist ein Teil der eigentlichen Produktentwicklung. An ihrem Anfang steht in der Regel die funktionsorientierte Beschreibung der zu erfüllenden Anforderungen sowie die gestaltorientierte Formulierung der geometrischen Randbedingung (z. B. Bauraumgrenzen, Anschlussmaße, etc.). Anhand der Funktionen, die eine bestimmte Baugruppe erfüllen muss, werden die Überwachungsaufgaben ermittelt und auf diese Weise können sie schon in dieser frühen Phase der Entwicklung berücksichtigt werden.

Bei der Auslegung des Systems zur Lebensdauerüberwachung soll die hierarchische Gliederung der Baustuktur (Überwachung auf Gesamtebene, Subsystemebene und Komponentenebene) berücksichtigt werden. Es ist zweckmäßig, den Informationsfluss im System zu analysieren, bevor Festlegungen zur Systemstruktur gemacht werden. So hängt z. B. die Anzahl und die Position der notwendigen Überwachungspunkte davon ab, ob die Ermittlung der Beanspruchungen direkt oder indirekt erfolgt.

Im Folgenden wird ein Beispiel für die funktionale Beschreibung eines Fahrwerks in einem Shuttle der Neuen Bahntechnik Paderborn vorgestellt. Dabei handelt sich um ein Fragment der komplexen Gesamtstruktur. Von den Hauptfunktionen, die unmittelbar der Gesamtfunktion des Fahrzeugs dienen („*Nutzlast transportieren*“) wird die Funktion „*Nutzlast auf einer Bahn bewegen*“ und dann hierarchisch tiefer gelegen die Funktion „*System führen*“ ausgewählt, siehe auch Bild 3-7. Genauer analysiert wird dann eine der mehreren Unterfunktionen – „*System Tragen*“, Bild 3-8. Die Analyse ist in Anlehnung an [Gausemeier et al., 2001] durchgeführt.

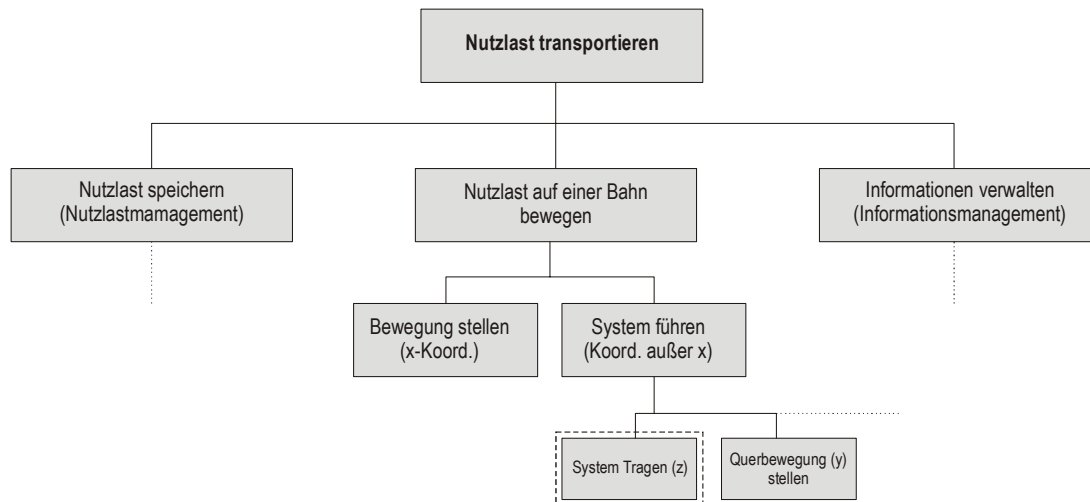


Bild 3-7 Fragment der Funktionshierarchie eines Shuttles

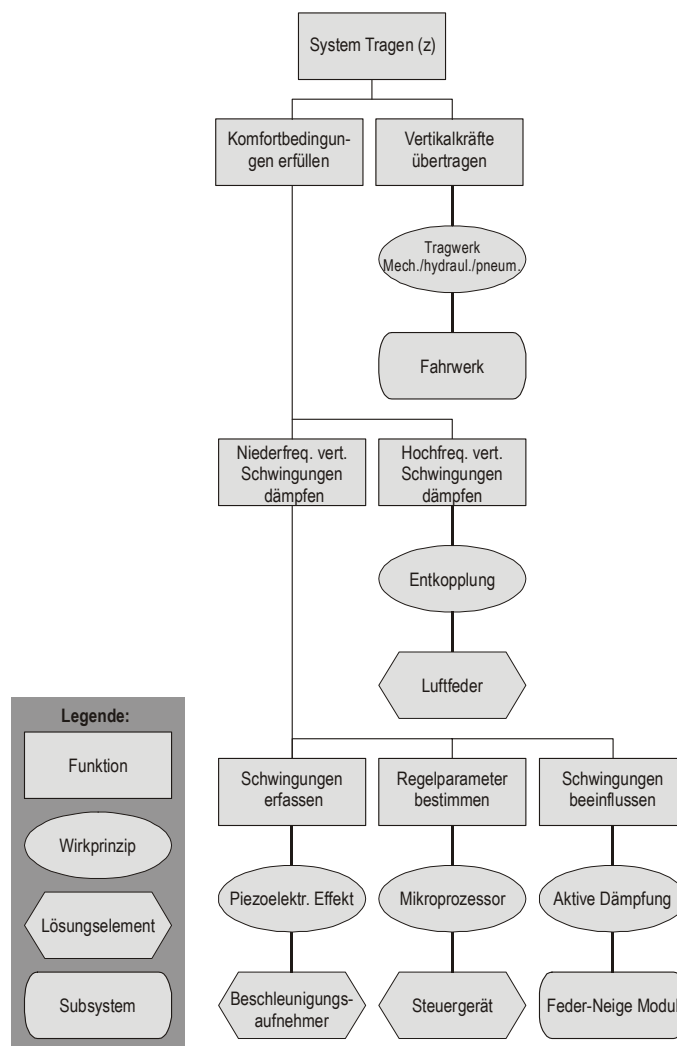
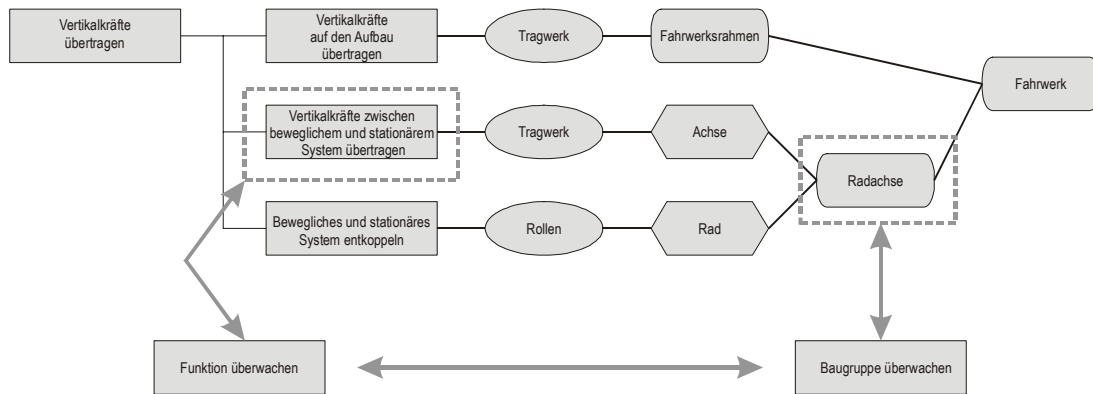


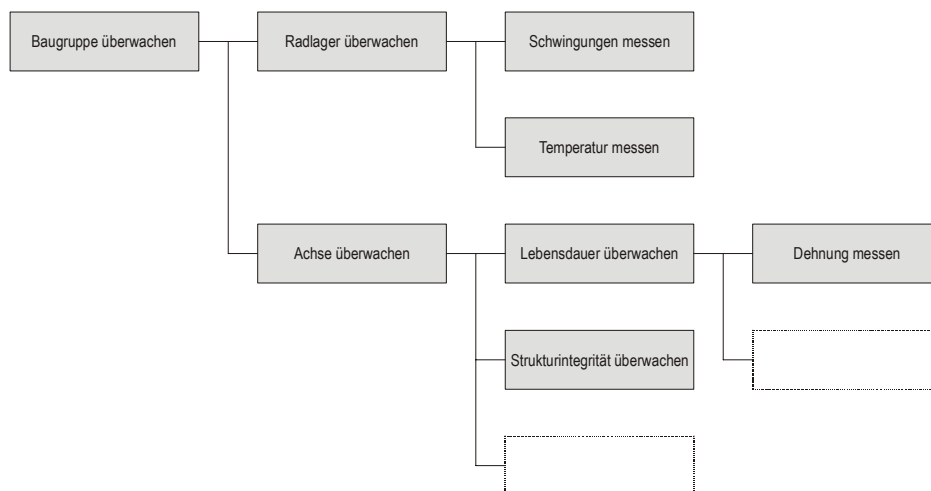
Bild 3-8 Fragment (Hierarchisierung) einer ganzheitlichen Beschreibung mit Funktionen und Lösungen am Beispiel der Funktion „System tragen“

Aus dieser Übersicht wird die Funktion „Vertikalkräfte übertragen“ weiter verfolgt. In Bild 3-9 werden die Lösungsprinzipien für diese Funktion und gleichzeitig die sinnngemäße Überwachung der dynamischen Beanspruchung gesucht.



*Bild 3-9 Suche nach Lösungsprinzipien für die Funktion „Vertikalkräfte übertragen“, markiert sind die Stellen, wo die Überwachungsfunktion an das System gekoppelt werden kann*

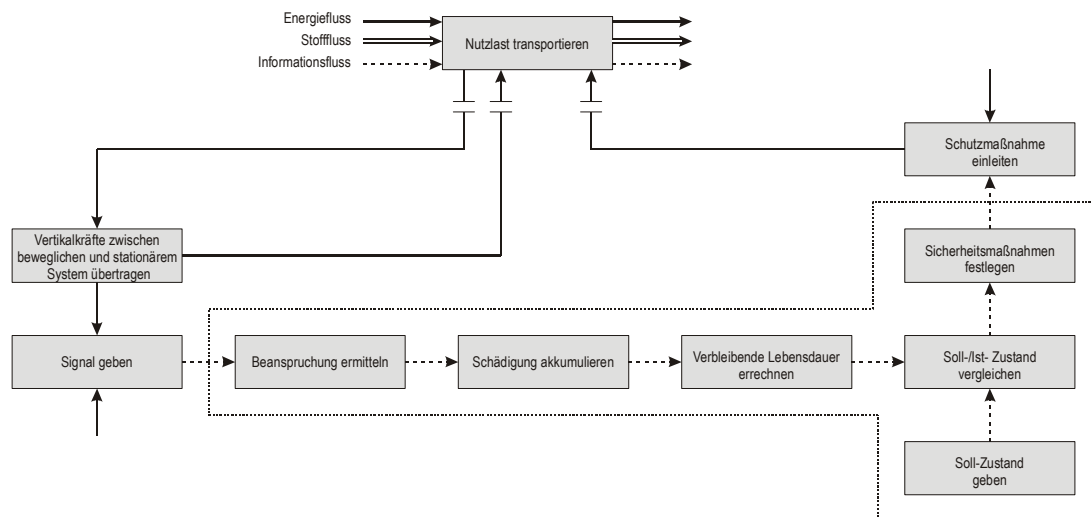
An dieser Stelle kann schon die Funktion „Baugruppe überwachen“ genauer spezifiziert werden, wie in Bild 3-10 beispielhaft gezeigt wird. Leere Elemente lassen weitere Möglichkeiten zu.



*Bild 3-10 Beispiel für die Zerlegung der Funktion „Baugruppe überwachen“*

Diese Beispiele zeigen, wie komplex die Aufgabe ist. Eine Analyse des Gesamtsystems, mit vielen möglichen Verkettungen und Zusammenhängen ist praktisch, ohne Ausgliederung von bestimmten Untergebieten, sehr erschwert. Das folgende Bild 3-11 zeigt ein mögliches Beispiel für die Flussverkettung der

Funktionen, die der Lebensdauerüberwachung dienen. Es ist anzumerken, dass diese Verkettung lediglich einen kleinen Teil der untergeordneten Funktionen der Gesamtfunktion bildet. Man kann erkennen, dass auch bei dieser kleinen Auswahl die Querverbindungen zu anderen Hauptfunktionen in Form z. B. eines Informationsflusses mit betrachtet werden müssen.



*Bild 3-11 Beispiel einer Flussverkettung innerhalb der Funktion „Nutzlast transportieren“. Der umrandete Bereich ist eine Unterfunktion innerhalb der Funktion „Information verwalten“*

Die in einem System bereits vorhandenen Sensoren sollten, soweit es möglich ist, auch für die Zwecke der Zustandsüberwachung mit genutzt werden. Eine Analyse der Funktionsbeschreibung mit entsprechenden Verkettungen kann dazu verwendet werden, vgl. Bild 3-8. Dort ist u. a. die Funktion „Komfortbedingungen erfüllen“ vorgesehen, weiter unten in der Hierarchie wird als das Lösungselement „Beschleunigungsaufnehmer“ definiert. Dieses Lösungselement kann aber auch, unter bestimmten Voraussetzungen, die Funktion „Signal geben“ in Bild 3-11 erfüllen. Diese Information kann man auch aus einer Tabelle entnehmen, wo Funktionen und Lösungen zusammengestellt werden (Tabelle 3-3). Markiert sind dort die Stellen, wo eine Lösung für mehrere Funktionen verwendet werden kann.

Andererseits kann man sich vorstellen, dass die Informationen, die in erster Linie für den Lebensdauerbeobachter bestimmt sind, auch für andere Zwecke benutzt werden. In der Regel ist die Integration auf der Informationsebene problemlos möglich. Die Daten können zwischen verschiedenen Systemen (Regelkreis, Diagnosesystem, Lebensdauerbeobachter usw.) nach Bedarf ausgetauscht werden.

Tabelle 3-3 Zusammenstellung Funktionen/Lösungen für das NBP-Fahrwerk (Auswahl)

	SUBSYSTEM FAHRWERK	Räder	Achse	Fahrwerksrahmen	Hydropneumatische Querfederung	Sensoren für Querbewegung	Längslenker	Querlenker	Vertikallenker	Neigetechnikrahmen	Wagenkastenlängslenker	Sensoren der Achsbewegung	Sensoren der Achsbeanspruchung	Temperatursensoren	...	FEDER-NEIGE-MODUL	Luftfeder	Feder-Neige-Aktoren	Sensoren für vertikale Bewegung	...	DATENVERARBEITUNG	Prozessor/Regler	...
SYSTEM TRAGEN																							
Vertikalkräfte auf den Aufbau übertragen				x					x	x							x						
Vertikalkräfte zwischen beweglichem und stationärem System übertragen			x																				
Bewegliches und stationäres System entkoppeln		x																					
Hochfrequente vertikale Schwingungen dämpfen																	x						
Schwingungen erfassen												x							x				
Regelparameter bestimmen																						x	
Schwingungen beeinflussen																		x					
INFORMATION VERWALTEN																							
Achse überwachen												x	x	x					x				
Verbleibende Lebensdauer errechnen																						x	
...																							

Die gemeinsame Betrachtung von Lebensdauerbeobachter und System erleichtert auch eine Entscheidung, ob die Überwachungsstruktur stark zentralisiert oder verteilt aufgebaut wird (zentralisierte oder verteilte Überwachungsstrategie). Im ersten Fall werden die Sensoren mit einer zentralen Recheneinheit verbunden (z. B. mit dem zentralen Shuttle- bzw. Fahrzeugrechner). Andererseits können verschiedene Sensorgruppen autonome lokale Messeinrichtungen bilden, mit der Folge, dass sie bei einem Auswechseln von Komponenten einfach mit ausgetauscht werden, falls ein Austausch notwendig sein sollte. Ein Beispiel dafür kann eine Achs-Antriebseinheit (Einzelachs-fahrwerk) des NBP-Shuttles sein.

### 3.5.4 Anforderungen an das System zur Lebensdauerüberwachung

Um die einem System zur Lebensdauerbeobachtung zugeschriebenen Funktionen zuverlässig erfüllen zu können, muss bei der praktischen Umsetzung eine Reihe weiterer Aspekte berücksichtigt werden, zu denen beispielsweise die folgenden Punkte zählen:

- Stabile Messtechnik mit langer Lebensdauer (zuverlässige Bestimmung der Beanspruchungen über viele Jahre)
- Robuste Ausführung für den mobilen Einsatz (wenig Beeinflussung durch Umgebung)
- Hohe Zuverlässigkeit und ausfallsicheres Verhalten (Redundanz in besonders sicherheitsrelevanten Funktionen)
- Modifikationsmöglichkeit (Flexibilität) der Berechnungsprozeduren und der eingesetzten Modelle.

Die Lebensdauer des Überwachungssystems muss an die Lebensdauer der zu überwachenden Struktur angepasst sein. Es werden hier einige Beispiele genannt, um die mögliche Lastzyklenspanne darzustellen: Space Shuttle – 100 Zyklen, Passagierflugzeug – 10.000 Zyklen (entspricht 20...30 Jahren), Bahntechnik – oft mehrere Millionen Zyklen (ca. 30 Jahre). Für Brücken kann die erwartete Lebensdauer bei 120 Jahren und höher liegen. Bei der Auslegung des Systems müssen nach Möglichkeit diese Anforderungen erfüllt werden. Dabei sind sowohl die hardware- als auch softwaretechnische Alterung zu berücksichtigen.

Im mobilen Einsatz treten verschiedene Faktoren auf, die die Funktion der Lebensdauerüberwachung beeinträchtigen können. Dazu zählen u. a. Wetterbedingungen, (Nässe, Wärmeentwicklung) und elektromagnetische Felder (insbesondere bei Schienenfahrzeugen). Auch mechanische Einflüsse wie z. B. Stöße oder Überlastung können nicht ausgeschlossen werden. Diese Einflüsse wirken sowohl auf die Sensoren als auch auf die Leitungen der Stromversorgung und Informationsübertragung. Bei der Auslegung müssen die gleichen Voraussetzungen für die Reparierbarkeit des Systems (Demontage, Montage, Datenerhalt etc.) erfüllt werden wie bei der mechanischen Struktur. Die Robustheit des Überwachungssystems soll auch erlauben, dass die Daten nach einem Unfall wiederhergestellt werden können (Black Box Funktion).

Das System muss eine sehr hohe Zuverlässigkeit bieten, sodass es nicht zu falschen Alarmen z. B. wegen der aufgebrauchten Lebensdauer kommt. Die schon bereits in diesem Kapitel angesprochene Systemredundanz kann dazu beitragen, dass diese Forderung erfüllt wird.

Außerdem sollte das System möglichst in offener Weise aufgebaut werden. Das bedeutet, dass einzelne Softwareprozeduren nach Bedarf im Laufe der Zeit modifiziert werden können, wenn z. B. neue Hypothesen eine bessere Beschreibung der Schädigung erlauben. Die offene Architektur erlaubt auch, dass nachträglich weitere Sensoren durch das Lebensdauermodell berücksichtigt werden können.





## 4 Informationsfluss und -verarbeitung im Lebensdauerbeobachter

In diesem Kapitel wird das Informationsmanagement im Lebensdauerbeobachter näher betrachtet. Unter diesem Begriff werden hier Informationsgewinnung, -fluss und -verarbeitung verstanden. Die Informationsgewinnung ist dabei im Allgemeinen mit der Signalakquisition und -konditionierung verbunden. Als Informationsfluss bezeichnet man Übertragung und Verteilung der Information im Überwachungssystem. Bei der Informationsverarbeitung handelt es sich um Prozeduren und Methoden, die es erlauben, aus einer Vielzahl von Informationen eine möglichst kleine Datenmenge zu erzeugen und darauf basierend die Prognose der Lebensdauer abzugeben.

Es muss dabei erwähnt werden, dass sich die oben genannten Bereiche nicht immer eindeutig abgrenzen lassen. Eine solche Vorgehensweise wäre auch nicht immer sinnvoll. Als Beispiel kann hier die Signalverarbeitung dienen. Im Allgemeinen umfasst sie die Vorbearbeitung von Signalen im Sensor, Anpassung an die Busschnittstelle und die anschließende Bearbeitung im Zentralprozessor. So gesehen, findet ein Teil der Signalanalyse schon auf der Sensorebene statt. Die verschiedenen Schritte des Informationsverarbeitungsprozesses können je nach Ausführung unterschiedlichen Elementen der gesamten Kette zugeordnet werden. Aus dieser Hinsicht ist das Umfeld, wo die Signalverarbeitung stattfindet, sehr breit. Dementsprechend müssen auch die Anforderungen an die Signalverarbeitung gestellt werden.

Bei der Entwicklung eines Überwachungssystems kann man aus informationstechnischer Hinsicht folgende Aspekte erwähnen:

- Modularität des Systems (austauschbare Module sowohl auf physikalischer als auch informationstechnischer Ebene)
- Hierarchischer Aufbau der Hardware/Software
- Anzahl von Eingangskanälen (bzw. Sensoren)
- Art und Größe des Speichers
- Programmiersprache und Software (Modifikationsfähigkeit, Sicherheit usw.)
- Rekonfigurierbarkeit der Hardware
- Monitoring der Höchstbeanspruchungen (*exceedance monitoring*) – im Ausnahmefall kann auch der Betrieb weit über „Limit“ stattfinden, ohne das die Struktur sofort versagt; solche Fälle werden in diesem Fall auch klassifiziert
- Robustheit und Zuverlässigkeit des Gesamtsystems.

Es handelt sich dabei zunächst um eine übergreifende Betrachtung des Aufbaus. Auf Einzelheiten bezüglich Subsysteme wird im Untenstehenden noch eingegangen. Bei der Auslegung des Gesamtsystems müssen noch zwei Aspekte berücksichtigt werden, die das Verhalten in zeitlicher Hinsicht beschreiben:

- Verhalten des Systems in kurzen Zeitperioden (sog. dynamisches Verhalten) – Messung der Schwingungen, der Schallemission, einzelner Lastzyklen, etc.
- Langfristiges Verhalten des Systems (über die gesamte Lebensdauer) – Schädigung infolge dynamischer Beanspruchung.

## 4.1 Datenakquisition und -aufbereitung

Datenakquisition und -aufbereitung sind von zentraler Bedeutung für die Funktion des Lebensdauerbeobachters. Bei der Auslegung sollte man daher alle möglichen Messmethoden in Betracht ziehen, die zur Erfüllung der definierten Funktion beitragen können. Erst nach einer Analyse aller Vor- und Nachteile sollte die Auswahl getroffen werden, welche Messmethoden auch tatsächlich verwendet werden. Da die Funktion als *Beanspruchung ermitteln* (vgl. Kapitel 3) definiert ist, ist es nahe liegend, dass man im ersten Ansatz versucht sie möglichst direkt zu „messen“<sup>3</sup>. Manchmal ist das zwar der einfachste Weg, z. B. anhand der Dehnungsmessung eine Information über die Beanspruchung zu ermitteln, aber u. U. ist das nicht die beste Lösung. Deswegen sollten auch andere Möglichkeiten ausgewertet werden, wie z. B. Überwachung von Prozessmessgrößen, die für das gesetzte Ziel notwendige Informationen beinhalten. Man sollte deswegen die ohnehin im System vorhandenen Größen (Regelung, Diagnose, etc.) auf die Eignung für die Überwachung der Lebensdauer untersuchen.

### 4.1.1 Datenakquisition

Bei der Auslegung des Systems zur Datenakquisition können folgende Fragen gestellt werden:

- welche Größen können gemessen werden?
- wie viele Größen müssen gemessen werden?
- welche Messprinzipien sind am besten geeignet?
- welche Sensortechnik steht zur Verfügung?
- wie zuverlässig sind die Messungen?
- wie genau sind die Messungen?
- welche Frequenzbereiche sind interessant?
- wie müssen die Signale angepasst werden?
- welche Kosten fallen für die Messtechnik an?

Als Träger der Information eignen sich z. B. mechanische Größen: Kräfte, Drücke, Drehmomente, Spannungen, Drehzahlen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen. Auch andere Größen können für die Überwachung von Maschinen geeignet sein. Dies sind z. B. elektrische Größen (Strom, Leistungsaufnahme, usw.), Prozessgrößen

---

<sup>3</sup> Genau genommen, lässt sich die Beanspruchung nicht messen. Gemessen wird die Verformung und anhand anschließender Berechnung kann die Aussage über Beanspruchung im Bauteil gemacht werden.

(Energieverbrauch, Betriebsmittelverbrauch) und thermische Größen. Aus heutiger Sicht können auch optische Methoden (Reflexion, digitale Bildverarbeitung) in Betracht kommen. Wenn die Umweltbedingungen einen wesentlichen Einfluss auf das zu überwachende Objekt haben und im vorhandenen Schädigungsmodell implementiert sind, müssen sie als Teil des Systems betrachtet und demzufolge messtechnisch erfasst werden.

Ziel bei der Festlegung der Anzahl von Messgrößen ist es, das Maximum an Information mit möglichst minimalem Aufwand zu bekommen. Eine Hilfestellung bietet dabei die Simulation der Beanspruchung, z. B. mithilfe einer geeigneten FE-Software. Auf diese Weise kann man vorab die Hot Spots ermitteln. Das sind die Punkte der Struktur, in denen die Beanspruchung am stärksten ist. Auch die Problematik der langen Messzeiten (Langzeitdrift) kann durch die Wahl der entsprechenden Sensoren, des Kalibriervorgehens im Laufe der Zeit bzw. durch rechnerische Korrektur weitgehend behoben werden. Dies muss schon in der Projektierungsphase beachtet werden. Natürlich können Positionierung, Anzahl und Auswahl der Sensoren, Wahl der Auswertungsprozedur etc. im Laufe der Zeit und mit neuen Erkenntnissen und die Anforderungen (die oft auch steigen) besser angepasst werden. Für den Fall, dass im rechnerischen Modell Zeitsignale ausgewertet werden, muss auch die Phaseninformation (der zeitliche Zusammenhang zwischen einzelnen Signalen) zur Verfügung gestellt werden. Dies kann nur gewährleistet werden, wenn eine entsprechende Triggerinformation bei der Messung vorgesehen ist.

Die Festlegung von Frequenzbereichen, die aus Sicht der Lebensdauerüberwachung ein Informationspotenzial haben, zieht nach sich die Wahl von Abtastraten. Die Abtastraten können dabei variieren in Abhängigkeit von der zu beobachtenden Größe; sie reichen von 1 Hz (z. B. bestimmte Prozessparameter) über den Bereich um 100 Hz bei Beschleunigungsaufnehmern und DMS bis zur mehreren Hunderten Hertz bei der hochfrequenten Datenanalyse. Höhere Abtastraten werden auch statt analoger Anti-Aliasing Filter eingesetzt, sie verursachen jedoch einen wesentlichen Zuwachs an zu verarbeitenden Datenmengen. Im Einzelfall muss dann entschieden werden, welche Lösung aus technischer bzw. ökonomischer Sicht günstiger ist.

Das Überwachungssystem muss prinzipbedingt eine Stromzufuhrunterbrechung ohne Datenverlust überstehen können, außerdem muss es als ein selbst sicherndes (*self-secured*) System ausgelegt werden. Das bedeutet, dass sich im Falle eines Ausfalls das betroffene Modul von der Außenwelt isoliert, um die Arbeit von anderen Systemen nicht zu beeinträchtigen. Die Architektur der Software muss dann entsprechend (Schichtstruktur) ausgelegt werden. Die Erhöhung der Zuverlässigkeit und Genauigkeit kann durch prozessorseitige Plausibilitätskontrolle der Ausgangssignale redundanter Sensoren oder durch automatische Ausführung von Selbsttests erfolgen. Auch die erforderliche Einstellung und Kalibrierung des

Messsystems kann softwaremäßig realisiert werden. Die Kalibrierdaten können dabei sowohl direkt im Aufnehmer als auch im Prozessor gespeichert werden.

#### 4.1.2 Sensorik

Die Sensoraufgabe besteht im Allgemeinen aus der Abbildung einer unbekannten Messgröße in ein zur Weiterverarbeitung geeignetes elektrisches Messsignal. Um die geeigneten Messprinzipien zu wählen, müssen zuerst die Methoden der Überwachung genauer spezifiziert werden. Die für das Monitoring benötigten Informationen können folgenderweise gewonnen werden:

- direkte Messung der Beanspruchung mittels DMS (analog oder digital)
- indirekte Ermittlung der Beanspruchung anhand der für diesen Zweck eingesetzten Messtechnik (z. B. Kraftmessung in der Aufhängung eines Fahrzeugs, Beschleunigungsmessung an der Achsen usw.).
- indirekte Ermittlung der Beanspruchung anhand im Fahrzeug vorhandener Sensoren/Messsignale (z. B. Drehwinkel der Achse, Druck in der Servopumpe, longitudinale Beschleunigung des Fahrzeugs).

Im Untenstehenden wird repräsentativ die Sensortechnik der ersten Gruppe betrachtet.

Beim Aufbau der Messkette muss zuerst die Aufgabenstellung genau definiert werden. Die Messgröße, der Messbereich und die Auflösung des Sensors werden festgelegt. Außerdem spielen bei der Sensorwahl die Empfindlichkeit, die dynamischen Sensoreigenschaften, Flexibilität (z. B. ein Sensor für mehrere Zwecke), Zuverlässigkeit und nicht zuletzt die Kosten des Messaufnehmers eine wichtige Rolle. In Bezug auf die Messstrecke muss noch die Redundanz der Ausführung, Signalaufbereitung, (z. B. Korrektur der Linearität oder des Temperaturdrifts), Abtast- und Übertragungsrate in Betracht gezogen werden. Nach der Auslegung der Messkette kann eine Analyse durchgeführt werden, ob es aus Kostengründen bei der Serienproduktion sinnvoll ist, die notwendige Messtechnik im Bauteil fest zu integrieren.

#### **Messung der Verformung**

Direkt lässt sich die Beanspruchung nicht messen. Das, was man unter dem Begriff „Beanspruchung direkt ermitteln“ versteht, basiert auf der Messung der Belastung bzw. der Verformung der Bauteile (u. U. können auch beide Größen gleichzeitig gemessen werden) und anschließender Umrechnung. Die Wahl eines geeigneten Verfahrens richtet sich z. B. nach Art des Spannungszustands bzw. der Beanspruchung, Dauer der Messung, Temperatur- und Störeinflüssen, möglichen Anschlussmöglichkeiten (z. B. Verkabelung) und Applikationsbedingungen (z. B. Klebetechnik) etc.

Bei der Messung der Verformung können u. a. folgende Messprinzipien verwendet werden:

- Direkte Erfassung der Verformung (z. B. induktives oder optisches Messprinzip, Messbügel)
- Erfassung der relativen Verformungen (Dehnungen) beim DMS-Prinzip bzw. piezoresistiven Prinzip
- Erfassung spannungsbedingter Ladungsänderungen an Quarzkristallen beim piezoelektrischen Prinzip
- Erfassung von spannungsbedingten Permeabilitätsänderungen beim magnetoelastischen Prinzip.

An dieser Stelle wird repräsentativ die Erfassung der Verformungen mit der DMS-Technik als eine der möglichen Lösungen für den Lebensdauerbeobachter beschrieben. Die Messung der Dehnung mithilfe von DMS (Dehnungsmessstreifen) ist eine universelle, genaue und verbreitete Methode. Das Funktionsprinzip ist sehr einfach. Infolge der Dehnung im Sensor ändert sich der Widerstand in gedehnten Streifen; diese Änderungen dienen als das Maß der Dehnung. Die typischen DMS-Sensoren werden durch die Ätzung gewalzter Metallfolien, mittels Dünnschichttechnik oder als monolithisch integrierte Sensoren hergestellt.

Die weitaus größte Bedeutung haben Folien-DMS, die seit den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts auf dem Markt sind. Sie können prinzipiell über Jahrzehnte im Einsatz sein. Ohne Probleme lässt sich die Messabweichung unter 0,1 % erreichen. Für die Messung mittels eines DMS ist immer ein sog. Federkörper notwendig, dessen Dehnungen an der Oberfläche gemessen werden. Als Federkörper wird üblicherweise das Bauteil selbst benutzt. Die Folien-DMS können an das Bauteil geklebt oder geschweißt werden. Da die Widerstandsänderungen im Sensor sehr klein sind, werden die Messstreifen elektrisch durch eine Wheatstone'sche Brückenschaltung verbunden.

Bei der DMS-Messung unter ungünstigen Bedingungen, die oft in den Fahrzeugen vorkommen (Witterungsbedingungen, Korrosionseinfluss, elektromagnetische Strahlung), muss die Messstelle entsprechend abgedeckt werden, oft durch metallische Verschlusselemente. Für typische DMS liegt der Einsatzbereich zwischen  $-200...+200^{\circ}\text{C}$ , somit ist die Verwendung in Fahrzeugen (Temperaturbereich zwischen ca.  $-30$  und  $+80^{\circ}\text{C}$ ) in der Regel, mit entsprechenden Maßnahmen zur Temperaturkompensation, möglich.

### **Zukunftsweisende Sensortechniken**

Mit der Weiterentwicklung von verschiedenen Sensoren eröffnen sich neue Horizonte für die Messtechnik auf dem Gebiet der Lebensdauerüberwachung. Hier werden nur einige Beispiele genannt.

[Ellerbrock et al., 1999] präsentiert in seiner Arbeit Dehnungssensoren auf digitaler Basis, die für die Überwachung der Belastung in Strukturelementen eines Militärhubschraubers eingesetzt wurden. Die MEMS-Aufnehmer (Micro-Electro-Mechanical System) arbeiten völlig digital. Die Dehnung ist als Abstand zwischen dem festen und dem beweglichen Fuß des Aufnehmers definiert. Der Abstand wird elektrostatisch durch einen entsprechenden Felddetektor ermittelt.

Die Dehnung kann mithilfe eines Lichtwellenleiters (*optical fiber*) gemessen werden. Die Dehnung des Lichtleiters [Hampshire und Adeli, 2000] verursacht die Vergrößerung der Zeit für die Lichttransmission zwischen beiden Enden des Leiters um  $\Delta t$ , die gemessen werden muss. Ein Lichtleiter wird starr und kontinuierlich an der Strukturfläche (z.B. Brückenträger, Schiffsrumpf) angebracht. Diese Methode befindet sich immer noch im Entwicklungsstadium und für den industriellen Einsatz ist sie noch nicht reif. Heute werden diese Techniken vereinzelt in der Bauindustrie [Abbiati, 2000], in der Marine [Todd et al., 2007] oder in der Raumfahrt getestet.

Zu den zukunftsweisenden Techniken zählen auch autarke Sensoren, wie z. B. in der Arbeit von [Elvin et al., 2001] oder [Grisso, 2007] beschrieben. Eine Besonderheit der Sensoren besteht darin, dass sie ohne eigene Stromversorgung auskommen, weil sie die zu ihrem Betrieb erforderliche Energie durch Wandlung der mechanischen Primärenergie selbst gewinnen. In der Patentanmeldung [DE 19837486 A1] werden spezielle Sensoren beschrieben, die mithilfe von Feder-Masse-Systemen so in das Fahrzeug eingebaut sind, dass sie erst bei einer bestimmten Mindestbeanspruchung ansprechen und Ereignismeldungen ausgeben.

Bei der Lebensdauervorhersage können auch Methoden der Bruchmechanik eingesetzt werden. Sie basieren grundsätzlich auf der Messung/Bestimmung des Rissfortschritts. Beispiele dafür sind z. B. in [McDowell et al., 2000] oder [Vachtsevanos, 2006] vorgestellt. Dabei können Ultraschalltechnik, aber auch berührungslose, optische Verfahren, wie z. B. Coherent Laser Radar System oder CCD Hochauflösungs-Kamera [Fu und Moosa, 2000] zur Überwachung von Rissen bzw. Verformungen verwendet werden.

Diese zukunftsweisenden Techniken können, nachdem sie einen gewünschten Serienreifegrad erreicht haben, in die Systeme der Lebensdauerüberwachung mit offener Struktur implementiert werden.

#### 4.1.3 Aufbereitung der Daten (Signalkonditionierung)

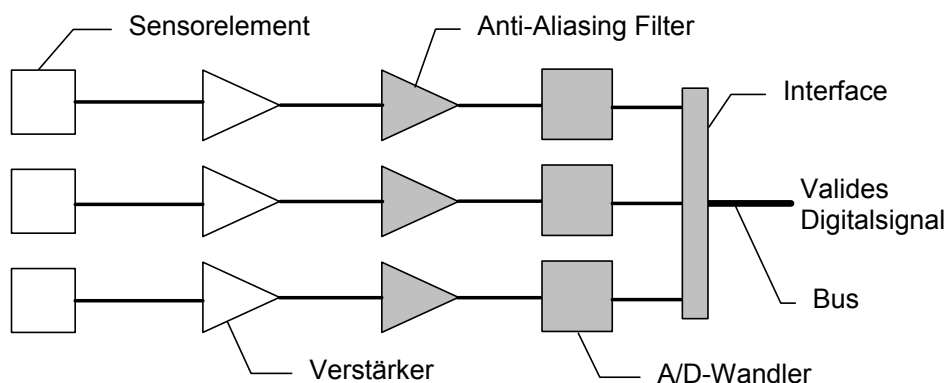
Ziel der Signalkonditionierung ist es, die durch den Sensor ausgegebenen Signale, die üblicherweise den für die Auswertung gestellten Anforderungen noch nicht entsprechen, so aufzubereiten, dass sie dem Prozessor zur Lebensdauerrechnung in geeigneter Form zur Verfügung gestellt werden können. Die Signalkonditionierung

besteht im Allgemeinen aus Verstärkern, Filtern und Konvertern. Bei den analogen Sensoren wird eine kontinuierliche physikalische Größe, nach einer analogen Signalkonditionierung (z. B. Verstärkung, analoge Filterung), in einem Signalverarbeitungssystem digitalisiert und danach weiter in dieser Form verarbeitet (digitale Filterung, Transformation, Merkmalsextraktion).

Die Kette der Signalaufbereitung kann folgendermaßen dargestellt werden:

Analoges Signal → Analoge Signalkonditionierung → A/D-Wandlung → Digitale Filterung → Codierter Abtastwertesatz

Die Signalverarbeitungskette nach diesem Muster ist in Bild 4-1 dargestellt. Der physikalische Aufbau der Messkette kann, abhängig von den verwendeten Elementen, stark variieren. Die einzelnen Elemente können auch ggf. in einer Einheit integriert werden. So kann ein Teil der Signalvorverarbeitung im Sensor selbst stattfinden. Bei der entsprechenden Integration des Systems kann der Sensor direkt mit dem Bus verbunden werden, wenn die Analog-Digital-Umsetzung der Signale direkt in der im Sensor implementierten Vorverarbeitungsphase erfolgt. Außer der hier erwähnten Kettenstruktur der Signalverarbeitung werden auch Parallelstruktur (z. B. Differenzprinzip) oder Kreisstruktur (loop – z. B. Kompensationsprinzip) verwendet.



*Bild 4-1 Beispiel einer Verarbeitungskette vom Sensorelement bis zum Bus (hier für 3 Sensorelemente)*

Das Sensorelement (vgl. Abschnitt 4.1.2), das nach einem beliebigen physikalischen Prinzip arbeitet, liefert ein zur messenden Größe proportionales elektrisches Signal. Da das Signal für den A/D-Wandler eine entsprechende Qualität und das gewünschte Pegelniveau aufweisen muss, werden ein Signalverstärker und bestimmte Filter verwendet. Das Anti-Aliasing Filter dient zum Ausfiltern von hochfrequenten Signalen, die das Ergebnis der Messung infolge der nicht ausreichenden Abtastrate verfälschen können (Alias-Effekt).

Um die Wege der analogen Signale zu kürzen, kann die analoge Messwertverarbeitung im Messaufnehmer implementiert werden. Es liegt im Trend, analoge Signale möglichst früh zu digitalisieren und weiter diskrete Signale digital zu verarbeiten. Als Ergebnis der Digitalisierung bekommt man von einem wert- und zeitkontinuierlichen Signal ein wert- und zeitdiskretes Signal. Die Digitalisierung findet in einem Analog-Digital Wandler statt. Meistens wird eine direkte Analog-Digital-Umsetzung (ADU) verwendet, die die Methode der sukzessiven Approximation mit konstanten Umsetzzeiten benutzt.

Eine andere Möglichkeit die digitalen Signale zu bekommen, sind reine Digitalaufnehmer (mit sog. Direktcodierung). In diesem Fall entfällt der Teil mit analoger Signalkonditionierung. Die physikalische Größe wird direkt in die Digitalform umgesetzt.

Als Grundlage der digitalen Signalverarbeitung dient eine möglichst gute mathematische Beschreibung der Abhängigkeit eines Sensorsignals von der zu messenden Größe. So können z. B. die Störeinflüsse entsprechend korrigiert werden. Um eine digitale Signalverarbeitung zu ermöglichen, muss die Sensorkennlinie durch ein mathematisches Modell nachgebildet werden. So beispielsweise fordert die Messung mittels Dehnungsmessstreifen relativ hohen Aufwand an Signalaufbereitung. Die Messsignalverarbeitungskette muss außer typischer Signalkonditionierung und Filterung der Ausgangssignale auch die Korrektur der Nichtlinearitäten, Nullpunktabweichung und der Temperatureinflüssen beinhalten.

Sensoren mit integrierter Messsignalverarbeitung ermöglichen kostengünstige Sensorsysteme mit guten Leistungsmerkmalen. Insbesondere ist die integrierte digitale Signalverarbeitung im Sensor erwünscht. Es ist von Vorteil, dass das analoge Signal, wenn überhaupt vorhanden, auf kürzestem Weg in ein digitales Messsignal umgesetzt wird. Dann kann das digitale Messsignal unter Umständen in einem lokalen (dezentralen) Prozessor bearbeitet werden. Der Einsatz von integrierten Sensoren erlaubt u. a. den Ausgleich von Fertigungsstreuungen und die Minimierung von Einflusseffekten (z. B. Störungen). Die integrierten Sensoren werden auch als Smartsensoren bezeichnet. Die Smartsensoren sind dadurch gekennzeichnet, dass sie über eine eingebaute Intelligenz verfügen [Taylor, 1997], sie muss dabei für den Betreiber nicht offensichtlich sein.

## 4.2 Informationsverarbeitung

Nach der Datenakquisition und der Datenaufbereitung folgt im Lebensdauerbeobachter die Phase der Informationsverarbeitung, mit dem Ziel, die Signale zu analysieren, die Datenmenge zu reduzieren und die Beanspruchungskollektive zu ermitteln.



Bei der Informationsverarbeitung kann man folgende Aspekte auflisten:

- Datenspeicherung (Kapazitäten, Anforderungen, Formate, Kompression, technische Grenzen)
- Numerischer Aufwand (Genauigkeit, technische Grenzen)
- Kollektivbildung/Datenreduktion (wann im Laufe der Verarbeitung?)
- Analyse im Zeitbereich (große Datenmengen), Frequenzbereich (veränderliche Signale, Stöße) oder nach *use-case* Prinzip (mit *Templates* – Vorlagen).

Bevor man die Anforderungen an die Signalverarbeitung stellt, soll man folgende Fragestellung genauer betrachten. Welche Modellvorstellungen gelten im speziellen Anwendungsfall? Welches Analyseverfahren ist für den jeweiligen Verwendungszweck am besten geeignet? Wie ist das Analyseverfahren zu parametrieren, um optimale Ergebnisse zu erhalten? Wie sind die Ergebnisse zu interpretieren? Nicht jede Anforderung kann gleichermaßen erfüllt werden, es muss in solchen Fällen nach einem vertretbaren Kompromiss gesucht werden. Die wichtigsten Anforderungen an die Informationsverarbeitung sind:

- möglichst geringer Rechenaufwand
- Ausführungsgeschwindigkeit
- numerische Stabilität
- ausreichende Genauigkeit
- Robustheit des Verfahrens
- Flexibilität (Upgradefähigkeit)
- Datenreduktion
- softwareseitige Redundanz.

In der Entwurfsphase der Informationsverarbeitung werden alle möglichen Lösungen verglichen und auf die Eignung für die Lebensdauerüberwachung geprüft. Der Aufbau der Datenverarbeitungskette hängt dabei sehr stark davon ab, welche Methode im Lebensdauerbeobachter zum Tragen kommt.

#### 4.2.1 Methoden der Signalanalyse

##### **Analyse im Zeit- und Frequenzbereich**

Die Aussagekraft von rohen, nicht verarbeiteten Signalen, insbesondere bei dynamisch beanspruchten Strukturen ist zu klein, um daraus direkt schon vernünftige Schlussfolgerungen in Bezug auf die Lebensdauerüberwachung ziehen zu können. Die Aufgabe der Datenanalyse ist es, die Information, die in diesen Signalen vorhanden ist, hervorzuheben und in eine solche Form zu bringen, die in der Lebensdauerabschätzung verwendet werden kann.

Die meist verwendete Unterteilung der Signalanalyse bezieht sich auf die Datenanalyse im Zeit- bzw. Frequenzbereich. Die Datenanalyse im Zeitbereich

beinhaltet u. a. Schwingstärke-, Summenpegel-, Hüllkurve- und Korrelationsanalyse. Diese Methoden sind rechen- und speicheraufwändig und erfordern deswegen eine Datenreduktion. Sie eignen sich dabei gut für nichtstationäre Systeme. Die Zeitdaten bilden die Basis für die Berechnung der Lebensdauer.

Die Signalanalyse im Frequenzbereich basiert auf der Fourier-Transformation, die ein Analyseverfahren zur Darstellung der Frequenzinhalte von Zeitsignalen ist. Die verwendeten Methoden sind u. a. statistische Auswertung der Frequenzspektren, Ordnungsanalyse, Leistungs- und Kreuzleistungsdichtefunktion, Kohärenz. Bei rasch wechselnden Schwingungssignalen ohne periodischen Charakter ist die Fourier-Transformation nicht das geeignete Werkzeug für die Datenanalyse, die Information über zeitlich veränderliche Anteile geht in diesem Fall verloren. Deswegen wurden für nichtstationäre Systeme Kombinations-Methoden entwickelt, sog. Zeit-Frequenz-Verbundtransformationen, wie z. B. Kurzzeit-FFT oder Wavelet-Transformation (statt Sinus/Kosinuskomponenten wie bei der FFT werden hier Einzelwellen verwendet; die Fenstergröße ist variabel und passt sich an das Signal an).

### **Signalverarbeitung bei mehreren Sensoren (Multisensoren)**

In der zu überwachenden Struktur werden gleichzeitig mehrere Sensoren eingesetzt. Die Aufgabe der Signalverarbeitung ist es, die Informationen aus mehreren Sensoren so zu integrieren/kombinieren, dass die Qualität der Messungen gesteigert wird. Die Kombination der Daten kann dabei auf verschiedenen Abstraktionsebenen stattfinden:

- Signalniveau (Datenfusion) – Verringerung der Varianz des Messfehlers
- Merkmalsniveau – Kombinieren der Merkmalsattribute im örtlichen/zeitlichen Kontext (höhere Zuverlässigkeit bei der Erkennung der Merkmale)
- Ebene symbolischer Beschreibungen (die Symbole mit Wahrscheinlichkeitswerten werden logisch verknüpft).

Um die redundanten Daten in dynamischen Systemen in Echtzeit auf niedrigem Signalvorverarbeitungsniveau zu fusionieren, werden u. a. Kalman-Filter verwendet. Auf Basis eines Systemmodells und einer Gauß'schen Fehlerverteilung für System und Sensoren wird ein rekursives Schätzverfahren eingesetzt, um statisch wahrscheinlichste Sensorwerte zu bestimmen.

Fuzzy Logic wird oft benutzt, wenn nur eine qualitative Modellierung des Systems möglich ist (mathematische oder statistische Modellierung ist sehr aufwändig oder unmöglich). In solchen Fällen lässt sich mit der Fuzzy Logic ein geeignetes mathematisches Hilfsmittel einsetzen. So kann mit unscharfen Messgrößen und Modellen gearbeitet werden. Diese Vorgehensweise wird oft in der Fehlerdiagnose eingesetzt.

Neuronale Netze werden in solchen Fällen eingesetzt, wenn auch eine qualitative Beschreibung des Systems nicht ohne weiteres möglich ist. Mithilfe von Beispielen kann das erwartete Verhalten des Systems „eintrainiert“ werden. Der Vorteil von neuronalen Netzen liegt darin, dass eine gesuchte Lösung ohne besonderes Expertenwissen fast immer gefunden werden kann. Nachteilig ist aber bei dieser Methode, dass sich aus gelernten Gewichtungsfaktoren keine allgemeinen Schlussfolgerungen ziehen lassen (das Verhalten für sicherheitsrelevante Anwendungen ist nicht ausreichend beschreibbar). Durch die Fähigkeit zum Lernen eignen sich Neuronale Netze zur Fehlererkennung, z. B. im Bereich der Geräuschklassifikation. Sie bestehen grundsätzlich aus 3 Komponenten: Rechenelemente, Netztopologie und Lernregeln.

### **Datenanalyse und Echtzeitverarbeitung**

An dieser Stelle kann auch das Problem der Echtzeitverarbeitung angesprochen werden. Eine Datenverarbeitung wird dann als Echtzeitbearbeitung bezeichnet, wenn die Daten lückenlos und innerhalb eines vorher fest definierten Zeitintervalls bearbeitet werden. Die Anforderungen bei dem Lebensdauerbeobachter müssen jedoch nicht so kritisch angesehen werden wie z. B. bei den Regelkreisen („harte“ Echtzeit). Während der Lebensdauerüberwachung müssen zwar alle Beanspruchungen lückenlos bearbeitet werden, aber eine eventuelle Datenpufferung (im Sinne der Zeitverschiebung) ist für das Endergebnis in Makro-Zeitskala irrelevant („weiche“ Echtzeit-Datenverarbeitung). Die Kapazitäten des Puffers müssen jedoch gewährleisten, dass es im System nicht zum Überlaufen (*overflow*) kommt. Die Menge der zu verarbeitenden Daten wächst mit der Anzahl der Messkanäle und der Abtastrate.

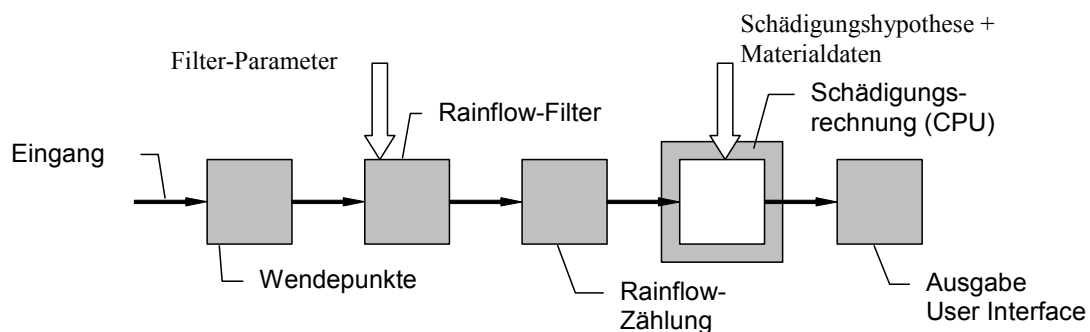
#### **4.2.2 Datenreduktion**

Bei der Auslegung des Informationsverarbeitungssystems wird die Frage gestellt, ob die ganze gemessene Belastungs-Zeit-Funktion gespeichert und verarbeitet werden soll. Wenn viele Punkte an der Struktur gemessen werden, ergeben sich aus der Messung enorme Mengen von Daten, die abgespeichert und bearbeitet werden müssen. Sowohl die vorhandene Speicher- als auch Rechnerkapazität ist, insbesondere im mobilen Einsatz, eingeschränkt. Dies führt zu dem Gedanken, die gemessenen Daten stark zu reduzieren. Andererseits, falls dies konstruktiv möglich ist, soll das Erfassungssystem auch die wirklich gemessenen Zeitdaten für Test- bzw. besondere Messzwecke liefern können, auch wenn dies z. B. nur mit Einschränkung auf wenige Kanäle möglich ist.

In allen übrigen Fällen ist die Datenreduktion unumgänglich. Ziel ist es, die Datenmenge zu einer leicht zu handhabenden Zahl zu reduzieren. Bei der Reduktion muss nicht zwangsweise mit dem Informationsverlust gerechnet werden. Als

Beispiel dafür kann die weiter in diesem Abschnitt beschriebene Ermittlung von Umkehrpunkten betrachtet werden. Diese Vorgehensweise reicht jedoch nicht, die Datenmenge signifikant zu reduzieren. In den weiteren Reduktionsstufen, die typischerweise mit dem Informationsverlust verbunden sind, sollten die Anforderungen der Lebensdauerschätzung, Speicher- und Rechenkapazitäten berücksichtigt werden. Die Vorgehensweise bei der Reduktion hängt grundsätzlich von der Art der zu reduzierenden Daten und von der Bestimmung des Datenflusses ab. So können z. B. die Daten, die mit dem Stillstand des Fahrzeugs verbunden sind, einfach eliminiert werden, da sie keinen Einfluss auf die Schädigung der Tragstruktur haben. Auch kleine Beanspruchungsamplituden, die praktisch zur Gesamtschädigung nicht beitragen, können aus dem Zeitverlauf gelöscht werden (sog. Omission). Durch die Datenreduktion kann u. U. die Reihenfolge der Ereignisse verloren gehen. Falls das Schädigungsmodell solche Informationen benötigt, müssen sie trotz des Reduktionsverfahrens zur Verfügung gestellt werden.

Bild 4-2 zeigt ein Beispiel für die Informationsverarbeitungskette zur Schädigungsberechnung bei Verwendung komprimierter Signale, wobei hier die sog. „späte Kollektivbildung“ dargestellt ist, bei der die Rainflow-Zählung direkt vor der Berechnung der Schädigung erfolgt. Als Eingangssignale dienen in diesem Fall die Beanspruchungen selbst.



*Bild 4-2 Verarbeitung des digitalen Signals in der Auswerteeinheit*

Es gibt viele verschiedene Möglichkeiten der Signalverarbeitung, um die Schädigung zu berechnen. In den folgenden Beispielen werden einzelne Berechnungsroutinen der frei im Web erhältlichen Matlab-Toolbox WAFO (*Wave Analysis for Fatigue and Oceanography*) [WAFO, 2003] verwendet, die an die Anforderungen des in dieser Arbeit beschriebenen Systems entsprechend angepasst worden sind. Diese Vorgehensweise bietet z. B. viele Möglichkeiten für die Simulation des Datenflusses oder der Datenverarbeitung, ohne dass Standardalgorithmen wie z. B. Rainflow-Zählung programmiert werden müssen.

Im Verlauf der Datenverarbeitung wird zuerst aus den Zeitdaten die Sequenz von Umkehrpunkten (*turning points*) ermittelt, dann wird die Rainflow-Filterung durchgeführt, bei der die kleinen, für die Schädigung nicht relevanten Schwingspiele herausgefiltert werden (Omission). Danach wird das auf diese Weise reduzierte Signal der Rainflow-Zählung unterzogen, die als Transformation aus dem Zeitbereich in den Rainflow-Bereich angesehen werden kann. Die Ergebnisse der Rainflow-Zählung werden dann unter Berücksichtigung der Materialdaten (z. B. Wöhler-Linie) und der zur Verfügung stehenden Schädigungshypothesen im Schädigungsrechner bearbeitet. Die Pfeile in Bild 4-2 zeigen die Stellen, an denen das Berechnungsverfahren an individuelle Bedürfnisse durch Angabe von bestimmten Parametern angepasst werden kann.

Da für die Schädigungsrechnung nicht der Gesamtzeitverlauf der Belastung, sondern nur Umkehrpunkte des Verlaufs relevant sind, werden sie zuerst aus der ganzen Datenmenge bestimmt. Die Umkehrpunkte in einem Zeitverlauf sind lokale Extrema, sie können in Bild 4-3 angesehen werden.

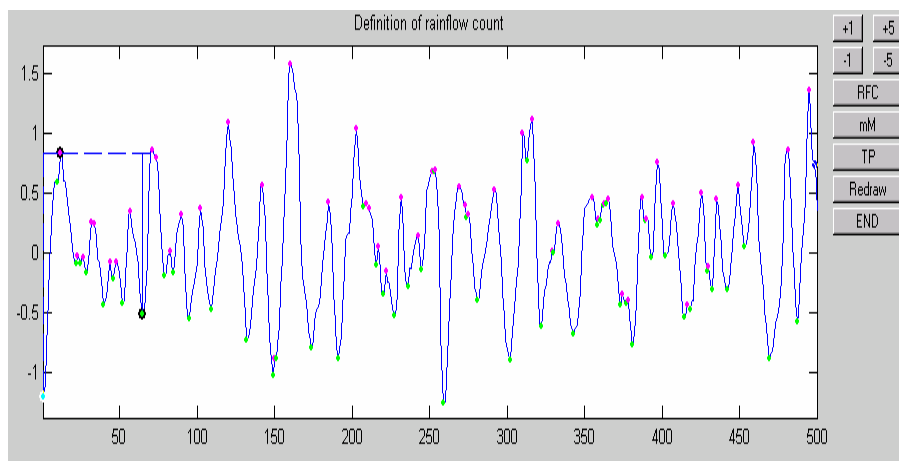


Bild 4-3 Beispiel für die Sequenz von Umkehrpunkten in einer Zeitprobe

Bei der Auswertung der Beanspruchungsdaten soll nach Bedarf/Möglichkeit die zeitliche und räumliche Information berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass man bei der Bestimmung von Umkehrpunkten für eine gemessene Richtung (Beispiel: Messung in drei Richtungen mit einer DMS-Rosette) zeitsynchron auch die entsprechenden Werte für die übrigen gemessenen Richtungen betrachten soll.

Ziel der Rainflow-Filterung ist es, die lokalen Extrema im Zeitverlauf, die kleiner als ein bestimmter Grenzwert sind, wegzulassen. Dieser Prozess ist auch als Omission bekannt. Diese kleinen Extremwerte sind für die Schädigungsrechnung irrelevant, bzw. haben nur einen geringen Einfluss. Die Grenzwerte für die Filterung können experimentell gewonnen werden oder finden sich in bestimmten Regelwerken.

Nach der Filterung werden die Daten durch die Rainflow-Zählung in eine Rainflow-Matrix umgewandelt. Die Daten werden somit aus dem Zeitbereich in den Rainflow-Bereich (Rainflow-Domäne) transformiert. Diese Daten werden weiter zusammen mit der Schädigungshypothese und Materialdaten zur Berechnung der Schädigung im Zentralprozessor verwendet.

Der mittels Matlab realisierte softwareseitige Aufbau der Informationsverarbeitung entspricht im Grunde der hier dargestellten Anordnung. In der Entwicklungsphase wurden einzelne Prozeduren getestet. Der modulare Aufbau hat den Vorteil, dass die einzelnen Unterprogramme unabhängig in verschiedenen Konfigurationen getestet werden können. In einfachster Ausführung braucht diese Anordnung 3 Eingänge: Parameter für das Rainflow-Filter, Materialdaten (Wöhlerlinie) und die Definition der Schadensakkumulationshypothese für die Schädigungsrechnung.

Die Schädigungsrechnung kann als eine dynamisch-sequenzielle Berechnung ausgeführt werden. Das bedeutet, die Daten werden in bestimmten Blöcken in der Verarbeitungskette bearbeitet. So kann die Online-Anforderung der Überwachung erfüllt werden (eine Datensequenz ist unendlich klein im Vergleich mit der gesamten Lebensdauer). Auf diese Weise lassen sich auch die Einflüsse der Beanspruchungsreihenfolge berücksichtigen, wenn eine entsprechende Schädigungshypothese vorliegt. Das Modul mit der Schädigungsrechnung kann außer linearen Akkumulationshypothesen andere, nichtlineare Schädigungshypothesen beinhalten. Die Blocklänge der Datensequenz kann dynamisch anhand der beobachteten Vorkommnisse angepasst werden.

#### 4.2.3 Ermittlung von Beanspruchungskollektiven

Im Untenstehenden werden die Methoden zur Ermittlung von Beanspruchungskollektiven kurz beschrieben, die in die Modelle der Schädigungsrechnung implementiert werden können. Diese Methoden können wie folgt klassifiziert werden:

##### □ Ermittlung im Zeitbereich

- ◆ Einparameter-Klassierverfahren (Kennfunktion ist ein Kollektiv)
  - Spitzenwertklassieren
  - Bereichs(paar)zählung (*range pair count*)
  - Überschreiten von Klassengrenzen (*level crossing counting*)
- ◆ Zweiparameter-Klassierverfahren (Amplitude und Mittelwert des Schwingungsspiels, Ausgabe in Matrixform)
  - Zweiparametrische Spitzenwertklassierung (Zählung von Bereichen und Mittelwerten (*range-mean counting*) oder Maxima und Minima (*peak-through counting*))
  - Rainflow Klassierung
  - Markov-Matrix

- Ermittlung im Frequenzbereich (aus dem Frequenzgang wird ein Kollektiv gebildet)
  - ◆ Überschreitung von Klassengrenzen im Frequenzbereich
  - ◆ Zweiparametrisches Spitzenwertverfahren im Frequenzbereich
  - ◆ Rainflow aus der Spektraldichte

Viele der hier genannten Methoden sind in den Normen, z. B. [DIN 45667] erfasst.

### **Vorgehensweise im Zeitbereich**

Anhand der während der Überwachung der Beanspruchung ermittelten Parameter (z. B. Spannungen und zugehörige Lastspielzahlen) wird infolge eines Klassierungsverfahrens ein Stufendiagramm mit der Verteilungsfunktion der Beanspruchung erstellt. Daraus kann eine Summenhäufigkeitskurve (Beanspruchungskollektiv) berechnet werden. Ziel des Klassierverfahrens (Zählung) ist es, eine beliebig komplizierte Beanspruchungs-Zeit-Funktion durch einfache Kenngröße (Kennfunktion) zu ersetzen. Die Darstellung der Zeitfunktion in Form eines Kollektivs ist mit einer erheblichen Datenreduktion verbunden. Dabei gehen aber die Informationen über die Frequenz, Reihenfolge und das Zeitgesetz (Sinus-, Rechteckfunktion) verloren. Die zeitliche Aufeinanderfolge lässt sich somit nicht mehr wiederherstellen. Auch die Geschwindigkeit der Belastungsänderungen (Frequenz) wird nicht im Zählergebnis wiedergegeben. Bei der technischen Durchführung der Kennzeichnung wird der Messbereich in Klassen unterteilt (mind. 20, oft 32 oder 64). Die Klassen müssen alle vorhandenen Messpunkte erfassen.

Heutzutage werden hauptsächlich zweiparametrische Zählverfahren angewendet. Bei diesen Verfahren sind in den Zählmatrizen Informationen über Amplitude und Mittelspannung der Beanspruchung enthalten. Zu diesen Verfahren gehört z. B. die Rainflow-Zählung. Je nachdem, welche Informationen bei der Schädigungsrechnung verwendet werden, muss u. U. das zweiparametrische Kollektiv in ein einparametrisches Kollektiv umgerechnet werden. Die Betriebsfestigkeitsberechnung erfolgt mit einem eindimensionalen Kollektiv.

Anstelle der Rainflow-Zählung kann eine statistische Klassierung der Beanspruchung vorgenommen werden. Die Schädigungsberechnung wird anhand der auf diese Art entstehenden Belastungskollektive vorgenommen. Gegenüber der Methode der Lebensdauerprognose, bei der die Rainflow-Zählung zur Anwendung kommt, ist die auf der Bildung von Belastungskollektiven beruhende Prognose der Lebensdauer weniger genau; dafür ist die erforderliche Kommunikationsbandbreite deutlich kleiner.

Wenn an der zu überwachenden Struktur die Kräfte oder Spannungen gemessen werden, kann eine direkte Klassierung (im Zeitbereich) relativ einfach online erfolgen, auf diese Weise kann die Menge von Zeitdaten sofort reduziert werden.

## Rainflow-Zählung

Die Rainflow-Zählung ist eine verbreitete, in der Praxis bewährte und oft angewendete Methode zur Reduktion des Zeitverlaufs einer Beanspruchungsfunktion auf die wirklich schädigungswirksamen Schwingspiele. Der Schädigungsinhalt einer Beanspruchungs-Zeitfunktion wird bei der Rainflow-Zählung am besten erfasst [Flach, 1999]. Diese Zählungsform ist auch am meisten in der üblichen Software verbreitet. Wenn sie „früh“ in der Berechnung eingesetzt wird, und das ist bei der direkten Ermittlung der Beanspruchung ohne weiteres möglich, kann die erforderliche Kommunikationsbandbreite zwischen Sensor und Prozessor, in dem die Schädigungsberechnung erfolgt, deutlich reduziert werden. Die Rainflow-Zählung kann auch „spät“ in der Verarbeitungskette vorgenommen werden. Dies führt jedoch nicht zu einer – an sich wünschenswerten – Entlastung des Kommunikationsbedarfes.

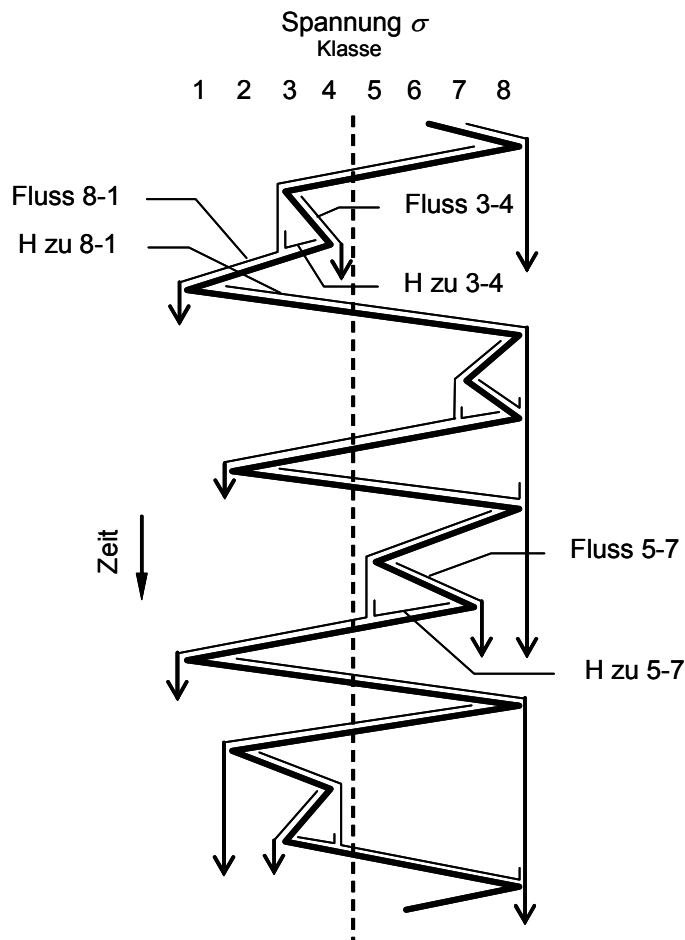
Es existieren mehrere Varianten der Rainflow-Zählung, wie z. B. von [Downing und Socie, 1982] dargestellt. Ein Datenblock kann beispielsweise zwischen 400 und 40000 Lastzyklen beinhalten. Prinzipiell werden bei der Rainflow-Zählung geschlossene Hysteresen erfasst. Die Vollzyklen bestehen dabei aus zwei Halbzyklen, die gleiche Schwingbreite und Maxima (Minima) haben. Die nicht geschlossenen Zyklen bilden dagegen ein sog. Residuum. In manchen Fällen (z. B. gedämpfte Schwingungen, kurze Beanspruchungs-Zeit-Funktionen) muss das Residuum auch berücksichtigt werden. Für die Identifikation geschlossener Hystereseschleifen wurden entsprechende Rainflow-Algorithmen entwickelt. Die Eckpunkte der Hysteresen können nach [Haibach, 1989] anhand von Nennspannungs-Zeitfunktionen identifiziert werden und nach der Neuber-Regel in die örtlichen  $\sigma$ - $\varepsilon$  Werte umgerechnet werden. Eine modifizierte Definition der Rainflow-Zählung befindet sich in [Rychlik, 1996]. Nach dieser Definition arbeiten auch die Softwaremodule der WAFO-Toolbox.

Die Ergebnisse der Rainflow-Zählung können mithilfe von mathematischen Werkzeugen bearbeitet werden (Extrapolation usw.). Eine grafische Erläuterung für die Rainflow-Zählung ist in Bild 4-4 dargestellt.

Als Beginn des „Regenwasserflusses“ versteht man jede positive oder negative Spitze der Beanspruchungs-Zeit-Funktion. Es gibt verschiedene Bedingungen für das Ende des „Wasserflusses“:

- Regenwasserfluss entlang des Dachs trifft auf Regenwasserfall von einem höheren Dach
- Regenwasserfluss erfolgt gegenüber einer Spitze, die weiter als Ausgangspitze liegt (Schließen der Hysterese)
- Regenwasser trifft auf kein weiteres Dach.





*Bild 4-4 Rainflow-Zählung an einer Beanspruchungs-Zeit-Funktion, in Anlehnung an [Gudehus und Zenner, 1999]*

In Bild 4-4 sind beispielhaft 3 geschlossene Hysteresen markiert. Zuerst wird der erste Fluss 8-1 ermittelt („von 8 nach 1“). Die Hysterese wird mit dem Fluss „H zu 8-1“ geschlossen. In der Vollmatrix (Bild 4-5) gibt es dann einen Vermerk (Zeile 8, Spalte 1). Im weiteren Verlauf wird der Fluss 3-4 ermittelt, die Hysterese wird mit dem Fluss „H zu 3-4“ geschlossen, in der Vollmatrix wird es in der Zeile 3 und Spalte 4 vermerkt. Ein weiteres Beispiel ist der Fluss 5-7, die Hysterese wird geschlossen mit „H zu 5-7“, in der Vollmatrix findet sich dementsprechend ein Vermerk in der Zeile 5 und Spalte 7. Auf diese Weise werden weitere Flüsse verarbeitet.

Die aus der Rainflow-Zählung resultierende Vollmatrix wird typischerweise durch entsprechendes Addieren (Elemente, die symmetrisch zur Hauptdiagonale sind, werden zusammenaddiert) in eine Halbmatrix umgewandelt. Beide Matrizen sind in Bild 4-5 dargestellt.

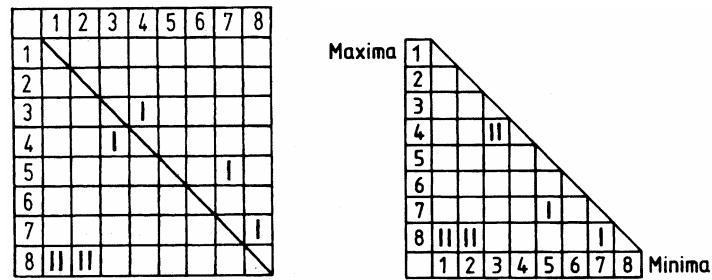


Bild 4-5 Rainflow-Vollmatrix für die Funktion aus dem Bild 4-4 und Rainflow-Halbmatrix [Gudehus und Zenner, 1999]

Aus einer Rainflow-Vollmatrix lassen sich einige Merkmale der Belastung ablesen. Die Zyklen mit der gleichen Schwingbreite liegen parallel zur Hauptdiagonale, senkrecht zur Diagonale liegen dagegen die Beanspruchungen mit gleichen Mittelwerten. Die Ergebnisse der Bereichspaarzählung bekommt man, indem man die Zyklen gleicher Schwingbreite addiert.

Der wichtigste Vorteil der Rainflow-Zählung ist die optimale Konsistenz zur Schädigungsäquivalenz [Krüger und Keul, 1992]. Das Verfahren hat einen guten physikalischen Bezug, die Zählergebnisse lassen sich nämlich als geschlossene Hystereseschleifen im Spannungs-Dehnungs-Diagramm interpretieren. Eine Einschränkung der Genauigkeit gegenüber der direkten Schädigungsberechnung aus den Zeitsignalen ist kaum gegeben. Eine Korrelation zwischen charakteristischen Schädigungsereignissen und zugehörigen Fahrmanövern oder Betriebszuständen kann auch hier nicht hergestellt werden, weil der Zustandsraum des Systems durch die Rainflow-Zählung in eine Matrix abgebildet wird, in der nur noch die relative Häufigkeit, mit der bestimmte Lastzustände aufgetreten sind, abgelesen werden kann. Der durch die Kollektivbildung entstehende Bedarf an Rechenleistung ist nicht besonders groß, muss jedoch abgedeckt werden. [Chaudonneret und Robert, 1996] machen die Bemerkung, dass sich die Rainflow-Analyse zwar für die komplexe Belastung eignet, aber nicht konsistent mit der nichtlinearen Schadensakkumulation ist. Um das zu berücksichtigen, soll die jeweilige Schädigungsanalyse nach jeder geschlossenen  $\sigma$ - $\varepsilon$  Schleife erfolgen. In der Simulationsphase kann diese Problematik durch die sequenzielle Analyse umgangen werden.

### Betrachtung im Frequenzraum

Die Fouriertransformation der Zeitdaten kann auch als eine Form der Datenreduktion gesehen werden. Dabei werden die Zeitsignale sensor-nah in den Frequenzbereich transformiert und nur die transformierten Signale werden über die Datenleitung an den Prozessor, in dem die Schädigungsberechnung erfolgt, übertragen. Je nachdem, ob und wie stark dabei die Frequenzbandbreite und -auflösung beschränkt wird, kann damit die erforderliche Kommunikationsbandbreite vermindert werden.

Es gibt Ansätze, bei denen die Schädigungsberechnung auf der Basis von Leistungsspektren (also unter Verzicht auf die Phaseninformation) durchgeführt wird. Voraussetzung ist aber, dass die Anregung als ein stochastischer Gaußprozess angenommen werden kann. Man kann die Spektralanalyse oder Kovarianzanalyse einsetzen. Als Ergebnis der Rechnung bekommt man eine zur Rainflow Matrix äquivalente Matrix. Dabei wird die Schädigungsrechnung mit Wöhlerlinien durchgeführt. Entsprechende Werkzeuge sind schon verfügbar (siehe z. B. „*frequency domain fatigue analysis*“ im nCode-Tool Fatimas-Spectral). Auch in [Pitoiset und Preumont, 2000] finden sich erste Ergebnisse zu diesem Ansatz. Auch die multiaxialen Lasten können auf diese Weise ausgewertet werden. Eine Definition für die multiaxiale Rainflow-Zählung im Frequenzbereich befindet sich in [Pitoiset et al., 1999].

Die erreichbare Genauigkeit wird bei dieser Vorgehensweise durch den bei der Kompression gezielt herbeigeführten Verlust an Informationsgehalt über die Beanspruchung beeinflusst und dadurch gegenüber der direkten Rechnung im Zeitbereich eingeschränkt. Eine Korrelation zwischen charakteristischen Schädigungsereignissen und zugehörigen Fahrmanövern oder Betriebszuständen kann nicht hergestellt werden. Durch die sensor-nahe Berechnung der Fouriertransformation entsteht dort ein entsprechender Bedarf an Rechenleistung, der jedoch noch vertretbar erscheint.

Die Ergebnisse der Zählung aus dem Zeit- und Frequenzbereich sind vergleichbar [Stichel und Knothe, 1998]. Es ist auch möglich, die beiden Methoden innerhalb einer Berechnung zu integrieren.

### 4.3 Modelle der Schädigungsrechnung

Modelle der Schädigungsrechnung können im Kontext der Funktionsanalyse (vgl. Abschnitt 3.5.2) betrachtet werden. Bezüglich der Funktion „*Beanspruchung ermitteln*“ werden zwei Möglichkeiten:

- direkte Messung der kritischen Beanspruchung
- Berechnung der kritischen Beanspruchung aus Messungen anderen Zustandsgrößen

unterschieden, während für Funktion „*Schädigung berechnen und akkumulieren*“ die Auswahl

- direkte Berechnung der Schädigung aus Zeitsignalen der Beanspruchung
- Berechnung der Schädigung aus komprimierten Signalen, z. B. Rainflow-Kollektiven, der Beanspruchung

besteht. Somit erhält man vier Kombinationsmöglichkeiten, wobei im Fall der Kombination von „*Berechnung der kritischen Beanspruchung*“ und „*Berechnung der*

*Schädigung aus komprimierten Signalen*“ sich noch Varianten ergeben, je nachdem, wann die Datenkompression, bzw. Kollektivbildung erfolgt. Tabelle 4-1 zeigt eine Übersicht der Alternativen, wobei noch eine fünfte Möglichkeit, das „Konzept der use-cases“, aufgenommen wurde. Die verschiedenen Vorgehensweisen werden in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert, wobei insbesondere ihre jeweiligen Vor- und Nachteile anhand der Kriterien

- Online-Fähigkeit (z. B. der Lebensdauerrechnung, des Modelleinsatzes),
- Rechenlast (online/offline Modus),
- Speicherplatzbedarf,
- Zeitliche Korrelation Belastung/Beanspruchung,
- Adaption des Modells,
- Einsetzbarkeit für verschiedene Bauteile,
- Realisierbarkeit und Aufwand,
- Kommunikations-Bandbreite, und
- Genauigkeit (Aussagequalität)

beurteilt werden. Es muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass die hier vorgestellten Methoden nach Bedarf in einem System kombiniert werden können.

*Tabelle 4-1 Übersicht verschiedener Konzepte von Systemen zur Lebensdauerbeobachtung*

		<b>Beanspruchung ermitteln</b>	
		<b>direkte Messung</b>	<b>Berechnung aus Messungen anderer Zustandsgrößen</b>
<b>Schädigung berechnen und akkumulieren</b>	<b>direkte Berechnung aus Zeitsignalen der Beanspruchung</b>	Direkte Vorgehensweise im Zeitbereich	Modellgestützte Vorgehensweise im Zeitbereich
	<b>Berechnung aus komprimierten Signalen</b>	Direkte Vorgehensweise mit komprimierten Daten	Modellgestützte Vorgehensweise mit komprimierten Daten
	<b>Konzept „Use-Cases“</b>	Modellgestützter Datenvergleich zwecks Fallzuordnung	

#### 4.3.1 Direkte Vorgehensweise im Zeitbereich

Diese Vorgehensweise mit transientem Datenfluss kann als die Reinform der Lebensdauerbeobachtung bezeichnet werden. Das Modell wird online angewendet. Die kritischen Beanspruchungen werden direkt ermittelt und aus den vorverstärkten, gefilterten und geeignet aufbereiteten Zeitsignalen der Beanspruchung (z.B. Ermittlung der Umkehrpunkte in der Beanspruchungs-Zeit-Funktion; Omission der kleinen, nicht schädigungsrelevanten Amplituden; Zerlegung der auf Einzelschwing-

spiele) wird die momentane Schädigung sofort berechnet. Eine Kollektivbildung, wie z. B. Rainflow-Zählung o. ä. erfolgt dabei nicht.

Bei dieser Methode ist der Bedarf an Rechenleistung relativ gering, es wird jedoch eine hohe Kommunikationsbandbreite benötigt, um die Sensorsignale zu übertragen, die mit einer ausreichend hohen Frequenz abgetastet werden müssen, um alle schädigungswirksamen Schwingspiele abzubilden. Die erreichbare Genauigkeit bei der Lebensdauerprognose wird nicht durch „ausfiltern“ der Beanspruchungsgeschichte wie bei der Kollektivbildung oder durch die Abbildungsgüte irgendwelcher Modellgleichungen eingeschränkt, sodass diese direkte Vorgehensweise im Zeitbereich hier als beste Lösung erscheint.

Wesentliche Nachteile dieser Methode bestehen darin, dass die entsprechenden Sensoren zusätzlich benötigt werden und demzufolge ein großer Aufwand an Messverstärkern, Kompensationsmitteln, Verkabelung usw. anfällt. Der Umfang der zu verarbeitenden Zeitdaten mit hier schon erwähnten Kommunikationsbandbreiten kann u. U. die gewünschte Überwachung an mehreren Punkten der Struktur einschränken.

Bei vorliegenden Zeitsignalen der Beanspruchung in nicht komprimierter Form sind Rückschlüsse auf die Auswirkung von Fahrmanövern möglich, z.B. Überfahren einer Bordsteinkante/Weiche mit einer bestimmten Geschwindigkeit verursacht eine bestimmte Schädigung in der Struktur. Diese Möglichkeit ist jedoch mit einem enormen Bedarf an Speicher verbunden, da auch Fahrmanöver als ein synchroner Zeitschrieb vorliegen müssen.

#### 4.3.2 Modellbasierte Vorgehensweise im Zeitbereich

Diese Vorgehensweise unterscheidet sich von der direkten Vorgehensweise nur insofern, als die kritischen Beanspruchungen nicht direkt gemessen werden, sondern aus Messungen anderer Zustandsgrößen oder aus Messungen der Belastung ermittelt werden. Durch die dabei in Echtzeit erfolgende Auswertung der Modellgleichungen entsteht ein relativ hoher Bedarf an Rechenleistung. Die erforderliche Kommunikationsbandbreite ist ähnlich hoch wie bei der direkten Vorgehensweise im Zeitbereich.

Die erreichbare Genauigkeit wird durch die Qualität des Modells eingeschränkt. Hier ergibt sich ein Konflikt zwischen einer möglichst hohen Modellgüte – die in der Regel zu hoher Genauigkeit und zu einem sehr hohen Rechenleistungsbedarf führt – und einer möglichst einfachen Modellstruktur – die weniger Rechenleistung benötigt, aber in der Regel keine besonders hohe Genauigkeit ermöglicht.

Durch das Vorliegen eines Modells, mit dem Belastungen, bzw. Zustandsgrößen in Beanspruchungen umgerechnet werden können, kann man in der Regel eine relativ

gute Kenntnis des Zusammenhangs zwischen Fahrmanövern, bzw. Betriebszuständen und besonders relevanten Schädigungsereignissen erlangen. Bei der indirekten Bestimmung der Beanspruchung können viele unterschiedliche Messgrößen benutzt werden, wie z. B. Beschleunigungen, Abstände und Verformungen, elektrische Ströme usw. Vorausgesetzt ist jedoch, dass sie auf bestimmte Weise mit der Beanspruchung in den zu betrachtenden Elementen korreliert sind. Die Schwierigkeit dieser Methode besteht darin, dass sehr komplizierte (und demzufolge aufwändige und teure) mathematische Modelle erforderlich sind, um die Schädigungsrechnung durchzuführen.

Die Beanspruchungsermittlung kann bei dieser Vorgehensweise mithilfe eines dynamischen Modells des Systems (z. B. Mehrkörpermodell) und/oder eines FE-Modells erfolgen. Als Input dienen hier die Zeitabläufe der System-Lasten und Geometriedaten. Als Ergebnis der Beanspruchungsermittlung bekommt man dann Spannungen an kritischen Stellen als Funktion der Zeit. Diese Daten werden dann vor der eigentlichen Schädigungsberechnung noch gefiltert bzw. angepasst. Anhand dieser Daten wird die Schädigungsrechnung durchgeführt, wobei als Input auch Materialkennndaten (ertragbare Beanspruchung) benötigt werden.

Eine entsprechende FEM/MKS-Simulation kann auch dazu verwendet werden, um schon auf den rechnerischen Modellen zu testen, inwieweit die im Modell vorhandenen Kräfte, Spannungen, Beschleunigungen bzw. Verformungen miteinander korreliert sind. Wenn die entsprechenden Beziehungen vorliegen, kann z. B. anhand der Beschleunigungsmessung an bestimmten Punkten der Struktur eine Aussage über die Beanspruchung gemacht werden. Bei den MKS-Simulationen soll das mögliche flexible Verhalten der zu überwachenden Struktur berücksichtigt werden. Daraufhin weist [Knothe et al., 1996] in seiner Beschreibung der MKS-Simulation eines Drehgestells. Dies beeinflusst die Berechnung von Belastungen und die simulierten Ermüdungserscheinungen.

#### 4.3.3 Direkte Vorgehensweise mit Datenkomprimierung

Die Beanspruchungen werden bei dieser Vorgehensweise direkt ermittelt. Die Schädigungsberechnung erfolgt aber nicht anhand der Zeitsignale, sondern anhand von Lastkollektiven, Rainflow-Matrizen, oder anderen aus den Zeitsignalen gebildeten komprimierten Daten. Die wichtigsten Möglichkeiten zur Datenkompression sind:

- Rainflow-Zählung
- Bildung von Belastungskollektiven
- Fouriertransformation
- andere moderne Techniken – z. B. MPEG-Standard.

Die Daten werden online komprimiert und anschließend weiter verarbeitet, um eine für die Schädigungsrechnung geeignete Form zu bekommen (Beanspruchungskollektive, Rainflow-Matrix). Diese Phase der Verarbeitung kann sowohl online als offline erfolgen, die Daten können dabei nach Bedarf dekomprimiert werden. Anschließend wird die Schädigungsberechnung durchgeführt.

Es ist nicht ohne weiteres möglich, Korrelationen zwischen besonders relevanten Schädigungsereignissen und zugehörigen Fahrmanövern oder Betriebszuständen herzustellen. Dies gelingt nur dann, wenn sowohl die momentane Schädigung als auch entsprechende Daten über Fahrmanöver oder Betriebszustände geeignet protokolliert werden. Offen bleibt die Frage der modellbasierten Transformation der Kollektive (nichtlineare Zusammenhänge usw.)

Die Bandbreite des Informationsflusses hängt stark davon ab, in welchem Prozessschritt die Datenkompression durchgeführt wird. Die Methode ist relativ rechenzeitintensiv (Online-Kompression/Kollektivbildung). Da nur die Daten in Kollektivform gespeichert werden, ist dafür der Bedarf an Speicher relativ gering. Dabei können die Berechnungsmodelle zu einem späteren Zeitpunkt modifiziert und neu angewendet werden.

#### 4.3.4 Modellbasierte Vorgehensweise mit komprimierten Daten

Bei dieser Vorgehensweise können die gleichen Kompressionsverfahren angewendet werden wie bei der direkten Vorgehensweise mit komprimierten Daten. Dabei erfolgt die Kompression:

- vor Anwendung des Modells, d. h. man komprimiert die Belastungen. In diesem Fall wird das Modell genutzt um eine komprimierte Form der Beanspruchung zu berechnen, wobei als Eingangsgröße eine komprimierte Form der Belastung gegeben ist. Dies ist in der Regel nur möglich, wenn ein linearer Zusammenhang zwischen Belastung und Beanspruchung vorliegt.
- nach Anwendung des Modells.

Bei der zweiten Methode ergeben sich ähnlich hohe Anforderungen an die Rechenleistung wie bei der modellbasierten Vorgehensweise im Zeitbereich, da die Berechnung der Beanspruchung anhand der – in der Regel hochfrequent abgetasteten – Zeitsignale der Belastungen erfolgen muss. Bei der ersten Methode genügt es bei linearen Systemen, mit Übertragungsfunktionen zu arbeiten, die nur einmal vorab berechnet werden müssen, und die Berechnung der Frequenzspektren der kritischen Beanspruchung aus den Frequenzspektren der Belastungen reduziert sich auf die Auswertung eines Matrizenproduktes. Die Sensordaten werden wie im Fall der transienten Analyse mit dynamischem Modell des Systems und FE-Modell verarbeitet. Die auf diese Weise ermittelten Frequenzspektren für lokale Spannungen werden dann der Schädigungsberechnung unterzogen. Das Spektrum der

Beanspruchung kann beispielsweise aus der spektralen Leistungsdichte der Belastungen berechnet werden.

Die Methode ist rechenzeitintensiv. Durch fehlende zeitliche Korrelation zwischen Belastung und Beanspruchung sind auch hier keine Rückschlüsse zwischen Fahrmanöver und Beanspruchungen möglich. Das FE-Modell wird aber offline angewendet – die Transferfunktionen werden nur einmalig berechnet. Auch die Anforderung an den Speicherplatz bleibt gering.

Die modellbasierte Beanspruchungsermittlung, bestehend aus einem MKS-Modell und einem FE-Modell, bietet eine Alternative zum Versuch. Die Bauteilbeanspruchungen können anhand synthetischer Fahrmanöver oder Teststrecken berechnet werden. Diese Vorgehensweise kann auch später dazu benutzt werden, die Beanspruchungsermittlung im Betrieb anhand vorhandener Daten durchzuführen. Zwischen diesen beiden Modellen muss eine Schnittstelle vorgesehen werden, die einen zuverlässigen Informationsaustausch erlauben kann. Die entsprechenden Ergebnisse aus der FE-Berechnung und MKS-Simulation sollten vor der Auslegung eines Lebensdauerbeobachters vorhanden sein. Auf diese Weise kann die Überwachung der Struktur auf entsprechende Schwachstellen fokussiert werden. Vorteilhaft ist in diesem Fall auch, dass die Ergebnisse der Lebensdauerberechnung anhand von FE-Modellen oder MKS-Simulationen vorliegen. In diesem Fall kann das Überwachungskonzept auf der rechnerischen Lebensdauervorhersage basieren (z. B. gleiche Auswertung von auftretenden Kräften, gleiche Zählung usw.) So kann direkt die rechnerische Simulation mit der wirklichen Beanspruchung verglichen werden.

#### 4.3.5 Konzept der Use-Cases

Diese Vorgehensweise setzt voraus, dass es bestimmte, typische und immer wiederkehrende Belastungs- und Betriebszustände gibt, die man anhand charakteristischer Merkmale der Belastungen, Beanspruchungen oder anderer System- oder Zustandsgrößen erkennen kann. Diese Belastungs- bzw. Betriebszustände werden in Form von *Templates* (Schablone, Vorlagen) zusammengefasst. Immer wenn ein Use-Case als aktueller Betriebszustand erkannt wird, verzichtet man darauf, die Zeitverläufe oder Spektren der Beanspruchung im Betrieb zu verfolgen und berechnet die eintretende Schädigung anhand der Dauer und Art des zugeordneten Template. Wenn die den jeweiligen Use-Cases entsprechenden Schädigungsraten vorab offline berechnet wurden, kann so eine sehr schnelle und einfache Online-Schädigungsberechnung erfolgen. Im Betrieb muss dann nur noch erkannt werden, welcher Use-Case gerade vorherrscht und wie lange er anhält, um die zugehörige Schädigung abzuschätzen.



Die Use-Cases werden idealerweise nur durch wenige, gut zu erfassende Merkmale charakterisiert. So könnte man sich z. B. im Falle eines Kraftfahrzeuges vorstellen, anhand der momentanen Fahrgeschwindigkeit und eines Beschleunigungssignals, das z. B. an einer Fahrwerkskomponente gemessen wird, um zwischen Stadt-, Landstrassen- und Autobahnfahrt zu unterscheiden. Die standardmäßigen Benutzungsfälle werden im Betrieb online aus den Zeitverläufen der Belastungen identifiziert. Die Identifikation von Use-Cases kann z. B. auf Korrelation zwischen verschiedenen Sensorsignalen oder Überschreitungen von Schwellwerten (Grenzbedingungen) basieren. Die Use-Cases werden dann abgespeichert, entweder in klassifizierter (zugeordneter) oder unerkannter Form (sog. Event), wenn die Klassifizierung nicht eindeutig möglich ist. Die klassifizierten Fälle werden dann offline den Standardkollektiven zugeordnet. Wenn den jeweiligen Fällen entsprechende Schädigungsraten zugeordnet sind, kann dann der resultierende Schädigungszuwachs aus der Zeit im jeweiligen Betriebsmodus errechnet werden.

Ein gewisses Problem bereiten Belastungsverläufe oder Betriebszustände, die keinem Use-Case zugeordnet werden können. Falls es solche singulären Ereignisse gibt, die signifikant zur Schädigung der Struktur beitragen, muss man eine kombinierte Vorgehensweise anwenden, bei der die Schädigung infolge der Use-Cases online, und die Schädigung durch die „events“ separat ermittelt wird, z. B. durch Registrierung der während des Events aufgetretenen Signale und spätere Offline-Berechnung der daraus resultierenden Schädigung. Die Belastungsverläufe, die keinem Standard Use-Case zugeordnet werden können, können z. B. mit einer modellbasierten Kollektivbildung weiterverarbeitet werden.

Bei der Erkennung von Use-Cases können neuronale Netze eine wichtige Rolle spielen, wie verschiedene Beispiele aus der Luft- und Raumfahrttechnik bereits zeigen. Das neuronale Netz muss vorher mit den Betriebsdaten und Messungen angelernet werden; diese Prozedur kann an einem voll instrumentierten Versuchsfahrzeug durchgeführt werden. Im späteren Betrieb werden dann nur noch die Daten aus den vorhandenen Betriebsdaten ausgewertet.

Die Offline-Berechnung erlaubt die Anpassung von Modellen, die Genauigkeit der Methode hängt jedoch stark von der Anzahl der vordefinierten Templates ab.

#### 4.3.6 Vergleichende Bewertung

Tabelle 4-2 zeigt eine vergleichende Bewertung der verschiedenen Vorgehensweisen anhand der am Anfang formulierten Kriterien. Dabei ist zu beachten, dass es sich um pauschale und grob verallgemeinerte Aussagen handelt. Dennoch können die jeweiligen Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren auf diese Weise halbwegs zutreffend charakterisiert werden.

*Tabelle 4-2 Bewertung verschiedener Konzepte für Systeme zur Lebensdauerbeobachtung*

	Online-Eignung	Rechenlast	Speicherlast	Zeitliche Korrelation zwischen Belastung und Beanspruchung	Einsetzbarkeit für verschiedene Bauteile	Realisierbarkeit	Finanzieller Aufwand	Kommunikations-Bandbreite	Genauigkeit
<b>Direkte Vorgehensweise im Zeitbereich</b>	hoch	gering	hoch <sup>4</sup>	hoch	mittel	hoch	hoch	hoch	hoch
<b>Modellbasierte Vorgehensweise im Zeitbereich</b>	gering	hoch	hoch	mittel	gering	mittel	mittel	hoch	mittel
<b>Direkte Vorgehensweise mit komprimierten Daten</b>	mittel	gering	gering	gering	mittel	mittel	hoch	mittel	mittel
<b>Modellbasierte Vorgehensweise mit komprimierten Daten</b>	gering	hoch	gering	gering	gering	gering	mittel	mittel	gering
<b>Konzept der „Use-Cases“</b>	hoch	gering	mittel	mittel	hoch	hoch	gering	gering	gering

Tabelle 4-3 fasst die Bewertungskriterien für die verschiedenen Datenkomprimierungsmethoden in Bezug auf den Zeitpunkt der Datenkomprimierung zusammen.

<sup>4</sup> Es wird angenommen, dass die Zeitdaten gespeichert werden, um weiter verwendet zu werden, z. B. zur Untersuchung zeitlicher Korrelation zwischen Belastung und Beanspruchung.

Tabelle 4-3 Bewertungskriterien für die verschiedenen Datenkomprimierungsmethoden

		Zeitpunkt der Datenkomprimierung	
		<i>früh</i>	<i>spät</i>
Art der Datenkomprimierung	FFT (Vorgehensweise im Frequenzraum)	(+) wenig Speicherplatz notwendig (+) keine Online-Anwendung des FE-Modells (+) einmalige Berechnung der Transferfunktionen (-) rechenzeit-intensiv (-) keine zeitliche Korrelation Belastung/Beanspruchung (-) nur reine bauteilspezifische Beanspruchungen möglich (-) empirischer Übergang Leistungsdichte - Verteilungsfunktionen	
	Rainflow-Zählung, Belastungskollektive	(+) Adaption des Modells möglich nachträgliche Lebensdauerberechnung beliebiger Bauteile (-) Realisierbarkeit (nichtlineare Transformation Beanspruchung-Belastung) (-) Keine zeitliche Korrelation Belastung-Beanspruchung	(+) wenig Speicherplatz notwendig (-) rechenzeit-intensiv (-) nur reine bauteilspezifische Beanspruchungen möglich (-) große Belastung des Informationsbusses
	andere Komprimierungsmethoden (z. B. MPEG)	(+) Berechnung Beanspruchungs-Zeitverläufe offline (+) zeitliche Korrelation Belastung-Beanspruchung (+) Adaption des Modells möglich nachträgliche Lebensdauerberechnung beliebiger Bauteile geringere Rechenleistung (-) relativ viel Speicherplatz notwendig (-) Methoden in der Lebensdauerüberwachung noch nicht eingesetzt	

#### 4.4 Informationsfluss in Sensorbussystemen

Das Gesamtsystem besteht aus vielen Elementen, zwischen einzelnen Elementen dieses Systems muss der gewünschte Informationsfluss gewährleistet werden. Ein Leitungssystem zum Austausch von Daten und/oder Energie zwischen potenziell mehr als zwei Teilnehmern bezeichnet man als Bus. Dabei können mit einem Bus verschiedene Geräte verbunden werden: Sensoren, Prozessoren, Datenbanken und Anzeigen.

Die Anforderungen an ein Bussystem lassen sich wie folgt auflisten:

- Bereitstellung eines geeigneten Übertragungsmediums, an das alle Busteilnehmer angeschlossen werden müssen
- Sicherstellung der Identifikation (Adressierung)
- Implementierung eines geeigneten Buszugriffsverfahrens (wann und wer auf den Bus zugreifen darf)
- Sicherstellung der Datensicherheit durch Einsatz von geeigneten Fehlererkennungsmechanismen
- Bereitstellung ausreichender Kapazität für die gewünschten Datenmengen
- Übertragung von notwendigen Datenklassen (Stellsignale, Sensorwerte, Signalverarbeitungsparameter usw.)
- Entsprechende Datenschnittstellen zu weiteren Prozessebenen.

Bei der Betrachtung einer Lösung für die Informationsübertragung sollen folgende Aspekte näher betrachtet werden:

- Kosten des Bussystems
- notwendige Übertragungskapazität (parallele Busse sind z. B. schneller als serielle)
- Sicherheit der Daten (Redundanz der Datenübertragung)
- Die zu überbrückende Distanz (z. B. mehrere hundert Meter im Zug)
- Flexibilität (serielle Busse sind z.B. universeller als parallele, da sie einfach um einen neuen Busteilnehmer erweitert werden können)
- Zuverlässigkeit.

Auf dem Markt gibt es mehrere Buskonzepte, die für bestimmte Aufgaben eingesetzt werden können. Schnelle Entwicklung von solchen Konzepten steht im engen Zusammenhang mit der allgemeinen Entwicklung der Informatik. Beispiele für Bussysteme sind: P-NET, Profibus, Bitbus, Interbus-S, CAN, DIN-Messbus, LON, ASI. Für manche Anwendungen können jedoch spezielle Konzepte entwickelt werden.

Der Aufbau der Messkette kann abhängig von den verwendeten Elementen stark variieren. Die einzelnen Elemente können auch ggf. in einer Einheit integriert

werden. Unabhängig davon, muss an der Schnittstelle zum Bus ein standardisiertes Signal vorliegen, nur so ist ein einfacher Informationsaustausch möglich.

Alle Teilnehmer des Informationsflusses sind durch einen gemeinsamen Bus verbunden. Als Übertragungsweg dienen typischerweise elektrische Leitungen, Lichtwellenleiter oder ein Funkkanal. Die Datenübertragungsstruktur kann dabei sternförmig (Verbindung einzelner Teilnehmer mit der Zentraleinheit mithilfe getrennter Übertragungsleitungen) oder ringförmig (ringförmige Verbindung der Teilnehmer, Daten können nur an den benachbarten Teilnehmer versendet werden) ausgeführt werden.

Außer „normaler“ Funktion der Datenübertragung müssen im Bus auch spezifische Funktionen implementiert werden, wie z. B. Funktion des Alarmgebers (die gewünschte Priorität für sicherheitsrelevante Meldungen) und Kontrollfunktion (Überwachung der fehlerfreien Datenübertragung, Überwachung der fehlerfreien Funktion von Sensoren, ggf. Freigabe des Busses auf Teilnehmeranforderung).

#### 4.4.1 Sensorbussysteme

Der Begriff Sensorbussystem bezieht sich auf ein Bussystem, das Sensoren mit integrierter Sensorbusschnittstelle beinhaltet. Damit sind mehrpunktfähige Übertragungsverfahren und Vernetzung von Sensoren auf binärer, bitserieller Basis bezeichnet. Es können mehrere Sensoren an einen gemeinsamen Bus angeschlossen werden. Der Sensorbus dient typischerweise zur reinen Abfrage der im System installierten Sensoren. Es werden alle Signale, Messwerte, Parameter etc. versandt. Aber auch Aktoren, Regelkreise und Steuergeräte können mit diesem Bus verbunden werden (Sensorbus zur Prozessregelung mit überlagerter Messdatenerfassung). Die Sensorinformationen werden mit konstanter oder variabler Abfragerate gewonnen. Im Unterschied zu Sensorbussen umfassen die Feldbusse alle Vernetzungsebenen von direkten Sensor- und Aktorbereichen bis zur Vernetzung von speicherprogrammierten Steuerungen. Zwischen diesen beiden Begriffen bestehen nur quantitative Unterschiede, qualitativ sind es gleiche Verfahren.

Die Bussysteme können in Teilnetze aufgeteilt werden. Das bietet sich insbesondere dann, wenn verschiedene Baugruppen modular verbunden werden (z. B. Einzelachs-fahrwerk im Shuttle) oder wenn verschiedene Überwachungskonzepte miteinander gekoppelt werden. Die Teilnetze werden mit sog. Bridges oder Gateways verknüpft. Die Teilnetze können dabei unabhängig entwickelt und erst dann zu einer funktionierenden Struktur verbunden werden. Die Bridges können die Netze mit gleicher Datenstruktur verbinden, die Gateways können noch zusätzlich die Protokolle umwandeln.

Der schematische Aufbau eines Busteilnehmers ist in Bild 4-6 dargestellt. Der busunabhängige Teil des Busteilnehmers kann typischerweise ein Sensor sein (siehe auch Abschnitt 4.1.2), für die Busankopplung muss allerdings das digitale Ausgangssignal vorhanden sein. Die Busschnittstellen müssen auf mechanischer, elektrischer und logischer Ebene die Anschlussbedingungen erfüllen.

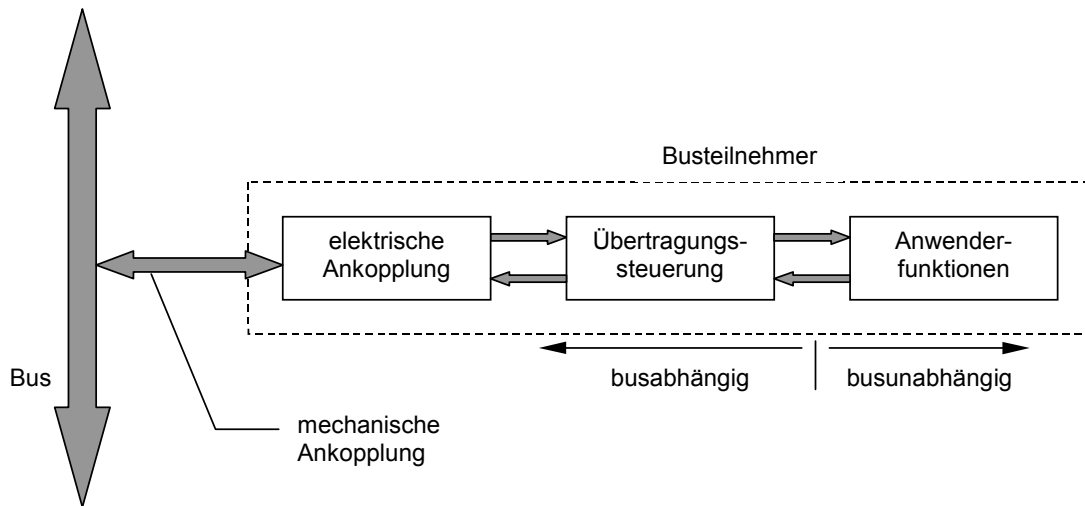


Bild 4-6 Schematischer Aufbau eines Busteilnehmers, nach [Pfeiffer, 1998]

#### 4.4.2 Datenübertragung

Das Kommunikationssystem wird in der Norm [DIN EN ISO/IEC 7498] in sieben Schichten aufgeteilt. Es sind: *Physical Layer*, *Data Link Layer*, *Network Layer*, *Transport Layer*, *Session Layer*, *Presentation Layer* und *Application Layer*. Im Feldbusbereich wird oft nur ein vereinfachtes Modell mit vier Schichten benutzt. Die erste Ebene (*Physical Layer*) entscheidet über das zu verwendende Busmedium und die Übertragungsparameter. Die zweite Ebene (*Data Link Layer*) übernimmt die Vorbereitung der Daten zum Versenden und die Regelung des Buszugriffs. Die dritte Ebene (*Network Layer*) hat die Bridge-Funktion. Die letzte, siebte (*Application Layer*) beschreibt die Bedienung des Busanschlusses durch das Anwendungsprogramm.

Als *Physical Layer* (Datenübertragungsschicht) können folgende Medien dienen:

- Kabelverbindungen (z. B. verdrehte Leitungspaare/twisted pairs; Koaxialkabel)
- Lichtwellenleiter (Vorteil: Signale werden nicht durch elektrische oder magnetische Felder beeinflusst, aber zusätzliche Signalumformungen sind notwendig)
- Drahtlose Medien (Funk, Infrarot).

Die Übertragung der Signale kann wie folgt erfolgen:

- Amplitudenanaloge Übertragung
- Frequenzanaloge Übertragung
- Digitale Übertragung.

Heutzutage gewinnt die digitale Übertragung an Bedeutung. Zur digitalen Übertragung wird oftmals ein PCM (Pulse Codemodulation) Verfahren verwendet (geringste Bandbreite, kleinste Sendeleistung). Das Verfahren kann parallel oder seriell eingesetzt werden. Am meisten wird, dank der Flexibilität und niedrigen Kosten, die serielle Übertragung benutzt.

Die seriellen Busse werden durch folgende Merkmale charakterisiert:

- Art des Multiplexverfahrens (Frequenzmultiplex/Zeitmultiplex)
- synchrone/asynchrone Übertragung
- kontrollierter oder zufälliger Zugriff
- verteilte oder zentrale Kontrolle.

Die Übertragungspriorität wird durch die Wahl des Multiplexverfahrens geregelt. Im Zeitmultiplex-Verfahren findet die Zuteilung mit festem Zeitraster und bedarfsabhängig statt. Bei dem Frequenzmultiplex-Verfahren sind für die Teilnehmer die Frequenzbereiche fest definiert. Die Bus-Arbitrierung muss gewährleisten, dass es zu keinen Buskonflikten kommt und dass jeder Teilnehmer entsprechende Daten versenden kann. Die Zuteilungslogik kann dabei zentral oder dezentral (durch Teilnehmer) bestimmt werden. Die Übertragungsregeln müssen definiert und dann entsprechend eingehalten werden.

### **Fehler bei der Datenübertragung**

Fehler können sowohl bei analoger als auch digitaler Signalübertragung auftreten. Die Störeffekte, die diese Fehler verursachen, können außerhalb des Netzes (äußere Beeinflussung) oder im Inneren des Systems (Störeffekte im eigenen Netz) liegen.

Unter anderem können folgende äußere Einflüsse (insbesondere in Bezug auf den mobilen Einsatz des Lebensdauerbeobachters) eine potentielle Störquelle sein:

- Temperatur
- mechanische Erschütterung
- Schwankungen in Versorgungsspannung
- elektrische oder magnetische Felder
- Witterungsbedingungen.

Störeffekte im eigenen Netz können z. B. Rauschen, mechanische Kontaktprobleme etc. sein. Fehler bei der digitalen Übertragung müssen aus der wahrscheinlichkeitsorientierten Sicht betrachtet werden (Wahrscheinlichkeit einer Null statt Eins). Durch Störung können invertierte Bits gelesen werden. Um das Störpotenzial zu verringern, werden beim Digitalsignal bestimmte Maßnahmen ergriffen. Das digitalisierte Signal

(Messsignal) wird um sog. Standardbits (z. B. Adressebits, Steuerbits) erweitert. Diese so genannten Nutzbits können dann mit speziellen Bits zur Fehlererkennung ergänzt werden. Ein Beispiel für solche Prozedur ist CRC-Fehlererkennung (*Cyclic Redundancy Check*). In diesem Fall wird die Hauptsequenz um eine CRC-Sequenz erweitert. Andere Möglichkeiten, wie z. B. Paritätsprüfung oder Zeitüberwachung beim Sender (*Time-Out*) können auch verwendet werden.



## 5 Prototypische Umsetzung

Im Folgenden wird die ausgewählte Lösung implementiert und im Experiment getestet. Ausgewählte Beispiele für die prototypische Umsetzung des Lebensdauerüberwachungskonzeptes werden dargestellt. Im ersten Abschnitt werden die Berechnungsprozeduren und Algorithmen zusammengestellt und einige Tests mit simulierten Datensätzen beschrieben. In weiteren Abschnitten werden der Aufbau eines Prüfstands zur Lebensdauerüberwachung und der Ablauf eines Experiments dargestellt. Im letzten Abschnitt erfolgt die Validierung der angewendeten Methode, wo die Ergebnisse diskutiert und erste Schlussfolgerungen gezogen werden.

### 5.1 Simulation der Datenaufbereitung

Die im Abschnitt 4.1 bereits beschriebene Informationsverarbeitungskette des Lebensdauerbeobachters kann in der ersten Phase der Entwicklung offline mit simulierten Messergebnissen gespeist werden. Auf diese Weise kann man ohne einen speziellen mechanischen Aufbau die einzelnen Teile der Informationskette testen, den Informationsfluss untersuchen und bereits verschiedene Modelle der Schädigung implementieren. Für diese Zwecke werden Belastungsdaten aus einer Simulation des Verhaltens des Spurführungsmoduls (vgl. Abschnitt 5.3.3) der NBP bei der Fahrt in einer gestörten Gleislage verwendet [Goldschmidt, 2002].

In der numerischen Simulation werden einzelne Subroutinen der WAFO-Toolbox [WAFO, 2003] innerhalb des Softwarepakets Matlab verwendet. In den folgenden Bildern wird die Datenverarbeitung am Beispiel von Spannungen in einem Element des Koppelgelenks (Aktorbefestigung) dargestellt. Die Spannungen an dieser Stelle bekommt man durch eine Umrechnung der simulierten dynamischen Kräfte, die an dieser Stelle später (im Betrieb) für die Zwecke der Regelung gemessen werden. Bild 5-1 stellt die Input-Daten und die Sequenz von Umkehrpunkten nach der Filterung (Omission) von Amplituden kleiner 15 MPa dar.

Auf der Sequenz von Umkehrpunkten wird die Rainflow-Zählung durchgeführt. Bild 5-2 zeigt die Ergebnisse der Rainflow-Zählung in Form von Rainflow-Zyklen und Rainflow-Matrix.

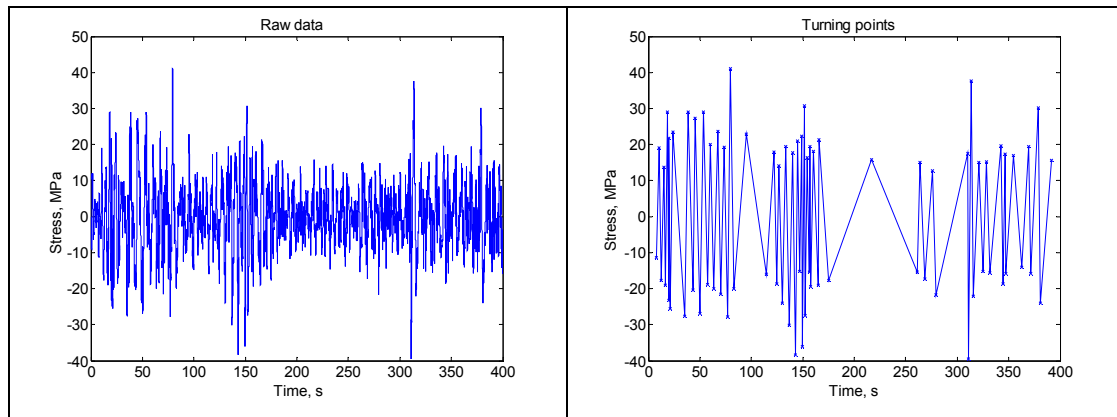


Bild 5-1 Rohe Spannungsdaten (links) und die Sequenz von Umkehrpunkten nach der Omission (rechts, Grenzwert der Amplitude 15 MPa)

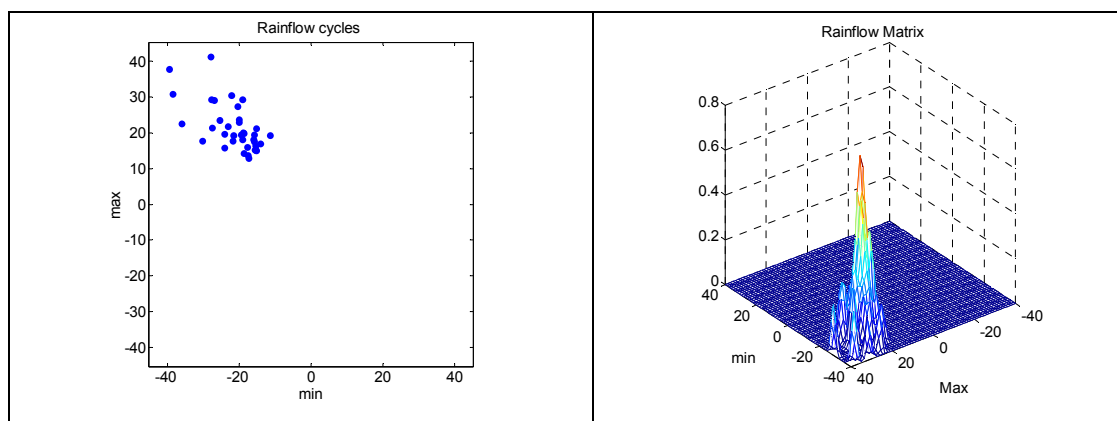


Bild 5-2 Rainflow-Zyklen (links) und Rainflow-Matrix (rechts)

Für die Simulation mit der vorliegenden Beanspruchung (Zeit  $t = 400$  s) wurden auf Basis der linearen Schädigungshypothese folgende Ergebnisse erzielt:

Gesamtschädigung:  $D = 1,49 \cdot 10^{-4}$   
 Schädigungsintensität:  $d_i = 3,73 \cdot 10^{-7}/s$   
 Lebensdauerprognose:  $\tau = 744$  h (Betriebsstunden, unter Voraussetzung gleicher Beanspruchung).

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass für die Zwecke der Simulation als Materialdaten zum Teil fiktive Werte (Schwingungszahl  $N_D = 1 \cdot 10^6$  Schwingungen, dauerfest ertragbare Amplitude  $\sigma_{ad} = 15$  MPa, Neigung der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich  $k = 3,2$ ; vgl. Bild 2-6) angenommen worden sind, um die Schadensakkumulation zu erlauben.

## 5.2 Lebensdauerüberwachung an einem Prüfstand

### 5.2.1 Aufgabenstellung

Bevor die Erprobung des Überwachungskonzeptes an einem Fahrzeug erfolgt, bei der realistische praxisnahe Randbedingungen vorliegen, wurde zunächst ein „akademischer“ Prinzipversuch durchgeführt. Hierzu wurde ein Prüfstand aufgebaut, mit dem ein sehr einfach aufgebautes System unter kontrollierten Randbedingungen untersucht werden kann. In diesen Prüfstand wurde das in der Simulationsphase (vgl. Abschnitt 5.1) getestete System implementiert. Mit diesem Aufbau soll dann eine erste Validierung des Konzeptes erfolgen, wobei sowohl die direkten als auch indirekten Methoden der Überwachung getestet werden sollen. Außerdem soll die Funktion der Informationsverarbeitungskette mit realen Messdaten untersucht werden.

Für den Prinzipversuch muss bereits die gesamte Funktionalität des Lebensdauerbeobachters umgesetzt werden, sodass verschiedene Arten der Beanspruchungsmessung und -ermittlung, der Datenkompression und -übertragung sowie der Schädigungsakkumulation erprobt werden können. Wenn es durch den Einsatz des Lebensdauerbeobachters gelingt, das Ausfallverhalten des Systems zuverlässig und korrekt zu beschreiben, sollte der nächste Schritt darin bestehen, den Lebensdauerbeobachter in eine konkrete Anwendung zu erproben (Vorschläge dazu werden in Abschnitt 5.3 gemacht).

### 5.2.2 Definition der Belastung

Bei der Vorbereitung des Biegeversuchs für die Lebensdauerüberwachung wurden zwei DIN-Normen [DIN 50142] und [DIN 53442] verwendet. Die erste Norm beschreibt den Flachbiegeschwingversuch an Flachproben aus metallischen Werkstoffen. Einzelheiten (wie z. B. Probenform und -maße) sind in dieser Norm nicht festgelegt. Die Probe soll lediglich einen rechteckigen Prüfquerschnitt haben, die Geometrie der Probe richtet sich dabei nach dem Versuchszweck und der vorhandenen Prüfmaschine. Die Norm [DIN 53442] betrifft den Dauerschwingversuch im Biegebereich an flachen Probekörpern bei der Prüfung von Kunststoffen, aber allgemeine Hinweise können auch in diesem Biegeversuch verwendet werden. Dabei wird festgelegt, dass die Prüfmaschine einen konstanten Verformungsausschlag haben soll, das wirksame Biegemoment und die Schwingspielzahl müssen feststellbar sein. Bei jedem eingestellten Verformungsausschlag sind mindestens 5 Probekörper zu prüfen.

Als Basis für die Ermittlung der Beanspruchungen und für die Schadensakkumulationsrechnung dient das Nennspannungskonzept in Verbindung mit einer linearen Schadenskumulierung nach Palmgren-Miner. Diese Kombination ermöglicht es, nach [Radaj, 1995], Ergebnisse zu erhalten, die für Tendenz- und Relativaussagen

zur Lebensdauer direkt geeignet sind. Dieses Konzept gilt als fehlerstabil, da sich kleine Abweichungen in den wenigen einzugebenden Kenngrößen nur geringfügig auf die Lebensdauervorhersage auswirken.

### Materialwahl und -kenndaten

Als Material wurde eine übliche Aluminiumlegierung mit internationaler Bezeichnung EN AW-6060 T6 (frühere Bezeichnung AlMgSi05 F22; wärmebehandelt: lösungsgeglüht und warmausgelagert) ausgesucht. Das Material wurde in Form eines Rechteckprofils mit dem Querschnitt 15 x 40 mm für den Biegeversuch (Biegelänge 720 mm) bestimmt. Die Proben wurden aus dem Pressprofil im Auslieferungszustand zugeschnitten, die Oberfläche wurde nicht nachträglich bearbeitet oder behandelt. Diese Vorgehensweise ist realitätsnah und spiegelt die Praxis wieder, in der verschiedene Konstruktionen direkt aus den gelieferten Materialien gebaut werden. Für die Legierung 6060 T6 liefert [Borrego et al., 2004] experimentell ermittelte mechanische Eigenschaften. Die Normwerke liefern typischerweise keine oder nur wenige Informationen, die für die Lebensdauerrechnung von Bedeutung sind. Die wichtigsten Eigenschaften sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

*Tabelle 5-1 Übersicht der mechanischen Eigenschaften der Aluminiumlegierung 6060 T6*

Formelzeichen	Wert	Bezeichnung (original)	Bezeichnung (deutsch)
$\sigma_{UTS}$	240 MPa	tensile strength	Zugfestigkeit
$\sigma_{YS}$	215 MPa	yield strength	Fließgrenze
$E$	70000 MPa	Young's modulus	E-Modul
$b$	-0,084	fatigue strength exponent <sup>1</sup>	zyklischer Spannungs-Exponent des Werkstoffs <sup>2</sup> <i>Schwingfestigkeitsexponent</i> <sup>3</sup>
$\sigma_f'$	376,5 MPa	fatigue strength coefficient <sup>1</sup>	zyklischer Spannungs-Koeffizient des Werkstoffs <sup>2</sup> <i>Schwingfestigkeitskoeffizient</i> <sup>3</sup>

<sup>1</sup> nach [Borrego et al., 2004]

<sup>2</sup> nach [Haibach, 1989]

<sup>3</sup> nach [Radaj und Vormwald, 2007]

Für Aluminiumlegierungen  $\sigma_U < 325$  MPa wird angenommen, dass  $\sigma_{erb}$  (Dauerfestigkeit bei Biegung, Mittelspannung  $\sigma_m = 0$ ) wie folgt definiert ist:

$$\sigma_{erb} = 0,4 \cdot \sigma_{UTS} = 0,4 \cdot 240 \text{ MPa} = 96 \text{ MPa}$$

Die Wahl der Beanspruchung der Probe ist ein Kompromiss zwischen den mit dem vorhandenen Prüfstand realisierbaren Belastungen einerseits und möglichst kurzer Prüfzeit andererseits. Ein Versuch mit der 2-Stufen-Belastung bietet zusätzlich mehr Spielraum für weitere Tests. Die Stufen sind wie folgt definiert: Stufe I –  $\sigma_{mI} = 120$  MPa,  $\sigma_{aI} = 95$  MPa; Stufe II –  $\sigma_{mII} = 110$  MPa,  $\sigma_{aII} = 95$  MPa. Mit der Reihenfolge I-II werden 5 Prüflinge getestet, 5 weitere Proben werden in der Reihenfolge II-I geprüft. Theoretisch sollte mit jeder Stufe die Hälfte der rechnerisch ermittelten Lebensdauer (Schädigung  $D = 0,5$ ) aufgebraucht werden.

### Einfluss der Mittelspannung

In der Berechnung der Lebensdauer muss der Einfluss der Mittelspannung berücksichtigt werden. Dies ist insbesondere wichtig, da im Experiment eine einseitige Beanspruchung ( $\sigma_m \neq 0$ ) vorgesehen ist. Die Umrechnung der aktuellen Beanspruchung erfolgt nach dem Konzept der äquivalenten Wechsellastspannung  $\sigma_{ar}$  [Dowling, 1999]. Nach diesem Konzept wird eine beliebige Spannung ( $\sigma_a$  beliebig,  $\sigma_m \neq 0$ ) in eine äquivalente Wechsellastspannung  $\sigma_{ar}$  ( $\sigma_m = 0$ ) umgerechnet. Dabei können zwei Methoden der Umrechnung der Mittelspannung verwendet werden: nach Goodman und Morrow (GM) sowie nach Smith, Watson und Topper (SWT). Insbesondere soll die SWT-Methode besser für Aluminiumlegierungen geeignet sein [Dowling, 1999].

Der Zusammenhang zur Berechnung der äquivalenten Wechsellastspannung  $\sigma_{ar}$  nach Goodman-Morrow ist wie folgt definiert [Dowling, 1999]:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{ar}} + \frac{\sigma_m}{\sigma'_f} = 1; \quad (5.1)$$

der Zusammenhang nach Smith, Watson und Topper entsprechend:

$$\sigma_{ar} = \sqrt{\sigma_{\max} \cdot \sigma_a} . \quad (5.2)$$

Die einzelnen Größen sind folgenderweise definiert:

maximale Spannung:  $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$

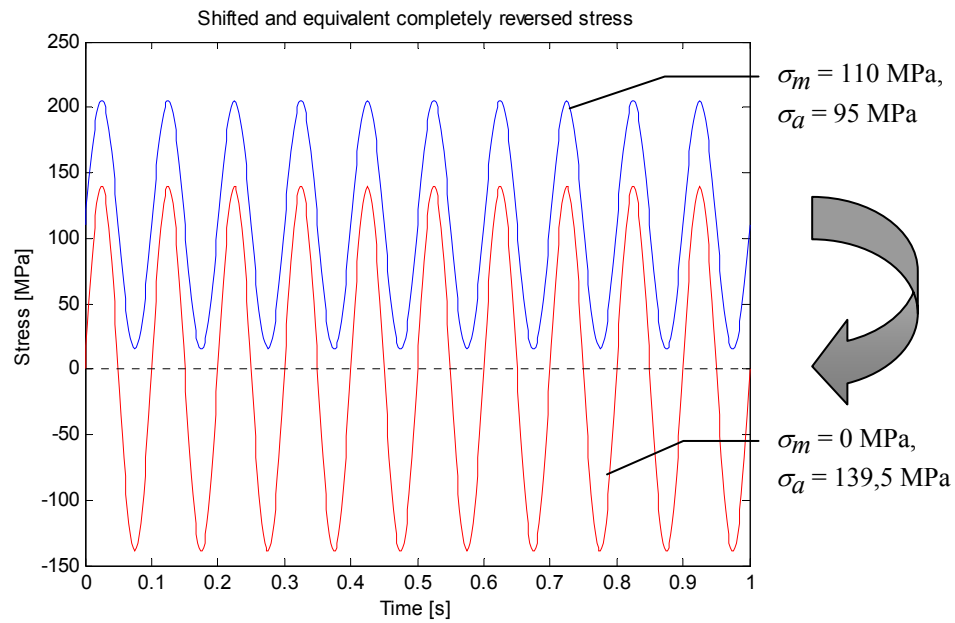
minimale Spannung:  $\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$

Mittelwert der Spannung:  $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} ;$

$\sigma_a$  ist dabei die Spannungsamplitude.

Die im Experiment bzw. in der Berechnung verwendete Werte für  $\sigma_a$ ,  $\sigma_m$  und  $\sigma_{\max}$  werden in diese Formeln eingesetzt um  $\sigma_{ar}$  zu berechnen. Dieser Wert wird dann verwendet, um die Lebensdauer anhand der üblichen Wöhler-Kurven für  $\sigma_m = 0$  zu berechnen.

Das Prinzip der Umrechnung der aktuellen Beanspruchung nach dem Konzept der äquivalenten Wechsellastspannung ist dargestellt in Bild 5-3.



*Bild 5-3 Prinzip der Umrechnung der aktuellen Beanspruchung nach dem Konzept der äquivalenten Wechsellastspannung (Beschreibung im Text)*

Da für viele Materialien entsprechende Kennwerte vorliegen, bietet sich an, den folgenden Zusammenhang zur Berechnung der Lebensdauer (auch Basquin-Gleichung genannt) zu verwenden [Dowling, 1999]. In allgemeiner Form gilt:

$$\sigma_a = \sigma_f' (2N_f)^b \quad (5.3)$$

Die Anzahl der Zyklen bis zur Schädigung  $N_f$  wird dann entsprechend definiert:

$$N_f = \frac{1}{2} \left( \frac{\sqrt{\sigma_{\max} \cdot \sigma_a}}{\sigma_f'} \right)^{\frac{1}{b}} \text{ nach Smith, Watson und Topper (SWT) oder} \quad (5.4)$$

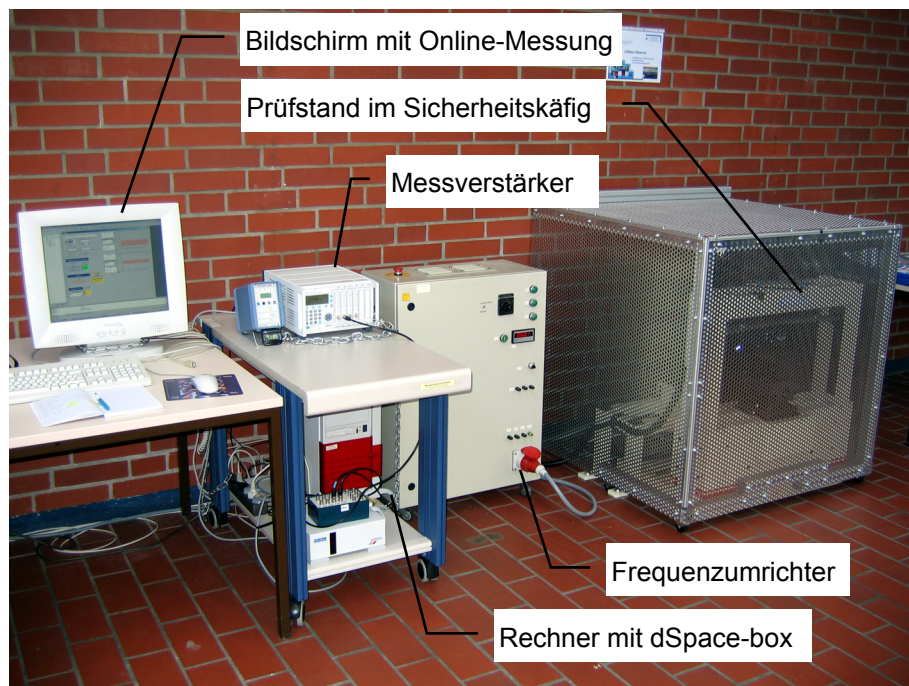
$$N_f = \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_a}{\sigma_f' - \sigma_m} \right)^{\frac{1}{b}} \text{ nach Goodman und Morrow.} \quad (5.5)$$

In weiteren Überlegungen wird die für Aluminiumlegierungen besser geeignete [Dowling, 1999] Lebensdauerrechnung nach SWT verwendet.

In Anlehnung an [DIN EN 6072] sind die berechneten und gemessenen Werte für die einzelnen Proben im Anhang 1 tabellarisch zusammengestellt.

### 5.2.3 Aufbau des Prüfstands zur Lebensdauerüberwachung

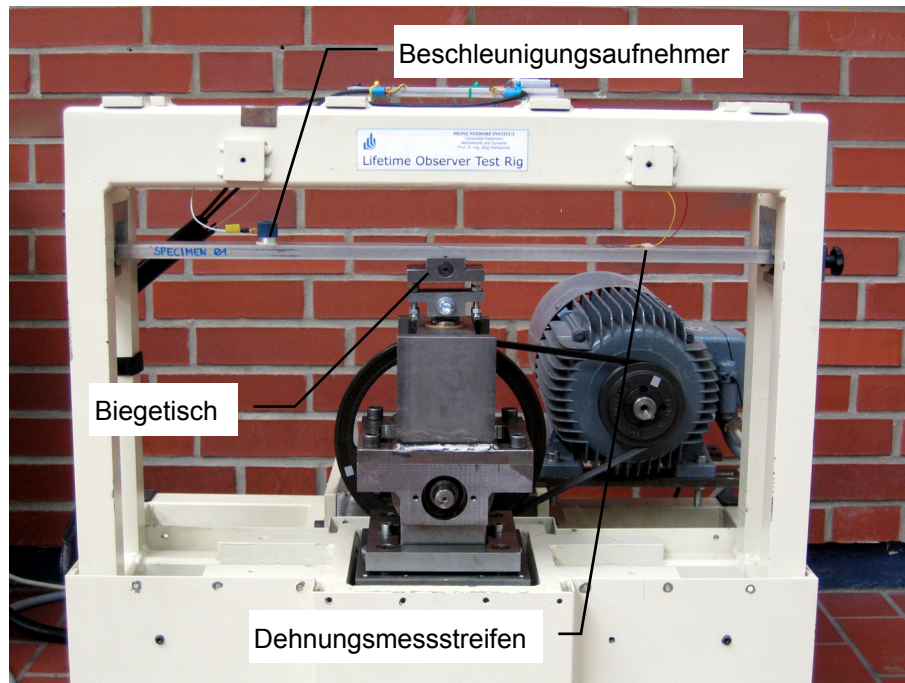
Für den Aufbau des Prüfstands zur Lebensdauerüberwachung wurden einige Teile aus einem existierenden Prüfstand (insbesondere Exzenter-Antrieb und Probeaufnahme) übernommen. Die Wahl dieses Antriebs legt gleichzeitig fest, dass die Versuche dehnungsgeregelt und nicht kraftgeregelt gefahren werden müssen. Auch für andere Parameter im Versuch (z. B. maximale Spannungsamplitude oder Geometrie der Probe) gelten dann bestimmte Randbedingungen. Bild 5-4 zeigt eine allgemeine Ansicht des Prüfstands.



*Bild 5-4 Gesamtansicht des Prüfstands*

Der Elektromotor und der Antrieb wurden so ausgewählt bzw. ausgelegt, dass eine Aluminiumprobe mit der maximalen Breite 40 mm und Dicke 15 mm als Prüfling eingesetzt werden konnte. Die Drehzahl des 5 kW starken Drehstrommotors kann durch einen Frequenzumrichter manuell eingestellt werden. Die notwendige Übersetzung zwischen dem Elektromotor und dem Exzenter ( $i = 2,5$ ) wird durch einen leisen und als Überlastungsschutz gedachten Keilriemenantrieb realisiert.

In Bild 5-5 ist die im Prüfstand eingespannte Probe dargestellt. Die Probe wird im 3-Punkt-Biegeversuch dynamisch beansprucht. Die Vorspannung der Probe kann durch die Einstellung des Biegetisches (4 Schrauben) auf dem geführten Kolben geändert werden.



*Bild 5-5 Eingespannte Probe beim 3-Punkt-Biegeversuch im Lebensdauerprüfstand*

Die Amplitude der Beanspruchung kann durch die Änderung des Exzenterhubs (Bild 5-6) eingestellt werden. Der maximale Wert des Hubs beträgt 15,6 mm.

In Bild 5-7 ist schematisch gezeigt, wie die durch einen Exzenter belastete Probe im Prüfstand eingebaut ist. Dort ist auch die Positionierung der Sensoren für direkte und indirekte Überwachung der Strukturspannungen dargestellt.

Die direkte Messung der Spannung an der Sollbruchstelle diente lediglich zu Testzwecken, der Sensor (Dehnungsmessstreifen) an dieser Stelle versagt noch bevor die ersten Risse (zumindest makroskopisch) sichtbar werden. In dem Testversuch ist der Sensor ca. in der Hälfte der wirklichen Lebensdauer der Probe ausgefallen. Die Anordnung der Sensoren auf der Probe ist in Bild 5-8 dargestellt.



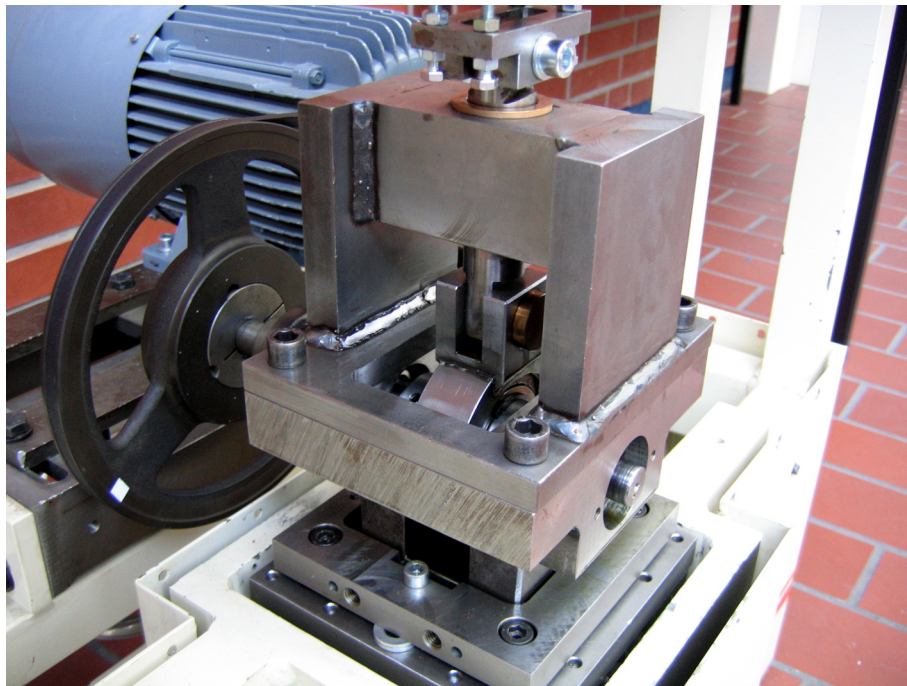


Bild 5-6 Ansicht des Exzenterantriebs

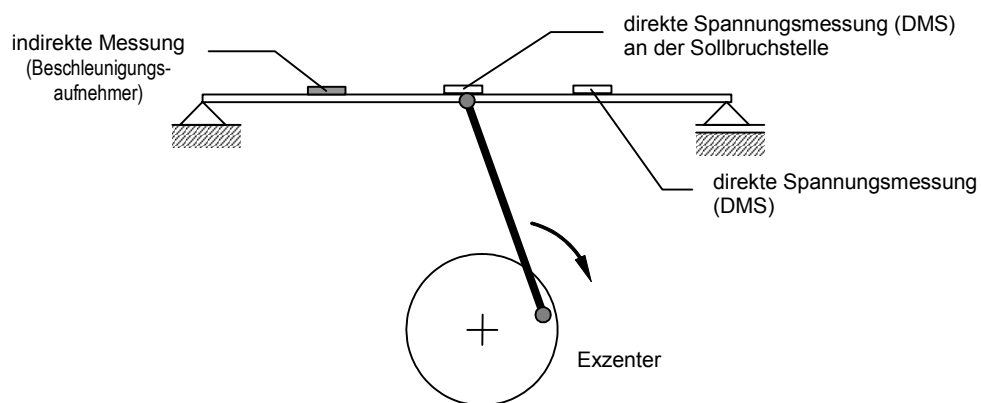


Bild 5-7 Schematische Darstellung der Sensoranordnung an der Probe

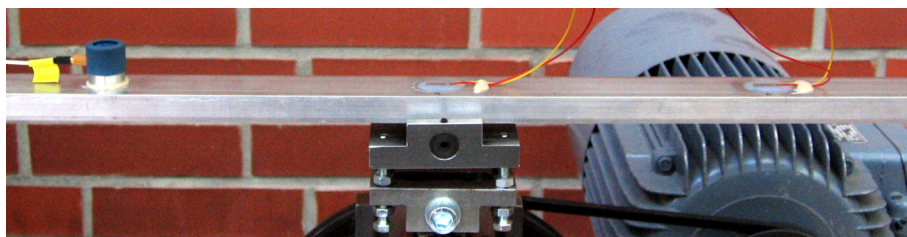
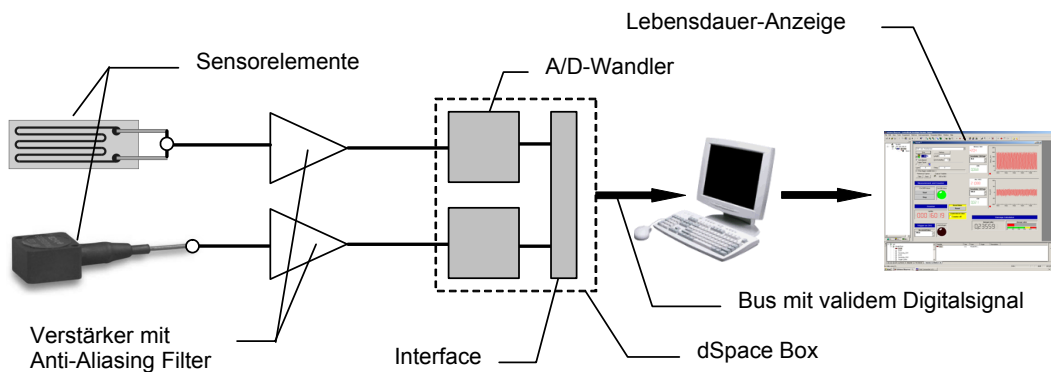


Bild 5-8 Anordnung der Sensoren an der Probe im Testlauf: ein Beschleunigungssensor (links) und 2 DMS (in der Mitte und rechts)

### 5.2.4 Aufbau der Messkette

Der grundlegende Aufbau einer Messkette wurde bereits in Kapitel 4 diskutiert. An dieser Stelle wird der im Testversuch verwendete Messaufbau genauer beschrieben. Eine schematische Übersicht des Messkettenaufbaus ist in Bild 5-9 zu sehen.



*Bild 5-9 Schematische Darstellung der Messkette im Testversuch*

Als Sensorelemente wurden Dehnungsmessstreifen des Typs 6/120LY43 (Hersteller HBM, 6 mm Gitterlänge, Temperaturkoeffizient angepasst für Alu-Legierungen) und ein Beschleunigungsaufnehmer der Fa. PCB des Typs 336C04 mit dem Messbereich 500 g (ca.  $5000 \text{ m/s}^2$ ) verwendet. Die Dehnungsmessstreifen wurden mit einem speziellen Klebstoff auf die Probe appliziert (Kaltklebung). Der Beschleunigungsaufnehmer wurde mittels eines Gewindestifts mit einer auf dem Prüfling geklebten Scheibe verbunden.

Die Dehnungsmessstreifen wurden in der 3-Leiter-Technik verschaltet (Bild 5-10). In dieser Anordnung ist ein DMS aktiv (Messung der Dehnung am Balken), der andere DMS wird nicht belastet und dient lediglich der Temperaturkompensation.

Die Verschaltung der beiden DMS auf der Probe für den Testlauf ist in Bild 5-11 dargestellt. Der Kompensationssensor ist auf einem Alublock aus dem gleichem Material wie die Probe aufgeklebt. Der DMS an der Stelle A diente zuerst nur der Kalibrierung. Außerdem konnte man mit diesem Aufnehmer untersuchen, wann es zum Versagen des Sensors kommt, der auf der Sollbruchstelle geklebt war. Für die weiteren Versuche wurde nur der DMS an der Stelle B geklebt.

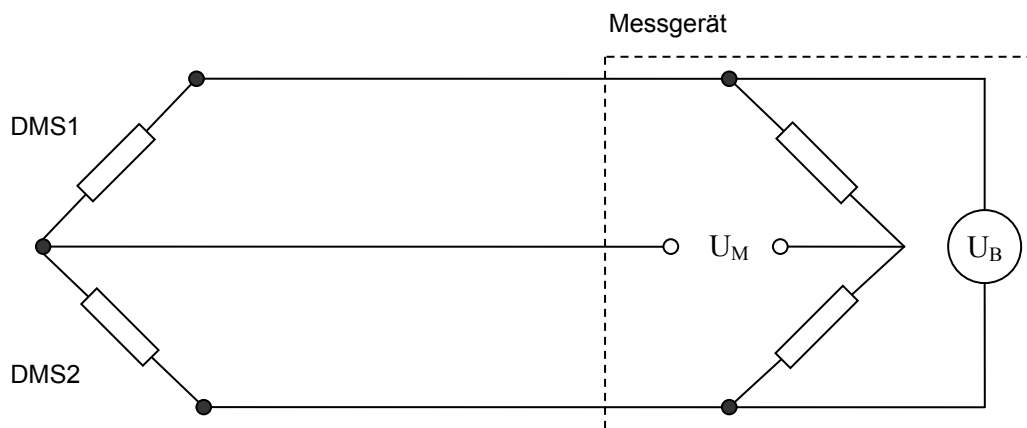


Bild 5-10 Brückenschaltung in 3-Leiter-Technik – schematische Darstellung

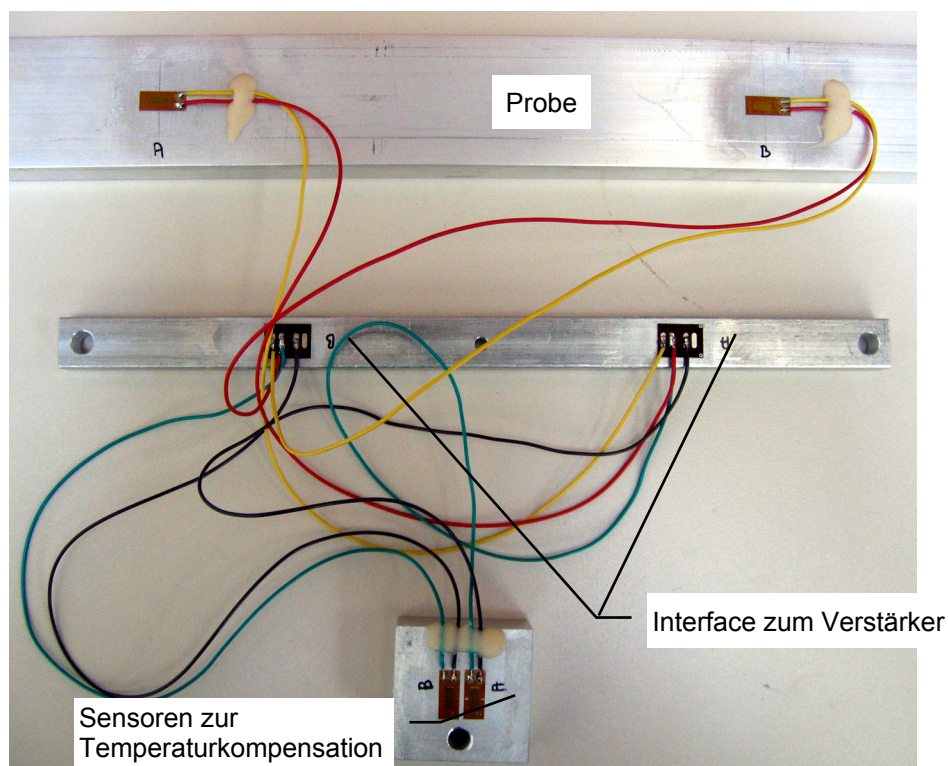


Bild 5-11 Verschaltung der beiden DMS in 3-Leiter-Technik mit der Temperaturkompensation

Die Sensorelemente sind über entsprechende Verstärker, die das Eingangssignal in eine Spannung im Bereich  $\pm 10$  V umwandeln, mit der dSpace Box verbunden (vgl. Bild 5-9). Die Dehnungsmessstreifen benötigen ein spezielles Gerät, um einerseits die volle Brückenschaltung zu simulieren, andererseits die Signale entsprechend zu bearbeiten (z. B. filtern). Der Beschleunigungsaufnehmer benötigt einen Verstärker,

der gleichzeitig den im Sensor eingebauten Vorverstärker mit dem Strom versorgen kann.

In der dSpace-Box werden die Eingangssignale digitalisiert. Auf dem box-internen Rechner laufen auch einige Prozeduren, die eine erste Aussage über die aufgebrauchte Lebensdauer erlauben. Dies entspricht der direkten Berechnung der Lebensdauer aus Zeitsignalen der Beanspruchung, vgl. Tabelle 4-1. Die dSpace-Box ist über einen Bus mit einem Bedienrechner verbunden, der als User Interface dient. Ein Beispiel der Anzeige mit Online-Darstellung der aufgenommenen Zeitsignale, Anzahl der Zyklen und ermittelten Schädigung ist in Bild 5-12 dargestellt.

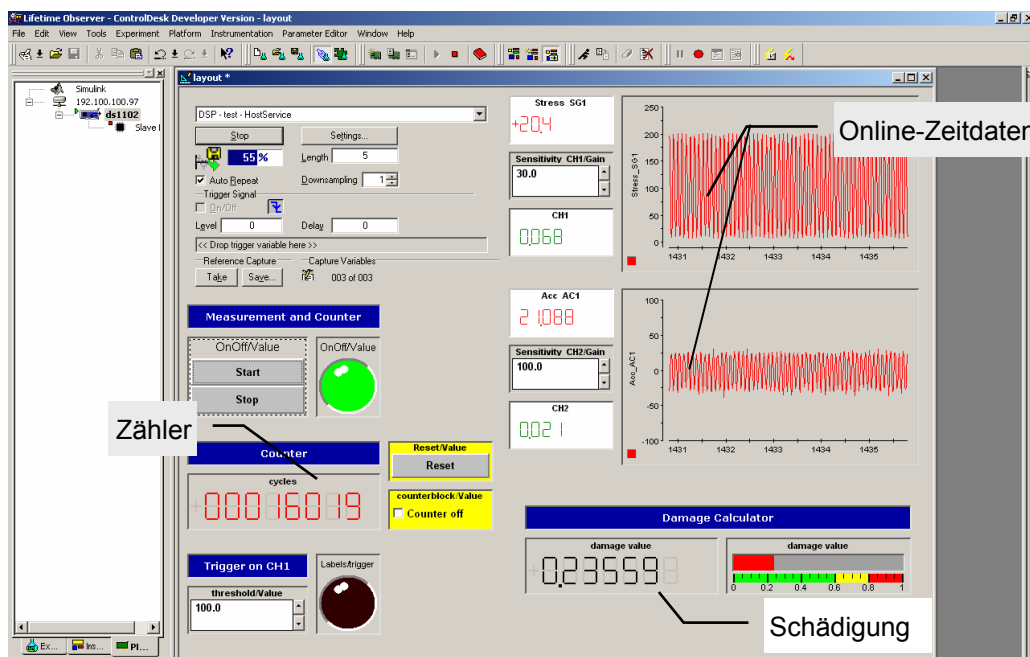


Bild 5-12 User Interface im Lifetime Observer mit Online-Anzeige (ControlDesk – dSpace)

### Festlegung der Messbereiche und Auflösung

Für die Aufnahme der Messgrößen wurde die Abtastrate 100 Hz ausgewählt. Bei der dynamischen Strukturbelastung im Bereich bis ca. 11 Hz (11 Lastwechsel pro Sekunde) ist diese Abtastrate ein guter Kompromiss zwischen der Genauigkeit und der aufgenommenen Datenmenge. In der Entwicklungsphase hat man sich entschieden, die kompletten Zeitdaten aufzunehmen, um später verschiedene Formen der Auswertung offline auszutesten.

Aus den Sensorempfindlichkeiten und Verstärkungsfaktoren in den Messverstärkern ergeben sich die Messbereiche: für die Spannungsmessung 0...250 MPa, für die Beschleunigungsmessung  $\pm 100 \text{ g}$  (ca.  $1000 \text{ m/s}^2$ ). Bei der Spannungsmessung ist der Messbereich relativ leicht zu bestimmen, die oberen Grenzen sind klar definiert. Das

ist nicht der Fall bei der Beschleunigungsmessung, der Messbereich wird mit großer Reserve ausgelegt, um den Verlauf beim Bruch festzuhalten. Der Messbereich kann in diesem Fall anhand der Systemanalyse, z. B. durch analytische Berechnung der Auslenkung in Verbindung mit der Belastungsfrequenz oder durch Erprobung eines Systems mit gleichzeitig gemessener Spannung ermittelt werden.

### 5.2.5 Aufbau der Software

Der Datenfluss in dem Matlab-Programm *lifetime* ist in Bild 5-13 dargestellt. Innerhalb dieser Prozedur werden einzelne Routinen (Module) abgerufen und die Daten werden in den dargestellten Schritten bearbeitet.

Einige Submodule stammen aus der bereits erwähnten, frei verfügbaren Matlab-Toolbox WAFO [WAFO 2003] – insbesondere die Algorithmen zur Datenfilterung und Berechnung der Rainflow-Zyklen. Da die hier genannte Toolbox einen überwiegend mathematischen Hintergrund hatte, mussten die speziellen, durch Lebensdauerrechnung bedingten Anforderungen durch neu programmierte Prozeduren erfüllt werden. Durch eine modulare Bauweise lassen sich die Änderungen oder neue Elemente in der Programmstruktur leicht implementieren (z. B. ein neues Schädigungsmodell oder eine modifizierte Berechnungsprozedur).

Das Programm *lifetime* wird auf Zeitdatensequenzen (Spannungen, Beschleunigungen) mit beliebiger Länge (z. B. 5 Minuten-Blöcke) ausgeführt. Die Art der zu verarbeitenden Datensequenzen richtet sich nach den im Programm *lifetime* implementierten Berechnungsmodellen. Die Blocklänge richtet sich nach der Datenmenge und der zu erwartenden Lebensdauer. Im Rahmen der in dieser Arbeit beschriebenen Versuche hat sich die Datenblocklänge von 5 Minuten als sinnvoll erwiesen, somit werden in der Berechnung bis hin zu einigen hundert von Sequenzen bearbeitet.

Dieser hier beschriebene Datenfluss entspricht der Lebensdauerbeobachtung auf Basis der Berechnung von komprimierten Signalen (vgl. Tabelle 4-1). Die Bearbeitung der Spannungsdaten entspricht dabei der direkten Vorgehensweise, der Beschleunigungen – der modellgestützten. Das Modell für die Bearbeitung der Beschleunigung basiert dabei auf einer empirischen Ermittlung der Koeffizienten für die Subroutine `cc2dam_sw.m` durch den Vergleich mit den gemessenen Spannungen in der Probe während einiger Testläufe. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass die Beschleunigungssignale in den gleichen Routinen verarbeitet werden, wie die Spannungssignale (mit Ausnahme von verwendeten Koeffizienten).



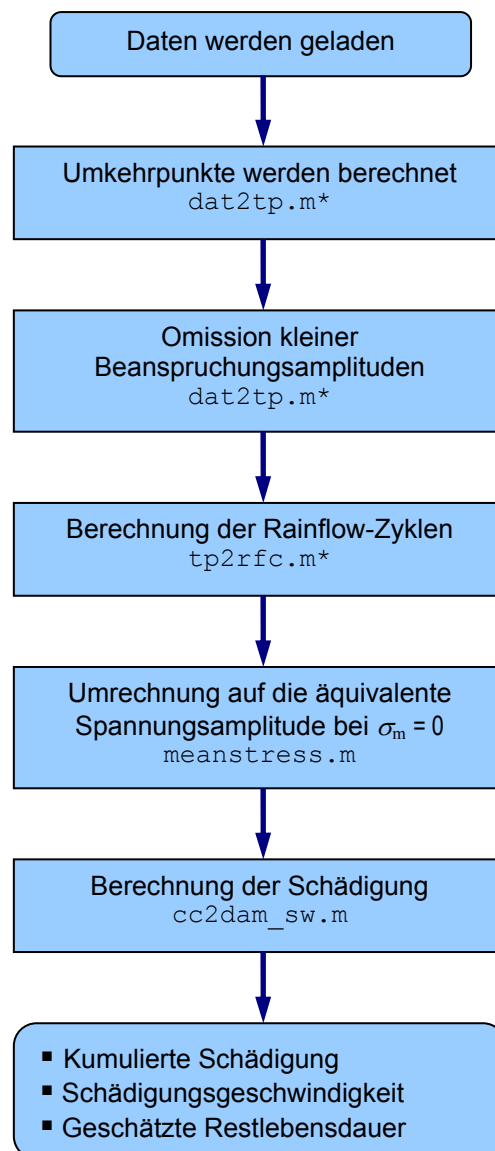


Bild 5-13 Datenfluss in der Matlab-Routine *lifetime*. Mit \* gekennzeichnete Subroutinen stammen aus der *WAFO-Toolbox*.

### 5.2.6 Übersicht der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Experimente zur Lebensdauerbeobachtung in tabellarischer Form dargestellt. Gegenüber gestellt werden die Ergebnisse der vereinfachten Online-Lebensdauerüberwachung, der sequenziellen Spannungsüberwachung und der modellbasierten Überwachung anhand der Beschleunigungsmessung. Um den möglichen Einfluss der Belastungsreihenfolge zu erfassen, wurden 5 Proben in der Reihenfolge  $\sigma_m = 120$  MPa und  $\sigma_m = 110$  MPa bei gleich bleibender Spannungsamplitude  $\sigma_a = 95$  MPa und weitere 5 Proben in umgekehrter Reihenfolge getestet (2-Stufen-Versuch). Die Beanspruchung der Probe (Stufenwechsel der Beanspruchung) wurde nach dem Erreichen der Schädigung  $D = 0,5$  aus der Online-Überwachung geändert.

Als Kriterium für den Bruch wurde ein Abfall der maximalen Spannung  $\sigma_{\max}$  auf ca. 80...85 % des Startwerts (z. B. von 215 auf ca. 180 MPa) verwendet, vgl. Bild 5-14. In der Praxis hat sich dieser Zeitpunkt durch das Abheben der Probe von dem Biegetisch während der dynamischen Belastung bemerkbar gemacht (Steifigkeitsverlust durch den Rissfortschritt). Während des gesamten Versuchs war das Aufliegen der Probe auf dem Biegetisch durch die Vorspannung gewährleistet. Ein Beispiel für eine Probe mit dem Anriss beim Testabbruch ist in Bild 5-15 zu sehen.

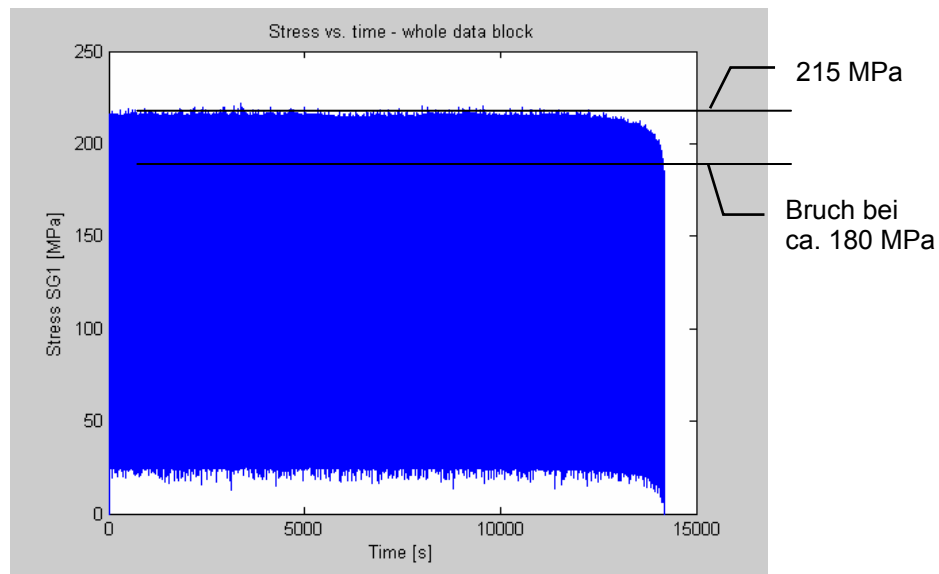


Bild 5-14 Darstellung des Zeitschriebs beim Bruch der Probe

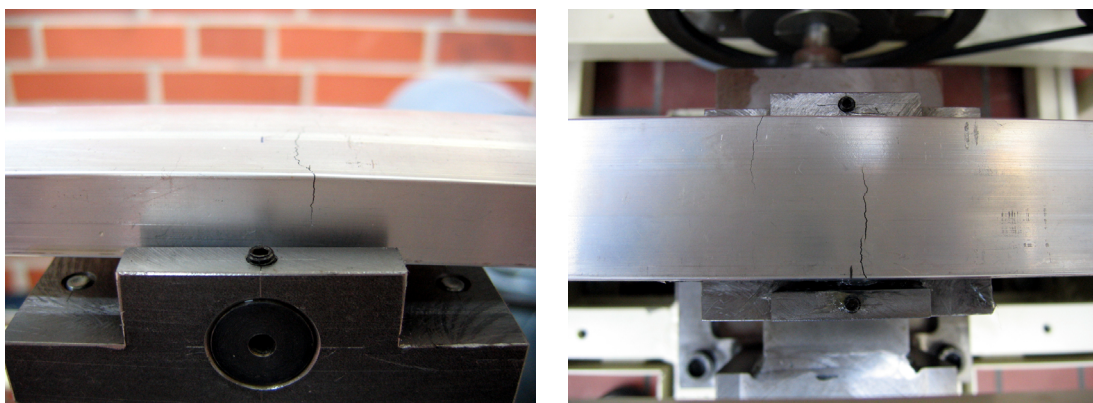


Bild 5-15 Ansicht der Probe nach dem Bruch, links – seitliche Ansicht, rechts – Blick von oben

Die Ergebnisse des Experiments sind in Tabelle 5-2 zusammengestellt. Dabei werden die ermittelten Schädigungen mit statistischer Auswertung angegeben. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Lebensdauerwerte (Schwingspielzahlen) einer lognormalen Verteilung unterliegen [Haibach, 1989]. Dies muss bei der statistischen Auswertung berücksichtigt werden (d. h. Mittelwertbildung und weitere Berech-

nungen auf logarithmierten Werten). Eine Standard-Lebensdauerrechnung, die auf Wöhlerlinien mit 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit basiert, liefert mittlere Lebensdauerwerte (von zehn gleichen Bauteilen unter gleichen Bedingungen fallen fünf Bauteile nach der berechneten Zeit aus). Da in technischen Anwendungen die Ausfallwahrscheinlichkeiten wesentlich niedriger liegen müssen, wird beispielhaft eine Umrechnung auf 90 % bzw. 99 % (Bezeichnung  $D_{90}$ ,  $D_{99}$ ) Zuverlässigkeit durchgeführt. Zusätzlich werden die Werte der Schädigung auf das in der technischen Konvention typische Konfidenzintervall (Vertrauensbereich) 95 % ( $D_{90,95}$  und entsprechend  $D_{99,95}$ ) umgerechnet, um den Einfluss eines kleinen Stichprobenumfangs zu berücksichtigen. Dieser Wert des Konfidenzintervalls bedeutet, dass man mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % den für bestimmte Zuverlässigkeiten errechneten Schädigungswerten vertrauen kann. Die für die Berechnung notwendigen Parameter können z. B. in [Zöfel, 2002] oder [Dowling, 1999] gefunden werden.

Tabelle 5-2 Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

1 - 5 Bruch bei Schädigung (online)				Sequenzielle Spannungsüberwachung				Sequenz. Beschleunigungsüberwachung			
25...215MPa 15...205MPa				25...215MPa 15...205MPa				25...215MPa 15...205MPa			
	step1	step2	ΣD	step1	step2	ΣD		step1	step2	ΣD	
specimen 1	0,5	2,64	3,14	0,41	2,23	2,64		0,31	2,88	3,19	
specimen 2	0,5	4,11	4,61	0,36	2,66	3,02		0,41	5,30	5,70	
specimen 3	0,5	3,93	4,43	0,37	3,74	4,11		0,57	6,68	7,25	
specimen 4	0,5	5,55	6,05	0,38	4,57	4,95		0,59	11,98	12,57	
specimen 5	0,5	7,42	7,92	0,39	7,64	8,02		0,66	7,30	7,96	
D mean	0,50	4,46	4,98	0,38	3,78	4,20		0,49	6,17	6,67	
D std dev.			1,42			1,55				1,65	
D <sub>90</sub>	(R = 90%)		3,19			2,39				3,51	
D <sub>99</sub>	(R = 99%)		2,21			1,51				2,07	
D <sub>90,95</sub>	(R = 90%, C = 95 %)		1,52			0,94				1,20	
D <sub>99,95</sub>	(R = 99%, C = 95 %)		0,67			0,34				0,37	

6 - 10 Bruch bei Schädigung (online)				Sequenzielle Spannungsüberwachung				Sequenz. Beschleunigungsüberwachung			
15...205MPa 25...215MPa				15...205MPa 25...215MPa				15...205MPa 25...215MPa			
	step1	step2	ΣD	step1	step2	ΣD		step1	step2	ΣD	
specimen 6	0,5	6,92	7,42	0,41	5,73	6,14		0,60	6,22	6,83	
specimen 7	0,5	7,44	7,94	0,43	6,71	7,14		0,34	5,41	5,75	
specimen 8	0,5	4,79	5,29	0,43	3,82	4,25		0,53	3,30	3,82	
specimen 9	0,5	3,64	4,14	0,40	3,24	3,63		0,71	3,38	4,09	
specimen 10	0,5	5,27	5,77	0,40	4,22	4,62		0,30	3,36	3,66	
D mean	0,50	5,43	5,95	0,42	4,57	5,00		0,47	4,17	4,68	
D std dev.			1,30			1,32				1,32	
D <sub>90</sub>	(R = 90%)		4,24			3,52				3,29	
D <sub>99</sub>	(R = 99%)		3,22			2,63				2,46	
D <sub>90,95</sub>	(R = 90%, C = 95 %)		2,42			1,96				1,83	
D <sub>99,95</sub>	(R = 99%, C = 95 %)		1,31			1,03				0,96	

#### Bemerkungen:

$D_{90}$  – Wert der Schädigung (beim Bruch), umgerechnet auf 90 % Zuverlässigkeit (10 % Ausfallwahrscheinlichkeit)

$D_{90,95}$  – Wert der Schädigung (beim Bruch) für 90 % Zuverlässigkeit und 95 % Konfidenzintervall (Vertrauensbereich).



## Diskussion der Ergebnisse

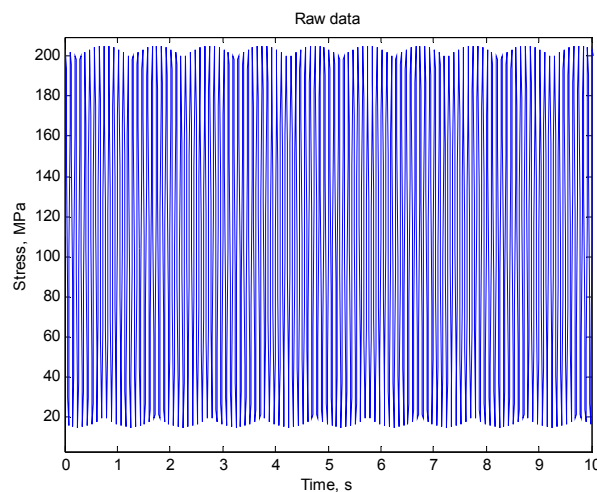
Die Analyse der erzielten Ergebnisse bestätigt, dass eine genaue Berechnung der Lebensdauer eine relativ schwierige und komplexe Aufgabe ist. Ein gutes Ergebnis zeigen die errechneten Werte der Schädigung  $D_{90,95}$ . In diesem Fall streuen die Schädigungswerte zwischen 0,94 und 2,42 je nach Methode. Diese Streuung ist sehr typisch für Lebensdauerversuche, Autoren wie [Suresh, 1991] und [Haibach, 1989] lassen Abweichungen bei den Schädigungswerten  $D$  in den Experimenten zu. Auch die Tests mit konstanter Auslenkung ergeben größere Lebensdauerwerte als Versuche mit konstanter Kraftamplitude [Fuchs und Stephens, 1980]. In diesem Zusammenhang bietet es sich an, die relative Schädigung  $D \neq 1$  als Grundlage für die Lebensdauerrechnung zu übernehmen. Aus den Ergebnissen lässt sich auch feststellen, dass bei der Lastfolge L-H (zuerst kleinere und dann größere Beanspruchung) die erzielten Schädigungswerte höher sind als bei umgekehrter Reihenfolge.

Laut [Suresh, 1991] liegen typische Werte für den Variationskoeffizient  $\delta_x$  in der Zyklenzahl bis zum Bruch bei 50 % und diese Werte wurden im Experiment auch erreicht (für die Schädigung im Experiment liegen diese Werte zwischen 22 und 37 %). Auch wenn es bekannt ist, dass Lebensdauerwerte relativ großer Streuung unterliegen, können die Abweichungen zwischen den gerechneten und tatsächlichen Werten der Schädigung eine oder mehrere Ursachen haben:

- die angenommenen Materialkennndaten (z. B. die Wöhlerlinie, Koeffizienten etc.) weichen von der tatsächlichen ab; nur wenige Kennwerte vorhanden, minimale Festigkeit angegeben, etc.
- die tatsächlichen Belastungen werden nicht vollständig erfasst oder es ergeben sich Fehler durch Komprimierungsprozeduren etc.
- die Schädigungsrechnung im Schädigungsmodell erfasst das tatsächliche Geschehen nicht vollständig korrekt (z. B. die Reihenfolgeeffekte werden nicht berücksichtigt).

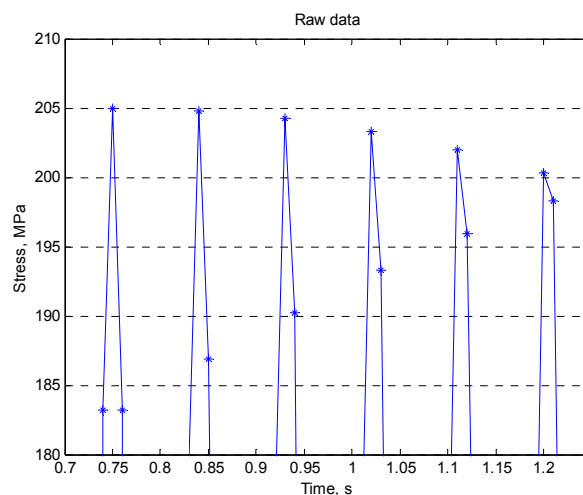
Da die Vermutung groß war, dass die Proben unterschiedliche Materialeigenschaften aufweisen, wurde zusätzlich im Zugversuch die statische Zugfestigkeit ermittelt. Für die erste Materiallieferung (Testproben für den Lebensdauerversuch, Sensorimplementierung) ergaben sich die Werte  $R_m$  um 265 MPa, für die zweite (alle bewertete Proben im Lebensdauertest) um 225 MPa. Aus jeder Materialanlieferung wurden 2 Proben für den statischen Zugversuch entnommen. In jedem Fall sind die Mindestanforderungen der [DIN EN 754-2] erfüllt ( $R_m = 215$  MPa); [aluSELECT, 2008] und [Borrego et al., 2004] liefern dabei entsprechend typische Werte 245 und 240 MPa. Zum Zeitpunkt der Berechnung lieferte lediglich [Borrego et al., 2004] Materialkennndaten, die für die Lebensdauerrechnung verwendet werden konnten. In den DIN-Norm liegen keine Werte für die Lebensdauerrechnung vor, bei [aluSELECT, 2008] sind sie zurückgezogen worden.

Mit der Problematik der Datenerfassung als potenzielle Fehlerquelle befasst sich das folgende Beispiel. Ein synthetisch erzeugtes Sinussignal (das der Beanspruchung mit  $\sigma_m = 110$  MPa und  $\sigma_a = 95$  MPa entspricht) wird rechnerintern abgetastet. Die Abtastrate für das Signal mit der Frequenz 11 Hz beträgt 100 Hz, demzufolge werden ca. 9 Messpunkte pro Periode erfasst. Die Welligkeit der imaginären Hüllkurve ist leicht zu erkennen (Bild 5-16).



*Bild 5-16 Welligkeit der imaginären Hüllkurve bei den gewählten Abtastparametern*

Im Folgenden (Bild 5-17) ist ein Ausschnitt der im Rechner abgebildeten Kurve dargestellt. Die Schwankungen der Maxima liegen zwischen ca. 200 und 205 MPa.



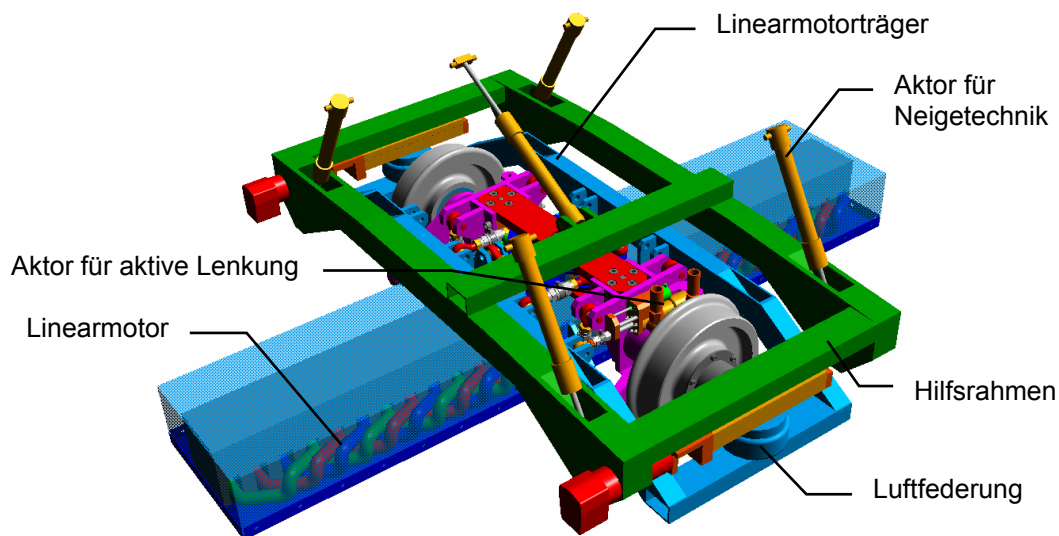
*Bild 5-17 Ausschnitt des abgetasteten Signals (abgetastete Punkte sind mit Sternchen markiert)*

Diese recht kleine Schwankung (2,5 %) reicht aus, um einen bemerkbaren Fehler in der Lebensdauerrechnung zu verursachen. Die errechnete Lebensdauer wird bei

dieser Fehlerquelle immer unterschätzt (im hier simulierten Fall um ca. 16 %). Bei der Abtastrate 250 Hz (ca. 23 Messpunkte pro Periode) beträgt der Fehler nur noch ca. 3 %.

### 5.3 Lebensdauerüberwachung im RailCab

RailCab ist ein Verkehrssystem auf Basis relativ kleiner autonomer Fahreinheiten (vgl. Abschnitt 3.2), die über zwei Einzelachsfahrwerke verfügen [Neue Bahntechnik Paderborn, 2005]. Die Länge der Shuttle-Einheit kann auf Grund des modularen Aufbaus frei gewählt werden, die Fahrwerke bleiben aber prinzipiell gleich und können somit mit jedem Aufbau gekoppelt werden. Die Fahrwerke übernehmen die wichtigsten Funktionen im Shuttle: Antreiben, Bremsen, Spurführen, Lenken und Federn. In Bild 5-18 ist ein Einzelachsfahrwerk im Detail dargestellt. Diese modulare Baugruppe besteht aus einem Hilfsrahmen für die Feder-Neige-Technik, einem Linearmotorträger, einer Achse mit den Radsätzen, Luftfedern und Aktoren für die aktive Lenkung und die Neigetechnik. Da praktisch alle sicherheitsrelevanten Bauelemente in dieser Baugruppe lokalisiert sind, steht diese im Zentrum der Untersuchung.

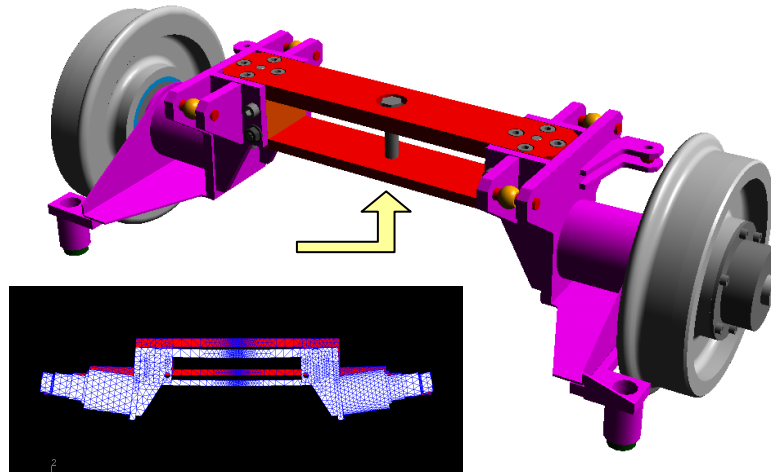


*Bild 5-18 3D-Modell eines Einzelachsfahrwerks mit Antriebs-, Spurführungs- und Neigemodul [Neue Bahntechnik Paderborn, 2005]*

Vor dem Hintergrund, dass ein Ausfall dieser hochbeanspruchten Baugruppe katastrophale Folgen haben kann, kommt dem Einsatz eines Zustandsdiagnose- und Lebensdauerbeobachter-Systems eine besondere Bedeutung zu. Bei NBP sollen in zukünftigem Testbetrieb verschiedene Methoden der Überwachung getestet werden. Im Folgenden werden die Aspekte der Überwachung am Beispiel des Fahrwerkes beschrieben.

### 5.3.1 Achse des Einzelachsfahrwerks

Die Achse ist das wichtigste dynamisch belastete Bauteil im Fahrwerk (Bild 5-19). Die Beanspruchung hängt ab vom Gleisverlauf (Gleisstörungen, Weichen, Kurvenfahrt), von den Fahrmanövern (Bremsen, Beschleunigen) und von den Kräften, die im Linearmotor (z. B. Regelung des Luftspalts, Anziehungskräfte zwischen dem Stator und dem Läufer) auftreten. Die Achse kann beispielsweise mithilfe der direkten Methode überwacht werden.

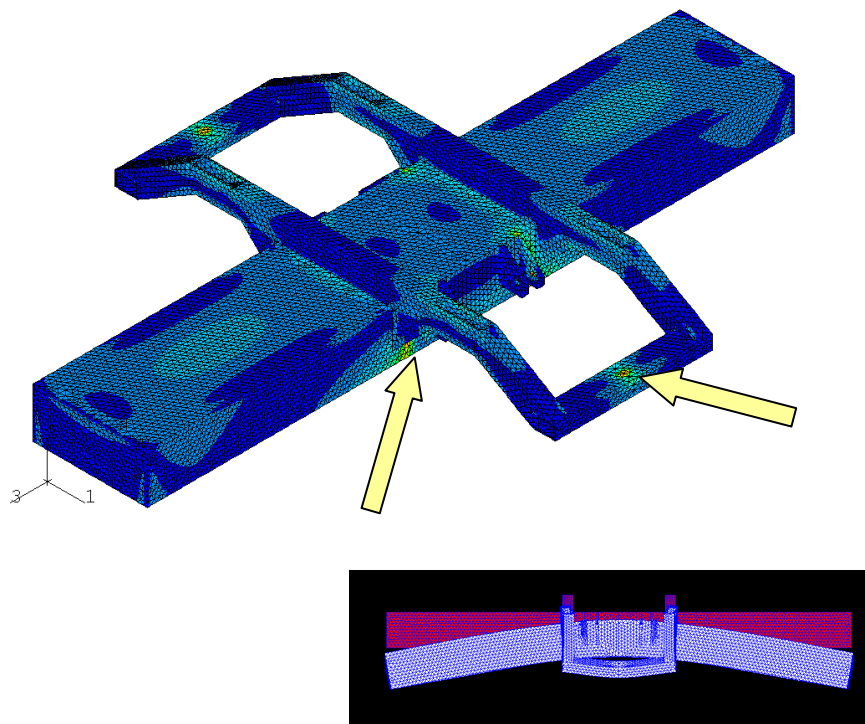


*Bild 5-19 Mögliche Position (Pfeil) für die direkte Messung der Beanspruchung. Links unten ist die Verformung der Achse skizziert*

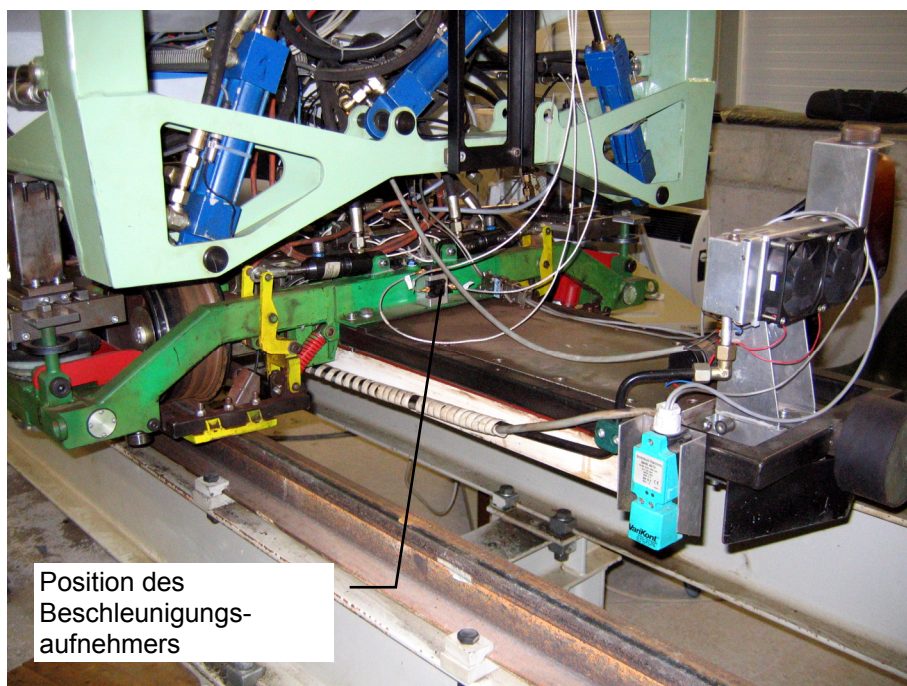
### 5.3.2 Linearmotorträger

Der Linearmotorträger unterliegt einer ähnlichen Beanspruchung wie die Achse selbst – beide Elemente sind miteinander fest gekoppelt. Besonders stark wirken sich in diesem Fall die Antriebskräfte (wie auch Bremskräfte) und die Normalkraft zwischen dem Läufer und dem in der Strecke verlegten Stator aus (die übrigens eine Funktion der Antriebskraft ist). Hinzu kommt noch die dynamische Belastung durch die schwingenden Massen des Linearmotors. Ein FE-Modell des Trägers und eine beispielhafte elastische Eigenschwingungsform sind in Bild 5-20 dargestellt.

Auch hier kann eine direkte Überwachung der Beanspruchung mittels DMS-Aufnehmer erfolgen, es bieten sich jedoch auch andere Möglichkeiten an. Einerseits können die Zustandsgrößen aus der Regelung des Linearantriebs ausgewertet werden, wie z. B. die Ströme und der Abstand zwischen dem Stator und dem Läufer, die ständig überwacht werden. Andererseits stehen auch Messwerte aus der aktiven Federung (z. B. Federeintauchtiefe, Druck in der Luftfeder, Beschleunigungen des Trägers) zur Verfügung, aus denen die gesuchten Beanspruchungen mithilfe mathematischer Modelle errechnet werden können. Die Position des Beschleunigungssensors am Linearmotorträger des Versuchsfahrzeugs ist in Bild 5-21 dargestellt.



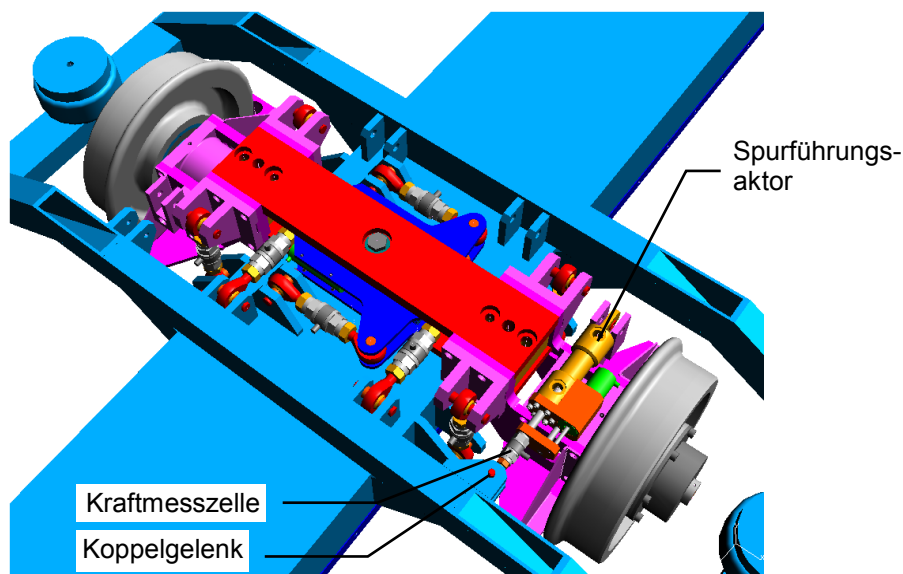
*Bild 5-20 FE-Modell des Linearmotorträgers, Pfeile zeigen die hochbeanspruchten Teile, unten rechts ist eine berechnete elastische Eigenschwingungsform dargestellt*



*Bild 5-21 Beschleunigungssensor am Linearmotorträger*

### 5.3.3 Spurführungssystem

Im NBP-Fahrzeugkonzept ist eine aktive Spurführung vorgesehen. Da der Lenkmechanismus der Achse für die Fahrsicherheit des Shuttles von hoher Bedeutung ist, soll er überwacht werden. Die Spurführung erfolgt mit einer Aktorregelfrequenz größer als 10 Hz. Im Regelkreis wird ein Kraftsensor verwendet, der mit dem Spurführungsaktor verbunden ist (Bild 5-22). Aus der Kraft im Stellmechanismus können die Beanspruchungen in den entsprechenden Koppellementen berechnet werden.



*Bild 5-22 Aufbau des Spurführungsmoduls*

Das Spurführungssystem kann als ein Beispiel einer Überwachungsstrategie dienen, wo bereits ein in der Struktur vorhandener Sensor im Konzept der Lebensdauerüberwachung verwendet werden kann. Diese Anordnung, wie schon früher erwähnt, wurde bereits in der Simulationsphase der Informationsverarbeitungskette des Lebensdauerbeobachters verwendet, da zu diesem Zeitpunkt die Simulationsergebnisse [Goldschmidt, 2002] bereits vorlagen.



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden nach der Beschreibung des Stands der Technik die Methoden der Lebensdauerüberwachung diskutiert, die in mobilen Systemen, vor allem in Kraft- und Schienenfahrzeugen, eingesetzt werden können. Auf dieser Basis ist ein Konzept des Lebensdauerbeobachters entwickelt worden. In diesem Zusammenhang wurde auch der Bezug zu Randgebieten, wie z. B. Zustandsdiagnose, diskutiert. Dieses Konzept wurde dann weiter erarbeitet, sodass ein System zur Lebensdauerüberwachung aufgebaut werden konnte. In einem weiteren Kapitel wurden der Informationsfluss und die Informationsverarbeitung des Systems beschrieben. Die Funktionsfähigkeit des entwickelten Systems wurde sowohl in der Simulation als auch in einem vereinfachten Versuch gezeigt. Dies bietet eine gute Grundlage für den industriellen Einsatz. Als Beispiel dafür wurde die Anwendung bei der Überwachung der Fahrwerke des RailCabs erläutert. Zu diesem Zeitpunkt stand leider noch kein Erprobungsfahrzeug der NBP zur Verfügung, das den Dauerbetrieb mit der implementierten Lebensdauerüberwachung erlaubt hätte.

Das zu entwickelnde System zur Lebensdauerüberwachung wurde aus einem neuen Blickwinkel – des funktionsorientierten Entwurfs – betrachtet. Dadurch konnten gezielt Lösungsprinzipien für die definierten Teilfunktionen gesucht und gefunden werden. In Verbindung mit den gezeigten Beispielen der funktionalen Beschreibung des zu überwachenden Systems wurden neue Möglichkeiten aufgezeigt, wie die Überwachungsfunktion an das System gekoppelt werden kann. Diese gemeinsame Betrachtung erleichtert die Konzeptauswahl der Lebensdauerbeobachtung für das zu überwachende mechatronische System.

Die hier beschriebene prototypische Umsetzung der Lebensdauerüberwachung am Prüfstand hat gezeigt, dass der modulare Aufbau der Berechnungsprozeduren sowie die sequenzielle Datenbearbeitung gut funktionieren, sowohl bei der direkten, als auch bei der indirekten Methode der Überwachung. Auf der anderen Seite wurde eine große, für die Lebensdauerversuche typische Streuung der ermittelten Schädigungswerte beobachtet. Für den betrachteten Fall der Ausfallwahrscheinlichkeit und des Konfidenzintervalls lagen die experimentell ermittelten Werte der Schädigung beim Bruch zwischen ca. 95 % und 250 % des theoretisch errechneten Wertes, je nach Überwachungsmethode bzw. Reihenfolge der Belastung. In einem Fall wurde die Lebensdauer geringfügig überschätzt, in allen anderen Fällen lag die Abschätzung auf der sicheren Seite.

Die Arbeit hat gezeigt, wo es noch Potenziale gibt, die zu einer besseren Erfüllung der gewünschten Funktion des Lebensdauerbeobachters beitragen können. An dieser Stelle gilt das Augenmerk vor allem den Schädigungshypothesen. Obwohl die linearen Schädigungshypothesen mehrere Nachteile aufweisen, werden sie bis heute am meisten eingesetzt und finden sich praktisch in jedem Programm zur Betriebs-

festigkeitsrechnung. Außerdem sind sie in vorhandenen Regelwerken oft als einzige Berechnungsmethode dargestellt. Obwohl theoretisch viele nichtlineare Modelle der Lebensdauerberechnung zur Verfügung stehen, kann eigentlich keines davon als eine universelle Methode eingesetzt werden. Ein Lebensdauerbeobachter kann nur so gut sein, wie das Modell, das die Schädigung beschreibt. Wenn neue Schädigungshypothesen entwickelt werden, können sie im Berechnungsmodul des Lebensdauerbeobachters ausgetauscht werden.

Auch die Modelle der Beanspruchungsberechnung können weiter entwickelt werden; deren Einsatz ist stark mit den verfügbaren Rechenkapazitäten verbunden. Die rasante Entwicklung auf diesem Gebiet kann dazu führen, dass bald auch komplexe Strukturmodelle online während der Überwachung rechnerisch simuliert werden, um eine genauere Prognose der Lebensdauer zu bekommen.

Condition Monitoring und die darauf aufbauende Lebensdauerüberwachung erlaubt eine wesentliche Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit mobiler Systeme. Auch eine, sowohl in Schienen- als auch Kraftfahrzeugen wichtige, weitere Steigerung der Zuverlässigkeit kann auf diese Weise erreicht werden. Die immer noch weit verbreitete Inspektion und Wartung nach Zeitplan ist zeit-, arbeits- und kostenintensiv. Die Entwicklungen von Diagnosekonzepten und Überwachungstools erlauben jedoch die Prognose, dass sich hier im Laufe der Zeit die modernen Techniken der zustandsabhängigen Wartung und Instandhaltung durchsetzen werden. Systeme zur Onboard-Diagnose (OBD) können künftig zu einem integralen Teil der Risikominimierungsstrategie für mobile Systeme werden.

Bisherige Ergebnisse der hier beschriebenen Simulationen und Versuche bilden eine gute Ausgangsbasis für weitere Feldversuche, z. B. innerhalb der Neuen Bahntechnik Paderborn. Inwieweit dabei eine Übereinstimmung zwischen der theoretischen Rechnung und den experimentellen Ergebnissen, bzw. im Vergleich zwischen der Lebensdauervorhersage des Lebensdauerbeobachters und den Schädigungswerten im realen Betrieb erzielt werden kann, ist offen. Erst wenn es in diesen Versuchen gelingt, eine ausreichende Vorhersagegüte zu erzielen, wäre die wichtige Rolle des Lebensdauerbeobachters komplett unterstrichen und der Weg für weitergehende Versuche, sowohl im Test- als auch normalen Betrieb, frei. Die vorliegende Arbeit zeigt deutlich die heutigen Probleme der Lebensdauerüberwachung, wie z. B. relativ aufwändige Messtechnik oder die Einschränkungen der vorhandenen Schädigungshypothesen. Diese Defizite sprechen aber keinesfalls gegen die Methode im Allgemeinen. Das Verbesserungspotenzial ist klar dargestellt und soll in Zukunft ausgenutzt werden.

Bei der Weiterentwicklung der Überwachung kann man bis jetzt nicht eindeutig den Trend erkennen, welche Methode der Überwachung, d. h. direkte oder indirekte, sich durchsetzen wird. Unter den sich momentan stark entwickelnden Schlüssel-Techno-



logien ist die Sensorik für Systeme zur Lebensdauerbeobachtung besonders interessant. Entwicklungen wie z. B. die von paint-on Sensoren eröffnen neue Möglichkeiten zur Überwachung mechanischer Strukturen [Chang, 1999]. Auch die Entwicklung autonomer, autarker Sensoren ist bereits weit fortgeschritten [Elvin et al., 2001], [Grisso, 2007]. Es werden auch Sensoren zur Überwachung der Korrosion bei metallischen Werkstoffen oder Delamination in Kompositen entwickelt. Kleine Sensoren, die überall an der Struktur angebracht sind, die sich selbst mit der zu ihrem Betrieb erforderlichen Energie (z.B. durch den piezoelektrischen Effekt, *energy harvesting*) versorgen und bei denen die Übertragung der Daten per Funk erfolgt [Gao und Spencer, 2008], könnten bereits in Kürze die Schwelle zum industriellen Einsatz erreichen. Es ist abzusehen, dass in künftigen Fahrzeugen sehr viel mehr Sensoren enthalten sein werden als heute, sodass damit auch mehr Informationen vorliegen, die in einem System zur Lebensdauerbeobachtung ausgewertet werden können.

Auf der anderen Seite geht die Entwicklung dahin, dass immer mehr Sensoren und Prozessoren in Fahrzeugen in Regelkreisen oder anderen mechatronischen Baugruppen eingesetzt werden. Im gleichen Maße steigt die für die Zustandsdiagnose verwendbare Informationsbasis von ganz alleine. Die bisher vorherrschende Methode, den Zustand einzelner Komponenten gezielt durch eine spezielle Sensorik zu überwachen, kann so nach und nach durch modellbasierte Methoden abgelöst werden, bei denen mehrere Sensorsignale, die ohnehin im System vorhanden sind, gemeinsam betrachtet und ausgewertet werden. Diese Entwicklung wird durch die Verfügbarkeit immer preiswerterer und immer kleinerer Prozessoren mit immer größerer Leistung unterstützt, durch die immer mehr Verfahren der künstlichen Intelligenz praktisch anwendbar werden. Bei gut strukturierten Problemen, bei denen Ursache – Wirkung Zusammenhänge bekannt und formal darstellbar sind, werden sich regelbasierte und modellgestützte Verfahren durchsetzen, während bei komplexen Problemen, z. B. Methoden des fallbasierten Schließens eingesetzt werden könnten.

Als Folge-Entwicklung von Systemen zur Lebensdauerbeobachtung sind selbstoptimierende Systeme denkbar, die ihre Betriebsart an ihre Alterung anpassen und sich so einstellen, dass z. B. eine möglichst lange Lebensdauer erreicht wird. Extreme Forderungen an die Optimierung der Lebensdauer werden z. B. an Raumfahrtssysteme gestellt, speziell bei Langfrist-Missionen.

Das Grundprinzip der hier vorgestellten Lösung ist freilich auf andere Systeme übertragbar. Das bedeutet, dass nicht nur Fahrzeuge mit dem beschriebenen Überwachungssystem ausgestattet werden können. Auch andere Maschinenelemente oder Anlagen (sowohl stationär als auch mobil) können mit permanent überwachenden Lebensdauerbeobachtern ausgestattet werden. Natürlich können auch Teile, deren Ausfall keine sicherheitskritischen Folgen nach sich zieht, überwacht werden. So kann eine Information über die zu erwartende Lebensdauer auch als ein Komfort-Merkmal angesehen werden, z. B. bei Haushaltsgeräten.



## Literatur

Abbiati, P.; Casciati, F.; Merlo, S.; (2000): Vibration Monitoring with Fiber Optic Sensor. In: Condition monitoring of materials and structures. Ed. by Farhad Ansari. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2000.

Agerskov, H.; (2000): Fatigue in steel structures under random loading. Journal of Constructional Steel Research, 2000, Bd. 53, S. 283-305.

aluSELECT (2008): <http://aluminium.matter.org.uk> (European Aluminium Association), 2008.

Appel, W.; (1992): Verfahren zur "On-board"-Überwachung von Kraftfahrzeug-Komponenten. VDI-Berichte Nr. 974, 1992, S. 17-26.

Armitage, S.R.; Holford, D.M.; (1998): Future Fatigue Monitoring Systems. In: Proceedings of the 19th Symp. Aircraft Integrated Monitoring Systems, Garmisch-Part., May 4-7, 1998.

Azzam, H.; (1996): A practical approach for the indirect prediction of structural fatigue from measured flight parameters. Aircraft Health and Usage Monitoring Systems – IMechE Seminar Publication 1996-9. MEP, London, 1996, S. 57-64.

Birolini, A.; (1997): Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen. Springer, Berlin, 1997.

Blumenauer, H.; Pusch, G.; (1993): Technische Bruchmechanik. Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1993.

Boller, C.; (2001): Ways and options for aircraft structural health management. In: Smart Materials and Structures, 10(2001), S. 432-440.

Boller, Ch.; Seger, T.; (1987): Material Data for Cyclic Loading. Elsevier, Amsterdam, 1997.

Borchert, J.; (1995): Diagnosekonzeption für Triebfahrzeuge im Fahrbetrieb und praxisbezogene Fahrzeuganalyse. ZEV + DET Glas. Ann. 1995, Bd. 119, Nr. 9/10 September/Oktober, S. 382 – 394.

Borrego et al.; (2004): Analysis of low cycle fatigue in AlMgSi aluminium alloys. In: Engineering Failure Analysis, Bd. 11(2004), S. 715-725.

Buxbaum, O.; (1992): Betriebsfestigkeit. Stahleisen, Düsseldorf, 1992.

Cempel, C.; (1990): Vibroakustische Maschinendiagnostik. Verl. Technik, Berlin, 1990.

Chang, F.-K.; (1999): Summary Report of the 2nd Workshop on Structural Health Monitoring. Dept. of Aeronautics and Astronautics. Stanford University, Stanford, 1999.

Chaudonneret, M.; Robert, M.; (1996): Fatigue lifetime prediction methods: an analysis of the different approximations involved in local approaches. Int. J. Pres. & Piping, 1996, Bd. 66, S. 113-123.

Columbus, J.; (1992): Ein wissensbasiertes System zur Bewertung der Qualität von Messdaten aus der Betriebsfestigkeit. VDI Berichte Nr. 974, 1992, S. 243-251.

Cordts, D.; Wolf, A.; Biber, R.; (2000): Zuverlässigkeit von Gummi-Metallteilen in Schienenfahrzeugen. ZEV + DET Glass. Ann., 2000, Bd. 124, Nr. 2/3, S. 209-215.

Cutter, D.M.; Thompson, O.R.; (2005): Condition-Based Maintenance Plus: Select Program Survey. Report LG301T6. Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology and Logistics. <http://www.acq.osd.mil>, 2005.

DE 19837485 A1 (2000): Offenlegungsschrift: Verfahren zum Erkennen von Schäden an Schienenfahrzeugen und/oder Gleisen. Offenlegung: 17.2.2000, Anmelder: Siemens AG.

DE 19837486 A1 (2000): Offenlegungsschrift: Verfahren zum Erkennen von Schäden an Schienenfahrzeugen und/oder Gleisen. Offenlegung am 17.2.2000, Anmelder: Siemens AG.

DE 3314181 (1983): Patentschrift: Method of monitoring fatigue of structural component parts, for example in nuclear power plants. 19.04.1983. Anmelder: Kraftwerk Union AG.

DE 4226010 (1994): Offenlegungsschrift: Verfahren und Vorrichtung zum Überwachen der Lebensdauer von Fahrzeugbauteilen. Offenlegung am 10.02.1994. Anmelder: Porsche AG.

DIN 45667 (1969): Klassiervverfahren für das Erfassen regelloser Schwingungen, Oktober 1969.

DIN 50100 (1978): Werkstoffprüfung; Dauerschwingversuch, Begriffe, Zeichen, Durchführung, Auswertung, Februar 1978.

DIN 50142 (1982): Prüfung metallischer Werkstoffe; Flachbiegeschwingversuch, März 1982.

DIN 53442 (1990): Prüfung von Kunststoffen; Dauerschwingversuch im Biegebereich an flachen Probekörpern, September 1992.

DIN EN 6072 (1999): Luft- und Raumfahrt - Metallische Werkstoffe - Prüfverfahren; Ermüdungsversuch mit konstanter Amplitude; Entwurf, Mai 1999.

DIN EN 754-2 (1997): Aluminium und Aluminiumlegierungen - Gezogene Stangen und Rohre - Teil 2: Mechanische Eigenschaften; Deutsche Fassung EN 754-2:1997, August 1997.

DIN EN ISO/IEC 7498-1 Informationsverarbeitung – Kommunikation Offener Systeme; Teil 1: Basis-Referenzmodell, Dezember 1995 (zurückgezogen 1999).

DIN ISO 11898 (1995): Straßenfahrzeuge - Austausch digitaler Informationen - Steuergerätenetz (CAN) für schnellen Datenaustausch (ISO 11898:1993) (Stand 1994), August 1995.

Dowling, N.E.; (1999): Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture and fatigue. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey, 1999.

Downing, S.D.; Socie, D.F.; (1982): Simple rainflow counting algorithms. International Journal of Fatigue. 1982, Bd. 4, Nr. 1, S. 31-40.

Dudek, R.; (1993): Analiza metod obliczenia trwałości z wykorzystaniem hipotezy o kumulacji uszkodzeń. In: Mechanika, Tom 12, Zeszyt 2, 1993, S. 155-162.

Ellerbrock, P.J.; Halmos, Z.; Shanthakumaran, P.; (1999): Development of New Health and Usage Monitoring System Tools Using a NASA/Army Rotorcraft. In: Annual Forum Proceedings - American Helicopter Society, Forum 55, New York, 1999, Vol. 2, S. 2337-2348.

Ellyin, F; (1997): Fatigue Damage, Crack Growth and Life Prediction. Chapman & Hall, London (u. a.), 1997.

Elvin, N.A.; Elvin, A.A.; Spector, M.; (2001): A self-powered mechanical strain energy sensor. Smart Materials and Structures, 10(2001), S. 293-299.

EP 0339833 A2 (1989): Offenlegungsschrift: An automatic load monitoring system with remote sensing. Offenlegung am 2.11.1989, Anmelder: Kaman Aerospace Corporation.

Fararooy, S.; (1998): Condition Monitoring for Rail Transport - RCM Strategy. IEE Colloquium (Digest) n 501. Proceeding of the 1998 Seminar on Condition

Monitoring for Rail Transport System. IEE, Stevenage, Nr. 501, IEE, Stevenage, 1998.

Fatemi, A.; Yang, L.; (1998): Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogenous materials. *Int. J. Fatigue*. 1998, Bd. 20, Nr. 1, S. 9-34.

FKM-Richtlinie (1998): Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile: FKM-Richtlinie. VDMA Verlag, Frankfurt am Main, 1998.

Flach, M.; (1999): Rechnerische Lebensdauerabschätzung für stochastische Lasten im Schienenfahrzeugbau. Dissertation. Forschungszentrum für Multidisziplinäre Analysen und Angewandte Strukturoptimierung, Universität Siegen, Siegen, 1999.

Foultier, G.; Lafont, T.; Marcelet, H.M.; (1998): Modular concept for an HUMS dedicated to heavy aircrafts. In: *AIMS 98 – Proceedings of the 19th Symposium Aircraft Integrated Monitoring Systems*, Garmisch-Partenkirchen, Germany, May 4-7, 1998, S. 137-154, Arbeitskreis Telemetrie, Braunschweig, 1998.

Fritzen, C.-P.; Bohle, K.; (1999): Modellgestützte Diagnose von Schädigungen in Tragwerken – eine Anwendung auf eine Autobahnbrücke. *VDI-Berichte Nr. 1466*, 1999, S. 341-354.

Fu, G.; Moosa, A.G.; (2000): Health Monitoring of Structures Using Optical Instrumentation and Probabilistic Diagnosis. In: *Condition monitoring of materials and structures*. Ed. by Farhad Ansari. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2000.

Fuchs, H.O.; Stephens, R.I.; (1980): *Metal fatigue in engineering*. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1980.

Gao, Y.; Spencer, Jr., B.F.; (2008): *Structural Health Monitoring Strategies for Smart Sensor Networks*. Newmark Structural Engineering Laboratory. University of Illinois at Urbana-Champaign. <http://hdl.handle.net/2142/8802>, 2008.

Gausemeier, J.; Ebbesmeyer, P.; Kallmeyer, F.; (2001): *Produktinnovation: Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen*. Hanser, München, 2001.

GB 2233798A (1990): Offenlegungsschrift: Aircraft health and usage monitoring system. Offenlegung am 5.07.1990, Anmelder: Bristow Helicopter Limited.

Gersbach, V.; Naundorf, H.; (1987): Versuchsmethoden für Mißbrauchtests innerhalb der Betriebsfestigkeit. *VDI Berichte Nr. 632*, 1987, S. 169-190.

Goldschmidt, S.; (2002): Anwendung mengenorientierter numerischer Methoden zur Analyse nichtlinearer dynamischer Systeme am Beispiel der Spurführungsdynamik von Schienenfahrzeugen. Dissertation, Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, Mechatronik und Dynamik, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 112, 2002.

Golos, K.; Ellyin, F.; (1987): Generalization of cumulative damage criterion to multilevel cyclic loading. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 1987, Bd. 7, S. 169-176.

Golos, K.; Ellyin, F.; (1988): A total strain energy density theory for cumulative fatigue damage. Journal of Pressure Vessel Technology, February 1988, Bd. 110, S. 36-41.

Grießbach, R.; Berwanger, J.; Peller, M.; (2000): Byteflight – neues Hochleistungs-Datenbussystem für sicherheitsrelevante Anwendungen. ATZ/MTZ Automotive Electronics, Sonderheft, S. 60-67, Friedrich Vieweg & Sohn, 2000.

Grisso, B.L.; (2007): Advancing Autonomous Structural Health Monitoring. Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.

Gudehus, H.; Zenner, H.; (1999): Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung. VDEh, Düsseldorf, 1999.

Günther, G.; (2000): Loads Monitoring and Hums. Paper presented at the RTO AVT Lecture Series on "Aging Aircraft Fleets: Structural and Other Subsystem Aspects", Sofia, Bulgaria, 2000, published in RTO EN-015.

Haibach, E.; (1989): Betriebsfestigkeit: Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989.

Haibach, E.; (1992): Betriebsfeste Bauteile. Springer, Berlin u. a., 1992.

Hampshire, T.A.; Adeli, H.; (2000): Monitoring the behaviour of steel structures using distributed optical fiber sensors. Journal of Constructional Steel Research. 2000, Bd. 53, S. 267-281.

Heine, R.; (2008): Role of On-Board Sensors in Remaining Life Prognostic Algorithm Development for Selected Assemblies as Input to a Health and Usage Monitoring System for Military Ground Vehicles. Dissertation. University of Maryland. <http://hdl.handle.net/1903/7868>, 2008.

Heinisch, R.; (2001): Diagnosesysteme zur Überwachung der Dynamik von Fahrweg und Fahrzeugen. In: ZEV, DET, Glasers Annalen, Die Eisenbahntechnik. 2001, Bd. 125, Nr. 9-10, S. 321-326.

Henkel, C.; (2000): The airframe fatigue life monitoring concept for the WS Tornado in the German Air Force. In: AIMS 2000 – Aircraft Integrated Monitoring Systems; 22-25 May 2000; Garmisch-Partenkirchen, 2000, S. 51-66.

Heuler, P.; Bergmann, J.W.; Schütz, W.; (1987): Die Beurteilung der Betriebsfestigkeit von Kfz-Bauteilen auf der Basis von Probestab-Daten – Möglichkeiten und Grenzen. VDI-Berichte Nr. 632, 1987, S. 191-216.

Hunt, S.R.; Hebden, I.G.; (2001): Validation of the Eurofighter Typhoon structural health and usage monitoring system. In: Smart Materials and Structures. 10(2001), S. 497-503.

Kallenbach, E. et al.; (1997): Zur Gestaltung integrierter mechatronischer Produkte. VDI-Berichte 1315, VDI-Verlag, 1997.

Klein, U.; (1998): Schwingungsdiagnostische Beurteilung von Maschinen und Anlagen. Stahleisen, Düsseldorf, 1998.

Knothe, K.; Stichel, S.; Dietz, St.; (1996): Konzept für einen Betriebsfestigkeitsnachweis aufgrund gekoppelter FE-MKS-Simulationsrechnungen. Konstruktion, 1996, Bd. 48, S. 35-39.

Kolerus, J.; (1995): Zustandsüberwachung von Maschinen, Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1995.

Kraftfahrtechnisches Taschenbuch (1998); ed. Robert Bosch GmbH. Springer, Berlin, 1998.

Krüger, W.; Keul, M.; (1992): Optimale Datenreduktionsverfahren in der Betriebsfestigkeitsanalyse. VDI-Berichte Nr. 974, 1992. S. 153-173.

Kujawski, D.; Ellyin, F.; (1984): A cumulative damage theory for fatigue crack initiation and propagation. International Journal of Fatigue, April 1984, Bd. 6, Nr. 2.

Lagoda, T.; (2001): Energy models for fatigue life estimation under uniaxial random loading. Part I: The model elaboration. International Journal of Fatigue. 2001, Bd. 23, S. 467-480. Part II: Verification of the model. International Journal of Fatigue. 2001, Bd. 23, S. 481-489.

Lagoda, T.; Macha, E.; Pawliczek, M.; (2001): The influence of mean stress on fatigue life of 10HNP steel under random loading. International Journal of Fatigue. 2001, Bd. 23, S. 283-291.

Lemaitre, J.; Chaboche, J.-L.; (1990): Mechanics of solid materials. Cambridge University Press, Cambridge, 1990.



Luo, R.K.; Gabbittas, B.L.; Brickle, B.V.; (1994): Fatigue life evaluation of a railway vehicle bogie using an integrated dynamic simulation. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 1994, Bd. 208, Nr. F2, S. 123-132.

Macha, E.; (2001): A review of energy based multiaxial fatigue failure criteria. In: The Archive of Mechanical Engineering. 2001, Vol. XLVII, Number 1, S. 71-101.

Macha, E.; Sonsino, C.M.; (1999): Energy criteria of multiaxial fatigue failure. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. 1999, Bd. 22, S. 1053-1070.

Maly, H. et al.; (2001): Neue Onboard- und stationäre Diagnosesysteme für Schienenfahrzeuge des Hochgeschwindigkeitsverkehrs. In: ZEV, DET, Glasers Annalen, Die Eisenbahntechnik. 2001, Bd. 125, Nr. 9-10, S. 421-428.

Mangoubi, R.S.; (1998): Robust estimation and failure detection. A concise treatment. Springer-Verlag, London, 1998.

McDowell, D.L.; Clayton, J.D.; Bennett, V.P.; (2000): Integrated diagnostic/prognostic tools for small cracks in structures. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 2000, Bd. 214, Part C, S. 1123-1140.

Miner, M.; (1945): Cumulative damage in failure. Journal of Applied Mechanics. 1945, Bd. 12, S. A159-A164.

Natke, H.G.; Cempel, C.; (1997): Model-aided diagnosis of mechanical systems: fundamentals, detection, localization, assessment. Springer, Berlin u. a., 1997.

Neubauer, M.; Günther, G.; (2000): Aircraft Loads. Paper presented at the RTO AVT Lecture Series on "Aging Aircraft Fleets: Structural and Other Subsystem Aspects", Sofia, Bulgaria, 2000, published in RTO EN-015.

Neue Bahntechnik Paderborn (2005): Internet-Seite: <http://nbp-www.upb.de>, 2005.

Neumair, M.; (1998): In Flight Measurements of Complex Load Distributions with a Multifunctional Autonomous Data Acquisition System. In: Proceedings of the 19th Symposium Aircraft Integrated Monitoring Systems, Garmisch-Partenkirchen, May 4-7, 1998.

Oswald, G. et al.; (1989): Ein speicherprogrammierbares Meßsystem zum Erfassen von Betätigungshäufigkeiten und Fahrbetriebszuständen über lange Zeiträume im Flottenversuch. VDI-Berichte Nr. 741, 1989, S. 323-335.

Palmgren, A.; (1924): Die Lebensdauer von Kugellagern. Zeitschrift des VDI. 1924, Bd. 68, Nr. 14, S. 339-341.

Place, C.S.; Strutt, J.E.; Allsopp, K.; (1999): Reliability prediction of helicopter transmission systems using stress-strength interference with underlying damage accumulation. In: Quality and Reliability Engineering International. 1999, Bd. 15, S. 69-78.

Pfeiffer, W.; (1998): Digitale Messtechnik: Grundlagen, Geräte, Bussysteme. Springer, Berlin, 1998.

Pitoiset, X.; Preumont, A.; (2000): Spectral methods for muliaxial random fatigue analysis of metallic structures. In: International Journal of Fatigue. 2000, Bd. 22, S. 541-550.

Pitoiset, X.; Preumont, A.; Kernilis, A.; (1999): Tools for a multiaxial fatigue analysis of structures submitted to random vibrations. In: Proceedings European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing, 4-6 November 1998, Braunschweig, Germany. ESA, Noordwijk, 1999.

Radaj, D.; (1995): Ermüdungsfestigkeit: Grundlagen für Leichtbau, Maschinen- und Stahlbau. Springer-Verlag, Berlin (u. a.), 1995.

Radaj, D.; Vormwald, M. (2007): Ermüdungsfestigkeit: Grundlagen für Ingenieure. Springer-Verlag, Berlin (u. a.), 2007.

Raison, J.; Viet, J.J.; (1998): Conception des châssis de bogies mécanosoudés en acier pur les rames TGV. Revue générale des chemins de fer 0035-3183/98/05, 1998, S. 17-23.

Rychlik, I.; (1996): Extremes, rainflow cycles and damage functionals in continuous random processes. Stochastic Processes and their Applications. 1996, Bd. 63, S. 97-116.

Sähn, S.; Göldner, H.; (1993): Bruch- und Beurteilungskriterien in der Festigkeitslehre. Fachbuchverlag, Leipzig, 1993.

Schultes, G.; Gau, H.; (1994): Diagnoseeinrichtung des ICE – Systembeschreibung und Konzepte zur Weiterentwicklung. ETR – Eisenbahntechnische Rundschau. 1994, Bd. 43, Heft 7/8 Juli/August, S. 495-506.

Söffker, S.; (1999): Überwachung, Diagnose und lebensdaueroptimierte Betriebsführung schwingungsfähiger Maschinen. Teil 1: Prinzipvergleich bestehender modellgestützter und signalanalytischer Verfahren am Beispiel der Wellenrissdetektion bei Turborotoren. S. 609-626. Teil 2: Entwicklung lebensdauer- und belastungsabhängiger Ausfallraten im SRCE-Konzept. S. 627-638. VDI-Berichte Nr. 1466, 1999.

Steinhorst, W.; (1999): Sicherheitstechnische Systeme: Zuverlässigkeit und Sicherheit kontrollierter und unkontrollierter Systeme. Vieweg, Braunschweig, 1999.

Stichel, S.; (1996): Betriebsfestigkeitsberechnung bei Schienenfahrzeugen anhand von Simulationsrechnungen. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 288. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996.

Stichel, S.; Knothe, K.; (1998): Fatigue life prediction for a s-train bogie. Vehicle System Dynamics Supplement. 1998, Bd. 28, S. 390-403.

Suresh, S.; (1991): Fatigue of materials. Cambridge University Press, Cambridge, 1991.

Takahara, M.; (1992): Field data aquisition system by rainflow method and fatigue life estimation of automobile. In: The Rainflow Method in Fatigue, ed. Y. Murakami, S. 87-93, Butterworth Heinemann, 1992.

Tang, S.S.; Moffat, J.; (1996): Development of an on-board fatigue processor for helicopters. International Journal of Fatigue. 1996, Vol. 18, No. 3, S. 179-189.

Taylor, H. R.; (1997): Data Acquisition for Sensor Systems. Chapman & Hall, London u. a., 1997.

Todd, M.D. et al. (2007): Bragg grating-based fibre optic sensors in structural health monitoring. Phil. Trans. R. Soc. A. 2007, Vol. 365, S. 317-343.

US 4336595 (1982): Patentschrift: Structural life computer. Erteilung am 22.6.1982, (zwischenzeitlich ausgelaufen), Anmelder: Lockheed Corporation.

US 4752053 (1988): Patentschrift: Railway vehicle motion detector. Erteilung am 21.6.1988, Anmelder: DSL Dynamic Sciences Ltd.

Vachtsevanos, G.; (2006): Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2006.

Verhufen, M.; (1998): Concept for A3XX aircraft condition monitoring. In: AIMS 98: Proceedings of the 19th Symposium Aircraft Integrated Monitoring Systems, Garmisch-Partenkirchen, Germany, May 4-7, 1998. S. 119-136. Arbeitskreis Telemetrie, Braunschweig, 1998.

WAFO (2003): A Matlab Toolbox for Analysis of Random Waves and Loads, Tutorial, (2000) Version 2.0.02. <http://www.maths.lth.se/matstat>, Lund University, 2003.

Wallaschek, J.; (1995): Modellierung und Simulation als Beitrag zur Verkürzung der Entwicklungszeiten mechatronischer Produkte In: Simulation in der Praxis – neue Produkte effizienter gestalten. VDI-Berichte Nr. 1215, 1995, S. 35-50.

Wiesenhofer, K.; Schmeja, M.; (2001): Erhöhung der Betriebssicherheit und Verfügbarkeit von Schienenfahrzeugen durch Fahrwerksdiagnose und -überwachung. In: ZEV, DET, Glasers Annalen, Die Eisenbahntechnik. 2001, Bd. 125, Nr. 9-10, S. 441-448.

Xie, L.; (1999): Equivalent life distribution and fatigue failure probability prediction. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 1999, Bd. 76, S. 267-273.

Yen, G.G.; (1995): Integrated health monitoring and control in rotorcraft machines. In: Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks. Bd. 5, S. 885-890, ASME, Fairfield, NY, 1995.

Yen, G.G.; (1996): Health Monitoring of Vibration Signatures in Rotorcraft Wings. In: Neural Processing Letters. 1996, Bd. 4, S. 127-137.

Zheng, X.-L.; (1995): Overload effects on fatigue behaviour and life prediction of low carbon steels. International Journal of Fatigue. 1995, Bd. 17, Nr. 5, S. 331-337.

Zöfel, P.; (2002): Statistik verstehen. Ein Begleitbuch zur computergestützten Anwendung. Addison-Wesley, München u. a., 2002.

**Veröffentlichungen, die im Zusammenhang mit dieser Arbeit entstanden sind**

Wedmann, S.; Wallaschek, J.; (2001): Condition Monitoring in mechatronischen Systemen am Beispiel des Lebensdauerbeobachters. VDI-Berichte Nr. 1606, 2001, S. 243-258.

Wedman, S.; Wallaschek, J.; (2001): The application of a lifetime observer in vehicle technology. Proceedings of the 4th International Conference on Damage Assessment of Structures (DAMAS 2001), Key Engineering Materials, Vol. 204-205; 2001. Trans Tech Publications, Uetikon-Zürich, 2001, pp. 153-162.

Wallaschek, J.; Wedman, S.; Wickord, W.: Lifetime observer: An application of mechatronics in vehicle technology. International Journal of Vehicle Design; Interscience Enterprises Ltd Great Britain, Vol. 28, No. 1/2/3, 2002, pp. 121-130.

DE 10257793 A1 (2004) Offenlegungsschrift: Modellbasierter Lebensdauerbeobachter. Offenlegung: 22.07.2004; Anmelder: DaimlerChrysler AG.



## Anhang 1 – Übersicht der Testparameter für die Proben

Probe Nr.	Dicke a mm	Breite b mm	Quer- schnitt A mm <sup>2</sup>	Biege- länge l mm	Durch- biegung der Vor- spannung s <sub>01</sub> mm	Vor- spannung $\sigma_{01}$ MPa	Hub s <sub>1</sub> mm	Span- nungs- amplitude $\sigma_{a1}$ MPa	Mittel- spannung $\sigma_{m1}$ MPa	Maximale Spannung $\sigma_{max1}$ MPa	Berech- nete Anzahl der Zyklen D=0,5	Tatsäch- liche Anzahl der Zyklen Nf <sub>1</sub>	Durch- biegung der Vor- spannung s <sub>02</sub> mm	Vor- spannung $\sigma_{02}$ MPa	Hub s <sub>2</sub> mm	Span- nungs- amplitude $\sigma_{a2}$ MPa	Mittel- spannung $\sigma_{m2}$ MPa	Maximale Spannung $\sigma_{max2}$ MPa	Berech- nete Anzahl der Zyklen D=0,5	Tatsäch- liche Anzahl der Zyklen Nf <sub>2</sub>	Schädi- gung beim Bruch D
1	15,1	40,03	604,45	720	1,97	24,2	15,6	95,4	119,6	215,0	24807	24858	1,16	14,2	15,6	95,4	109,6	205	32938	173746	3,14
2	15,04	40,07	602,65	720	2,04	24,9	15,6	95,0	120,0	215,0	25402	25401	1,22	14,9	15,6	95,0	110,0	205	33728	277410	4,61
3	15,04	40,10	603,10	720	2,04	24,9	15,6	95,0	120,0	215,0	25402	25807	1,22	14,9	15,6	95,0	110,0	205	33728	264648	4,43
4	15,04	40,07	602,65	720	2,04	24,9	15,6	95,0	120,0	215,0	25402	25412	1,22	14,9	15,6	95,0	110,0	205	33728	374708	6,05
5	15,03	40,11	602,85	720	2,06	25,0	15,6	95,0	120,0	215,0	25503	25507	1,23	15,0	15,6	95,0	110,0	205	33862	502695	7,92
6	15,03	40,05	601,95	720	1,23	15,0	15,6	95,0	110,0	205,0	33862	33865	2,06	25,0	15,6	95,0	120,0	215	25503	353200	7,42
7	15,04	40,05	602,35	720	1,22	14,9	15,6	95,0	110,0	205,0	33728	33728	2,04	24,9	15,6	95,0	120,0	215	25402	377751	7,94
8	15,01	40,04	601,00	720	1,26	15,3	15,6	94,9	110,1	205,0	34132	34133	2,08	25,3	15,6	94,9	120,1	215	25706	246177	5,29
9	15,00	40,00	600,00	720	1,27	15,4	15,6	94,8	110,2	205,0	34267	34269	2,09	25,4	15,6	94,8	120,2	215	25808	187970	4,14
10	15,02	40,05	601,55	720	1,25	15,2	15,6	94,9	110,1	205,0	33997	33998	2,07	25,2	15,6	94,9	120,1	215	25604	269759	5,77





## **Das Heinz Nixdorf Institut – Interdisziplinäres Forschungszentrum für Informatik und Technik**

Das Heinz Nixdorf Institut ist ein Forschungszentrum der Universität Paderborn. Es entstand 1987 aus der Initiative und mit Förderung von Heinz Nixdorf. Damit wollte er Ingenieurwissenschaften und Informatik zusammenführen, um wesentliche Impulse für neue Produkte und Dienstleistungen zu erzeugen. Dies schließt auch die Wechselwirkungen mit dem gesellschaftlichen Umfeld ein.

Die Forschungsarbeit orientiert sich an dem Programm „Dynamik, Mobilität, Vernetzung: Auf dem Weg zu den technischen Systemen von morgen“. In der Lehre engagiert sich das Heinz Nixdorf Institut in vielen Studiengängen der Universität. Hier ist das übergeordnete Ziel, den Studierenden die Kompetenzen zu vermitteln, auf die es in der Wirtschaft morgen ankommt.

Heute wirken am Heinz Nixdorf Institut sieben Professoren mit insgesamt 200 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Etwa ein Viertel der Forschungsprojekte der Universität Paderborn entfallen auf das Heinz Nixdorf Institut und pro Jahr promovieren hier etwa 30 Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler.

## **Heinz Nixdorf Institute – Interdisciplinary Research Centre for Computer Science and Technology**

The Heinz Nixdorf Institute is a research centre within the University of Paderborn. It was founded in 1987 initiated and supported by Heinz Nixdorf. By doing so he wanted to create a symbiosis of computer science and engineering in order to provide critical impetus for new products and services. This includes interactions with the social environment.

Our research is aligned with the program “Dynamics, Mobility, Integration: Enroute to the technical systems of tomorrow.” In training and education the Heinz Nixdorf Institute is involved in many programs of study at the University of Paderborn. The superior goal in education and training is to communicate competencies that are critical in tomorrow's economy.

Today seven Professors and 200 researchers work at the Heinz Nixdorf Institute. The Heinz Nixdorf Institute accounts for approximately a quarter of the research projects of the University of Paderborn and per year approximately 30 young researchers receive a doctorate.



## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |  |  |
|--|--|
| <p>Bd. 1     FAHRWINKEL, U.: Methoden zur Modellierung und Analyse von Geschäftsprozessen zur Unterstützung des Business Process Reengineering. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 1, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-00-0</p> | <p>Bd. 9     HUMPERT, A.: Methodische Anforderungsverarbeitung auf Basis eines objektorientierten Anforderungsmodells. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 9, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-08-6</p>  |
| <p>Bd. 2     HORNBOSTEL, D.: Methode zur Modellierung der Informationsverarbeitung in Industrieunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 2, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-01-9</p>                                     | <p>Bd. 10    AMEUR, F.: Space-Bounded Learning Algorithms. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 10, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-09-4</p>  |
| <p>Bd. 3     STEMANN, V.: Contention Resolution in Hashing Based Shared Memory Simulations. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 3, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-02-7</p>   | <p>Bd. 11    PAUL, M.: Szenariobasiertes Konzipieren neuer Produkte des Maschinenbaus auf Grundlage möglicher zukünftiger Technologieentwicklungen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 11, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-10-8</p>                      |
| <p>Bd. 4     KETTERER, N.: Beschreibung von Datenaustausch eines verteilten Fertigungssteuerungssystems. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 4, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-03-5</p>                               | <p>Bd. 12    HOLL, F.: Ordnungsmäßigkeit von Informations- und Kommunikationssystemen. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 12, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-11-6</p>  |
| <p>Bd. 5     HARTMANN, T.: Spezifikation und Klassifikation von Methoden zur Definition hierarchischer Abläufe. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 5, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-04-3</p>                        | <p>Bd. 13    GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): First European Workshop on Global Engineering Networking - organized by GLENnet e.V., HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 13, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-12-4</p>  |
| <p>Bd. 6     WACHSMANN, A.: Eine Bibliothek von Basisdiensten für Parallelrechner: Routing, Synchronisation, gemeinsamer Speicher. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 6, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-05-1</p>         | <p>Bd. 14    PETRI, K.: Vergleichende Untersuchung von Berechnungsmodellen zur Simulation der Dynamik von Fahrleitung-Stromabnehmer-Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 14, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-13-2</p>                            |
| <p>Bd. 7     GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Die Szenariotechnik – Werkzeug für den Umgang mit einer multiplen Zukunft. 1. Paderborner Szenario-Workshop, 14. November 1995, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 7, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-06-X</p>   | <p>Bd. 15    LESCHKA, S.: Fallbasiertes Störungsmanagement in flexiblen Fertigungssystemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 15, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-14-0</p>  |
| <p>Bd. 8     CZUMAJ, A.: Parallel Algorithmic Techniques: PRAM Algorithms and PRAM Simulations. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 8, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-07-8</p>   | <p>Bd. 16    SCHNEIDER, U.: Ein formales Modell und eine Klassifikation für die Fertigungssteuerung - Ein Beitrag zur Systematisierung der Fertigungssteuerung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 16, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-15-9</p> |

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |  |  |
|--|--|
| <p>Bd. 17 FELSER, W.: Eine Methode zur Erstellung von Fertigungssteuerungsverfahren aus Bausteinen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 17, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-16-7</p> <p>Bd. 18 GAUSEMEIER, J.; ALEXANDER FINK, A.: Neue Wege zur Produktentwicklung – Erfolgspotentiale der Zukunft. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 18, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-17-5</p> <p>Bd. 19 DANGELMAIER, W.; GAUSEMEIER, J.: Fortgeschrittene Informationstechnologie in der Produktentwicklung und Fertigung. 2. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 19, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-18-3</p> <p>Bd. 20 HÜLLERMEIER, E.: Reasoning about Systems based on Incomplete and Uncertain Models. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 20, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-19-1</p> <p>Bd. 21 GAUSEMEIER, J.: International Symposium on Global Engineering Network - Antwerp, Belgium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 21, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-20-5</p> <p>Bd. 22 BURGER, A.: Methode zum Nachweis der Wirtschaftlichkeit von Investitionen in die Rechnerintegrierte Produktion. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 22, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-21-3</p> <p>Bd. 23 GAUSEMEIER, J.: Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik - Paderborner Workshop TransMechatronik. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 23, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-22-1</p> <p>Bd. 24 GERDES, K.-H.: Architekturkonzeption für Fertigungsleitsysteme der flexiblen automatischen Fertigung. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 24, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-23-X</p> | <p>Bd. 25 EBBESMEYER, P.: Dynamische Texturwände - Ein Verfahren zur echtzeitorientierten Bildgenerierung für Virtuelle Umgebungen technischer Objekte. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 25, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-24-8</p> <p>Bd. 26 FRANK, G.: Ein digitales Hardwaresystem zur echtzeitfähigen Simulation biologienaher neuronaler Netze. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 26, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-25-6</p> <p>Bd. 27 DITTRICH, W.: Communication and I/O Efficient Parallel Data Structures. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 27, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-26-4</p> <p>Bd. 28 BÄUMKER, A.: Communication Efficient Parallel Searching. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 28, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-27-2</p> <p>Bd. 29 PINTASKE, C.: System- und Schaltungstechnik neuronaler Assoziativspeicher. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 29, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-28-0</p> <p>Bd. 30 HENKEL, S.: Ein System von Software-Entwurfsmustern für die Propagation von Ereignissen in Werkzeugen zur kooperativen Fabrikmodellierung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 30, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-29-9</p> <p>Bd. 31 DANGELMAIER, W.: Vision Logistik – Logistik wandelbarer Produktionsnetze. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 31, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-30-2</p> <p>Bd. 32 BREXEL, D.: Methodische Strukturmodellierung komplexer und variantenreicher Produkte des integrativen Maschinenbaus. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 32, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-31-0</p> |
|--|--|

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |   |   |
|---|---|
| <p>Bd. 33    HAHN, A.: Integrationsumgebung für verteilte objektorientierte Ingenieursysteme. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 33, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-32-9</p> <p>Bd. 34    SABIN, A.: Semantisches Modell zum Aufbau von Hilfsorientierungsdiensten in einem globalen Engineering Netzwerk. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 34, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-33-7</p> <p>Bd. 35    STROTHMANN, W.-B.: Bounded Degree Spanning Trees. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 35, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-34-5</p> <p>Bd. 36    MÜLLER, W.; RAMMIG, F.-J.: Methoden und Beschreibungssprachen zur Modellierung und Verifikation von Schaltungen und Systemen. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 36, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-35-3</p> <p>Bd. 37    SCHNEIDER, W.: Anwenderorientierte Integration von CAE-Systemen. Ein Verfahren zur Realisierung eines durchgehenden Informationsflusses entlang des Produktentwicklungsprozesses. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 37, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-36-1</p> <p>Bd. 38    DEMEL, W.; SCHMITZ, G. (Hrsg.): Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik. Aachener Workshop TransMechatronik, 26. Juni 1998, Technologiezentrum am Europaplatz Aachen, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 38, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-37-X</p> <p>Bd. 39    GROBBEL, R.; LANGEMANN, T.: Leitfaden PPS-Systeme: Auswahl und Einführung in der Möbelindustrie. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 39, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-38-8</p> <p>Bd. 40    REHBEIN, P.: Tribologische Untersuchung von hochfrequent schwingenden Gleitkontakten für den Einsatz in Reibkraftschlüssigen Antrieben. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 40, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-39-6</p> | <p>Bd. 41    DANGELMAIER, W.: KOMNET – Kommunikationsplattform für KMU-Netzwerke. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 41, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-40-X</p> <p>Bd. 42    KALLMEYER, F.: Eine Methode zur Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 42, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-41-8</p> <p>Bd. 43    TRAPP, R.: Stereoskopische Korrespondenzbestimmung mit impliziter Detektion von Okklusionen. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 43, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-42-6</p> <p>Bd. 44    GAUSEMEIER, J.; FINK, A.; SCHLAKE, O.: Grenzen überwinden - Zukünfte gestalten. 2. Paderborner Konferenz für Szenario-Management, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 44, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-43-4</p> <p>Bd. 45    wird noch vergeben!</p> <p>Bd. 46    VÖCKING, B.: Static and Dynamic Data Management in Networks. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 46, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-45-0</p> <p>Bd. 47    SCHEKELMANN, A.: Materialflußsteuerung auf der Basis des Wissens mehrerer Experten. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 47, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-46-9</p> <p>Bd. 48    GECK-MÜGGE, K.: Herleitung und Spezifikation generischer Bausteine zur einheitlichen Modellierung von Fertigungsinformationen für die Fertigungssteuerung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 48, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-47-7</p> <p>Bd. 49    WALLASCHEK, J.; LÜCKEL, J.; LITTMANN, W.: Heinz Nixdorf Symposium on Mechatronics and Advanced Motion Control. 3. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 49, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-48-5</p> |
|---|---|

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |  |   |
|--|---|
| <p>Bd. 50 FINK, A.: Szenariogestützte Führung industrieller Produktionsunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 50, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-49-3</p> <p>Bd. 51 HOLTkamp, R.: Ein objektorientiertes Rahmenwerk zur Erstellung individueller, verteilter Fertigungslenkungssysteme. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 51, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-50-7</p> <p>Bd. 52 KUHN, A.: Referenzmodelle für Produktionsprozesse zur Untersuchung und Gestaltung von PPS-Aufgaben. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 52, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-51-5</p> <p>Bd. 53 SIEBE, A.: Systematik der Umsetzung von IT-orientierten Veränderungsprojekten in dynamischen Umfeldern. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 53, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-52-3</p> <p>Bd. 54 KLAHOLD, R. F.: Dimensionierung komplexer Produktionsnetzwerke. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 54, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-53-1</p> <p>Bd. 55 SCHÜRholz, A.: Synthese eines Modells zur simulationsgestützten Potentialanalyse der Distribution. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 55, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-54-X</p> <p>Bd. 56 GEHNEN, G.: Integriertes Netzwerk zur Fertigungssteuerung und –automatisierung. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 56, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-55-8</p> <p>Bd. 57 KRESS, S.: Architektur eines workflow-basierten Planungsinstruments für die technische Auftragsbearbeitung unter besonderer Berücksichtigung des Einsatzes der Telearbeit. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 57, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-56-6</p> | <p>Bd. 58 THIELEMANN, F.: Integrierte Methodik zur Gestaltung von Leistungserstellungsprozessen mittels Workflowmanagement. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 58, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-57-4</p> <p>Bd. 59 KROME, J.: Modelle zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Statoren für piezoelektrische Ultraschall-Wanderwellen-Motoren. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 59, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-58-2</p> <p>Bd. 60 DEMEL, W.; SCHMITZ, G. (Hrsg.): Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik. Krefelder Workshop TransMechatronik, 24. August 1999 Fachhochschule Niederrhein, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 60, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-59-0</p> <p>Bd. 61 LANGEMANN, T.: Modellierung als Kernfunktion einer systemorientierten Analyse und Bewertung der diskreten Produktion. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 61, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-60-4</p> <p>Bd. 62 KÜMMEL, M.: Integration von Methoden und Werkzeugen zur Entwicklung von mechatronischen Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 62, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-61-2</p> <p>Bd. 63 LUKOVSKI, T.: New Results on Geometric Spanners and Their Applications. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 63, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-62-0</p> <p>Bd. 64 LÖFFLER, A.; MONDADA, F.; RÜCKERT, U. (Hrsg.): Experiments with the Mini-Robot Khepera, Proceedings of the 1st International Khepera Workshop. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 64, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-63-9</p> <p>Bd. 65 SCHÄFERMEIER, U.; BISCHOFF, C.: KMUnet - Ein Konzept zur ablauforganisatorischen Gestaltung der Lieferanteneinbindung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 65, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-64-7</p> |
|--|---|

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |   |  |
|---|--|
| <p>Bd. 66    HOLTHÖFER, N.: Regeln in einer Mengenplanung unter Ausbringungsgrenzen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 66, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-69-8</p> <p>Bd. 67    SCHLAKE, O.: Verfahren zur kooperativen Szenario-Erstellung in Industrieunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, 67, Paderborn, Band 2000 – ISBN 3-931466-66-3</p> <p>Bd. 68    LEWANDOWSKI, A.: Methode zur Gestaltung von Leistungserstellungsprozessen in Industrieunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 68, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-67-1</p> <p>Bd. 69    SCHMIDTMANN, A.: Eine Spezifikations-sprache für die Fertigungslenkung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 69, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-68-X</p> <p>Bd. 70    GROBBEL, R.: Eine Referenzarchitektur für Kooperationsbörsen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 70, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-69-8</p> <p>Bd. 71    WESSEL, R.: Modelocked Waveguide Lasers in Lithium Niobate. Dissertation, Fachbereich für Physik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 71, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-70-1</p> <p>Bd. 72    LÖFFLER, A.: Energetische Modellierung neuronaler Signalverarbeitung. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 72, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931433-71-X</p> <p>Bd. 73    LUDWIG, L. A.: Computational Intelligence in der Produktionswirtschaft. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 73, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-72-8</p> | <p>Bd. 74    WENSKI, R.: Eine objektorientierte Systemkomponente zur Workflow-Modellierung und -Ausführung unter besonderer Berücksichtigung der Telekooperation. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 74, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-73-6</p> <p>Bd. 75    GRASMANN, M.: Produktkonfiguration auf Basis von Engineering Data Management-Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 75, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-74-4</p> <p>Bd. 76    DITZE, C.: Towards Operating System Synthesis. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 76, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-75-2</p> <p>Bd. 77    KÖRNER, T.: Analog VLSI Implementation of a Local Cluster Neural Network. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 77, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-76-0</p> <p>Bd. 78    SCHEIDELER, C.: Probabilistic Methods for Coordination Problems. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 78, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-77-9</p> <p>Bd. 79    GAUSEMEIER, J.; LINDEMANN, U.; REINHART, G.; WIENDAHL, H.-P.: Kooperatives Produktengineering - Ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 79, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-78-7</p> <p>Bd. 80    GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.: Entwicklungsumgebungen Mechatronik - Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 80, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-79-5</p> <p>Bd. 81    RIEPING, I.: Communication in Parallel Systems-Models, Algorithms and Implementations. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 81, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-80-9</p> |
|---|--|

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |   |   |
|---|---|
| <p>Bd. 82 GAUSEMEIER, J; LÜCKEL, J.: Auf dem Weg zu den Produkten für die Märkte von morgen. 4. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 82, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-81-7</p> <p>Bd. 83 DEL CASTILLO, G.: The ASM Workbench - A Tool Environment for Computer-Aided Analysis and Validation of Abstract State Machine Models. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 83, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-82-5</p> <p>Bd. 84 SCHÄFERMEIER, U.: Eine Methode zur systemorientierten organisatorischen Gestaltung der Zweckaufgabenverrichtung in kooperativen Verbünden; Klassifikation, Aufgabenzuordnung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 84, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-83-3</p> <p>Bd. 85 KRÜGER, J.: Ganzheitliche Beherrschung von Abläufen in und zwischen soziotechnischen Systemen: Ein Beitrag zur Modellbildung und zum paradigmatischen Verständnis von Industrieunternehmen zur Integration von Mensch und Maschine; Prozess und Struktur. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 85, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-84-1</p> <p>Bd. 86 BARTSCHER, T.: Methoden des Integrierten Workflowmanagements (IWFm). Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 86, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-85-X</p> <p>Bd. 87 QUINTANILLA, J.: Ein Verifikationsansatz für eine netzbasierte Modellierungsmethode für Fertigungssteuerungssysteme. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 87, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-86-8</p> <p>Bd. 88 PREIS, R.: Analyses and Design of Efficient Graph Partitioning Methods. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 88, Paderborn, 2001 – ISBN 3-931466-87-6</p> <p>Bd. 89 wird noch vergeben!</p> | <p>Bd. 90 WESTERMANN, M.: Caching in Networks: Non-Uniform Algorithms and Memory Capacity Constraints. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 90, Paderborn, 2001 – ISBN 3-931466-89-2</p> <p>Bd. 91 LEMKE, J.: Nutzenorientierte Planung des Einsatzes von CAD- / CAE-Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 91, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-00-X</p> <p>Bd. 92 VON BOHUSZEWICZ, O.: Eine Methode zur Visualisierung von Geschäftsprozessen in einer virtuellen Umgebung. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 92, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-01-8</p> <p>Bd. 93 BÖRNCHEN, T.: Zur Entwicklung dynamischer Komponenten für variables Kraftfahrzeug-Scheinwerferlicht. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 93, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-02-6</p> <p>Bd. 94 WINDELER, I.: Auswahl von Restrukturierungsprojekten in Forschungs- und Entwicklungsorganisationen der Automobilindustrie. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 94, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-03-4</p> <p>Bd. 95 WOLFF, C.: Parallele Simulation großer pulscodierter neuronaler Netze. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 95, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-04-2</p> <p>Bd. 96 HENKE, A.: Modellierung, Simulation und Optimierung piezoelektrischer Stellsysteme. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 96, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-05-0</p> <p>Bd. 97 RÜCKERT, U.; SITTE, J.; WITKOWSKI, U. (Hrsg.): Autonomous Minirobots for Research and Edutainment AMiRE2001. 5. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 97, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-06-9</p> |
|---|---|



## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |   |   |
|---|---|
| <p>Bd. 98 LI, P.: Datenkonversion für den Datenaustausch in verteilten Fertigungs-Lenkungssystemen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 98, Paderborn, 2001 – ISBN 9-935433-07-7</p>  | <p>Bd. 106 SOETEBEER, M.: Methode zur Modellierung, Kontrolle und Steuerung von Produktstrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 106, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-15-8</p>  |
| <p>Bd. 99 BRANDT, C.: Eine modellbasierte Methode zum strukturierten Entwurf virtueller Umgebungen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 99, Paderborn, 2001 – ISBN 9-935433-08-5</p>   | <p>Bd. 107 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 1. Paderborner Workshop Augmented &amp; Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 107, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-16-6</p>   |
| <p>Bd. 100 WLEKLINSKI, C.: Methode zur Effektivitäts- und Effizienzbewertung der Entwicklung maschinenbaulicher Anlagen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 100, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-09-3</p>                                 | <p>Bd. 108 FLATH, M.: Methode zur Konzipierung mechatronischer Produkte. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 108, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-17-4</p>  |
| <p>Bd. 101 HEMSEL, T.: Untersuchung und Weiterentwicklung linearer piezoelektrischer Schwingungsantriebe. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 101, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-10-7</p>  | <p>Bd. 109 AVENARIUS, J.: Methoden zur Suche und Informationsbereitstellung von Lösungselementen für die Entwicklung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 109, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-18-2</p>   |
| <p>Bd. 102 MAUERMANN, H.: Leitfaden zur Erhöhung der Logistikqualität durch Analyse und Neugestaltung der Versorgungsketten. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 102, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-11-5</p>                    | <p>Bd. 110 HELMKE, S.: Eine simulationsgegestützte Methode für Budgetentscheidungen im Kundenbindungsmanagement. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 110, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-19-0</p>   |
| <p>Bd. 103 WAGENBLAßT, D.: Eine Analyse-methode zur Beurteilung der Funktionssicherheit von gemischt analog-digitalen Schaltungen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 103, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-12-3</p> | <p>Bd. 111 CZUBAYKO, R.: Rechnerinterne Repräsentation von informationsverarbeitenden Lösungselementen für die verteilte kooperative Produktentwicklung in der Mechatronik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 111, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-20-4</p>             |
| <p>Bd. 104 PORRMANN, M.: Leistungsbewertung eingebetteter Neurocomputersysteme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 104, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-13-1</p>  | <p>Bd. 112 GOLDSCHMIDT, S.: Anwendung mengenorientierter numerischer Methoden zur Analyse nichtlinearer dynamischer Systeme am Beispiel der Spurführungsdynamik von Schienenfahrzeugen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 112, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-21-2</p> |
| <p>Bd. 105 SEIFERT, L.: Methodik zum Aufbau von Informationsmodellen für Electronic Business in der Produktentwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 105, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-14-X</p>   | <p>Bd. 113 LEHMANN, T.: Towards Device Driver Synthesis. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 113, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-22-0</p>   |

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |   |   |
|---|---|
| <p>Bd. 114 HÄRTEL, W.: Issueorientierte Frühaufklärung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 114, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-23-9</p> <p>Bd. 115 ZIEGLER, M.: Zur Berechenbarkeit reeller geometrischer Probleme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 115, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-24-7</p> <p>Bd. 116 SCHMIDT, M.: Neuronale Assoziativspeicher im Information Retrieval. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 116, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-25-5</p> <p>Bd. 117 EL-KEBBE, D. A.: Towards the MaSHReC Manufacturing System under Real-Time Constraints. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 117, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-26-3</p> <p>Bd. 118 PUSCH, R.: Personalplanung und -entwicklung in einem integrierten Vorgehensmodell zur Einführung von PDM-Systemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 118, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-27-1</p> <p>Bd. 119 SOHLER, C.: Property Testing and Geometry. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 119, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-28-X</p> <p>Bd. 120 KESPOHL, H.: Dynamisches Matching – Ein agentenbasiertes Verfahren zur Unterstützung des Kooperativen Produktengineering durch Wissens- und Technologietransfer. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 120, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-29-8</p> <p>Bd. 121 MOLT, T.: Eine domänenübergreifende Softwarespezifikationstechnik für automatisierte Fertigungsanlagen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 121, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-30-1</p> | <p>Bd. 122 GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 1. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 122, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-31-X</p> <p>Bd. 123 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 2. Paderborner Workshop Augmented &amp; Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 123, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-32-8</p> <p>Bd. 124 LITTMANN, W.: Piezoelektrische resonant betriebene Ultraschall-Leistungswandler mit nichtlinearen mechanischen Randbedingungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 124, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-33-6</p> <p>Bd. 125 WICKORD, W.: Zur Anwendung probabilistischer Methoden in den frühen Phasen des Systementwurfs. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 125, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-34-4</p> <p>Bd. 126 HEITTMANN, A.: Ressourceneffiziente Architekturen neuronaler Assoziativspeicher. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 126, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-35-2</p> <p>Bd. 127 WITKOWSKI, U.: Einbettung selbstorganisierender Karten in autonome Miniroboter. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 127, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-36-0</p> <p>Bd. 128 BOBDA, C.: Synthesis of Dataflow Graphs for Reconfigurable Systems using Temporal Partitioning and Temporal Placement. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 128, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-37-9</p> <p>Bd. 129 HELLER, F.: Wissensbasiertes Online-Störungsmanagement flexibler, hoch automatisierter Montagesysteme. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 129, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-38-7</p> |
|---|---|

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |   |   |
|---|---|
| <p>Bd. 130 KÜHN, A.: Systematik des Ideenmanagements im Produktentstehungsprozess. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 130, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-39-5</p>  | <p>Bd. 138 STORCK, H.: Optimierung der Kontaktvorgänge bei Wanderwellenmotoren. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 138, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-47-6</p>   |
| <p>Bd. 131 KEIL-SLAWIK, R.; BRENNKE, A.; HOHENHAUS, M.: ISIS -Installationshandbuch für lernförderliche Infrastrukturen. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 131, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-40-9</p>  | <p>Bd. 139 KALTE, H.: Einbettung dynamisch rekonfigurierbarer Hardwarearchitekturen in eine Universalprozessorumgebung. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 139, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-48-4</p>                                |
| <p>Bd. 132 OULD HAMADY, M.: Ein Ansatz zur Gestaltung des operativen Fertigungsmanagements innerhalb der Lieferkette. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 132, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-41-7</p>            | <p>Bd. 140 ISKE, B.: Modellierung und effiziente Nutzung aktiver Infrarotsensorik in autonomen Systemen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 140, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-49-2</p>   |
| <p>Bd. 133 HOLTZ, C.: Theoretical Analysis of Unsupervised On-line Learning through Soft Competition. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 133, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-42-5</p>            | <p>Bd. 141 BÄTZEL, D.: Methode zur Ermittlung und Bewertung von Strategiealternativen im Kontext Fertigungstechnik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 141, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-50-6</p>   |
| <p>Bd. 134 UEBEL, M.: Ein Modell zur Steuerung der Kundenbearbeitung im Rahmen des Vertriebsmanagements. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 134, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-43-3</p>                         | <p>Bd. 142 BÖKE, C.: Automatic Configuration of Real-Time Operating Systems and Real-Time Communication Systems for Distributed Embedded Applications. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 142, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-51-4</p> |
| <p>Bd. 135 BRINKMANN, A.: Verteilte Algorithmen zur Datenplatzierung und zum Routing in gegnerischen Netzwerken. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 135, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-44-1</p> | <p>Bd. 143 KÖCKERLING, M.: Methodische Entwicklung und Optimierung der Wirkstruktur mechatronischer Produkte. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 143, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-52-2</p>   |
| <p>Bd. 136 FRÜND, E.: Aktive Kompensation von periodischen Schwingungen an rotierenden Walzen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 136, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-45-X</p>  | <p>Bd. 144 HENZLER, S.: Methodik zur Konzeption der Struktur und der Regelung leistungsverzweigter Getriebe mit Toroidvariator. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 144, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-53-0</p>   |
| <p>Bd. 137 KEIL-SLAWIK, R. (Hrsg.): Digitale Medien in der Hochschule: Infrastrukturen im Wandel. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 137, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-46-8</p>   | <p>Bd. 145 GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 2. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 145, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-54-9</p>   |

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 146 LESSING, H.: Prozess zur multivariaten Prognose von Produktionsprogrammen für eine effiziente Kapazitätsplanung bei typisierten Dienstleistungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 146, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-55-7
- Bd. 147 HAMOUDIA, H.: Planerische Ablaufgestaltung bei prozessorientierten Dienstleistungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 147, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-56-5
- Bd. 148 BUSCH, A.: Kollaborative Änderungsplanung in Unternehmensnetzwerken der Serienfertigung – ein verhandlungsbasierter Ansatz zur interorganisationalen Koordination bei Störungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 148, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-57-3
- Bd. 149 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 3. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 149, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-58-1
- Bd. 150 MEYER, B.: Value-Adding Logistics for a World Assembly Line. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 150, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-59-X
- Bd. 151 GRIENITZ, V.: Methodik zur Erstellung von Technologieszenarien für die strategische Technologieplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 151, Paderborn, 2004 – ISBN 3-9354 33-60-3
- Bd. 152 FRANKE, H.: Eine Methode zur unternehmensübergreifenden Transportdisposition durch synchron und asynchron kommunizierende Agenten. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 152, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-61-1
- Bd. 153 SALZWEDEL, K. A.: Data Distribution Algorithms for Storage Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 153, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-62-X
- Bd. 154 RÄCKE, H.: Data Management and Routing in General Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 154, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-63-8
- Bd. 155 FRANK, U.; GIESE, H.; KLEIN, F.; OBERSCHELP, O.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; VÖCKING, H.; WITTING, K.; GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen und Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 155, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-64-6
- Bd. 156 MÖHRINGER, S.: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Habilitation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 156, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-65-4
- Bd. 157 FAHRENTHOLZ, M.: Konzeption eines Betriebskonzepts für ein bedarfsgesteuertes schienengebundenes Shuttle-System. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 157, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-66-2
- Bd. 158 GAJEWSKI, T.: Referenzmodell zur Beschreibung der Geschäftsprozesse von After-Sales-Dienstleistungen unter besonderer Berücksichtigung des Mobile Business. Dissertation Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 158, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-67-0
- Bd. 159 RÜTHER, M.: Ein Beitrag zur klassifizierenden Modularisierung von Verfahren für die Produktionsplanung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 159, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-68-9

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |  |  |
|--|--|
| <p>Bd. 160 MUECK, B.: Eine Methode zur benutzerstimulierten detaillierungsvarianten Berechnung von diskreten Simulationen von Materialflüssen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, , Band 160, Paderborn 2004 – ISBN 3-935433-69-7</p> <p>Bd. 161 LANGEN, D.: Abschätzung des Ressourcenbedarfs von hochintegrierten mikroelektronischen Systemen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 161, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-70-0</p> <p>Bd. 162 ORLIK, L.: Wissensbasierte Entscheidungshilfe für die strategische Produktplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 162, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-71-9</p> <p>Bd. 163 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 3. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 163, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-72-7</p> <p>Bd. 164 FISCHER, M.: Design, Analysis, and Evaluation of a Data Structure for Distributed Virtual Environments. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 164, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-73-5</p> <p>Bd. 165 MATYSCZOK, C.: Dynamische Kantenextraktion - Ein Verfahren zur Generierung von Tracking-Informationen für Augmented Reality-Anwendungen auf Basis von 3D-Referenzmodellen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 165, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-74-3</p> <p>Bd. 166 JANIA, T.: Änderungsmanagement auf Basis eines integrierten Prozess- und Produktdatenmodells mit dem Ziel einer durchgängigen Komplexitätsbewertung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 166, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-75-1</p> <p>Bd. 167 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 4. Paderborner Workshop Augmented &amp; Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 167, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-76-X</p> | <p>Bd. 168 VOLBERT, K.: Geometric Spanners for Topology Control in Wireless Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 168, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-77-8</p> <p>Bd. 169 ROSLAK, J.: Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehrsraumes. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 167, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-78-6</p> <p>Bd. 170 EMMRICH, A.: Ein Beitrag zur systematischen Entwicklung produktorientierter Dienstleistungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 170, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-79-4</p> <p>Bd. 171 NOWACZYK, O.: Explorationen: Ein Ansatz zur Entwicklung hochgradig interaktiver Lernbausteine. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 171, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-80-8</p> <p>Bd. 172 MAHMOUD, K.: Theoretical and experimental investigations on a new adaptive duo servo drum brake with high and constant brake shoe factor. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 172, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-81-6</p> <p>Bd. 173 KIEWER, G.: Optimierung in der Flugplanung: Netzwerkentwurf und Flottenzuweisung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 173, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-82-4</p> <p>Bd. 174 BALÁŽOVÁ, M.: Methode zur Leistungsbewertung und Leistungssteigerung der Mechatronikentwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 174, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-83-2</p> <p>Bd. 175 FRANK, U.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinzipiellösung selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 175, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-84-0</p> |
|--|--|

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |  |  |
|--|--|
| <p>Bd. 176 BERGER, T.: Methode zur Entwicklung und Bewertung innovativer Technologiestrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 176, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-85-9</p> <p>Bd. 177 BERSSENBRÜGGE, J.: Virtual Nightdrive - Ein Verfahren zur Darstellung der komplexen Lichtverteilungen moderner Scheinwerfersysteme im Rahmen einer virtuellen Nachtfahrt. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 177, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-86-7</p> <p>Bd. 178 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 1. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 3. und 4. November 2005, Schloß Neuhausen, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 178, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-87-5</p> <p>Bd. 179 FU, B.: Piezoelectric actuator design via multiobjective optimization methods. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 179, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-88-3</p> <p>Bd. 180 WALLASCHEK, J.; HEMSEL, T.; MRACEK, M.: Proceedings of the 2nd International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 180, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-89-1</p> <p>Bd. 181 MEYER AUF DER HEIDE, F.; MONIEN, B. (Hrsg.): New Trends in Parallel &amp; Distributed Computing. 6. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, 17. und 18. Januar 2006, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 181, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-00-1</p> <p>Bd. 182 HEIDENREICH, J.: Adaptierbare Änderungsplanung der Mengen und Kapazitäten in Produktionsnetzwerken der Serienfertigung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 182, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-01-X</p> <p>Bd. 183 PAPE, U.: Umsetzung eines SCM-Konzeptes zum Liefermanagement in Liefernetzwerken der Serienfertigung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 183, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-02-8</p> | <p>Bd. 184 BINGER, V.: Konzeption eines wissensbasierten Instruments für die strategische Vorausschau im Kontext der Szenariotechnik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 184, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-03-6</p> <p>Bd. 185 KRIESEL, C.: Szenarioorientierte Unternehmensstrukturoptimierung – Strategische Standort- und Produktionsplanung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 185, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-04-4</p> <p>Bd. 186 KLEIN, J.: Efficient collision detection for point and polygon based models. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 186, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-05-2</p> <p>Bd. 187 WORTMANN, R.: Methodische Entwicklung von Echtzeit 3D-Anwendungen für Schulung und Präsentation. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 187, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-06-0</p> <p>Bd. 188 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 5. Paderborner Workshop Augmented &amp; Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 188, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-07-9</p> <p>Bd. 189 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 4. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 189, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-08-7</p> <p>Bd. 190 DAMEROW, V.: Average and Smoothed Complexity of Geometric Structures. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 190, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-09-5</p> <p>Bd. 191 GIESE, H.; NIGGEMANN, O. (Hrsg.): Postworkshop Proceedings of the 3rd Workshop on Object-oriented Modeling of Embedded Real-Time Systems (OMER 3), HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 191, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-10-9</p> |
|--|--|

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |  |   |
|--|---|
| <p>Bd. 192 RADKOWSKI, R.: Anwendung evolutionärer Algorithmen zur Unterstützung des Entwurfs selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 192, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-11-7</p> <p>Bd. 193 SHEN, Q.: A Method for Composing Virtual Prototypes of Mechatronic Systems in Virtual Environments. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 193, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-12-5</p> <p>Bd. 194 REDENIUS, A.: Verfahren zur Planung von Entwicklungsprozessen für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 194, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-13-3</p> <p>Bd. 195 KÜHL, P.: Anpassung der Lichtverteilung des Abblendlichtes an den vertikalen Straßenverlauf. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 195, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-14-1</p> <p>Bd. 196 MICHELS, J. S.: Integrative Spezifikation von Produkt- und Produktionssystemkonzeptionen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 196, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-15-X</p> <p>Bd. 197 RIPS, S.: Adaptive Steuerung der Lastverteilung datenparalleler Anwendungen in Grid-Umgebungen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 197, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-16-8</p> <p>Bd. 198 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 2. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 9. und 10. November 2006, Schloß Neuhausen, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 198, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-17-6</p> | <p>Bd. 199 FRANKE, W.: Wiederverwendungsorientierte Herleitung von Inter-Fachkomponentenkonzepten für Lagerverwaltungssysteme. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 199, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-18-7</p> <p>Bd. 200 SCHEIDELER, P.: Ein Beitrag zur erfahrungsbasierten Selbstoptimierung einer Menge technisch homogener fahrerloser Fahrzeuge. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 200, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-19-4</p> <p>Bd. 201 KÖSTERS, C.: Ein ontologiebasiertes Modell zur Beschreibung der Abläufe in einem Produktionssystem unter besonderer Berücksichtigung einer diskreten Produktion. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 201, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-20-0</p> <p>Bd. 202 HALFMEIER, S.: Modellierung und Regelung von Halbtoroidvariationen in leistungsverzweigten Getriebestrukturen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 202, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-21-7</p> <p>Bd. 203 RÜHRUP, S.: Position-based Routing Strategies. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 203, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-22-4</p> <p>Bd. 204 SCHMIDT, A.: Wirkmuster zur Selbstoptimierung – Konstrukte für den Entwurf selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 204, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-23-1</p> <p>Bd. 205 IHMOR, S.: Modeling and Automated Synthesis of Reconfigurable Interfaces. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 205, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-24-8</p> |
|--|---|

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |   |   |
|---|---|
| <p>Bd. 206 ECKES, R.: Augmented Reality – basiertes Verfahren zur Unterstützung des Anlaufprozesses von automatisierten Fertigungssystemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 206, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-25-5</p> <p>Bd. 207 STEFFEN, D.: Ein Verfahren zur Produktstrukturierung für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 207, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-26-2</p> <p>Bd. 208 LAROQUE, C.: Ein mehrbenutzerfähiges Werkzeug zur Modellierung und richtungsoffenen Simulation von wahlweise objekt- und funktionsorientiert gegliederten Fertigungssystemen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 208, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-27-9</p> <p>Bd. 209 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 6. Paderborner Workshop Augmented &amp; Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 209, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-28-6</p> <p>Bd. 210 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 5. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 210, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-29-3</p> <p>Bd. 211 KAUSCHKE, R.: Systematik zur lichttechnischen Gestaltung von aktiven Scheinwerfern. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 211, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-30-9</p> <p>Bd. 212 DU, J.: Zellen-basierte Dienst-Entdeckung für Roboternetzwerke. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 212, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-31-6</p> <p>Bd. 213 DANNE, K.: Real-Time Multitasking in Embedded Systems Based on Reconfigurable Hardware. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 213, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-32-3</p> | <p>Bd. 214 EICKHOFF, R.: Fehlertolerante neuronale Netze zur Approximation von Funktionen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 214, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-33-0</p> <p>Bd. 215 KÖSTER, M.: Analyse und Entwurf von Methoden zur Ressourcenverwaltung partiell rekonfigurierbarer Architekturen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 215, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-34-7</p> <p>Bd. 216 RÜCKERT, U.; SITTE, J.; WITKOWSKI, U.: Proceedings of the 4th International Symposium on Autonomous Minirobots for Research and Edutainment – AMiRE2007. Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 216, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-35-4</p> <p>Bd. 217 PHAM VAN, T.: Proactive Ad Hoc Devices for Relaying Real-Time Video Packets. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 217, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-36-1</p> <p>Bd. 218 VIENENKÖTTER, A.: Methodik zur Entwicklung von Innovations- und Technologie-Roadmaps. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 218, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-37-8</p> <p>Bd. 219 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 3. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 29. und 30. November 2007, Miele &amp; Cie. KG Gütersloh, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 219, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-38-5</p> <p>Bd. 220 FRÜND, J.: Eine Architekturekonzeption für eine skalierbare mobile Augmented Reality Anwendung für die Produktpräsentation. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 220, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-39-2</p> |
|---|---|



## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |   |  |
|---|--|
| <p>Bd. 221 PEITZ, T.: Methodik zur Produktoptimierung mechanisch elektronischer Baugruppen durch die Technologie MID (Molded Interconnect Devices). Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 221, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-40-8</p> <p>Bd. 222 MEYER AUF DER HEIDE, F. (Hrsg.): The European Integrated Project "Dynamically Evolving, Large Scale Information Systems (DELIS)", Proceedings of the Final Workshop, Barcelona, February 27-28, 2008, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 222, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-41-5</p> <p>Bd. 223 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W. (Hrsg.): Self-optimizing Mechatronic Systems: Design the Future. 7. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, 20. und 21. Februar 2008, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 223, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-42-2</p> <p>Bd. 224 RATH, M.: Methode zur Entwicklung hybrider Technologie- und Innovationsstrategien – am Beispiel des Automobils. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 224, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-43-9</p> <p>Bd. 225 GRÜNEWALD, M.: Protokollverarbeitung mit integrierten Multiprozessoren in drahtlosen Ad-hoc-Netzwerken. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 225, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-44-6</p> <p>Bd. 226 STRAUSS, S.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz gepulster Halbleiterlichtquellen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 226, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-45-3</p> <p>Bd. 227 ZEIDLER, C.: Systematik der Materialflussplanung in der frühen Phase der Produktionssystementwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 227, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-46-0</p> | <p>Bd. 228 PARISI, S.: A Method for the intelligent Authoring of 3D Animations for Training and Maintenance. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 228, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-47-7</p> <p>Bd. 229 DITTMANN, F.: Methods to Exploit Reconfigurable Fabrics. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 229, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-48-4</p> <p>Bd. 230 TONIGOLD, C.: Programm-, Ressourcen- und Prozessoptimierung als Bestandteile der Anpassungsplanung von spanenden Fertigungssystemen in der Fließfertigung von Aggregaten. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 230, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-49-1</p> <p>Bd. 231 BRANDT, T.: A Predictive Potential Field Concept for Shared Vehicle Guidance. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 231, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-50-7</p> <p>Bd. 232 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop Augmented &amp; Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 232, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-51-4</p> <p>Bd. 233 CHANG, H.: A Methodology for the Identification of Technology Indicators. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 233, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-52-1</p> <p>Bd. 234 ADEL, P.; DONOTH, J.; GAUSEMEIER, J.; GEISLER, J.; HENKLER, S.; KAHL, S.; KLÖPPER, B.; KRUPP, A.; MÜNCH, E.; OBERTHÜR, S.; PAIZ, C.; PORRMANN, M.; RADKOWSKI, R.; ROMANUS, C.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; TSCHESCHNER, T.; VÖCKING, H.; WITKOWSKI, U.; WITTING, K.; ZNAMENSHCHYKOV, O.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen, Anwendungen, Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 234, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-53-8</p> |
|---|--|

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |  |  |
|--|--|
| <p>Bd. 235 DELL'AERE, A.; HIRSCH, M.; KLÖPPER, B.; KOESTER, M.; KRÜGER, M.; KRUPP, A.; MÜLLER, T.; OBERTHÜR, S.; POOK, S.; PRIESTERJAHN, C.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SONDERMANN-WÖLKE, C.; TICHY, M.; VÖCKING, H.; ZIMMER, D.: Verlässlichkeit selbstoptimierender Systeme – Potenziale nutzen und Risiken vermeiden. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 235, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-54-5</p> <p>Bd. 236 GEHRKE, M.; GIESE, H.; STROOP J.: Proceedings of the 4th Workshop on Object-oriented Modeling of Embedded Real-Time Systems (OMER4), Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 236, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-55-2</p> <p>Bd. 237 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 4. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 30. und 31. Oktober 2008, Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 237, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-56-9</p> <p>Bd. 238 BRÖKELMANN, M.: Entwicklung einer Methodik zur Online-Qualitätsüberwachung des Ultraschall-Drahtbondprozesses mittels integrierter Mikrosensorik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 238, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-57-6</p> <p>Bd. 239 KETTELHOIT, B.: Architektur und Entwurf dynamisch rekonfigurierbarer FPGA-Systeme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 239, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-58-3</p> <p>Bd. 240 ZAMBALDI, M.: Concepts for the development of a generic Multi-Level Test Bench covering different areas of applications. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 240, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-59-0</p> <p>Bd. 241 OBERSCHELP, O.: Strukturierter Entwurf selbstoptimierender mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 241, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-60-6</p> | <p>Bd. 242 STOLLT, G.: Verfahren zur strukturierten Vorausschau in globalen Umfeldern produzierender Unternehmen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 242, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-61-3</p> <p>Bd. 243 WENZELMANN, C.: Methode zur zukunftsorientierten Entwicklung und Umsetzung von Strategieoptionen unter Berücksichtigung des antizipierten Wettbewerbsverhaltens. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 243, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-62-0</p> <p>Bd. 244 BRÜSEKE, U.: Einsatz der Bibliometrie für das Technologiemanagement. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 244, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-63-7</p> <p>Bd. 245 TIMM, T.: Ein Verfahren zur hierarchischen Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung von Fertigungssystemen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 245, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-64-4</p> <p>Bd. 246 GRIESE, B.: Adaptive Echtzeitkommunikationsnetze. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 246, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-65-1</p> <p>Bd. 247 NIEMANN, J.-C.: Ressourceneffiziente Schaltungstechnik eingebetteter Parallelrechner. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 247, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-66-8</p> <p>Bd. 248 KAISER, I.: Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 248, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-67-5</p> |
|--|--|

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |  |  |
|--|--|
| <p>Bd. 249 GANS, J. E.: Neu- und Anpassungsplanung der Struktur von getakteten Fließproduktionssystemen für variantenreiche Serienprodukte in der Montage. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 249, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-68-2</p> <p>Bd. 250 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 6. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 250, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-69-9</p> <p>Bd. 251 LESSMANN, J.: Protocols for Telephone Communications in Wireless Multi-Hop Ad Hoc Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 251, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-70-5</p> <p>Bd. 252 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 8. Paderborner Workshop Augmented &amp; Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 252, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-71-2</p> <p>Bd. 253 KLÖPPER, B.: Ein Beitrag zur Verhaltensplanung für interagierende intelligente mechatronische Systeme in nicht-deterministischen Umgebungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 253, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-72-9</p> <p>Bd. 254 Low, C. Y.: A Methodology to Manage the Transition from the Principle Solution towards the Controller Design of Advanced Mechatronic Systems. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 254, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-73-6</p> <p>Bd. 255 XU, F.: Resource-Efficient Multi-Antenna Designs for Mobile Ad Hoc Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 255, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-74-3</p> | <p>Bd. 256 MÜLLER, T.: Integration von Verlässlichkeitsanalysen und -konzepten innerhalb der Entwicklungsmethodik mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 256, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-75-0</p> <p>Bd. 257 BONORDEN, O.: Versatility of Bulk Synchronous Parallel Computing: From the Heterogeneous Cluster to the System on Chip. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 257, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-76-7</p> <p>Bd. 258 KORTENJAN, M.: Size Equivalent Cluster Trees - Rendering CAD Models in Industrial Scenes. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 258, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-77-4</p> <p>Bd. 259 SCHOMAKER, G.: Distributed Resource Allocation and Management in Heterogeneous Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 259, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-78-1</p> <p>Bd. 260 MENSE, M.: On Fault-Tolerant Data Placement in Storage Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 260, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-79-8</p> <p>Bd. 261 LÜRWER-BRÜGGEMEIER, K.: Mächtigkeit und Komplexität von Berechnungen mit der ganzzahligen Division. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 261, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-80-4</p> <p>Bd. 262 ALTEMEIER, S.: Kostenoptimale Kapazitätsabstimmung in einer getakteten Variantenfließlinie unter expliziter Berücksichtigung des Unterstützereinsatzes und unterschiedlicher Planungszeiträume. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 262, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-81-1</p> |
|--|--|

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 263 MAHAJAN, K.: A combined simulation and optimization based method for predictive-reactive scheduling of flexible production systems subject to execution exceptions. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 263, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-82-8
- Bd. 264 CHRISTIANSEN, S. K.: Methode zur Klassifikation und Entwicklung reifegradbasierter Leistungsbewertungs- und Leistungssteigerungsmodelle. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 264, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-83-5
- Bd. 265 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 5. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 19. und 20. November 2009, Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 265, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-84-2
- Bd. 266 KAULMANN, T.: Ressourceneffiziente Realisierung Pulscodierter Neuronaler Netze. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 266, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-85-9
- Bd. 267 WEHRMEISTER, M. A.: An Aspect-Oriented Model-Driven Engineering Approach for Distributed Embedded Real-Time Systems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 267, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-86-6
- Bd. 268 DANNE, C.: Assessing the Cost of Assortment Complexity in Consumer Goods Supply Chains by Reconfiguration of Inventory and Production Planning Parameters in Response to Assortment Changes. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 268, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-87-3
- Bd. 269 AUFENANGER, M.: Situativ trainierte Regeln zur Ablaufsteuerung in Fertigungssystemen und ihre Integration in Simulationssysteme. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 269, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-88-0
- Bd. 270 STOLL, K.: Planung und Konzipierung von Marktleistungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 270, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-89-7
- Bd. 271 IHMELS, S.: Verfahren zur integrierten informationstechnischen Unterstützung des Innovationsmanagements. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 271, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-90-3
- Bd. 272 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 272, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-91-0
- Bd. 273 PURNAPRAJNA, M.: Run-time Reconfigurable Multiprocessors. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 273, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-92-7
- Bd. 274 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 9. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 274, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-93-4