

Integriertes Qualitätsinformations- und Recherchesystem für die dokumentierte Prüfung von Bauteilen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Matthias Recknagel
aus Stuttgart

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h.
Dr. h.c. mult. E. Westkämper
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Spath
Tag der Einreichung: 14.05.2004
Tag der mündlichen Prüfung: 11.01.2005

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart
2005

IPA-IAO Forschung und Praxis

Berichte aus dem
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung (IPA), Stuttgart,
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und
Organisation (IAO), Stuttgart,
Institut für Industrielle Fertigung und
Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart
und Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

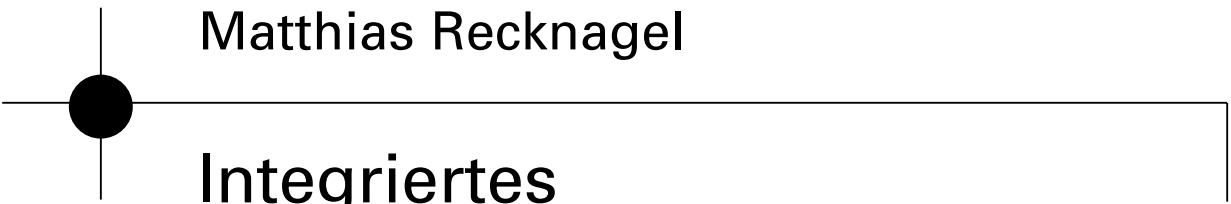
Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. e.h. Dr. h.c. Hans-Jörg Bullinger
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

Matthias Recknagel



Integriertes
Qualitätsinformations-
und Recherchesystem
für die dokumentierte
Prüfung von Bauteilen

Nr. 432

Dr.-Ing. Matthias Recknagel

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. e.h. Dr. h.c. Hans-Jörg Bullinger

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, München

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

D 93

ISBN 3-936947-77-5 Jost Jetter Verlag, Heimsheim

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Jost Jetter Verlag, Heimsheim 2005.

Printed in Germany.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Druck: printsystem GmbH, Heimsheim

Geleitwort der Herausgeber

Über den Erfolg und das Bestehen von Unternehmen in einer marktwirtschaftlichen Ordnung entscheidet letztendlich der Absatzmarkt. Das bedeutet, möglichst frühzeitig absatzmarktorientierte Anforderungen sowie deren Veränderungen zu erkennen und darauf zu reagieren.

Neue Technologien und Werkstoffe ermöglichen neue Produkte und eröffnen neue Märkte. Die neuen Produktions- und Informationstechnologien verwandeln signifikant und nachhaltig unsere industrielle Arbeitswelt. Politische und gesellschaftliche Veränderungen signalisieren und begleiten dabei einen Wertewandel, der auch in unseren Industriebetrieben deutlichen Niederschlag findet.

Die Aufgaben des Produktionsmanagements sind vielfältiger und anspruchsvoller geworden. Die Integration des europäischen Marktes, die Globalisierung vieler Industrien, die zunehmende Innovationsgeschwindigkeit, die Entwicklung zur Freizeitgesellschaft und die übergreifenden ökologischen und sozialen Probleme, zu deren Lösung die Wirtschaft ihren Beitrag leisten muss, erfordern von den Führungskräften erweiterte Perspektiven und Antworten, die über den Fokus traditionellen Produktionsmanagements deutlich hinausgehen.

Neue Formen der Arbeitsorganisation im indirekten und direkten Bereich sind heute schon feste Bestandteile innovativer Unternehmen. Die Entkopplung der Arbeitszeit von der Betriebszeit, integrierte Planungsansätze sowie der Aufbau dezentraler Strukturen sind nur einige der Konzepte, welche die aktuellen Entwicklungsrichtungen kennzeichnen. Erfreulich ist der Trend, immer mehr den Menschen in den Mittelpunkt der Arbeitsgestaltung zu stellen - die traditionell eher technokratisch akzentuierten Ansätze weichen einer stärkeren Human- und Organisationsorientierung. Qualifizierungsprogramme, Training und andere Formen der Mitarbeiterentwicklung gewinnen als Differenzierungsmerkmal und als Zukunftsinvestition in *Human Resources* an strategischer Bedeutung.

Von wissenschaftlicher Seite muss dieses Bemühen durch die Entwicklung von Methoden und Vorgehensweisen zur systematischen Analyse und Verbesserung des Systems Produktionsbetrieb einschließlich der erforderlichen Dienstleistungsfunktionen unterstützt werden. Die Ingenieure sind hier gefordert, in enger Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen, z. B. der Informatik, der Wirtschaftswissenschaften und der Arbeitswissenschaft, Lösungen zu erarbeiten, die den veränderten Randbedingungen Rechnung tragen.

Die von den Herausgebern langjährig geleiteten Institute, das

- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO),
- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart,
- Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

arbeiten in grundlegender und angewandter Forschung intensiv an den oben aufgezeigten Entwicklungen mit. Die Ausstattung der Labors und die Qualifikation der Mitarbeiter haben bereits in der Vergangenheit zu Forschungsergebnissen geführt, die für die Praxis von großem Wert waren. Zur Umsetzung gewonnener Erkenntnisse wird die Schriftenreihe „IPA-IAO - Forschung und Praxis“ herausgegeben. Der vorliegende Band setzt diese Reihe fort. Eine Übersicht über bisher erschienene Titel wird am Schluss dieses Buches gegeben.

Dem Verfasser sei für die geleistete Arbeit gedankt, dem Jost Jetter Verlag für die Aufnahme dieser Schriftenreihe in seine Angebotspalette und der Druckerei für saubere und zügige Ausführung. Möge das Buch von der Fachwelt gut aufgenommen werden.

Engelbert Westkämper Hans-Jörg Bullinger Dieter Spath

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart und am Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart. Für die Ermöglichung und Förderung der Arbeit im Rahmen meiner Beschäftigung an diesen Instituten möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Westkämper danken. Herrn Prof. Dr.-Ing. D. Spath danke ich für die Übernahme des Koreferates.

Mein besonderer Dank gilt Dr. Wolfgang Rauh, der mich über viele Jahre beruflich gefördert und bei der Anfertigung der Arbeit immer wieder motiviert und mit sachkundigem Rat begleitet hat. Bei der Durchführung meiner Arbeiten wurde ich von zahlreichen Kollegen hilfreich unterstützt. Hervorzuheben sind hierbei besonders Thomas Bantel, Lorenz Holzer, Stephan Roder und Markus Hüttel. Prof. Dr. Günter Radons danke ich für die gewissenhafte Durchsicht der Arbeit und die konstruktiven Hinweise.

Die dem Thema zugrunde liegende Aufgabenstellung entstand im Rahmen mehrerer Projekte mit der Advanced Nuclear Fuels GmbH in Duisburg. Mein Dank gilt Herrn Ulrich Mariak, der die Weiterentwicklung der Prüfverfahren über viele Jahre begleitet und damit einen wesentlichen Beitrag zu dem in dieser Arbeit beschriebenen Beispiel für die Anwendung der entwickelten Verfahren geleistet hat.

Für die Unterstützung bei der Ausarbeitung der Arbeit danke ich Veronika Simko für die Erstellung der zahlreichen Abbildungen sowie Christine Christ für die Übernahme des Lektorats.

Der Entstehung der Arbeit fielen zahlreiche Wochenenden, Urlaubstage und Abende zum Opfer. Für ihre Ermunterung, ihr Verständnis und ihre Geduld danke ich in diesem Zusammenhang ganz besonders meiner Frau Ute.

Stuttgart, im Oktober 2005

Matthias Recknagel

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	17
2	Stand der Technik	19
2.1	Qualitätsmanagement	19
2.1.1	Total Quality Management und Kontinuierlicher Verbesserungsprozess	21
2.2	Qualitätsprüfung	22
2.2.1	Messen und Prüfen	24
2.2.2	Prüfplanung	25
2.2.3	Prüfbeauftragung	26
2.2.4	Durchführung von Prüfungen	26
2.2.5	Auswertung von Prüfergebnissen	33
2.3	Einsatz von C-Techniken	36
2.3.1	Rechnergestützte Qualitätsplanung und -lenkung	37
2.3.2	Rechnergestützte Qualitätsprüfung	38
2.3.3	Organisatorische und informationstechnische Integration	38
2.4	Praktische Durchführung von Prüfungen	38
2.5	Produkthaftung und Dokumentation von Prüfungen	40
2.5.1	Grundlagen der Produkthaftung	40
2.5.2	Dokumentation von Prüfungen	42
2.5.3	Dokumentierte Prüfung von Bauteilen	43
2.6	Zusammenfassung	44
3	Qualitätsdatenrecherche	45
3.1	Voraussetzungen für die Qualitätsdatenrecherche	47
3.2	Durchführung der Qualitätsdatenrecherche	49
3.3	Varianten der Qualitätsdatenrecherche	50
3.4	Realisierung von Qualitätsdatenrecherchesystemen	51
3.4.1	Organisatorisch-technische Komponenten	51
3.4.2	Mathematisch-informationstechnische Komponenten	52

4	Wissenschaftliche Grundlagen	55
4.1	Funktionsweise eines Erkennungssystems	56
4.2	Generierung von Merkmalen	58
4.2.1	Einteilung von Signalen	58
4.2.2	Verarbeitung mit Auswertefenstern	59
4.2.3	Beschreibung von Signalen im Zeitbereich	61
4.2.4	Beschreibung von Signalen im Frequenzbereich	62
4.2.5	Wavelet-Transformation	63
4.3	Klassifikation	72
4.3.1	Merkmalsraum	72
4.3.2	Abstandsfunktion	74
4.3.3	Entscheidungsfindung	75
4.3.4	Lineare Klassifikatoren	75
4.3.5	Statistische Klassifikatoren	76
4.3.6	Beurteilung von Klassifikatoren	78
4.4	Lernen	80
4.4.1	Evolutionäre Algorithmen	81
5	Systembeschreibung	87
5.1	Die Qualitätsdatenrecherche im CAQ-Umfeld	87
5.1.1	Beispiel: Rohrprüfung	90
5.2	Modellierung des Gesamtsystems	92
5.2.1	Beschreibung des Systems mit Use Cases	92
5.2.2	Statisches Modell des Systems	102
5.2.3	Dynamisches Modell des Systems	112
5.3	Entwurf ausgewählter Systembestandteile	123
5.3.1	Signalformbewertende Auswertung der Prüfdaten	124
5.3.2	Signalanalyse	125
5.3.3	Klassifikation	129
5.3.4	Optimierung des Merkmalsvektors	133
5.4	Erprobung des Erkennungssystems	135

6	Automatische Ultraschallprüfung von Hüllrohren	141
6.1	Prüfverfahren	141
6.2	Aufbau des automatisierten Prüfsystems	143
6.3	Festlegen von Suchmustern	146
7	Zusammenfassung	149
8	Summary	151
8.1	Motivation and Objective of Quality Data Enquiry	151
8.2	Functions Covered by Quality Data Enquiry Systems	152
8.3	Architecture and Functioning of the Quality Data Enquiry System	153
8.4	Validation of the Quality Data Enquiry System	154
8.5	Use of Quality Data Enquiry	154
8.6	Conclusion	155

Symbolverzeichnis

E	Entscheidungsraum
G	durch gemessene physikalische Größen aufgespannter Raum
M	durch die aus den physikalischen Größen ermittelten Merkmale aufgespannter Raum
T	Definitionsbereich von x
X	Wertebereich von x
δ	Einheitsimpuls
$\hat{\Gamma}(\xi)$	Genetischer Operator mit Zufallselementen ξ
ι	Fitnessfunktion
K	Kovarianzmatrix
$\mathfrak{P}(t)$	Population der Generation t
ω	Kreisfrequenz
ψ	Grundform eines Wavelets
$\psi_{a,t}$	Basisfunktionen für Wavelet-Transformation
$\psi_{m,n}$	Basisfunktionen für diskrete Wavelet-Transformation
σ	Codierungssymbol des Parametervektors für genetische Algorithmen
$\underline{X}(\omega)$	Fourier-Transformierte
$\underline{X}(a, t)$	Wavelet-Transformierte
φ_i	Phasenwinkel
$\varphi_{m,n}$	diskrete Skalierungsfunktion
$\vec{\chi}_t^{(i)}$	Individuen der Population der Generation i
$\vec{\mu}_k$	mittlerer Klassenvektor der Klasse k
\vec{Y}, \vec{y}	Merkmalsvektor
a	Kontinuierlicher Skalenfaktor

a_m	Diskreter Skalenfaktor
$a_Q(i)$	Schätzwert zur Beurteilung der Zuverlässigkeit der Zuordnung der Beobachtung \vec{y}_i zur richtigen Klasse k
c_i	Fourier-Koeffizienten
$CVQPM(\mathfrak{K})$	Bewertungskriterium (Crossvalidated Quadratic Probability Measure) für Klassifikator \mathfrak{K}
$d(\vec{x}, \vec{y})$	Abstandsfunktion
d_k	Unterscheidungsfunktion für Klassifikation
e_k	zu unterscheidende Klassen
L_F	Filterlänge
L_k	Umfang der Lernstichprobe der Klasse k
M_i	Modellinformation über die zu verarbeitenden Signale oder die zu unterscheidenden Klassen
N	Wavelet-Ordnung
$P(k)$	A-priori-Klassenwahrscheinlichkeit für Klasse k
x	Eingangssignal des Erkennungssystems
BDE	Betriebsdatenerfassung
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
CAD	Computer Aided Design
CAP	Computer Aided Planing
DOE	Design of Experiments
FMEA	Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse
GA	Genetische Algorithmen
HGB	Handelsgesetzbuch
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LAN	Local Area Network
OODB	objektorientierte Datenbank
PMÜ	Prüfmittelüberwachung
PPS	Produktionsplanung und -steuerung

QFD Quality Function Deployment

RDB relationale Datenbanksystem

SPC Statistische Prozessregelung

TQM Total Quality Management

Kapitel 1

Einleitung

Für die Aufrechterhaltung der Produktion ist ein funktionierendes Qualitätswesen heute unerlässlich geworden. In die betrieblichen Abläufe integriert stellt es eine große Zahl von Werkzeugen und Verfahren zur Verfügung, mit deren Hilfe *Qualität* zu einer bewertbaren und planbaren Zielgröße für Unternehmen gemacht werden kann. Die bekannten und in der Praxis angewandten Verfahren stellen die *Planung* und *Dokumentation* qualitätsrelevanter Prozesse sowie die Durchführung von *Prüfungen* in den Vordergrund des Interesses. Ziel dieser Aktivitäten ist die *Sicherstellung* und die kontrollierte kontinuierliche *Verbesserung* der Qualität.

Die Ziele des Qualitätswesens haben somit eine regulierende, den aktuellen Zustand der Produktion beeinflussende und eine in die Zukunft gerichtete Komponente. Idealerweise sollen die Erkenntnisse aus der aktuellen Qualitätslage einen Beitrag zur angestrebten Verbesserung liefern. Betrachtet man jedoch die zur Verfügung stehenden Methoden und Werkzeuge, so stellt man fest, dass auf der *operativen* Ebene derzeit keine Verfahren zur Verfügung stehen, die den unterschiedlichen Charakter dieser beiden Teilziele miteinander verbinden.

Grundlage für die Beurteilung des aktuellen Zustandes der Produktion ist meist die Durchführung von *Prüfungen* an Werkstücken oder Proben, die dem Fertigungsfluss entnommen werden. Mit Hilfe des Ergebnisses der Prüfung und prozessspezifischem Wissen kann nun festgelegt werden, ob und ggf. wie in den Produktionsprozess eingegriffen werden muss, um die gewünschte Änderung des produzierten Werkstücks zu erreichen. Die im Rahmen von Prüfungen anfallenden Daten werden den individuellen Anforderungen entsprechend dokumentiert und in vielen Fällen so aufbereitet, dass sie eine Beurteilung der aktuellen Prozessfähigkeit zulassen. Dem Streben nach einer kontinuierlichen Verbesserung der Qualität wird durch ein Führungsmodell Rechnung getragen, das den Qualitätsbegriff auf alle Unternehmensbereiche überträgt.

Mit dem in dieser Arbeit beschriebenen Verfahren der *Qualitätsdatenrecherche* wird eine Möglichkeit aufgezeigt, die bei der Durchführung von Prüfungen anfallenden Informationen so zu verarbeiten und zu verwalten, dass sie für zusätzliche, zu einem späteren Zeitpunkt durchzuführende und über den derzeitigen Entwicklungsstand der angewandten Verfahren hinausgehende Untersuchungen genutzt werden können. So können mit Hilfe der Qualitätsdatenrecherche beispielsweise *nachträglich* zusätzliche Aussagen über das zu erwartende Verhalten von bereits im Einsatz befindlichen Produkten oder Bauteilen gemacht werden, ohne diese einer neuen Prüfung im Sinne unterziehen zu müssen. Darüber hinaus können neue Untersuchungen und Auswertungen der anfallenden Daten mit Hilfe der Qualitätsdatenrecherche entwickelt und verifiziert werden. Auf diese Weise wird es möglich, aktuelle oder in der Vergangenheit aufgezeichnete Daten zur Weiterentwicklung und Verbesserung von Maßnahmen

zur Sicherung der Qualität auf der technischen Ebene systematisch zu nutzen. Die Qualitätsdatenrecherche ergänzt damit den im TQM-Modell enthaltenen Aspekt des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses auf der technischen Ebene.

Die Gewinnung dieser Aussagen und Erkenntnisse mit Hilfe der Qualitätsdatenrecherche basiert auf der nachträglichen Auswertung von bereits erfassten Daten. Für den wirtschaftlich vertretbaren Einsatz des Verfahrens unter Produktionsbedingungen müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein: Zunächst müssen die zugrunde liegenden Daten erfasst und so organisiert werden, dass sie jederzeit wieder zugeordnet und ohne großen Aufwand genutzt werden können. Darüber hinaus müssen geeignete mathematische Auswerteverfahren zur Verfügung stehen, die einerseits ausreichend flexibel und leistungsfähig sind, andererseits aber auch ohne ausgeprägtes mathematisches Grundlagenwissen an die jeweils betrachtete Aufgabenstellung angepasst werden können.

Die beiden genannten Anforderungen spiegeln sich auch in den Schwerpunkten der vorliegenden Arbeit wider. So wird einerseits ein *System* für die Qualitätsdatenrecherche dargestellt, andererseits muss jedoch auch auf das *Verfahren* zur Auswertung der Daten und die zugehörigen mathematischen Grundlagen eingegangen werden. Die Qualitätsdatenrecherche wird damit im Rahmen der Beschreibung des Systems quasi aus externer Sicht dargestellt. Dies umfasst sowohl die Schnittstellen zu umgebenden Systemen und Prozessen als auch die Beschreibung der von der Qualitätsdatenrecherche in das Gesamtsystem eingebrachten Funktionalität. Der zweite Aspekt konzentriert sich im Rahmen der Beschreibung des Verfahrens stark auf mathematische Algorithmen und Verfahren, mit deren Hilfe die aus externer Sicht wahrnehmbaren Funktionen realisiert werden können.

Ziel der Arbeit ist es, die Idee der Qualitätsdatenrecherche in allgemeiner Form zu entwickeln und an einem konkreten Beispiel anschaulich darzustellen. Es soll gezeigt werden, dass die mit der Realisierung eines solchen Systems verbundenen mathematischen und technischen Herausforderungen mit den heute zur Verfügung stehenden Mitteln zu bewältigen sind. Der hier beschriebene Lösungsweg repräsentiert damit *einen* von vielen möglichen Ansätzen zur Realisierung eines Systems für die praktische Anwendung der Qualitätsdatenrecherche.

Um die Idee der Qualitätsdatenrecherche vor dem Hintergrund des aktuellen Qualitätsmanagements darstellen zu können, wird zunächst in Kapitel 2 ein Überblick über die dem Stand der Technik entsprechenden Bausteine des Qualitätswesens gegeben. Darauf aufbauend beschreibt Kapitel 3 die grundsätzliche Idee der Qualitätsdatenrecherche. Neben der Funktionsweise werden dabei auch die grundsätzlichen Voraussetzungen, die Varianten und die daraus resultierenden Anforderungen an das System und die eingesetzten Verfahren aufgezeigt. Bevor mit der konkreten Beschreibung eines Systems zur Durchführung der Qualitätsdatenrecherche in Kapitel 5 begonnen werden kann, erfolgt zunächst in Kapitel 4 eine Darstellung der wichtigsten mathematischen Grundlagen und der verwandten Verfahren. Den Abschluss der Arbeit bildet die Beschreibung des Einsatzes eines Qualitätsdatenrecherchesystems im Zusammenhang mit der automatischen Prüfung von Hüllrohren in Kapitel 6.

Kapitel 2

Stand der Technik

Bevor detailliert auf System und Verfahren der Qualitätsdatenrecherche eingegangen wird, soll zunächst das Umfeld im Hinblick auf den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik beleuchtet werden. Infolge der hohen „Verfahrenstiefe“ erstreckt sich der dabei zu betrachtende Bereich von den allgemeinen Zielen und Grundsätzen des Qualitätsmanagements über die Grundlagen für die Durchführung von Prüfungen bis zu Fragen der Produkthaftung.

2.1 Qualitätsmanagement

Qualitätsmanagement ist die Grundhaltung oder besser noch die ständige Bemühung aller Mitarbeiter einer Organisation oder Unternehmung, die externen und internen Kundenerwartungen zu verstehen, zu erfüllen und zu übertreffen. Qualitätsmanagement ist somit sowohl die Philosophie als auch die praktizierte Umsetzung von Führungsprinzipien sowie die Technik zur Optimierung dienstleistender wie auch technischer Prozessabläufe [71].

Das Qualitätsmanagement erstreckt sich damit nicht nur auf einen bestimmten Bereich des Unternehmens. Seine Ideen finden sich vielmehr idealerweise in *allen* Unternehmensbereichen wieder. Exemplarisch seien hier im Falle eines produzierenden Unternehmens die Entwicklung, Konstruktion, Prozessplanung, das Beschaffungswesen sowie die Fertigung genannt. Bei den Anforderungen, die an ein modernes Qualitätssicherungssystem gestellt werden, kann nach [39] zwischen *Aufgabengruppen* (Planung, Lenkung, Darlegung und Verbesserung) und *Betrachtungseinheiten* (Produkte, Prozesse und Systeme) unterschieden werden.

Erste Ansätze zur Qualitätskontrolle wurden bereits ab ca. 1920 veröffentlicht. Seit dieser Zeit wurden zahlreiche Philosophien und Strategien zur Umsetzung des Qualitätsgedankens entwickelt. Eine Übersicht über die wichtigsten Ansätze gibt beispielsweise [108]. Die Umsetzung der Idee des Qualitätsmanagements erfolgt mit Hilfe von *Qualitätsmanagementsystemen*. Ein solches System ist nach DIN EN ISO 9000-1 definiert als „zur Verwirklichung des Qualitätsmanagements erforderliche Organisationsstruktur, Verfahren, Prozesse und Mittel“ [22]. Im Bereich der Fertigung verfolgt das Qualitätsmanagement die Zielsetzung, durch qualitätssichernde Maßnahmen während oder unmittelbar nach der Produktentstehung eine einwandfreie Produktqualität sicherzustellen. Tabelle 2.1 zeigt einen Teil der Techniken, die in modernen Qualitätsmanagementsystemen Bedeutung erlangt haben. Für einen detaillierteren Überblick über den Aufbau von Qualitätsmanagementsystemen nach DIN EN ISO 9000ff. sei auf [107] verwiesen.

	Produkte	Prozesse	Systeme
Qualitätsplanung	Wettbewerbsanalyse QFD Statische Versuchsplannung Produkt-FMEA	Benchmarking Prozessfähigkeitsanalyse Prozess-FMEA	Wettbewerbsanalyse
Qualitätslenkung	Prüfen Produktaudit	SPC Prozessaudit	Systemaudit
Qualitätsmanagement-Darlegung		Arbeitsplatzbeschreibung	QM-Handbuch
Qualitätsverbesserung	Statistische Versuchsplanung	Statistische Versuchsplanung KVP	Geschäftsprozessanalyse KVP

Tabelle 2.1: Ausgewählte Techniken innerhalb eines modernen Qualitätsmanagementsystems für die Betrachtungseinheiten *Produkt*, *Prozess* und *System*.

Historisch betrachtet wurde die geforderte Qualität vor allem durch *Prüfen* als Maßnahme der Qualitätslenkung erreicht. Maßnahmen der Qualitätsplanung und der Qualitätsverbesserung wurden dagegen vor allem in Form von Erfahrung implizit in die betrieblichen Prozesse eingebracht und erst mit der Einführung formaler Qualitätssicherungssysteme systematisiert und gezielt weiterentwickelt.

Mit der Erweiterung des Qualitätsbegriffes auf *Prozesse* und *Systeme* wurden strategische Qualitätssicherungsmaßnahmen immer bedeutender. Durch die Erkenntnis, dass *beherrschte* Produktionsprozesse auch ohne spezielle Prüfungen zu einer Verbesserung der Qualität beitragen, und die Einsicht, dass durch die Einbeziehung des Qualitätsmanagements in frühe Phasen der Produktentwicklung bzw. des Produktlebenslaufes ein Teil der Qualitätsrisiken bereits frühzeitig ausgeschlossen werden kann, wurde der Qualitätsprüfung vielfach eine immer geringere Bedeutung zugesprochen.

Die Praxis der letzten Jahre hat jedoch gezeigt, dass aufgrund der immer schneller steigenden Anforderungen an die Produkte auch in Zukunft nicht auf Qualitätsprüfungen verzichtet werden kann. Nicht zuletzt aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten werden nach wie vor neue und leistungsfähigere Prüfverfahren entwickelt und eingeführte Prüfverfahren automatisiert in die Fertigungsprozesse integriert, um langfristig Kosten einzusparen und gleichzeitig eine Objektivierung der Prüfergebnisse zu erreichen [37, 88]. Dies gilt in besonderem Maße für Bauteile, deren Versagen eine erhebliche Gefahr für den Menschen oder die Umwelt darstellt. Die sorgfältige Durchführung und Dokumentation von Prüfungen stellt hier in vielen Fällen die einzige Möglichkeit für den verantwortungsvollen Umgang mit Risiken dieser Art dar [63, 72].

Das in der vorliegenden Arbeit beschriebene Verfahren der Qualitätsdatenrecherche stellt einerseits eine sinnvolle Ergänzung der bestehenden Qualitätsmanagementsysteme dar und greift andererseits in erheblichem Maße auf etablierte Methoden und Prozesse dieser Systeme zurück. Entscheidend ist dabei, dass die entscheidenden Ziele des Qualitätsmanagements gewahrt bleiben bzw. dass die Qualitätsdatenrecherche einen Beitrag zum Erreichen dieser Ziele leistet.

2.1.1 Total Quality Management und Kontinuierlicher Verbesserungsprozess

Eines der wichtigsten Ziele des Qualitätsmanagements ist das Streben nach einer möglichst kontinuierlichen Verbesserung der Qualität. Es kann nur dann erfolgreich sein, wenn es alle Bereiche des Unternehmens einschließt. Dieser Aspekt drückt sich im so genannten *Total Quality Management (TQM)* aus. Die Idee des TQM kann dabei als Ergebnis eines sich in den letzten Jahrzehnten grundsätzlich gewandelten Verständnisses von Qualität angesehen werden. Während die traditionelle Perspektive des Qualitätsmanagements vor allem ergebnisorientiert war und damit die Prüfung der Ergebnisse im Mittelpunkt stand, integrieren neuere Qualitätskonzepte weitere Aspekte des Qualitätsgedankens. Aus der Einsicht heraus, dass „Qualität im Kopf beginnt“ [48] und damit die Einstellung und Handlungen aller Mitarbeiter in den einzelnen Wertschöpfungsstufen beeinflusst werden, hat sich der Fokus des Qualitätsmanagements ausgedehnt [71]. Ein ganzheitliches Qualitätsdenken bei gleichzeitiger Anpassung der Unternehmenskultur stellt damit in immer stärkerem Maße die Voraussetzung für ein qualitätsfähiges Unternehmen dar. Das Total Quality Management muss somit als eine *Unternehmensstrategie* verstanden werden, die in erster Linie auf die Erfüllung der Kundenwünsche abzielt, wobei interne und externe Kunden im Mittelpunkt der Bemühungen stehen.

Das TQM wird nach [47] im DIN ISO 8402 als eine auf der „Mitwirkung aller ihrer Mitglieder beruhende Führungsmethode einer Organisation, die Qualität in den Mittelpunkt stellt und durch Zufriedenstellung der Kunden auf langfristigen Geschäftserfolg sowie auf Nutzen für die Mitglieder der Organisation und für die Gesellschaft zielt“, definiert. Eine Deutung dieser Definition kann nach [31] beispielsweise mit Hilfe der Zerlegung des Begriffes in die Bestandteile „Total“, „Qualität“ und „Management“ erfolgen.

Total bedeutet, dass es sich bei TQM um eine allumfassende Strategie handelt. Dies gilt sowohl für die betroffenen Unternehmensbereiche als auch für die Mitarbeiter. TQM kann damit nicht auf einzelne Abteilungen im Unternehmen beschränkt werden; ebenso ist TQM nicht möglich, wenn der Gedanke nur der Führungsriege nahe gebracht wird. TQM verlangt vielmehr nach einer unternehmensweiten und unternehmensübergreifenden Einführung.

Qualität ist nach DIN 55350 Teil 11 definiert als „die Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen“. Sie beschränkt sich damit nicht nur auf Produkte, sondern schließt auch Dienstleistungen unabhängig davon ein, ob sie in direktem Bezug zu einem Produkt stehen oder als reine Tätigkeit angeboten werden. Qualität bedeutet dabei nicht allein die Güte eines Produktes, sondern auch die Zufriedenheit des Kunden.

Management bezeichnet alle aktiven Führungs-, Planungs-, Steuerungs- und Überwachungsaktivitäten. Das dem TQM zugrunde liegende Führungsmodell ist dabei bereichs- und funktionsübergreifend. Die Führungstätigkeit muss einerseits die Qualität als Unternehmensziel in den Vordergrund stellen und andererseits selbst durch Qualität überzeugen. Dies kommt unter anderem in dem in Bild 2.1 dargestellten Führungsmodell zum Ausdruck, das den klassischen produkt- und prozessbezogenen Qualitätsbegriff um die Aspekte der Unternehmens- und der Arbeitsqualität erweitert.

Die Umsetzung der TQM-Philosophie erfolgt durch die Formulierung einer *Unternehmensvision*, aus der in mehreren Stufen Prozessziele, Abteilungsziele und nicht zuletzt individuell vereinbarte mitarbeiterbezogene Ziele abgeleitet werden können. Ein wichtiger Aspekt für das Erreichen der Ziele ist dabei auch in der notwendigen Qualifikation der Mitarbeiter zu sehen. Dabei sind sowohl Kenntnisse

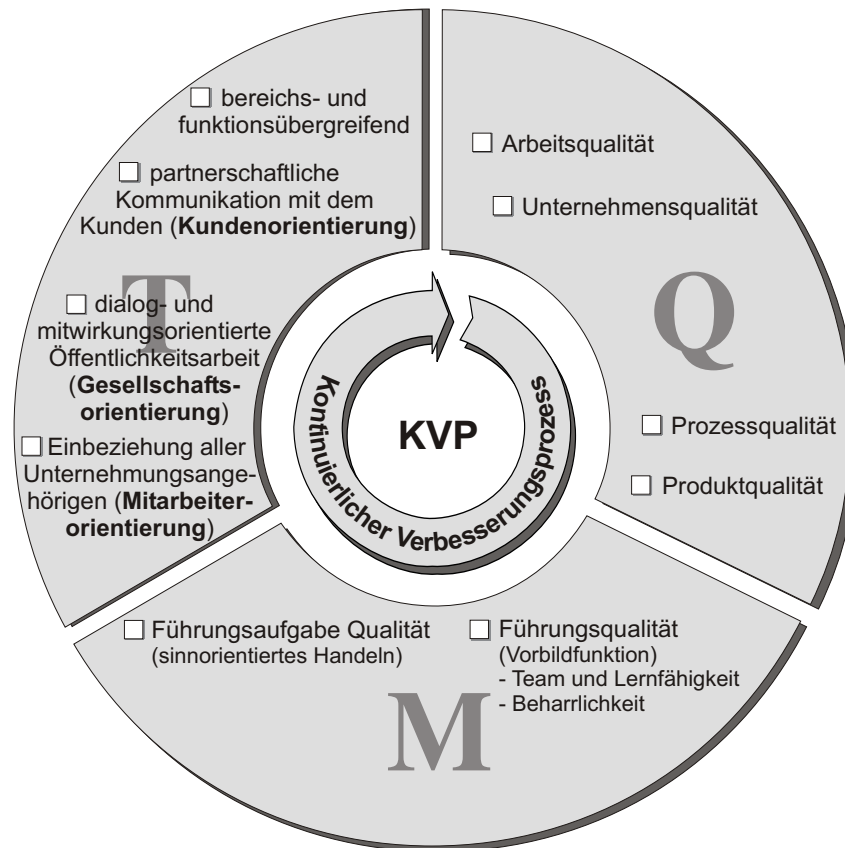


Abbildung 2.1: Das Führungsmodell des Total Quality Managements nach [48] erweitert den Qualitätsbegriff um die Aspekte der Unternehmens- und der Arbeitsqualität, verdeutlicht den funktions- und bereichsübergreifenden Wirkungsbereich und die an die Unternehmensführung gestellten Anforderungen.

über die verschiedenen Methoden und Hilfsmittel (z. B. QFD, FMEA, statistische Versuchsplanung, SPC, etc.) zum Erreichen der Ziele als auch die Motivation für den Einsatz dieser Qualitätstechniken im Sinne des TQM zu vermitteln.

Neben den genannten Methoden kann auch die Qualitätsdatenrecherche einen Beitrag zum Erreichen der Ziele des Total Quality Managements leisten. Mit ihrer Hilfe wird es möglich, die bei der Prüfung von Bauteilen erfassten und in geeigneter Form gespeicherten Daten zu einem späteren Zeitpunkt für zusätzliche Auswertungen und die Weiterentwicklung und Validierung der Auswerteverfahren zu nutzen.

2.2 Qualitätsprüfung

Die *Qualitätsprüfung* stellt die wichtigste Datenquelle für die Qualitätsdatenrecherche dar. Im Sinne des klassischen Qualitätsmanagements kann sie als Maßnahme betrachtet werden, die feststellt,

inwieweit Produkte oder Tätigkeiten die an sie gestellten Qualitätsanforderungen erfüllen [21]. Sie konzentriert sich zunächst in erster Linie auf das *Produkt*. Da aus wirtschaftlichen Interessen angestrebt wird, Qualität nicht zu „erprüfen“, sondern von vorneherein zu produzieren, richten sich die Methoden und Verfahren der Qualitätsprüfung wie in Bild 2.2 dargestellt mehr und mehr auch auf den Prozess sowie die Betriebs- und Prüfmittel.

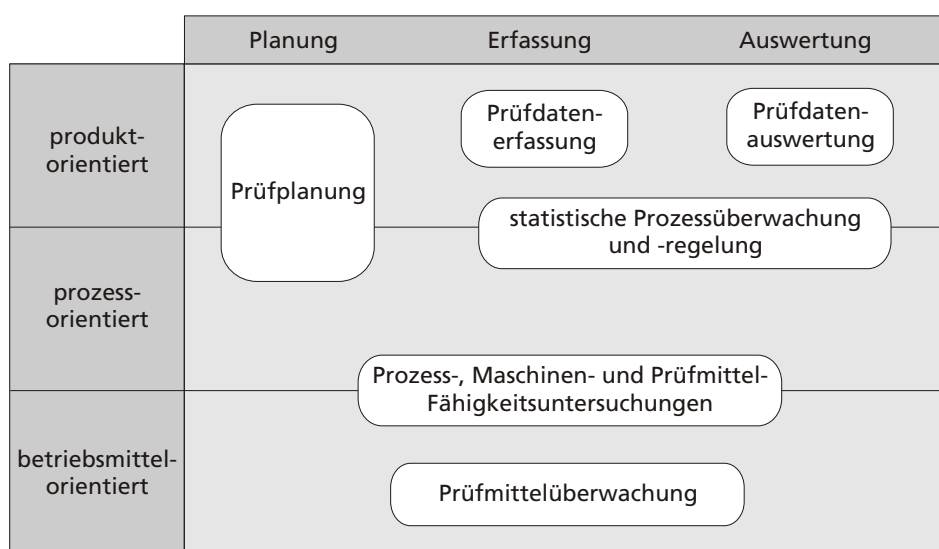


Abbildung 2.2: Methoden und Verfahren der Qualitätsprüfung. Abhängig von der Intention der Prüfung unterscheidet man zwischen produktorientierter, prozessorientierter und betriebsmittelorientierter Qualitätsprüfung.

Die Qualitätsprüfung basiert auf der Ermittlung des Ist-Zustandes von Qualitätsmerkmalen und der Bewertung der Abweichungen von einem zuvor festgelegten Sollzustand. Da solche Abweichungen fast nie vollständig zu vermeiden sind, wird angestrebt, diese möglichst frühzeitig zu erkennen. Durch gezielte Eingriffe in den Fertigungsprozess soll den Abweichungen entgegengewirkt werden, so dass der Normalzustand möglichst bald wieder hergestellt werden kann. Dieses Vorgehen setzt jedoch voraus, dass die Zusammenhänge zwischen dem betrachteten Qualitätsmerkmal und dem zugrunde liegenden Fertigungsprozess hinreichend genau, z. B. in Form eines Prozessmodells, bekannt sind.

Die Ergebnisse der klassischen Qualitätsprüfung können auf vielfältige Weise ausgewertet oder steuernd in den Fertigungsprozess rückgekoppelt werden. Steht dabei die laufende Fertigung im Vordergrund des Interesses, kommen Verfahren der *statistischen Prozessregelung* (SPC) zum Einsatz, soll dagegen die grundsätzliche Eignung eines Prozesses oder einer Maschine zur Gewährleistung einer stabilen und sicheren Produktion nachgewiesen werden, so spricht man von so genannten *Fähigkeitsuntersuchungen*. Eine wesentliche Voraussetzung für die sinnvolle Durchführung von Qualitätsprüfungen ist die Überwachung der Betriebsmittel im Rahmen der *Prüfmittelüberwachung*, welche den ordnungsgemäßen Zustand und die Genauigkeit der eingesetzten Mess- und Prüfmittel in regelmäßigen Zeitabständen überprüft und dokumentiert.

Abhängig vom Zeitpunkt der Produktprüfung während des Fertigungsprozesses wird zwischen *fertigungsbegleitenden Prüfungen* und der *Endprüfung* von Produkten unterschieden. Im Gegensatz zu Prüfungen während des Fertigungsprozesses, die vor allem aus Gründen der internen Sicherstellung und Optimierung der Qualität durchgeführt werden, tritt bei der Endprüfung von Produkten häufig die Dokumentation der geforderten Eigenschaften gegenüber Dritten in den Vordergrund des Interesses. Auf die für die vorliegende Arbeit relevanten Hintergründe wird im Zusammenhang mit den rechtlichen Rahmenbedingungen in Abschnitt 2.5 näher eingegangen.

2.2.1 Messen und Prüfen

Für den operativen Bereich des Qualitätsmanagements im Fertigungsbereich haben die Begriffe *Messen* und *Prüfen* eine zentrale Bedeutung. Dies gilt auch für die Qualitätsdatenrecherche, da die beim Messen und Prüfen erfassten Daten die Grundlage für alle nachfolgenden Auswertungen darstellen.

Nach DIN 1319-1 wird mit der Durchführung einer Prüfung festgestellt, „inwieweit ein Prüfobjekt eine Forderung erfüllt“ [20]. Mit dem Prüfen ist somit immer der Vergleich mit einer Forderung verbunden, die festgelegt oder vereinbart sein kann. An gleicher Stelle ist Messen als „Ausführen einer geplanten Tätigkeit zum quantitativen Vergleich der Messgröße mit einer Einheit“ definiert. Eine Messung führt damit nur dann zu einer Prüfung, wenn dabei festgestellt wird, inwieweit (oder ob) der Messwert eine Forderung erfüllt. Die mit dem Prüfen verbundene Entscheidung kann sich dabei sowohl auf die Qualität des Prüfobjektes, den Zustand des Prozesses oder bei Einbeziehung des Beschaffungswesens auch auf die Fähigkeit des Lieferanten beziehen.

Im Hinblick auf die Ermittlung von Prüfergebnissen werden *objektive* und *subjektive* Prüfungen unterschieden. Entsprechend der in Bild 2.3 dargestellten Einteilung kann von einer objektiven Prüfung immer dann gesprochen werden, wenn der Beurteilung Messen oder *Lehren* vorangeht. Unter Lehren versteht man dabei den in der Fertigungsmesstechnik eingesetzten Vergleich bestimmter Längen, Winkel oder Formen mit einer Maß- und Formverkörperung, der *Lehre* [27]. Eine subjektive Prüfung liegt dagegen immer dann vor, wenn das Prüfergebnis maßgeblich auf einer Sinneswahrnehmung beruht.

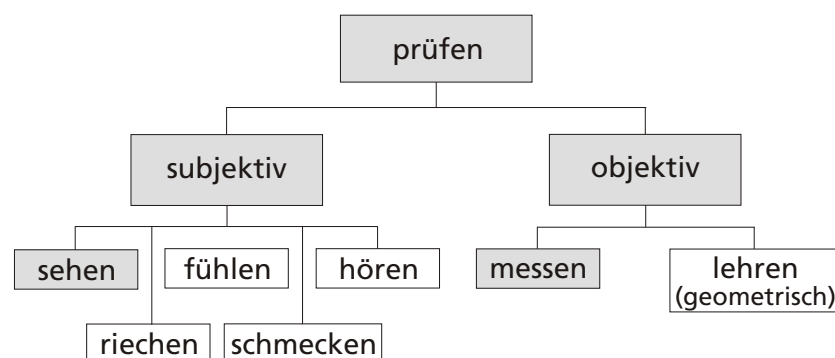


Abbildung 2.3: Unterscheidung objektiver und subjektiver Prüfverfahren nach [27].

Bei der praktischen Durchführung von Messungen und Prüfungen werden zunächst Eigenschaften des *Produktes* oder des *Prozesses* erfasst. Durch entsprechende Auswertungen können daraus jedoch

statistische Aussagen über die einzelnen Merkmale des Produktes, die Fähigkeit von Produktions-einrichtungen oder die Beherrschung des Produktionsprozesses abgeleitet werden. Auf diese Aspekte wird in Abschnitt 2.2.5 näher eingegangen.

Die Einordnung des Prüfens in die *organisatorischen* Abläufe erfolgt durch die *Prüfplanung*, die *Prüf-beauftragung*, die *Prüfdatenerfassung* und die *Prüfdatenauswertung*. Im Zusammenhang mit der Qualitätsdatenrecherche sind dabei vor allem die Prüfplanung sowie die Erfassung und Auswertung der Prüfdaten von Interesse. In Verbindung mit der Strukturierung und Speicherung der Prüfdaten bilden sie die Grundlage für die nachträgliche Auswertung und müssen daher in ein System zur Durchführung der Qualitätsdatenrecherche in geeigneter Form eingebunden werden.

2.2.2 Prüfplanung

Die Prüfplanung beschränkt sich im Sinne nach [21] auf die Planung der Qualitätsprüfung. Ihr Ziel ist demnach, die ordnungsgemäße Durchführung der Qualitätsprüfung vorzubereiten und somit die ordnungsgemäße Qualität der Produkte sicherzustellen. Zu ihren Aufgaben gehören nach [62] vor allem:

- die Auswahl der zu prüfenden Merkmale
- die Einordnung der durchzuführenden Prüfungen in den Produktionsprozess
- die Bestimmung der zu prüfenden Einheiten bzw. des mengen- oder zeitbezogenen Prüfintervalls
- die Festlegung der Reihenfolge, in der die einzelnen Merkmale zu prüfen sind
- die Ermittlung des zu verwendenden Prüfmittels
- die Festlegung der Prüfmethode
- die Ermittlung der Prüfzeitpunkte
- die Ermittlung der notwendigen Prüfdokumentation
- die Aufbereitung der Hinweise für die Prüfdurchführung.

Das Ergebnis der Prüfplanung ist somit ein Prüfplan, der die Durchführung der Qualitätsprüfung unter Berücksichtigung der geforderten Eigenschaften sowie der Vorschriften, Richtlinien, Auflagen und eventuell vorhandener Daten aus der Vergangenheit beschreibt.

Nach der Festlegung des *Inhaltes* der Prüfplanung wurde in den wissenschaftlichen Arbeiten der letzten Jahre vor allem der Prozess der *Prüfplanerstellung* betrachtet. Nachdem in früheren Arbeiten in erster Linie die Vorgehensweise bei der Prüfplanung analysiert und in Regeln umgesetzt wurde [52], steht in neueren Arbeiten vor allem die Integration des Prüfplanungsprozesses in die frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses im Vordergrund des Interesses [94, 93, 7].

2.2.3 Prüfbeauftragung

Im Gegensatz zur Prüfplanung, die in erster Linie technologische und produktspezifische Aspekte in die Durchführung von Prüfungen einbringt, ist die *Prüfbeauftragung* durch Abläufe des Produktionsprozesses bzw. der Produktionsplanung begründet. Durch die Prüfbeauftragung wird festgelegt, dass die durch einen Prüfplan festgelegte Prüfung an einem bestimmten Prüfling bzw. einer Gruppe durchzuführen ist. In vielen Fällen werden dabei die bei der Prüfplanung festgelegten Informationen ergänzt oder angepasst. So kann beispielsweise im Falle einer Stichprobe der Stichprobenumfang erst dann sinnvoll bestimmt werden, wenn die Losgröße bekannt ist.

Durch die Prüfbeauftragung wird die Durchführung der Prüfungen in die produktionsbedingten Abläufe eingebunden. Gleichzeitig schafft sie die Voraussetzungen für die Zuordnung der Prüfergebnisse zu den zugehörigen Materialien bzw. Produkten.

2.2.4 Durchführung von Prüfungen

Die Durchführung von Prüfungen besteht aus zwei Teilen: der *Aufnahme* der Daten, welche die zu prüfende Eigenschaft beschreiben, und der *Bewertung* der Daten hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen. Um sich stellende Prüfaufgaben so durchzuführen, dass sie das gewünschte Ergebnis mit der erforderlichen Sicherheit bei minimalem Aufwand erreichen, müssen eine Reihe von Festlegungen getroffen werden, die optimal aufeinander abzustimmen sind. Nach [87] sind dazu eine sorgfältige Prozessanalyse im Hinblick auf die zur Verfügung stehenden messtechnischen Technologien sowie eine wissenschaftlich und betriebswirtschaftlich begründete Prüfplanung erforderlich, die in fast allen Fällen durch ein rechnergesteuertes Datenmanagement ergänzt werden.

Die Aufnahme der Daten beruht wie in Bild 2.4 gezeigt auf einer Wechselwirkung des Prüfobjektes mit dem Prüfsystem. Die Prüfdaten sind in diesem Zusammenhang als Antwort des Prüfsystems auf die Wechselwirkung zu sehen und werden im Hinblick auf die Erfüllung der zu prüfenden Eigenschaft interpretiert. Abhängig davon, in welchem Zusammenhang die Wechselwirkung zu der zu bewertenden Eigenschaft steht, kann die Interpretation *direkt*, über einen bekannten Zusammenhang (*indirekt*) oder über ein *Modell* erfolgen. Als indirekte Prüfungen werden dabei die Fälle bezeichnet, in denen an Stelle des zu prüfenden Merkmals (z. B. der Dichtigkeit) ein oder mehrere mit diesem Merkmal in Verbindung stehende Ersatzmerkmale (z. B. die Oberflächeneigenschaften der Dichtflächen oder das Vorhandensein von Beschädigungen) geprüft werden. Bei modellbasierten Prüfungen kann mit Hilfe eines bekannten, quantitativ beschreibbaren Zusammenhanges von den gemessenen Größen auf die zu prüfende Größe geschlossen werden (z. B. bei der Prüfung eines elektrischen Widerstandes durch Messung von Strom und Spannung).

Im Vergleich zur Prüfplanung ist die Durchführung von Prüfungen noch wesentlich enger mit den technischen und funktionalen Eigenschaften des Prüfobjektes selbst verbunden. Für die Prüfplanung ist es in der Regel ausreichend zu wissen, welche Eigenschaften (z. B. Durchmesser) das zu prüfende Objekt hat, welche Grenzen für die Akzeptanz des Prüfobjektes hinsichtlich dieser Eigenschaften gelten und wie die Prüfung grundsätzlich zu erfolgen hat. Für die Durchführung der Prüfung ist dagegen die genaue Kenntnis der Wechselwirkung zwischen Prüfobjekt und Messsystem sowie des Verfahrens zur Interpretation der Prüfdaten erforderlich.

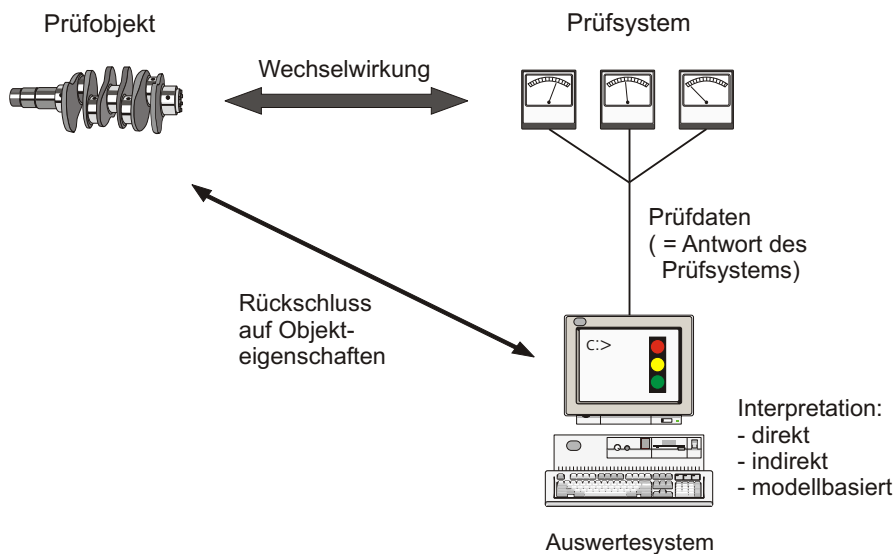


Abbildung 2.4: Funktionsprinzip der Durchführung von Prüfungen: Das Prüfbjekt tritt mit dem Prüfsystem in eine Wechselwirkung. Die Antwort des Prüfsystems auf diese Wechselwirkung stellt die Grundlage für die nachfolgende Interpretation dar. Diese kann je nach Art der Wechselwirkung direkt, indirekt oder modellbasiert erfolgen.

Bei der Interpretation der Prüfdaten wird im Allgemeinen mehrstufig vorgegangen. Wie in Bild 2.5 veranschaulicht, werden aus den erfassten Daten mit Verfahren der Signalverarbeitung Merkmale gewonnen, welche die nachfolgende Zuordnung der Daten zu einer das Prüfergebnis darstellenden Klasse ermöglichen.

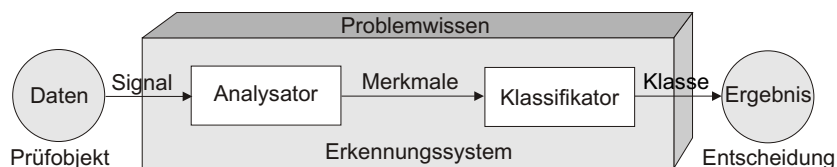


Abbildung 2.5: Aufbau eines Erkennungssystems. Aus dem am Prüfbjekt erfassten Signal werden zunächst Merkmale, d. h. Kennzahlen für bestimmte, die Erkennungsaufgabe charakterisierende Eigenschaften des Signals berechnet. Diese werden von einem zweiten Funktionsblock, dem Klassifikator einer das Ergebnis der Erkennungsaufgabe darstellenden Klasse zugeordnet.

Erfassen von Mess- und Prüfdaten

Die Erfassung von Mess- und Prüfdaten kann sowohl unter *organisatorischen* als auch unter *technologischen* Gesichtspunkten betrachtet werden. Aus organisatorischer Sicht ist in erster Linie der mit der

Durchführung der Prüfung erwartete Nutzen interessant. So können im Bereich der Produktion wie in Bild 2.6 gezeigt beispielsweise die Erstmusterprüfung, die Wareneingangsprüfung, die Zwischenprüfung, die Fertigungsprüfung und die Endprüfung unterschieden werden. Die genannten Prüfungen liefern Aussagen, die je nach Ergebnis Veränderungen im Produktionsprozess auf der logistischen, organisatorischen oder technologischen Ebene erforderlich machen können. Zum Erreichen dieses Nutzens müssen neben der Prüffart und Methode auch das Prüfobjekt, die Ausführung und der Umfang der Prüfung festgelegt sein.

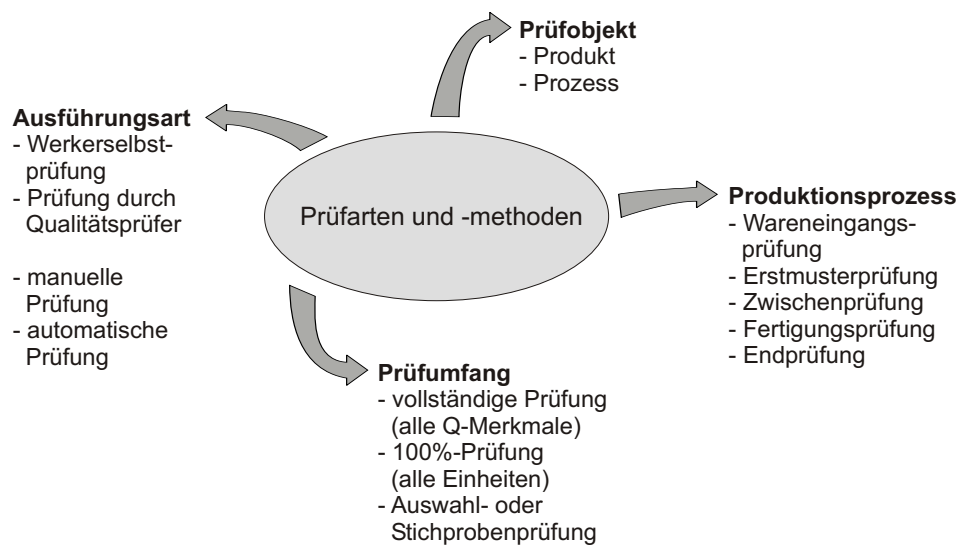


Abbildung 2.6: Festlegungen für die Erfassung von Mess- und Prüfdaten nach [71]. Um die mit der Durchführung einer Prüfung verbundenen Erwartungen erfüllen zu können, müssen der Gegenstand der Prüfung, die Art der Durchführung, der Umfang und die Zuordnung zur betreffenden Phase des Produktionsprozesses festgelegt werden.

Unter technologischen Gesichtspunkten sind vor allem die zur Erfassung der Prüfdaten eingesetzten Technologien zu betrachten. Ausschließlich manuelle Mess- und Prüfmittel werden dabei fast nur noch für prozessbegleitende Prüfungen ohne weitergehende Dokumentation und Auswertung der Prüfdaten angewandt. In allen anderen Bereichen haben sich Prüfsysteme mit Schnittstellen zu elektronischen Erfassungs- und Auswertesystemen durchgesetzt. Diese bauten in immer stärkerem Maße auf der PC-Plattform auf, die mit geeigneten Schnittstellen und entsprechender Software an die jeweilige Aufgabenstellung angepasst werden kann. Eine Übersicht über die diesbezüglichen Möglichkeiten unter dem Aspekt der verschiedenen Software-Systeme ist beispielsweise in [82] zu finden. Exemplarische Anwendungen der Werkzeuge, die teilweise sogar über die Erfassung und Auswertung von Prüfdaten hinausgehen und die automatisierte Steuerung von Abläufen in Prüfständen mit einschließen, sind in [36] und [58] beschrieben.

Auswerten von Mess- und Prüfdaten

Die Auswertung von Mess- und Prüfdaten ist in fast allen Fällen mit einer *Datenreduktion* verbunden. Unabhängig davon, wie viele und welche Daten zunächst am Prüfobjekt erfasst wurden, steht am Ende der Auswertung meist eine Gut-/Schlecht-Entscheidung oder eine Entscheidung, welche das Prüfobjekt einer bereits im Voraus festgelegten Qualitätsklasse zuordnet. Die Reduktion der Datenmenge erfolgt dabei in mehreren Stufen. Wie in Bild 2.7 dargestellt wird die zu erfassende physikalische Größe zunächst in ein entsprechendes elektrisches Signal umgewandelt und soweit erforderlich verstärkt und linearisiert. Vor der Anwendung weiterer Vorverarbeitungsoperationen wie beispielsweise Filterungen oder Transformationen wird das Signal in den meisten Fällen durch eine AD-Wandlung diskretisiert, um die weitere Verarbeitung rechnergestützt durchführen zu können. Die aus den so vorbereiteten Daten gewonnenen Merkmale werden letztendlich zur Ermittlung des Prüfergebnisses durch den Vergleich mit Soll- und Grenzwerten oder mit Hilfe eines Klassifikators bewertet.

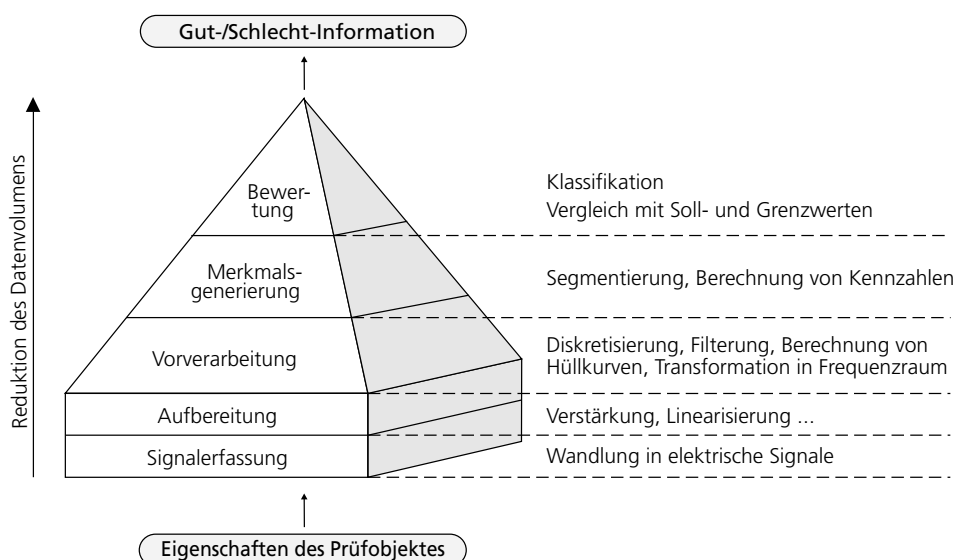


Abbildung 2.7: Die Ermittlung des Prüfergebnisses bedeutet eine schrittweise Reduktion des Datenvolumens. Die den Eigenschaften des Prüfobjektes entsprechenden elektrischen Signale werden nach der Erfassung zunächst aufbereitet und für die weitere rechnergestützte Verarbeitung digitalisiert. Die nach einer geeigneten Vorverarbeitung generierten Merkmale stellen letztendlich die Grundlage für die abschließende Gut-Schlecht-Entscheidung dar.

Für die automatische Ermittlung solcher Entscheidungen sind aus der Literatur (z. B. [41]) so genannte *Erkennungssysteme* bekannt. Wie in Bild 2.8 dargestellt, besteht ein solches System aus zwei Funktionsblöcken. Die am Prüfobjekt erfassten Daten, meist Einzelwerte oder in Abhängigkeit von einer freien Variable (Zeit, Weg, etc.) Zeitreihen oder Signale, werden zunächst dem *Analysator* zugeführt. Dieser berechnet daraus mit Hilfe von geeigneten, d. h. auf die Erkennungsaufgabe bzw. die zur Verfügung stehenden Signale zugeschnittenen Verfahren *Merkmale*. Die Merkmale sind Maßzahlen für das Vorhandensein bestimmter charakteristischer Eigenschaften in den analysierten Signalen

und stellen die Eingangsgröße für den zweiten Funktionsblock, den *Klassifikator* dar. Der Klassifikator führt eine Bewertung der verschiedenen Merkmale durch und liefert als Ergebnis die Zuordnung der Beobachtung, also der am Prüfobjekt erfassten Daten, zu einer der *Klassen*. Die Klassen stellen eine problembezogene Unterteilung des Merkmalsraumes dar. Die Anzahl der Klassen entspricht dabei der Zahl der möglichen Entscheidungen für die betrachtete Aufgabenstellung. Im einfachsten Fall sind nur die Klassen „Gut“ und „Schlecht“ zu unterscheiden, bei mehr als zwei Klassen werden oft mehrere Qualitätsklassen, die einen Einfluss auf die weitere Verwendbarkeit des Prüfobjektes haben, unterschieden.

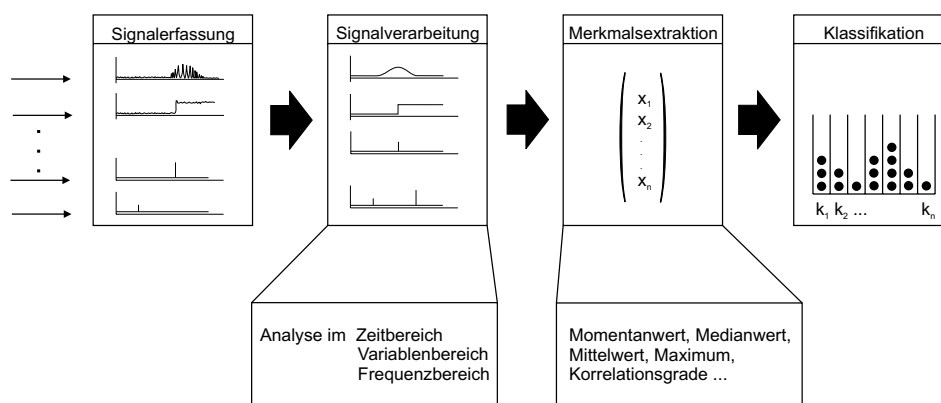


Abbildung 2.8: Prinzipielle Vorgehensweise bei der Bewertung der vom Messsystem gelieferten Prüfdaten: Aus den erfassten Daten werden mit Hilfe von Signalverarbeitungsverfahren Merkmale gewonnen, die durch einen Klassifikator einer der Prüfentscheidung entsprechenden Klasse zugeordnet werden.

Die in den Funktionsblöcken durchgeführten Operationen können als *Wissen* des Erkennungssystems über die Prüfaufgabe betrachtet werden. Wie in Abschnitt 4.4 näher beschrieben wird, gibt es mehrere Möglichkeiten, dieses Wissen in einem Erkennungssystem abzubilden. Zur Unterscheidung der großen Zahl der zur Verfügung stehenden *Signalverarbeitungsfunktionen* wird nach [73] wie in Bild 2.2 dargestellt eine Einteilung in die drei Gruppen

- Analyse im Zeitbereich
- Analyse im Variablenbereich
- Analyse im Frequenzbereich

vorgeschlagen, die selbstverständlich jederzeit erweitert werden kann.

Bei der Signalanalyse im *Zeitbereich* wird die zeitliche Struktur des zu analysierenden Signales betrachtet. Die Zeit stellt sowohl *vor* als auch *nach* der Analyse des Signals die unabhängige Variable dar. Zu den Funktionen im *Zeitbereich* zählen unter anderem Basisoperationen wie Subtraktion und Addition, darauf aufbauende Funktionen wie die Bildung des Quadrates sowie Vergleichsoperationen.

	Zeitbereich	Variablenbereich	Frequenzbereich
Signal- verarbeitung	<ul style="list-style-type: none"> → Basisoperationen <ul style="list-style-type: none"> → funktionale Verknüpfung → Betragbildung → Invertierung → Kennlinienoperationen <ul style="list-style-type: none"> → Interpolation → Filterung <ul style="list-style-type: none"> → linear → nichtlinear → Vergleichsoperationen → logische Operatoren → Integration → Differentiation 	<ul style="list-style-type: none"> → Wahrscheinlichkeitsfunktion <ul style="list-style-type: none"> → Verteilungsfunktion <ul style="list-style-type: none"> → Momente → lineare Kennwerte → quadrat. Kennwerte → Autokorrelation → Kreuzkorrelation → Kovarianz 	<ul style="list-style-type: none"> → Spektrum der Verteilungsfunktion <ul style="list-style-type: none"> → komplexes Spektrum <ul style="list-style-type: none"> → Phasenspektrum → Betragsspektrum <ul style="list-style-type: none"> → Leistungsspektrum → spektrale Leistungsdichte → Frequenzmodulation → Amplitudenmodulation
Merkmals- extraktion	<ul style="list-style-type: none"> - Momentanwert - Medianwert - Mittelwert - Maximum 	<ul style="list-style-type: none"> - Momente der Häufigkeits- verteilung - Korrelationsgrade - Maximum der Korrelations- funktionen - Regressionsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> - Amplitude (Betrag, Leistung) - Frequenz (Lage) - Phase - Regel

Tabelle 2.2: Einteilung der Funktionen zur Signalanalyse entsprechend der Art der Charakterisierung der Eingangssignale. Bei der Verarbeitung im Zeitbereich wird die zeitliche Struktur, im Variablenbereich beispielsweise die Häufigkeit oder die Zeitverschiebung (Korrelation) und im Frequenzbereich die Periodizität des Signals betrachtet.

Der Analyse im *Variablenbereich* geht eine Transformation des Signals voraus, welche die unabhängige Variable „Zeit“ beispielsweise in eine Häufigkeit oder eine Zeitverschiebung (bei Korrelationen) überführt. Auswertungen im Variablenbereich eignen sich nach [56] vor allem für stochastische Messsignale.

Auswertungen im *Frequenzbereich* erfordern ebenfalls eine Transformation des ursprünglichen Signals. So stellt beispielsweise nach einer Fouriertransformation die Frequenz die unabhängige Variable des Signals dar und kann für die weitere Bewertung des Signales verwendet werden. Die Analyse von Signalen im Frequenzbereich wird nach [9] vor allem bei der Überlagerung mehrerer periodischer Signale eingesetzt.

Die im Anschluss an die Signalverarbeitung durchgeführte Berechnung von Merkmalen stellt eine Abbildung dar, die Signalen einzelne Kenngrößen zuordnet. Um eine einfache Klassifikation zu ermöglichen, sollen die zugeordneten Kenngrößen für gleichartige Signale möglichst ähnlich sein und sich für verschiedenen Klassen zuzuordnende Signale möglichst deutlich unterscheiden. Die Merkmalsbildung stellt auch eine wichtige Stufe bei der bereits erwähnten Datenreduktion dar. Ein durch eine komplizierte Datenfolge beschriebenes Signal wird durch die Merkmalsbildung in einen n-dimensionalen Vektor überführt, wobei die Dimension n meist deutlich kleiner ist als die ursprüngliche, das Ausgangssignal repräsentierende Datenmenge [73].

Bild 2.2 zeigt neben den Signalverarbeitungsfunktionen auch die in der Praxis am häufigsten extrahierten Merkmalstypen. Zur Charakterisierung des zu bewertenden Signals können mehrere Merkmale aus unterschiedlichen Bereichen berechnet und zu einem Merkmalsvektor zusammengefasst werden.

Auf diese Weise können Eigenschaften aus den verschiedenen Bereichen zusammengeführt und bei der von dem Erkennungssystem zu treffenden Entscheidung berücksichtigt werden.

Die *Klassifikation* hat die Aufgabe, den aus dem ursprünglichen Signal berechneten Merkmalsvektor der *Klasse* zuzuordnen, die alle im Hinblick auf die Aufgabenstellung als *ähnlich* zu betrachtenden Beobachtungen bzw. die daraus abgeleiteten Merkmalsvektoren enthält. Im Falle der Durchführung von Prüfungen stellt die Klassifikation somit die eigentliche Entscheidungsfindung dar, die durch die Signalverarbeitung und Merkmalsbildung vorbereitet wurde.

Die zu unterscheidenden Klassen lassen sich im einfachsten Fall durch eine lineare Funktion voneinander trennen. Die genaue Funktionsweise der verschiedenen Klassifikatoren, die Annahmen über den aufzuteilenden Merkmalsraum sowie die zur Adaption an die jeweilige Aufgabenstellung eingesetzten Verfahren sind in der Literatur eingehend beschrieben. Stellvertretend für die zahlreichen Veröffentlichungen sollen hier [32, 101, 28, 102, 54] erwähnt werden. Eine detailliertere Einführung der für die vorliegende Arbeit relevanten Eigenschaften von Klassifikatoren ist in Abschnitt 4.3 zu finden.

Wie bereits in Bild 2.5 dargestellt, repräsentieren die Verfahren zur Analyse und Klassifikation das Wissen über die jeweilige Prüfaufgabe. Für die „Formulierung“ dieses Wissens muss dabei häufig auf leistungsfähige, zugleich aber meist auch komplizierte mathematische Verfahren zurückgegriffen werden. Je nach Aufgabenstellung können dabei analytische Verfahren, lernfähige adaptierbare Verfahren (z. B. künstliche neuronale Netze) oder eine geeignete Kombination eingesetzt werden. Aufgrund der mit praktischen Aufgabenstellungen in vielen Fällen verbundenen Komplexität ist für die Anwendung der Verfahren zur Analyse und Klassifikation eine genaue Kenntnis der Eigenschaften unabdingbar. Einfaches „Probieren“ führt nur in den seltensten Fällen zu einem akzeptablen Ergebnis.

Mit der Verfügbarkeit immer leistungsfähigerer Rechnersysteme kann die Anpassung von Analyse- und Klassifikationsverfahren in vielen Fällen durch Auswahl- bzw. Optimierungsverfahren unterstützt werden. Dabei sind zwei prinzipielle Vorgehensweisen gebräuchlich:

- Variation und Bewertung der *Parameter* zur Berechnung von Merkmalen
- *Auswahl* der für die betrachtete Aufgabenstellung geeignetsten Merkmale aus einer größeren Menge von zur Verfügung stehenden Merkmalen.

In der Literatur sind für beide Vorgehensweisen Ansätze beschrieben. Dabei setzt erstgenannte Möglichkeit voraus, dass das gewählte Verfahren zur Merkmalsberechnung für die betrachtete Aufgabenstellung grundsätzlich geeignet ist. Es kann daher besonders gut zur Unterstützung der Adaption an Varianten von Klassifikationsaufgaben angewandt werden, bei denen die grundsätzliche Eignung der Merkmale bereits nachgewiesen wurde oder prinzipiell vorausgesetzt werden kann. Ein Beispiel für die Optimierung von Parametern zur Regression von Funktionen ist in [57] beschrieben.

Die Auswahl von d Merkmalen für eine Klassifikationsaufgabe aus einer größeren Menge von Merkmalen D basiert auf der Erfahrung, dass sich die Erkennungsleistung des Systems bei geschickter Wahl der d Parameter nicht signifikant verschlechtert. Unter der Voraussetzung, dass eine geeignete Funktion f als Kriterium für die Erkennungsleistung des Systems zur Verfügung steht, „reduziert“ sich die Aufgabenstellung auf eine möglichst effiziente Suche der zu verwendenden Merkmale. Die Suchverfahren sollen dabei einerseits schnell sein, darüber hinaus aber auch gewährleisten, dass die Suche das globale Maximum für die Erkennungsleistung liefert. Entsprechende Überlegungen sind

in zahlreichen Veröffentlichungen beschrieben, von denen hier stellvertretend auf die *sequential backward selection* [75], die *Branch and Bound*-Methode [64] als Beispiel der kombinatorischen Verfahren sowie ein auf künstlichen neuronalen Netzen und Fuzzy-Methoden [14] basierendes Verfahren hingewiesen werden soll.

Ein vor allem in den letzten Jahren immer häufiger zur Optimierung kombinatorischer Aufgabenstellungen eingesetztes Verfahren stellen *genetische Algorithmen* (GA) dar. Diese werden vor allem zur Auswahl von Merkmalen aus größeren Merkmalsmengen (> 20) [92] oder zur kombinierten Auswahl und Festlegung der Gewichte der einzelnen Merkmale [79] angewandt. Eine detailliertere Beschreibung der Grundlagen der genetischen Algorithmen erfolgt in Abschnitt 4.4.1.

2.2.5 Auswertung von Prüfergebnissen

Die Ermittlung *eines* Prüfergebnisses nach der beschriebenen Vorgehensweise ermöglicht im einfachsten Fall eine Aussage über die weitere Verwendungsfähigkeit des geprüften Produktes. Gemessen an dem in Abschnitt 2.2 genannten Ziel, Qualität zu produzieren und nicht zu erprüfem, wird jedoch schnell deutlich, dass dieser Ansatz in modernen Qualitätsmanagementsystemen nicht mehr ausreichend ist. Vielmehr ist es erforderlich, aus einer *Reihe* von Prüfergebnissen Aussagen über den Fertigungsprozess abzuleiten und diese über einen Regelkreis zur Optimierung der Qualität in den zugrunde liegenden Prozess zurückzuführen. Wie in Bild 2.9 dargestellt kann durch die Analyse einer Reihe von Prüfergebnissen darüber hinaus auch die Fähigkeit des eingesetzten Prüfmittels beurteilt werden.

Steht wie von der klassischen Qualitätssicherung her gewohnt die Qualität des *Produktes* im Mittelpunkt des Interesses, so ist im einfachsten Fall ein einziges, nämlich das zu prüfende Werkstück für die Entscheidungsfindung ausreichend. Das Ergebnis kann beispielsweise in Form eines Zeugnisses dokumentiert und als Nachweis für die Erfüllung der geforderten Eigenschaften verwendet werden. Eine weitere Möglichkeit ist mit der Erstellung einer so genannten Ausfallstatistik gegeben, mit der die Qualitätslage einer größeren Anzahl von Prüfobjekten beurteilt werden kann.

Sollen Prüfergebnisse zur Beurteilung des *Prozesses* herangezogen werden, so muss ebenfalls eine Reihe von Prüfungen betrachtet werden. Im Gegensatz zur Ausfallstatistik spielt hier jedoch die zeitliche Abfolge der Prüfungen eine wichtige Rolle. Betrachtet man den Verlauf der erfassten Daten über die Zeit, so muss vor allem zwischen den durch zufällige Einflüsse hervorgerufenen Schwankungen und systematischen, das Ergebnis in eine gleich bleibende Richtung beeinflussenden Veränderungen unterschieden werden. Mit Hilfe der natürlichen Schwankungen kann die generelle Güte oder Beherrschung des Prozesses beurteilt werden. Systematische, die betrachtete Größe in eine gleich bleibende Richtung verändernde *Trends* weisen dagegen auf spezielle, die Qualität beeinflussende Einwirkungen hin.

Für die Beurteilung von Prüfdaten im Hinblick auf den Fertigungsprozess stehen so genannte *Regelkarten* zur Verfügung. Für die Beschreibung der verschiedenen Regelkartentypen sowie der mit dieser Technik durchzuführenden Auswertungen sei auf die einschlägige Literatur, z. B. [19] verwiesen. Erwähnt werden soll hier jedoch noch die Möglichkeit, die auf diese Weise gewonnenen Aussagen über Veränderungen in den Prozess zurückzuführen. Aufgrund der angewandten Auswerteverfahren spricht man in diesem Fall auch von *statistischer Prozessregelung* (SPC).

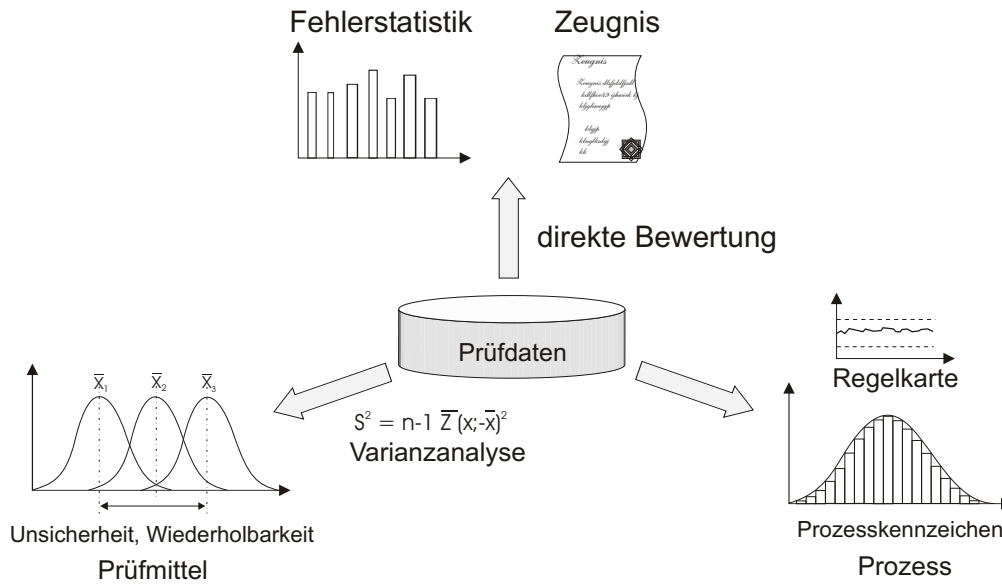


Abbildung 2.9: Die Interpretation einer Reihe von Prüfergebnissen kann Aussagen über das Produkt, den Prozess und die eingesetzten Prüfmittel liefern. Wird bei der Beurteilung des Produktes nur das jeweilige Prüfobjekt betrachtet, erfordert die Beurteilung des Prozesses die Ergebnisse einer ganzen Reihe von Werkstücken eines Typs. Im Gegensatz dazu beruht die Beurteilung des Messmittels auf der Wiederholung der Prüfung an ein und demselben Werkstück.

Eine weitere Möglichkeit zur Interpretation von Prüfdaten stellen *Maschinen-, Prozess- und Messmittelfähigkeitsuntersuchungen* dar. Während die Prozessfähigkeit eine Aussage darüber macht, ob ein Prozess in der Lage ist, die an ihn bezüglich eines Produktionsmerkmals gestellten Anforderungen in der laufenden Produktion zu erfüllen, beschreibt die Maschinenfähigkeit die Qualitätsfähigkeit einer Maschine unter optimalen Bedingungen. Die Maschinenfähigkeit wird daher vor allem im Rahmen von Abnahmeuntersuchungen eingesetzt. Unter Produktionsbedingungen ist dagegen in erster Linie die Prozessfähigkeit von Interesse.

Analog dazu unterscheidet nach [18] auch die Prüfmittelüberwachung zwischen einer Analysephase, in der die Eignung (Fähigkeit) des Messverfahrens festgestellt wird, und einer kontinuierlichen Überwachung der Messeinrichtung am Einsatzort. Bei der Beurteilung der Messverfahren bzw. Messeinrichtungen wird wie in Bild 2.10 dargestellt zwischen Genauigkeit, Wiederholpräzision, Vergleichspräzision, Stabilität und Linearität unterschieden.

Die *Genauigkeit* ist die Abweichung zwischen dem wahren Wert des Normals und dem Mittelwert einer Messwertreihe, der sich bei wiederholtem Messen des Normals ergibt. Die Untersuchung wird an ein und demselben Normal, von einem Bediener und an einem Ort vorgenommen.

Zur Ermittlung der *Wiederholpräzision* werden in kurzen zeitlichen Abständen Wiederholungsmessungen an einem Ort, nach einem festgelegten Messverfahren, an denselben Teilen, mit demselben Bediener und mit denselben Messeinrichtungen durchgeführt. Als Maß für die Wiederholpräzision

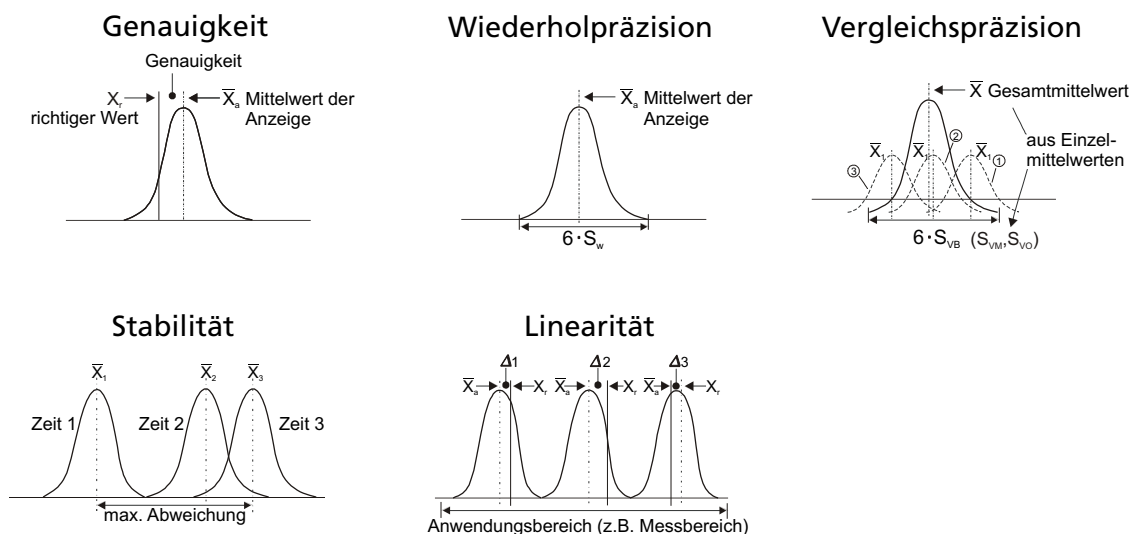


Abbildung 2.10: Vergleich der im Zusammenhang mit der Fähigkeit und Überwachung von Messeinrichtungen definierten Begriffe „Genauigkeit“, „Wiederholpräzision“, „Vergleichspräzision“, „Stabilität“ und „Linearität“.

kann beispielsweise die Standardabweichung der unter diesen Bedingungen ermittelten Messwerte verwendet werden.

Die *Vergleichspräzision* macht eine Aussage über die mit einem festgelegten Verfahren am identischen Objekt von verschiedenen Bedienern, an verschiedenen Stellen oder mit verschiedenen Messeinrichtungen durchgeführten Messungen. Dabei darf jeweils nur eine der genannten variablen Größen verändert werden. Die Vergleichspräzision kann durch den sich aus allen Werten ergebenden Mittelwert und die Streuung beschrieben werden.

Eine Aussage über die *Stabilität* kann getroffen werden, wenn mit einem festgelegten Messverfahren, denselben Messeinrichtungen, ein und demselben Messobjekt, durch denselben Bediener an demselben Ort in festgelegten Zeitabständen Messungen durchgeführt und die sich dabei ergebenden Mittelwerte miteinander verglichen werden. Die auf diesem Wege ermittelte Stabilität beinhaltet sowohl zufällige als auch systematische Einflüsse durch Sensoren, die Kalibrierung und die Umgebung. Sie kann durch die maximale Differenz zwischen den Mittelwerten der einzelnen Messwertreihen ausgedrückt werden.

Die *Linearität* einer Messeinrichtung kann mit Hilfe von Normalen, die den gesamten Messbereich abdecken, ermittelt werden. Die Messungen zur Berechnung der Linearität werden von einem Bediener am selben Ort nach einem festgelegten Messverfahren durchgeführt. Die Linearität ergibt sich durch den Vergleich der Mittelwerte der Messungen an je einem Normal mit dem zugehörigen wahren Wert. Die graphische Darstellung der Abweichungen über dem Messbereich ist die Kennlinie der Linearitätsabweichung.

Ein zusammenfassender Überblick über die verschiedenen Kenngrößen zur Überwachung von Messeinrichtungen und die Vorgehensweisen zur Ermittlung der jeweiligen Größe ist in Bild 2.11 dargestellt. Für eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise zur Ermittlung und Berechnung der Kennzahlen sei auf die einschlägige Literatur, z. B. [6] verwiesen.

	gleiches Merkmal	selbes Teil	kurze zeitl. Abstände	selber Bediener	selbes Gerät	selber Ort	gesamter Messbereich	definierte Zeitabstände
Genauigkeit	•	•	•	•	•	•		
Wiederholpräzision	•	•	•	•	•	•		
Vergleichspräzision	•	•	•	•	•	•		
Stabilität	•	•		•	•	•		•
Linearität			•	•	•	•	•	

Abbildung 2.11: Übersicht über die Kenngrößen zur Überwachung von Messeinrichtungen und die Vorgehensweisen zur Ermittlung der verschiedenen Kennzahlen.

2.3 Einsatz von C-Techniken

Die Einführung und der Betrieb eines Qualitätsmanagementsystems ist ohne den Hintergrund einer leistungsfähigen EDV-Infrastruktur und der geeigneten Software heute nicht mehr denkbar. Dies gilt sowohl für die im Bereich der präventiven Qualitätssicherung angesiedelten Verfahren und Systeme (z. B. Durchführung von FMEAs, Prüfplanung etc.) als auch für die Unterstützung der Durchführung von Prüfungen im Fertigungsbereich, die ja in vielen Fällen immer noch als in erster Linie Kosten erzeugende Maßnahme gesehen wird.

EDV-gestützte Qualitätssicherungsverfahren werden in der Regel unter der Bezeichnung *CAQ* zusammengefasst und sind häufig modular aufgebaut. Nach [71] kann die Funktionalität von CAQ-Systemen wie in Bild 2.12 dargestellt durch die Funktionen der *Qualitätsplanung*, der *Qualitätsprüfung* und der *Qualitätslenkung* sowie durch *organisatorische und informationstechnische Voraussetzungen* beschrieben werden.

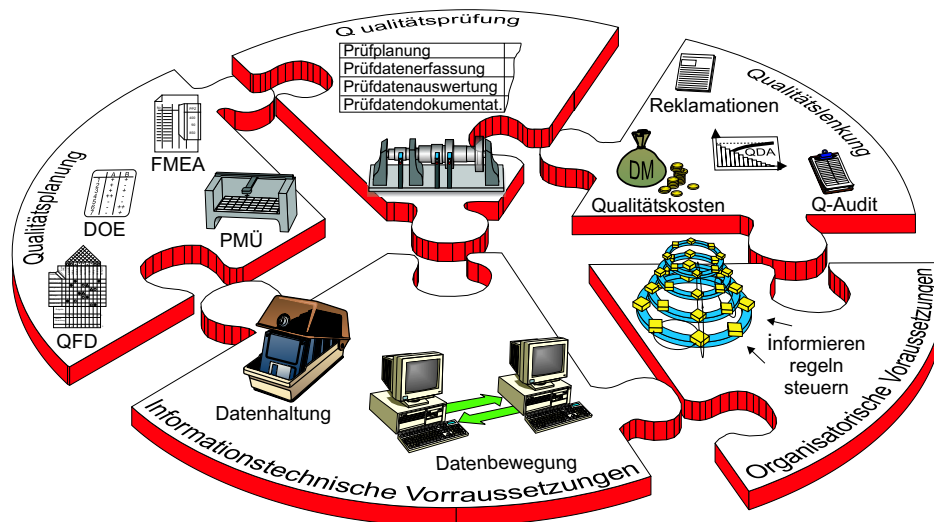


Abbildung 2.12: Das CAQ-Funktionsmodell nach [70] zeigt das Zusammenspiel der verschiedenen Module eines CAQ-Systems und verdeutlicht darüber hinaus die Durchdringung aller Unternehmensbereiche mit CAQ-relevanten Funktionen.

2.3.1 Rechnergestützte Qualitätsplanung und -lenkung

Die Funktionen zur *Qualitätsplanung* umfassen nach [71] vor allem Funktionen und Module zur Spezifikation qualitätsbezogener Anforderungen an Produkte und Prozesse. Da hierbei fast immer in hohem Maße kreative, konstruktive und bewertende Tätigkeiten eine große Rolle spielen, beschränkt sich der Leistungsumfang der Module meist auf verwaltende Funktionen sowie die Unterstützung des methodischen Vorgehens.

Beispiele für CAQ-Funktionsmodule aus dem Bereich der Qualitätsplanung sind Anwendungen zur Unterstützung des Quality Function Deployment (QFD) sowie zur Durchführung von Fehlermöglichkeits- und Einflussanalysen. Dabei sind Systeme, deren Funktionsumfang das Editieren von Formularen übersteigt, meist die Ausnahme [29].

Im Bereich der *Qualitätslenkung* steht die Verdichtung qualitätsbezogener Daten unter betriebswirtschaftlichen und organisatorischen Aspekten im Vordergrund des Interesses. Als Beispiel für solche Auswertungen kann die Aufbereitung der Qualitätslage des Unternehmens für ein Management-Informationssystem genannt werden. Dabei spielen vermehrt Gesichtspunkte der Prozessorientierung eine wichtige Rolle, so dass Qualitätsdatenauswertungen zunehmend für

- die Ermittlung von (qualitätsbezogenen) Kosten,
- die Bearbeitung von Reklamationen,
- die Schadensrückverfolgung und
- die qualitätsbezogene System- und Lieferantenbeurteilung

durchgeführt werden.

2.3.2 Rechnergestützte Qualitätsprüfung

Die Durchführung von Prüfungen im Rahmen des modernen Qualitätswesens bildet die Grundlage für die klassische Teileprüfung (Zwischen- und Endprüfung) und für die statistische Prozessregelung (SPC). Aufgrund der nach wie vor großen Bedeutung des Prüfwesens innerhalb moderner Qualitätssicherungssysteme wird die Durchführung von Prüfungen von fast allen CAQ-Systemen unterstützt. Die zur Verfügung stehenden Funktionen decken dabei die Prüfplanung, d. h. die auftragsneutrale Festlegung der zu prüfenden Merkmale, und die Prüfbeauftragung ab, die den Prüfplan um auftrags- bzw. mengenabhängige Informationen erweitert.

Die Erfassung der Prüfdaten beinhaltet zunächst wie in Bild 2.13 dargestellt die Führung des Benutzers durch die verschiedenen Arbeitsschritte. Nach der Identifikation des Prüfers werden der Prüfauftrag und das bzw. die zu prüfenden Merkmale ausgewählt. Die eingegebenen oder automatisch übernommenen Messdaten werden angezeigt und können soweit erforderlich korrigiert werden. Nach der ggf. notwendigen Berechnung der Werte für zusammengesetzte Merkmale erfolgt die Bewertung der Daten, die im Falle von nicht erwartungsgemäßen Ergebnissen durch die Eingabe der Fehlerarten und -ursachen vervollständigt wird. Je nach Zweck der Prüfung schließt sich eine abschließende Entscheidung über die weitere Verwendung des Loses an.

Die erfassten Prüfdaten werden vom CAQ-System gespeichert und ggf. mit statistischen Methoden weiter verdichtet. Die *Prüfdatenauswertung* kann hierbei auftrags-, chargen-, teile- und merkmalsorientiert über Lieferanten, Maschinen und Zeiträume durchgeführt werden. Typische durch CAQ-Systeme unterstützte Auswertungen sind nach [76] beispielsweise Lineardiagramme der Messwerte (Urwertkarten), Häufigkeitsverteilungen (Histogramme), statistische Kennwerte (Mittelwerte, Standardabweichungen usw.), Angaben über Ausschuss und Nacharbeit, Fehlersammelkarten und Verteilungstests.

2.3.3 Organisatorische und informationstechnische Integration

Die von CAQ-Systemen zur Verfügung gestellten Funktionen hängen in vielfältiger Weise mit anderen betrieblichen Prozessen wie Materialwirtschaft, Produktionsplanung und -steuerung (PPS), Betriebs- und Maschinendatenerfassung (BDE, MDE), Computer Aided Design (CAD), Computer Aided Planning (CAP) sowie Anwendungen zur Erstellung übergreifender Auswertungen zusammen. Entsprechend vielfältig sind auch die Schnittstellen aktueller CAQ-Systeme. Diese Aufzählung lässt sich im Hinblick auf die frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses noch erweitern, so dass das rechnerunterstützte Qualitätsmanagement als ganzheitliches, den Produktlebenszyklus begleitendes Qualitätskonzept betrachtet werden kann [45, 38, 112].

2.4 Praktische Durchführung von Prüfungen

Trotz des über dem modernen Qualitätswesen stehenden Ziels, Qualität zu produzieren und nicht zu erprüfen, werden in nahezu allen Bereichen der Produktion nach wie vor Prüfungen durchgeführt und



Abbildung 2.13: CAQ-Systeme unterstützen den Anwender bei der Durchführung von Prüfungen. Das System führt den Prüfer durch die einzelnen Arbeitsschritte und nimmt eine automatische Bewertung der Prüfdaten aufgrund der eingegebenen Vorgaben vor.

die dabei ermittelten Ergebnisse mit immer präziseren Methoden ausgewertet. Abhängig von der Art der Bauteile werden dabei jedoch unterschiedliche Anforderungen an die Prüfschärfe gestellt. So ist bei „einfachen“ Produkten häufig die Prüfung von Stichproben ausreichend, während bei kritischeren Produkten vielfach die vollständige Prüfung aller Teile gefordert wird.

Entscheidend für die Festlegung der Prüfschärfe ist der *Sicherheitsmaßstab*, der für das jeweilige Produkt angelegt werden muss. Ausschlaggebend ist dabei nicht allein die Wahrscheinlichkeit, mit der ein fehlerhaftes Produkt auftritt, sondern auch das Ausmaß des durch die weitere Verwendung entstehenden Schadens. In [23] wird das in diesem Zusammenhang zu betrachtende Risiko als Produkt aus der zu erwartenden *Häufigkeit* des zum Eintritt eines Schadens führenden Ereignisses und dem beim Ereigniseintritt zu erwartenden *Schadensausmaß* beschrieben.

Das Schadensausmaß kann vom Wert des betrachteten Bauteils bis zu Haftungsansprüchen bei Sachschäden in beliebiger Höhe reichen. Dies führt dazu, dass die im Einzelfall angemessene Prüfschärfe häufig auf der Basis wirtschaftlicher Betrachtungen festgelegt wird. So kann es beispielsweise auf lange Sicht günstiger sein, selbst einfache Schrauben einer 100%-Prüfung auf das Vorhandensein des

Gewindes zu unterziehen, wenn diese in einem nachfolgenden Arbeitsschritt automatisch weiterverarbeitet werden.

2.5 Produkthaftung und Dokumentation von Prüfungen

Die im vorigen Abschnitt dargestellten Überlegungen machen deutlich, dass die Durchführung von Prüfungen nicht allein unter technologischen Gesichtspunkten betrachtet werden kann. Werden Produkte, die nicht den an sie gestellten Qualitätsanforderungen entsprechen, in Verkehr gebracht, so kann dies im Schadensfall für den Hersteller weitreichende Konsequenzen haben. So drohen neben den schwer zu bewertenden Imageschäden beispielsweise Haftungsansprüche gegen das Unternehmen, die infolge des aktuell geltenden Produkthaftungsgesetzes bei Personenschäden bis zu 85 Mio Euro betragen und bei Sachschäden ohne Begrenzung geltend gemacht werden können.

Das Thema Produkthaftung muss daher unter zwei Gesichtspunkten betrachtet werden: den möglichen Konsequenzen, die sich durch das In-Verkehr-Bringen eines nicht den gestellten Anforderungen entsprechenden Produktes ergeben können, und den im Vorfeld zu treffenden Vorkehrungen, um das Risiko für solche Fälle durch *vorbeugende* qualitätssichernde und organisatorische Maßnahmen sowie eine umfassende Dokumentation der Qualitätsslage so gering wie möglich zu halten [108].

2.5.1 Grundlagen der Produkthaftung

Die rechtliche Grundlage für die Produkthaftung stellt § 823 BGB dar, der durch das deutsche *Produkthaftungsgesetz* (ProdHaftG) auf der Basis der EG-Richtlinie 85/374 ergänzt wird. Das Produkthaftungsgesetz erleichtert vor allem die Beweisführung im Schadensfall, denn „Für den Fehler, den Schaden und ursächlichen Zusammenhang zwischen Fehler und Schaden trägt der Geschädigte die Beweislast.“ (§ 1 Abs. 4 ProdHaftG). Um einen Schaden nach dem Produkthaftungsgesetz geltend zu machen, ist es demnach ausreichend zu beweisen,

- dass ein *Schaden* entstanden ist,
- das vom Hersteller in den Verkehr gebrachte Produkt *fehlerhaft* ist
- und dass der Fehler des Produktes *ursächlich* für den eingetretenen Schaden ist.

Im Gegensatz zur Haftung nach § 823 BGB ist die meist schwierig zu beweisende Frage des Verschuldens für die Haftung nach dem ProdHaftG unerheblich [113]. Einen Überblick über die Haftungsgrundlagen für die verschiedenen Formen der Produkthaftung gibt Bild 2.14.

Das Produkthaftungsgesetz legt auch fest, in welchen Fällen die Haftung für einen Schaden ausgeschlossen werden kann. Ist bei einem Kunden ein Schaden infolge eines Fehlers eines Produktes entstanden, so muss der Hersteller nach [85] nachweisen, dass

- er das Produkt nicht in den Verkehr gebracht hat,
- nach den Umständen davon auszugehen ist, dass das Produkt den Fehler, der den Schaden verursacht hat, noch nicht hatte, als der Hersteller es in den Verkehr brachte,

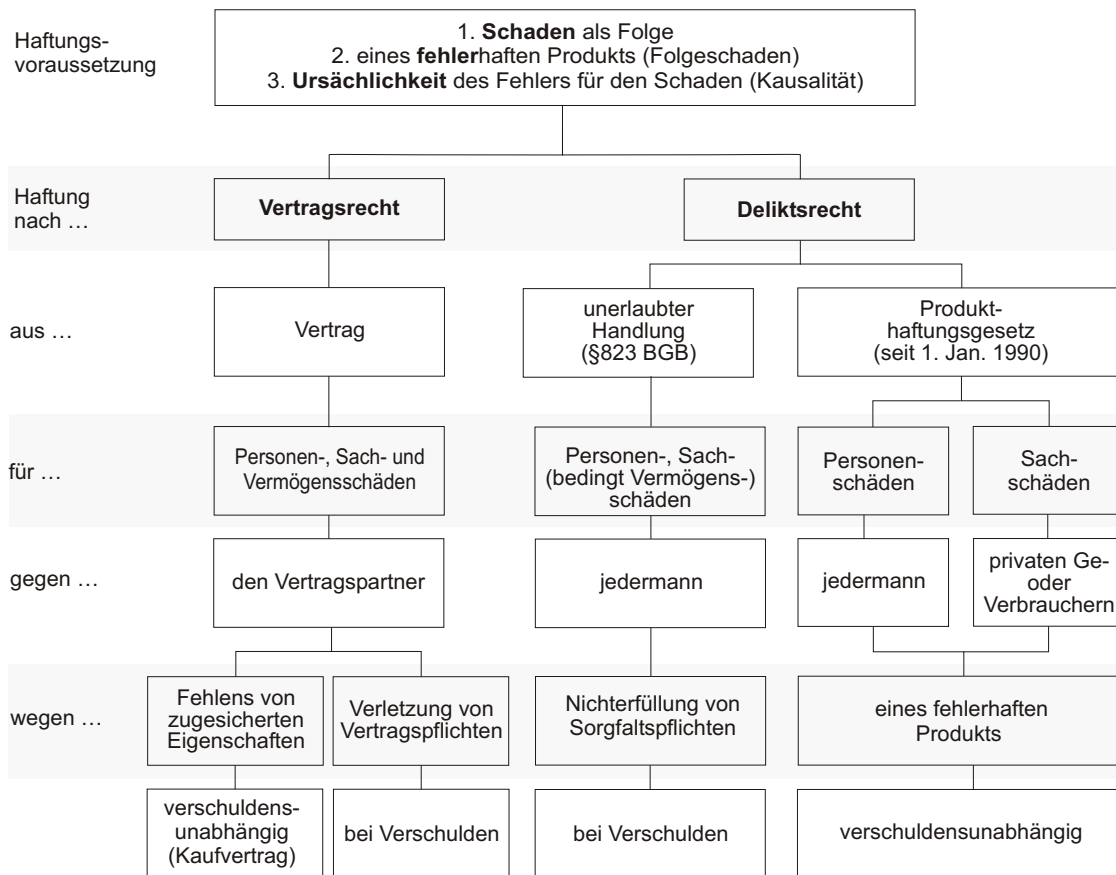


Abbildung 2.14: Haftungsgrundlagen für die unterschiedlichen Formen der Produkthaftung nach [2].

- er das Produkt weder für den Verkauf oder eine andere Form des Vertriebes mit wirtschaftlichem Zweck hergestellt noch im Rahmen seiner beruflichen Tätigkeit hergestellt oder vertrieben hat,
- der Fehler darauf beruht, dass das Produkt zu dem Zeitpunkt, zu dem der Hersteller es in den Verkehr brachte, dazu zwingenden Rechtsvorschriften entsprochen hat,
- der Fehler nach dem Stand der Wissenschaft und Technik zu dem Zeitpunkt, zu dem der Hersteller das Produkt in den Verkehr brachte, nicht erkannt werden konnte.

Durch *Qualitätsvereinbarungen* wird die Verantwortung häufig über das gesetzlich geregelte Maß hinaus ausgedehnt, wodurch sich ein zusätzliches Risiko für den Lieferanten von Waren ergibt. Der Inhalt von Qualitätsvereinbarungen ist nach [8] häufig die Abwälzung der in §§ 377, 378 HGB geregelten Prüf- und Rügepflicht des Käufers auf den Verkäufer, so dass auf Wareneingangsprüfungen verzichtet oder deren Umfang erheblich eingeschränkt werden kann. Ein Vorteil von Qualitätsvereinbarungen ist dagegen, dass zwischen Kunde und Lieferant klargestellt wird, was unter „Qualität“ verstanden wird.

Einen weiteren Aspekt des Vertragsrechts stellt die *Zusicherung von Eigenschaften* dar, welche die Gewährleistungs- oder Haftungsansprüche gegen den Hersteller von Waren zusätzlich erleichtert.

Da die durch das Vertragsrecht entstehenden Risiken von Haftpflichtversicherungen in der Regel nicht abgedeckt werden können, stellt ein funktionierendes Qualitätssicherungssystem das einzige Mittel zur Minimierung der genannten Gefahren für das Unternehmen dar. Abhängig davon, wie kritisch ein Versagen der hergestellten Produkte zu bewerten ist, gewinnen die Funktionen zur Dokumentation mehr und mehr Bedeutung gegenüber den operativen und analysierenden CAQ-Funktionen. Eine ähnliche Situation besteht wie in Bild 2.15 dargestellt zwischen den eingegangenen Qualitätsvereinbarungen und den Funktionen des CAQ-Systems, das die Einhaltung der zugesagten Eigenschaften überwacht und gewährleistet.

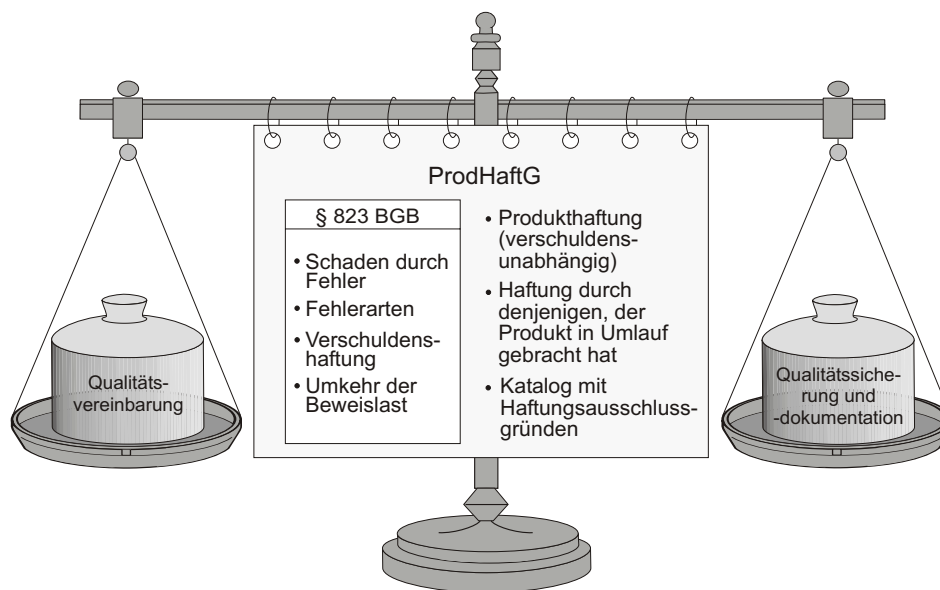


Abbildung 2.15: Um über die gesetzlich festgelegte Produkthaftung hinausgehende Qualitätsvereinbarungen sicher erfüllen zu können, müssen verstärkt Maßnahmen zur Sicherung und Dokumentation der Qualität ergriffen werden.

2.5.2 Dokumentation von Prüfungen

Aufgrund der Tatsache, dass Schadenersatzansprüche auf der Basis des Produkthaftungsgesetzes im Schadensfall bereits dann geltend gemacht werden können, wenn ein Fehler sowie der kausale Zusammenhang zwischen Fehler und dem daraus entstandenen Schaden nachgewiesen werden konnte, ist die Durchführung von Produktprüfungen zur Minimierung des Haftungsrisikos allein nicht ausreichend. Um gegebenenfalls erhobene Schadenersatzansprüche abwenden zu können, ist vielmehr der *Nachweis* zu erbringen, dass das Produkt zum Zeitpunkt des In-den-Verkehr-Bringens durch den Hersteller fehlerfrei war. Dies lässt sich nach heutigem Stand der Technik nur durch die geeignete Dokumentation des individuellen Zustandes des Produktes und aller für die Qualität des Produktes relevanten Prozesse erreichen. Nach [86] sind folgende Kategorien zu betrachten:

- Konstruktionsfehler

- Produktionsfehler
- Instruktionsfehler
- Produktbeobachtungsfehler

Bei einem *Konstruktionsfehler* ist bereits die ursprüngliche Festlegung des Produktes fehlerhaft. Demzufolge sind beim Vorliegen eines solchen Fehlers grundsätzlich alle Produkte, die entsprechend dieser Vorgabe gefertigt wurden, betroffen. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei einem *Produktionsfehler* um einen Fehler, der erst im Bereich der Produktionskette auftritt und daher nicht notwendigerweise alle gefertigten Teile betrifft. Als Fehlerursache können menschliche oder technische Faktoren genannt werden. Von einem *Instruktionsfehler* kann immer dann gesprochen werden, wenn beispielsweise die Gebrauchsanweisungen nicht die erforderlichen Informationen beinhalten. Ein *Produktbeobachtungsfehler* liegt dagegen dann vor, wenn der Hersteller das Langzeitverhalten des in Verkehr gebrachten Produktes nicht ausreichend beobachtet.

Im Zusammenhang mit dem für die vorliegende Arbeit relevanten Verfahren der Qualitätsdatenrecherche sind in erster Linie Produktionsfehler von Bedeutung. Darüber hinaus können jedoch auch Konstruktionsfehler eine Rolle spielen, wenn qualitätsrelevante Vorgaben für die Herstellung oder Prüfung der Produkte nach In-Verkehr-Bringen geändert werden.

An ein System zur Dokumentation für eine später gegebenenfalls erforderliche Beweisführung müssen nach [86] folgende Anforderungen gestellt werden:

- fehlerfreie Erfassung der Daten
- Organisation der Daten mit minimalem Administrationsaufwand und ohne Routinetätigkeiten
- einfache Verfügbarkeit der Daten mit schnellem Zugang, einfacher Bedienbarkeit und gezieltem Zugriff
- langfristige Archivierung der Daten mit Sicherstellung der Datenintegrität, Zugriffssicherheit und Sicherheit vor Datenverlust
- Flexibilität bei neuen Anforderungen, z. B. durch offenes System und Zugriffsmöglichkeit auch bei Systemwechsel

Die genannten Anforderungen entsprechen in vielen Bereichen den Voraussetzungen für die Anwendung der Qualitätsdatenrecherche. Durch marktübliche CAQ-Systeme kann wie in Abschnitt 2.3 beschrieben ein großer Teil der Anforderungen abgedeckt werden.

2.5.3 Dokumentierte Prüfung von Bauteilen

Unter Berücksichtigung der dargestellten Überlegungen soll in den weiteren Ausführungen der Arbeit immer dann von einer *dokumentierten Prüfung* gesprochen werden, wenn die oben genannten Anforderungen an die Erfassung, Organisation, Verfügbarkeit und Archivierung der Daten erfüllt sind. In Verbindung mit einem Qualitätswesen, das die *richtigen* Qualitätsmerkmale überwacht, sind aus der

Sicht des Unternehmens damit gute Voraussetzungen für eventuell aufkommende Haftungsansprüche gegeben. Gleichzeitig sind mit den genannten Anforderungen auch die Voraussetzungen für die Einführung eines Systems zur Qualitätsdatenrecherche gegeben, was zusätzliche Möglichkeiten für die Auswertung der vorliegenden Daten eröffnet.

Die dokumentierte Durchführung von Prüfungen macht keine Aussage darüber, welches Risiko im Fehlerfall zu erwarten ist. Die Entscheidung, in welchem Umfang die durchgeführten Prüfungen dokumentiert werden, kann damit unabhängig davon getroffen werden, ob es sich beispielsweise um sicherheitskritische oder dokumentationspflichtige Bauteile handelt.

2.6 Zusammenfassung

Die Darstellung des aktuellen Standes der Technik hat gezeigt, dass der Sicherung der Qualität eine äußerst hohe Bedeutung bei der Produktion von Gütern zukommt. Eine nicht den Erwartungen entsprechende Qualitätslage kann neben der Schädigung des Ansehens des Unternehmens aufgrund der geltenden Rechtslage zu hohen Schadenersatzforderungen führen, die durchaus den Bestand des Unternehmens gefährden können. Eine Möglichkeit der Vorsorge für eventuell aufkommende Haftungsansprüche ist die umfassende *Dokumentation* der durchgeführten Prüfungen. Es ist also vielfach nicht ausreichend, Qualität zu *produzieren*, die Qualität muss vielmehr grundsätzlich so dokumentiert werden, dass sie im Falle eines auftretenden Schadens auch *nachgewiesen* werden kann.

Zum Erreichen eines möglichst hohen Qualitätsstandards steht eine Vielzahl von Werkzeugen und Verfahren zur Verfügung, die in der Praxis flexibel angewandt und an die verschiedenen Aufgabenstellungen und Prozesse angepasst werden können. Der Anwendungsbereich der Verfahren deckt dabei den Lebenszyklus eines Produktes fast vollständig ab. Im Falle der Durchführung und Auswertung von Prüfungen ist jedoch zu erkennen, dass die zur Verfügung stehenden Verfahren prozessspezifisch ausgewählt und in vielen Fällen auch angepasst werden müssen. Die hier nur als Überblick gegebene Darstellung der Signalverarbeitungsverfahren macht jedoch deutlich, dass das vorauszusetzende mathematische Verständnis erfahrungsgemäß in vielen Fällen nicht in ausreichendem Maß vorhanden ist, so dass das Potential der Verfahren häufig nur teilweise oder gar nicht genutzt wird.

Die heute zur Verfügung stehenden CAQ-Systeme unterstützen alle gebräuchlichen Verfahren des modernen Qualitätswesens. Gleichzeitig sind sie durch ihre modulare Architektur in ausreichendem Maße an die im Einzelfall gegebenen Anforderungen anpassbar. In Verbindung mit den bei aktuellen Systemen in ausreichendem Maße vorhandenen Leistungsreserven stellen CAQ-Systeme damit eine optimale Plattform für die Entwicklung und den Betrieb neuer Auswerte- und Analyseverfahren für die erfassten Prüfdaten und Ergebnisse dar. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die heute vielfach noch manuell durchgeführte Adaption des Systems an die jeweilige Aufgabenstellung vereinfacht und zumindest teilweise automatisiert werden kann.

Kapitel 3

Qualitätsdatenrecherche

Die Mess- und Prüftechnik hat im Produktionsbereich in den letzten Jahren stetig an Bedeutung gewonnen. Dies gilt in besonderem Maße bei der Herstellung von Bauteilen, deren Versagen erhebliche Folgen für Mensch und Umwelt hat. Dieser Tatsache wird im Rahmen des aktuell praktizierten Qualitätswesens vielfach nur dadurch Rechnung getragen, dass auf die Notwendigkeit und die besondere Sorgfalt bei der Durchführung der Prüfungen hingewiesen wird. In Anbetracht der derzeit gültigen Regelungen für die Produkthaftung wird darüber hinaus häufig eine detailliertere Dokumentation der durchgeführten Prüfungen erstellt. Spezielle, den besonderen Anforderungen dieser Art von Produkten gerecht werdende Verfahren sind bis jetzt jedoch nicht bekannt.

Ein Ansatz für eine geeignete Vorgehensweise zur rechnerunterstützten Prüfung derartiger Produkte kann aus der in Bild 2.13 dargestellten Durchführung von Prüfungen im Rahmen eines konventionellen CAQ-Systems abgeleitet werden. Wie in Bild 3.1 dargestellt ist die Überprüfung der Prüfanlage fest in den Ablauf integriert. Die an den Prüflingen ermittelten Prüfergebnisse werden erst dann endgültig akzeptiert, wenn der einwandfreie Zustand der Prüfeinrichtungen nachgewiesen und dokumentiert wurde. Aus Gründen der Rückverfolgbarkeit muss darüber hinaus jeder Prüfling individuell gekennzeichnet werden, um die durchgeführten Prüfungen auch zu einem späteren Zeitpunkt noch eindeutig nachvollziehen zu können.

Mit den steigenden Anforderungen an die Qualität der Produkte werden auch die in der Praxis eingesetzten Prüf- und Auswerteverfahren immer leistungsfähiger und teilweise auch anspruchsvoller in der Anwendung. Dies zeigt sich nicht nur an der zunehmenden Quantität der eingesetzten Mess- und Prüftechnik, sondern vor allem auch in einer ständigen Zunahme der Komplexität der Aufgabenstellungen sowie der eingesetzten Verfahren. Diese äußert sich vor allem durch

- die Verfügbarkeit neuer Prüfverfahren und -geräte,
- die Forderung nach Vereinfachungen bei der Erfassung und Auswertung der Prüfdaten

und nicht zuletzt durch

- neue Erkenntnisse hinsichtlich der Beurteilung von Fehlern.

Der erste Punkt bietet durch die Einführung neuer Technologien eine Erweiterung der Möglichkeiten zur Erkennung von Fehlern am Produkt oder zur Beurteilung des Prozesses. Mit Hilfe der neuen Technik ist in der Regel die Erkennung von Fehlern möglich, die bis zu diesem Zeitpunkt aus technischen

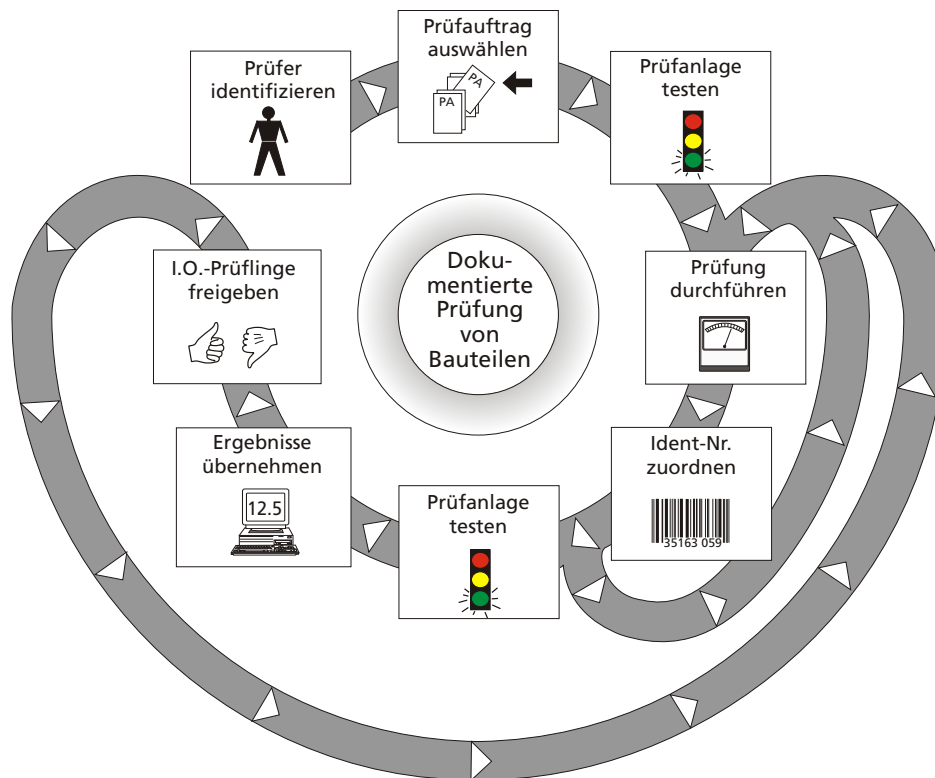


Abbildung 3.1: Vorgehensweise für die rechnerunterstützte Durchführung von Prüfungen von Produkten mit erhöhten Anforderungen an die Überwachung der Prüfeinrichtung und die Dokumentation der Prüfergebnisse.

Gründen nicht detektiert werden konnten. Im Gegensatz dazu bietet der zweite Punkt lediglich eine vereinfachte Handhabung der Prüftechnik, die sowohl aus Sicht der Ergonomie als auch im Hinblick auf eine erhöhte Wirtschaftlichkeit erwünscht sein kann.

Der letzte der genannten Punkte resultiert aus einer verbesserten Kenntnis der Prüftechnik oder des geprüften Produktes, die zu einer qualifizierteren Beurteilung führt. Auslöser für diese Entwicklung können Erfahrungen aus dem Einsatz des Produktes oder neue Erkenntnisse hinsichtlich der Werkstoffe sowie der Prüf- und Fertigungstechnik des Produktes sein. Unter dem Aspekt der Qualitätsdatenrecherche ist dabei entscheidend, dass die Verbesserung allein durch die Weiterentwicklung der Verfahren zur Interpretation der erfassten Prüfdaten und nicht durch eine verbesserte oder zusätzlich eingesetzte Prüftechnik erzielt werden kann.

Bei der Qualitätsdatenrecherche handelt es sich wie in Bild 3.2 dargestellt grundsätzlich um einen zweistufigen Prozess: In einem ersten Schritt werden die erforderlichen Prüfungen normal durchgeführt und bewertet. Die der Ermittlung des Prüfergebnisses zugrunde liegenden Daten werden jedoch zusammen mit einem Identifikationsmerkmal des Prüflings gespeichert und in geeigneter Form archiviert. In einem zweiten Schritt, der zu einem wesentlich späteren Zeitpunkt auch dann noch durchgeführt werden kann, wenn der Prüfling bereits seiner Bestimmung gemäß eingesetzt wird, kann die

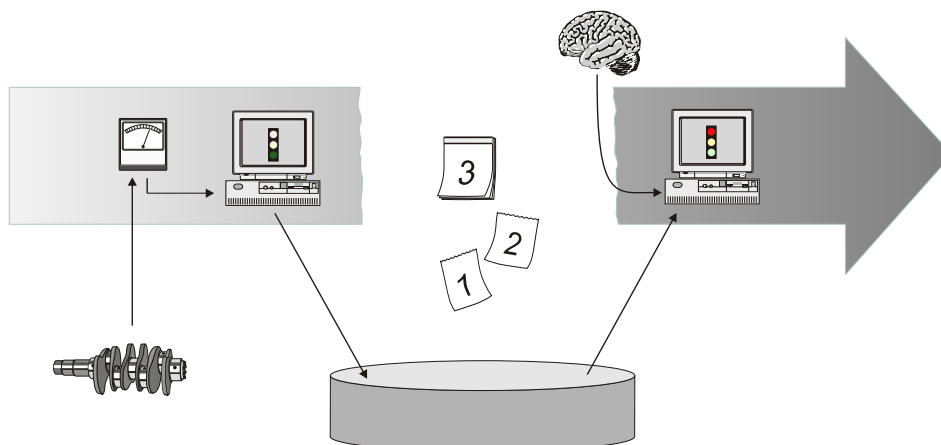


Abbildung 3.2: Prinzipielle Vorgehensweise bei der Qualitätsdatenrecherche. Die bei der Durchführung von Produktprüfungen erfassten Daten werden so in einer Datenbank gespeichert, dass sie zu einem späteren Zeitpunkt unter Berücksichtigung neuer Erkenntnisse erneut ausgewertet werden können.

Auswertung der ursprünglich erfassten Prüfdaten wiederholt werden. Dabei wird auf die archivierten Prüfdaten zurückgegriffen, die unter Verwendung des aktuellen Wissens über das Produkt, den Prozess oder die eingesetzte Prüftechnik erneut ausgewertet werden können. Aufgrund der Tatsache, dass die archivierten Prüfdaten die Identifikation des zugehörigen Prüflings ermöglichen, können abhängig vom Ergebnis der aktuellen Auswertung gezielt Maßnahmen ergriffen werden.

3.1 Voraussetzungen für die Qualitätsdatenrecherche

Die Voraussetzungen für den Einsatz der Qualitätsdatenrecherche sind in erster Linie in einer durchgängigen und möglichst vollständigen Erfassung aller im Zusammenhang mit der Prüfung von Werkstücken anfallenden Informationen zu sehen. Dies umfasst neben den eigentlichen Prüfdaten auch Informationen über

- das Produkt selbst (Typ, Werkstoff . . .),
- zur Herstellung tatsächlich verwendete Materialien (z. B. Materialchargen) und Bearbeitungsschritte, die beispielsweise durch Maschinennummern und Prozessparameter näher beschrieben werden können,
- die der Erfassung der Prüfdaten zugrunde liegenden Prüfmittel und -parameter,
- die bei der Auswertung angewandten Verfahren und Grenzwerte (z. B. Rückweisgrenzen),
- ein oder mehrere Merkmale, die eine eindeutige Identifikation des Prüflings sowie eine Zuordnung aller bereits aufgeführten Informationen zum zugehörigen Prüfobjekt erlauben.

Um die Qualitätsdatenrecherche wirtschaftlich einsetzen zu können, darf gegenüber der herkömmlichen Vorgehensweise kein nennenswerter Mehraufwand entstehen. Dies kann nur mit Hilfe einer in hohem Maße automatisierten und sich über alle betroffenen Bereiche erstreckenden DV-Infrastruktur erreicht werden. Nachdem die Voraussetzungen dafür durch die in den letzten Jahren in immer stärkerem Maße zu beobachtende Durchdringung aller Unternehmensbereiche mit rechnergestützten Systemen geschaffen wurden, besteht die Herausforderung nun darin, die als „Insellösungen“ realisierten Einrichtungen so in Gesamtsysteme zu integrieren, dass sich nach Ergänzung der noch fehlenden Verfahren und Systeme die Möglichkeit zur Qualitätsdatenrecherche bietet. Bild 3.3 zeigt das Zusammenwirken konventioneller Maßnahmen der Planung und Durchführung von Prüfaufgaben innerhalb eines Qualitätsdatenrecherchesystems.

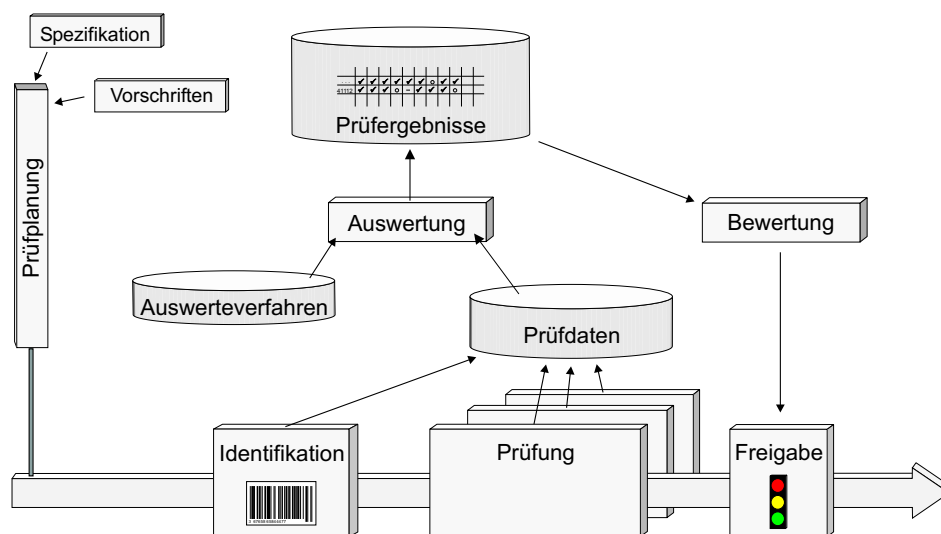


Abbildung 3.3: Einbindung konventioneller Prüfabläufe in ein System zur Qualitätsdatenrecherche.

Aufgrund der für das zu prüfende Teil vorliegenden Spezifikationen und der anzuwendenden Prüfvorschriften wird zunächst die *Prüfplanung* durchgeführt. Sie legt neben Art und Umfang der durchzuführenden Prüfungen auch die Auswerteverfahren sowie die bei der Bewertung anzuwendenden Kriterien (z. B. Rückweisgrenzen) fest. Vor Durchlaufen des ersten Prüfschrittes muss der Prüfling zunächst eindeutig *identifiziert* werden. Das dabei ermittelte Identifikationsmerkmal dient in erster Linie dazu, eine eindeutige Zuordnung der in den einzelnen Prüfschritten erfassten Prüfdaten und der daraus ermittelten Prüfergebnissen zu den zugehörigen Werkstücken zu ermöglichen. Die Prüfdaten selbst werden wie die Informationen über die Auswerteverfahren, die anzuwendenden Rückweisgrenzen und die ermittelten Prüfergebnisse in einer Datenbank abgelegt, die jederzeit eine Zuordnung dieser Daten zum zugehörigen Prüfling erlaubt. Aufgrund des Ergebnisses der Auswertung wird eine Entscheidung über die weitere Verwendung des Prüflings getroffen. Dabei wird normalerweise unterschieden, ob das Teil den Anforderungen entspricht, ob dieser Zustand durch Nacharbeit noch erreicht werden oder ob das Teil für den vorgesehenen Zweck nicht weiter verwendet werden kann.

3.2 Durchführung der Qualitätsdatenrecherche

Ein in der beschriebenen Weise erfasster und archivierter Datenbestand bietet die Voraussetzungen für nachträgliche Auswertungen mit Verfahren der Qualitätsdatenrecherche. Den Ausgangspunkt für die Durchführung einer Qualitätsdatenrecherche stellen in der Regel neue Erkenntnisse über die Beanspruchung der Werkstücke oder über die eingesetzten Prüf- und Fertigungsverfahren dar. Dabei spielt neben dem allgemeinen technologischen Fortschritt in immer stärkerem Maße auch die Suche nach bislang unbekanntem Zusammenhängen mit modernen Verfahren zur Datenanalyse (z. B. Data Mining) eine wichtige Rolle.

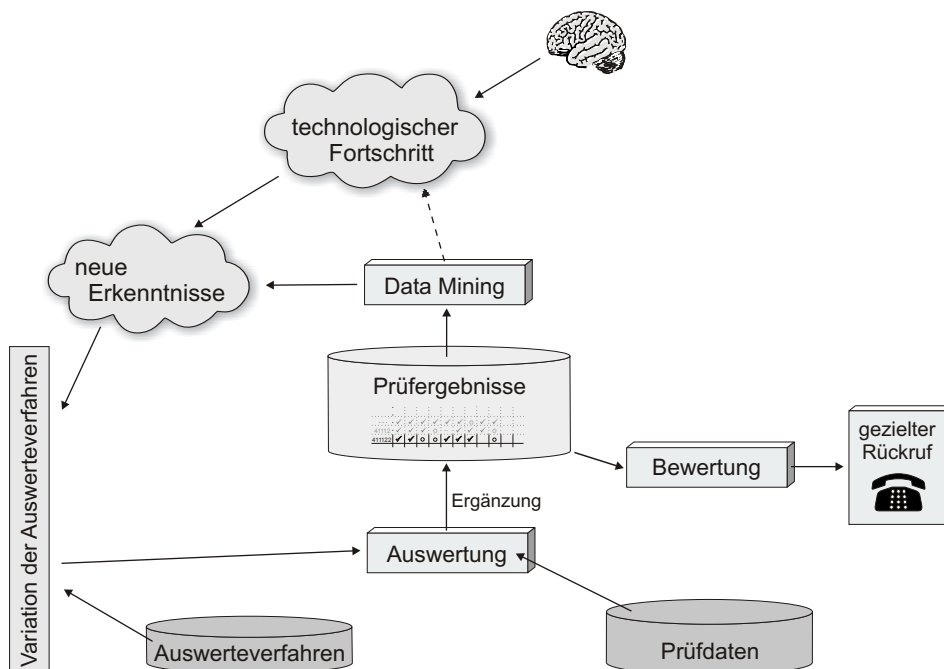


Abbildung 3.4: Nachträgliche Auswertung archivierter Datenbestände mit Verfahren der Qualitätsdatenrecherche.

Die bei der ursprünglichen Bewertung der Prüfdaten eingesetzten Auswerteverfahren werden wie in Bild 3.4 dargestellt unter Berücksichtigung neuer Erkenntnisse variiert und erneut auf die gespeicherten Prüfdaten angewendet. Aufgrund der vorgegebenen Bewertungsvorschriften kann nun eine neue Verwendungsentscheidung ermittelt werden. Durch die als Voraussetzung für die Qualitätsdatenrecherche geforderte Möglichkeit zur eindeutigen Identifikation der Prüflinge kann das so ermittelte neue Prüfergebnis für gezielte Maßnahmen (z. B. Rückruf, besondere Überwachung ...) an den betroffenen Werkstücken oder Komponenten genutzt werden.

3.3 Varianten der Qualitätsdatenrecherche

Das Verfahren der Qualitätsdatenrecherche ist in der Praxis vielseitig anwendbar. Zum einen bietet es eine komfortable Möglichkeit zur Beurteilung der Konsequenzen, die sich aus der Anwendung neuer Auswerteverfahren oder geänderter Rückweisgrenzen hinsichtlich der Qualitätslage eines Produktes oder Prozessschrittes ergeben. Auf diese Weise kann z.B. sehr einfach untersucht werden, welchen Einfluss eine Veränderung der derzeit verwendeten Toleranzen auf die Ausbeute eines Prozesses hat.

Der zweite große Anwendungsbereich der Qualitätsdatenrecherche ist in der Suche nach neuen Fehlermerkmalen in archivierten Datenbeständen zu sehen. Eine typische Aufgabenstellung besteht beispielsweise darin, alle Datensätze zu suchen, die über Merkmale verfügen, die einem gegebenen Muster ähnlich sind. Als Beispiel kann die Suche nach Stellen an geprüften Werkstücken dienen, an denen Risse und maßliche Abweichungen in geringem Abstand zueinander nachgewiesen werden können. Obwohl keines der Merkmale für sich allein genommen als versagenskritisch eingestuft werden muss, kann von der gleichzeitigen Ausprägung der beiden Merkmale oberhalb eines bestimmten Niveaus eine erhöhte Gefährdung ausgehen.

Diese Vorgehensweise kann mit der Idee der inhaltlichen Suche in Bilddatenbanken nach dem QBIC-Verfahren (Query by Image Content) verglichen werden, bei dem die visuellen Eigenschaften eines Bildes in numerische Deskriptoren umgesetzt werden, die eine Ähnlichkeitssuche nach Farbe, Form, Textur, Layout und Schlüsselwörtern oder einer Kombination dieser Kriterien ermöglichen [55, 17].

Aufgrund der Tatsache, dass bei QBIC eine Reihe von Deskriptoren quasi eine Erweiterung der Möglichkeiten zur Beschreibung des gesuchten Bildinhaltes darstellen, kann hier wegen des in dieser Form eingebrachten Wissens über die Eigenschaften der gesuchten Objekte der Suchraum relativ schnell eingegrenzt werden. Bei der Qualitätsdatenrecherche soll jedoch im Gegensatz dazu in erster Linie die Möglichkeit zur Suche nach einem anhand *eines Beispiels* gegebenen Signalverlauf gegeben sein, bei dem grundsätzlich nicht davon ausgegangen werden kann, dass eine Aussage darüber vorliegt, welche der im Mustersignal vorliegenden Eigenschaften (z. B. Frequenzen, Signalverläufe ...) charakteristisch für die gesuchten Muster sind. Da außerdem damit zu rechnen ist, dass nur eine geringe Anzahl von Beispielen des gesuchten Signalverlaufes verfügbar ist, wird in der Praxis wie in Bild 3.5 dargestellt eine iterative Vorgehensweise erforderlich sein, bei der die zur Suche eingesetzte Analysefunktion durch eine interaktive Bewertung der Ergebnisse immer besser an die gesuchte Signalform angepasst wird.

Aus der Forderung nach der Verwendung von *Beispielen* für die Definition der zu suchenden Signalverläufe wird die Bedeutung der zur Suche bzw. zur Adaption an die zu suchende Signalform verwendeten Verfahren deutlich. Um ein möglichst großes Spektrum von Suchmustern zu gewährleisten, müssen die Verfahren äußerst flexibel sein und in hohem Maße die Fähigkeit zur Adaption an die jeweiligen Suchmuster besitzen. Gleichzeitig soll die Anwendung aber auch so einfach sein, dass für den praktischen Einsatz keine ausgeprägten mathematischen oder programmiertechnischen Kenntnisse erforderlich sind. Die Verfügbarkeit geeigneter mathematischer Verfahren für die Suche nach frei wählbaren Mustern, die allein durch Beispiele definiert werden, stellt daher einen entscheidenden Schlüsselfaktor für die Realisierung eines Systems für die Qualitätsdatenrecherche dar.

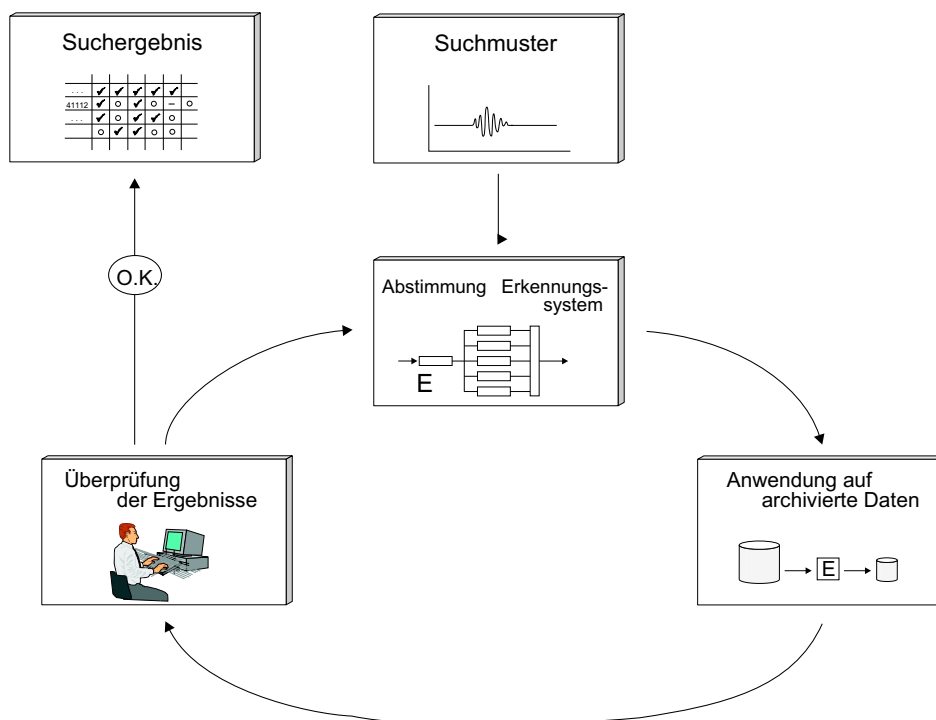


Abbildung 3.5: Iterative Vorgehensweise bei der Suche nach einem anhand eines Beispiels vorgegebenen Signalverlauf.

3.4 Realisierung von Qualitätsdatenrecherchesystemen

Der Aufbau eines Qualitätsdatenrecherchesystems stellt eine Reihe von Anforderungen, die sowohl den organisatorischen als auch den technischen bzw. wissenschaftlichen Bereich umfassen. Die Leistungsfähigkeit der Qualitätsdatenrecherche resultiert aus dem Zusammenwirken einer ganzen Reihe von Einzelkomponenten, die wie in Bild 3.6 dargestellt in zwei Gruppen eingeteilt werden können:

- organisatorisch-technische Komponenten (Erfassung und Archivierung der Daten, Kennzeichnung und Identifikation, Konfigurationsmanagement und Rückverfolgbarkeit) sowie
- mathematisch-informationstechnische Verfahren zur Auswertung und Klassifikation der Prüfdaten.

3.4.1 Organisatorisch-technische Komponenten

Aus technischer Sicht muss zunächst sichergestellt werden, dass die bei der ursprünglichen Prüfung erfassten Daten *vollständig* und so organisiert sind, dass auf sie mit geeigneten Werkzeugen schnell und *automatisch zugegriffen* werden kann. Durch eine entsprechende *Strukturierung* der Daten sollen Verbindungen zu den bei der Produktion bzw. Prüfung verwendeten Parametereinstellungen hergestellt

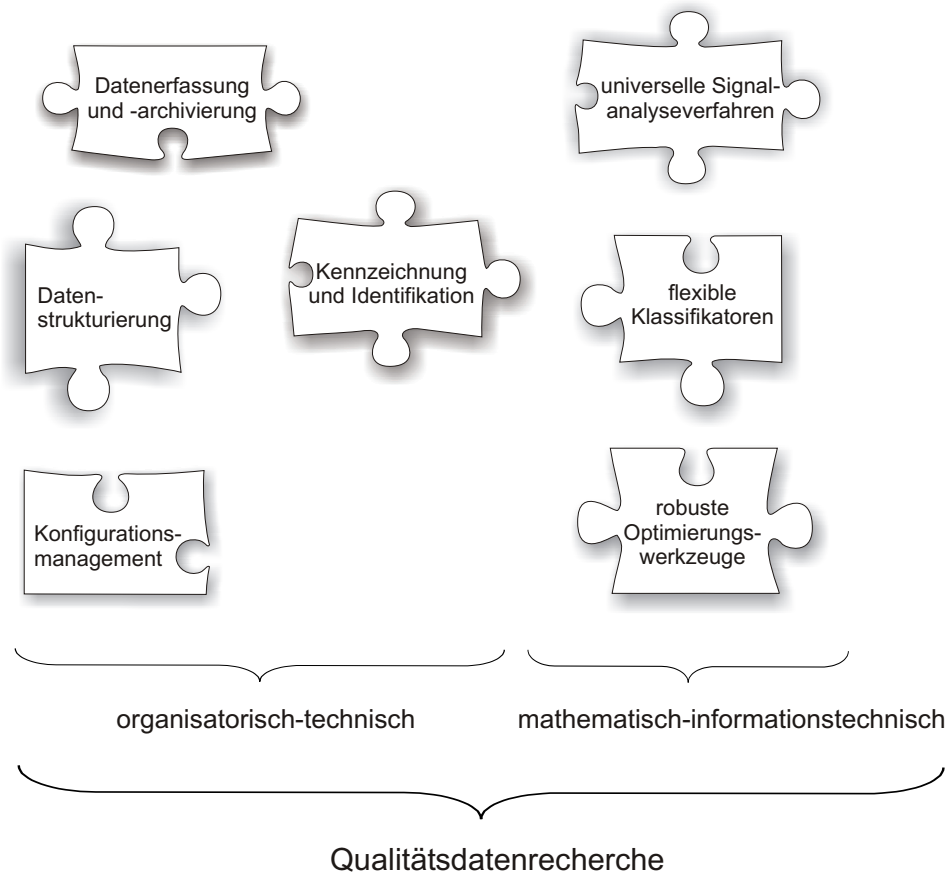


Abbildung 3.6: Zusammenwirken der einzelnen Komponenten eines Systems zur Qualitätsdatenrecherche.

werden können. Darüber hinaus müssen die archivierten Daten jederzeit die Zuordnung zum zugehörigen Werkstück ermöglichen, was geeignete *Kennzeichnungs- und Identifikationsverfahren* voraussetzt. Bei komplizierteren Produkten ist zusätzlich ein *Konfigurationsmanagement-System* erforderlich, welches das Auffinden eines Bauteils oder einer Komponente auch dann noch ermöglicht, wenn diese in einem späteren Produktionsschritt mit anderen Komponenten zu einer größeren Einheit zusammengefügt wurde. Die organisatorisch-technischen Anforderungen können somit in der Forderung nach möglichst weitgehender Rückverfolgbarkeit zusammengefasst werden, die jedoch nicht mit der Endprüfung des Produktes abgeschlossen ist, sondern sich je nach Vertriebsstruktur bis zum Endanwender des Produktes erstreckt.

3.4.2 Mathematisch-informationstechnische Komponenten

Neben den organisatorisch-technischen Komponenten eines Systems zur Qualitätsdatenrecherche, die den Rahmen für die Einbindung in bestehende Abläufe einer Fertigung ermöglichen, sind auch leistungsfähige Verfahren zur automatischen Analyse und Beurteilung der auszuwertenden Qualitätsda-

ten erforderlich. Diese stellen das Kernstück des Systems dar und müssen über extreme Zuverlässigkeit in Verbindung mit einem hohen Maß an Universalität verfügen.

Die Funktion eines Qualitätsdatenrecherchesystems beruht darauf, dass die zu untersuchenden Daten mit einem bekannten Muster verglichen werden. Übersteigt die Ähnlichkeit eine bestimmte Schwelle, so wird davon ausgegangen, dass das gesuchte Muster im untersuchten Datensatz wiedergefunden wurde. Diese Funktion entspricht grundsätzlich der eines in Kapitel 2.2.4 beschriebenen Erkennungssystems. Im Zusammenhang mit der Qualitätsdatenrecherche besteht eine Besonderheit jedoch darin, dass die Festlegung des Suchmusters, d. h. die Adaption des Erkennungssystems an das gewünschte Muster, flexibel durch den *Anwender* des Systems durchgeführt wird. Dies bedeutet, dass die Adaption an das Suchmuster automatisch erfolgen muss oder vom System zumindest so weit unterstützt wird, dass sie ohne das detaillierte Verständnis der zugrunde liegenden mathematischen Verfahren durch den Anwender durchgeführt werden kann. Die Fähigkeit des Systems zur Anpassung an die zu suchenden Muster soll dabei auch dann gewährleistet sein, wenn nur wenige oder eine stark unterschiedliche Anzahl von Lernmustern für die zu unterscheidenden Klassen zur Verfügung stehen. Die zuletzt genannten Anforderungen führen dazu, dass ein Teil der prinzipiell geeigneten Verfahren (z. B. künstliche neuronale Netze) für die Qualitätsdatenrecherche im allgemeinen Fall nicht mehr oder nur noch in eingeschränkter Form in Frage kommt.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit dargestellten Überlegungen haben das Ziel, bekannte und in konventionellen Erkennungssystemen mit Erfolg eingesetzte Verfahren an die Anforderungen der Qualitätsdatenrecherche anzupassen und so miteinander zu kombinieren, dass die Funktionsweise der Qualitätsdatenrecherche an einer konkreten Aufgabenstellung demonstriert werden kann. Aufgrund des begrenzten Umfangs der Arbeit wird der Schwerpunkt auf ein funktionierendes Gesamtsystem gelegt. Die Auswahl der in diesem Zusammenhang verwendeten Algorithmen und Verfahren erfolgt dabei in vielen Fällen auf der Basis von Erfahrungen aus der praktischen Anwendung der Verfahren und entspricht daher nicht in allen Fällen dem streng wissenschaftlichen Vergleich mit anschließender Bewertung der Verfahren.

Bei vielen in der industriellen Praxis durchgeführten Prüfungen sind die auszuwertenden Daten von einer Variable abhängig, die häufig dem Ort oder der Zeit entspricht. Daten dieser Art, die auch die Grundlage für die im weiteren Verlauf dieser Arbeit dargestellten Überlegungen bilden, werden vielfach auch als *Zeitreihe* bezeichnet. Da der Zusammenhang zwischen der zu bewertenden Objekteigenschaft und den zur Verfügung stehenden Daten in vielen Fällen nicht trivial ist, werden *Analyseverfahren* benötigt, welche die zur Bewertung erforderlichen Informationen aus den Daten extrahieren. Aufgrund der Vielfalt der denkbaren Fragestellungen ist es günstig, dabei möglichst viele Betrachtungsweisen der Daten (z. B. Darstellung im Orts- bzw. Zeit- und im Frequenzbereich) berücksichtigen zu können.

Das Ziel einer Prüfung ist stets das Finden einer Entscheidung über die weitere Verwendbarkeit des Prüfobjektes. Dabei gibt es in der Regel eine endliche Zahl von Möglichkeiten (z. B. Gutteil, Nacharbeit, Ausschuss), die durch mehrere *Klassen* repräsentiert werden und alle Prüfobjekte zusammenfassen, die in gleicher Art und Weise weiterverwendet werden können. Beim Treffen der Verwendungsentscheidung werden nun die im Rahmen der Analyse ermittelten, die verschiedenen Aspekte des Prüfobjektes abdeckenden Merkmale zu einem *Merkmalsvektor* zusammengefasst und mit Hilfe eines *Klassifikators* einer der Klassen zugeordnet.

Die beiden hier beschriebenen Stufen der Entscheidungsfindung können im Allgemeinen nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. So kann die Zuordnung eines Prüfobjektes zu einer der Klassen nur dann zuverlässig erfolgen, wenn die in der Analyse ermittelten Merkmale die *Separierbarkeit* der „richtigen“ von allen anderen Klassen gewährleisten.

Um die Qualitätsdatenrecherche auch unter praktischen Bedingungen nutzen zu können, müssen die teilweise recht komplexen Verfahren und Zusammenhänge auch ohne tieferes Verständnis der zugrunde liegenden Mathematik angewandt werden können. Dies erfordert, dass die Adaption an die jeweilige Aufgabenstellung durch geeignete Maßnahmen unterstützt oder soweit möglich automatisiert wird. Im Zusammenhang mit der geschilderten Suche nach durch Beispiele beschriebenen Mustern kann diese Adaption durch eine *Optimierung* der Analysefunktionen und des Klassifikators auf der Basis der zur Verfügung stehenden Muster betrachtet werden. Als Kriterium für die Optimierung wird dabei die Separierbarkeit der zu unterscheidenden Klassen durch die mit den Analysefunktionen ermittelten Merkmalsvektoren herangezogen. Unter der Annahme, dass es gelingt, diese Optimierung automatisch durchzuführen, wird die Einsatzfähigkeit des Verfahrens unter praktischen Bedingungen dann nur noch durch die Leistungsfähigkeit der zur Verfügung stehenden Analysefunktionen bestimmt.

Die im Folgenden beschriebenen und im Rahmen dieser Arbeit zur Durchführung der Auswertungen eingesetzten Verfahren stellen dabei wie bereits erwähnt nur eine Möglichkeit zum Aufbau eines Qualitätsdatenrecherchesystems für den praktischen Einsatz dar. Durch den Austausch einzelner Bausteine des Systems kann das Verfahren der Qualitätsdatenrecherche jedoch auch auf andere Aufgabenstellungen übertragen werden. So bietet es sich beispielsweise zur Auswertung von Bilddaten an, die hier verwendeten Verfahren zur Generierung von Merkmalen durch entsprechende Algorithmen zur Analyse von Bilddaten zu ersetzen. Entsprechendes gilt für die eingesetzten Klassifikationsverfahren. Je nachdem, welche Vorkenntnisse über die zu unterscheidenden Klassen zur Verfügung stehen, können die hier verwendeten Normalverteilungsklassifikatoren durch andere, den jeweiligen Anforderungen besser entsprechende Klassifikatoren ausgetauscht werden.

Mit den nachfolgenden Ausführungen sollen somit zwei Ziele erreicht werden: Einerseits soll das Verfahren der Qualitätsdatenrecherche in das Umfeld eines bestehenden rechnergestützten Qualitätssicherungssystems eingebunden werden. Andererseits soll unter Berücksichtigung der genannten Einschränkungen gezeigt werden, wie die zu suchenden Muster mit Hilfe von Beispielen festgelegt und als Basis für die weitgehend automatisch erfolgende Adaption eines Erkennungssystems an eine spezifische Aufgabenstellung verwendet werden können.

Kapitel 4

Wissenschaftliche Grundlagen

Wie in Abschnitt 3.4.2 beschrieben spielen mathematische und informationstechnische Verfahren für die praktische Anwendung der Qualitätsdatenrecherche eine wichtige Rolle. Bevor mit der Beschreibung eines solchen Systems in Kapitel 5 begonnen wird, sollen hier zunächst die wichtigsten, zum Verständnis der Funktionsweise erforderlichen mathematischen und informationstechnischen Grundlagen dargestellt werden.

Für die Durchführung der Qualitätsdatenrecherche ist es notwendig, Aussagen mit einem Bezug zu dem Bereich der jeweiligen Anwendung aus den zur Verfügung stehenden Qualitätsdaten zu gewinnen. Die einzusetzenden mathematischen Verfahren müssen daher in der Lage sein, die unter einem bestimmten Gesichtspunkt interessierenden Informationen möglichst exakt aus den verfügbaren Daten zu *extrahieren*. Im Gegensatz zur *Signalübertragung*, bei der es darauf ankommt, ein Signal möglichst verlustfrei zu übertragen, steht bei der im Folgenden betrachteten *Signalanalyse* die Reduktion der Information auf das unter dem betrachteten Gesichtspunkt Wesentliche im Mittelpunkt des Interesses.

Um diese Verfahren unter den in der Praxis anzutreffenden Bedingungen einsetzen zu können, müssen hohe Anforderungen von der Adaption der Verfahren an die verschiedenen Aufgabenstellungen erfüllt werden. Dies bedeutet in der Praxis, dass die Anpassung an die jeweilige Aufgabenstellung weitgehend automatisch erfolgen muss, so dass die Qualitätsdatenrecherche auch von einem durchschnittlich gebildeten Bediener ohne tiefere mathematische Kenntnisse angewandt werden kann.

Nachdem die Grundlagen der Erfassung und Auswertung von Prüfdaten bereits in Abschnitt 2.2.4 dargelegt wurden, sollen im Folgenden die mathematischen Grundlagen der Verfahren beschrieben werden, mit denen eine weitgehend automatische Adaption an typische, in der praktischen Anwendung zu erwartende Signalformen erreicht werden kann. Dies umfasst

- *Analyseverfahren* zur Extraktion von Merkmalen aus den zur Verfügung stehenden Signalen,
- *Klassifikationsverfahren*, um die aus den Signalen extrahierten Merkmale einer die weitere Verwendung des zugehörigen Prüflings festlegenden Klasse zuzuordnen,
- *Optimierungsverfahren*, um die für die Analyse und Klassifikation bestehenden Parameter im Hinblick auf eine möglichst große Erkennungssicherheit an die jeweilige Aufgabenstellung anzupassen.

Als Kriterium für die Optimierung der Analyse und Klassifikation wird darüber hinaus ein Verfahren zur Beurteilung der Klassifikationsgüte erläutert.

Die weitere Beschreibung der Verfahren zur Analyse der zur Verfügung stehenden Daten erfolgt am Beispiel so genannter *Zeitreihen*. Als *Zeitreihen* werden Signale mit einer unabhängigen Veränderlichen bezeichnet, die meist der Zeit oder einer durch *eine* Dimension beschreibbaren Ortsinformation entspricht. Durch diese Gruppe von Signalen wird ein großer Teil der in praktischen Aufgabenstellungen relevanten Daten abgedeckt. Bei Bedarf lässt sich die hier für *Zeitreihen* dargestellte Vorgehensweise jederzeit auf Signale mit zwei oder mehr unabhängigen Veränderlichen übertragen.

Von der nahezu unüberschaubaren Menge von Verfahren zur Extraktion von Merkmalen aus Signalen sollen im Folgenden vor allem *Wavelets* näher betrachtet werden. Wie in zahlreichen Veröffentlichungen [5, 98, 84, 59, 99, 97] nachgelesen werden kann, haben sich *Wavelets* zur Generierung von Merkmalen bereits in vielen Fällen als äußerst leistungsfähig und robust bewährt. Dies gilt in besonderem Maße, wenn zeitlich oder örtlich beschränkte Veränderungen des Signalverlaufes ausgewertet werden sollen. Die für die hier betrachtete Anwendung geforderte Adaptivität soll zunächst durch die Auswahl geeigneter *Wavelets* erfolgen. Zusätzlich sollen aus der Menge der mit den verwendeten Verfahren berechenbaren Merkmale genau die Merkmale ausgewählt werden, die eine möglichst sichere Erkennung der gewünschten Signalform gewährleisten. Für diese Adaption sollen *genetische Algorithmen* eingesetzt werden, da bei der Anwendung dieser Optimierungsverfahren weitgehend auf eine analytische Beschreibung des zu optimierenden Systems verzichtet werden kann. An dieser Stelle soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass die im Folgenden beschriebenen Verfahren eine für die Demonstration der Qualitätsdatenrecherche im vorliegenden Fall geeignete Auswahl darstellen und dass abhängig von der jeweiligen Anwendung auch andere Analyse-, Klassifikations- und Optimierungsverfahren eingesetzt werden können.

4.1 Funktionsweise eines Erkennungssystems

Nach [14] kann ein Erkennungssystem durch eine Funktion $G \rightarrow M \rightarrow E$ beschrieben werden, die einen durch gemessene physikalische Größen aufgespannten Raum G über den Merkmalsraum M in einen Entscheidungsraum E abbildet. Das Funktionsschema eines solchen Erkennungssystems ist in Bild 4.1 dargestellt.

Das Eingangssignal $x \in G$ wird mit Hilfe einer Analysefunktion $f : G \rightarrow M$ in einen Merkmalsvektor \vec{Y} überführt. Der zugehörige Merkmalsraum M kann ausgewählte messbare Größen aus G sowie zusätzliche, aus den gemessenen Größen berechnete Komponenten enthalten. Der Entscheidungsraum E wiederum wird durch die Klassen e_1, e_2, \dots, e_K gebildet, die den durch die Merkmalsvektoren \vec{Y} aus M repräsentierten Objekten durch eine Entscheidungsfunktion $e : M \rightarrow E$ zugeordnet werden. Grundlage für die Zuordnung eines Merkmalsvektors \vec{Y} zu einer Klasse e_k ist die *Unterscheidungsfunktion* d_k . Mit Hilfe der Unterscheidungsfunktion kann die Tatsache, dass ein gegebener Merkmalsvektor \vec{Y} besser zur Klasse k als zur Klasse l passt, durch die Relation $d_k(\vec{Y}) > d_l(\vec{Y})$ beschrieben werden. Damit ergibt sich die *Entscheidungsregel*

$$e = \arg \underset{k=1, \dots, K}{\text{ext}} d_k(\vec{Y}) \quad (4.1)$$

des Erkennungssystems, die aussagt, dass eine durch den Merkmalsvektor \vec{Y} beschriebene Beobachtung der Klasse zugeordnet wird, für welche die Unterscheidungsfunktion einen Extremwert annimmt.

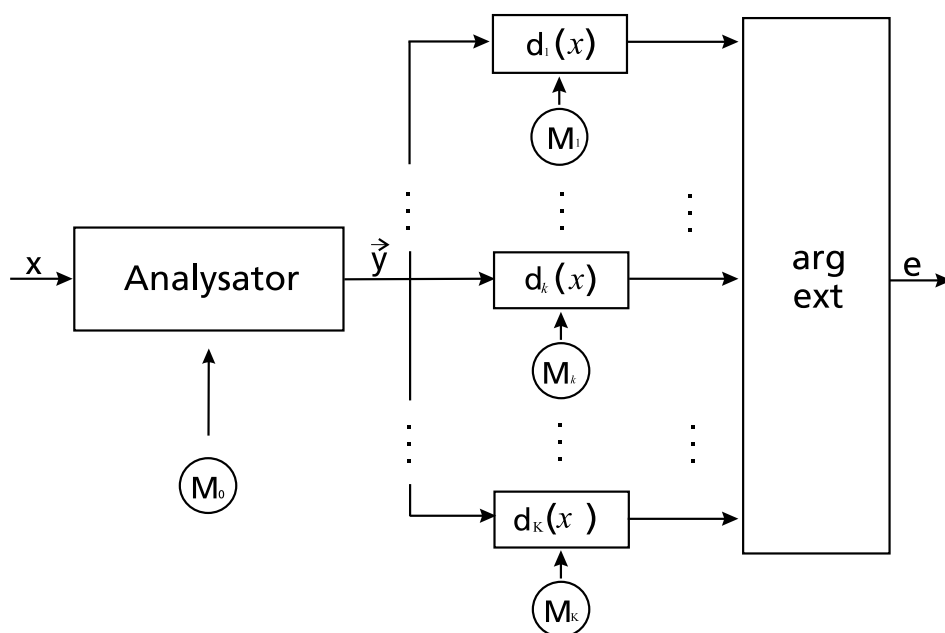


Abbildung 4.1: Funktionsschema eines Erkennungssystems nach [41]. Das Eingangssignal \vec{x} wird durch den Analysator in einen Merkmalsvektor \vec{y} umgewandelt, der mit Hilfe der Unterscheidungsfunktionen d_k einer Klasse e zugeordnet wird.

Dabei wird durch den Argumentoperator vor dem Extremaloperator ausgedrückt, dass nicht der Extremwert selbst interessiert, sondern der zugehörige Index k .

Bei Erkennungssystemen für Aufgabenstellungen aus der Praxis gibt es in der Regel eine nicht unerhebliche Anzahl von messbaren Größen und demzufolge eine noch viel größere Zahl von daraus abgeleiteten Merkmalen. Es ist daher häufig zu beobachten, dass ein großer Teil der in \vec{Y} enthaltenen Merkmale redundant oder zur Beschreibung der zu unterscheidenden Klassen ungeeignet ist. Es ist somit ausreichend, einen Teil der in \vec{Y} enthaltenen Merkmale auszuwählen und als reduzierten Merkmalsvektor \vec{y} zur Klassifikation zu verwenden. Diese Vorgehensweise findet sich auch in Abschnitt 5.3.4 bei der automatischen Adaption des Erkennungssystems an eine bestimmte Aufgabenstellung wieder.

Die in Bild 4.1 mit den Symbolen M_i eingezeichneten Elemente enthalten das Wissen über die vom System zu erkennenden Klassen, stellen also die *Modellinformation* dar. Dieses liegt je nach Anwendungsfall in analytischer Form oder als Lernstichprobe in Form von bewerteten Datensätzen vor. Um die für praktische Anwendungen geforderte einfache Bedienbarkeit des Systems zu gewährleisten, soll hier ausschließlich die letztgenannte Form weiter betrachtet werden.

4.2 Generierung von Merkmalen

Durch das Generieren von Merkmalen sollen unter dem jeweils betrachteten Gesichtspunkt charakteristische Eigenschaften aus den auszuwertenden Daten extrahiert werden. Dies wird unter anderem dadurch erleichtert, dass die Signale in verschiedenen Darstellungsformen, beispielsweise im Zeit- und im Frequenzbereich, betrachtet werden. Beim Übergang von einer Darstellungsform in eine andere gehen dabei prinzipiell keine Informationen verloren, es werden aber je nach Darstellungsform andere Signaleigenschaften hervorgehoben, was die Interpretation der Signale erleichtert.

4.2.1 Einteilung von Signalen

Bei der praktischen Verarbeitung und Interpretation von Signalen müssen verschiedene Signaltypen unterschieden werden, die in erster Linie durch die Erfassung der Signale bestimmt werden. Der jeweils vorliegende Signaltyp bestimmt, wie die verschiedenen Operationen auf die Signale ausgeführt werden müssen und ob ggf. im Signaltyp enthaltene Einschränkungen hinsichtlich des Informationsgehaltes beachtet werden müssen.

Bezeichnet x ein Signal mit dem Definitionsbereich T , der im hier betrachteten Fall der Zeit entspricht, und X den Wertebereich, d. h. die Menge aller möglichen Funktions- oder Signalwerte, so kann ein Signal allgemein durch die Funktion

$$x : T \rightarrow X$$

beschrieben werden. Mit \mathbb{R} als Menge der reellen und \mathbb{Z} als Menge der ganzen Zahlen können nach [41, 40] folgende in Bild 4.2 dargestellte Grundkombinationen unterschieden werden:

- $T \subseteq \mathbb{R}, X \subseteq \mathbb{R}$: Signale, die sowohl hinsichtlich ihres Amplituden- wie auch ihres Zeitverhaltens kontinuierlicher Natur sind, werden als *analoge* Signale oder auch als *wert- und zeitkontinuierliche* Signale bezeichnet.
- $T \subseteq \mathbb{R}, X \subseteq \mathbb{Z}$: Zu diesem Signaltyp gelangt man, wenn ein analoges Signal amplitudenquantisiert wird. Da der Signalwert zwar über die Zeit kontinuierlich gemessen werden kann, dabei aber nur diskrete Werte annimmt, bezeichnet man Signale dieses Typs auch als *wertdiskrete und zeitkontinuierliche* Signale. Zu beobachten ist dieser Typ von Signalen vor allem als Ausgangssignal von Digitalschaltungen.
- $T \subseteq \mathbb{Z}, X \subseteq \mathbb{R}$: Im Gegensatz zum zuvor genannten Fall entsteht ein *wertkontinuierliches und zeitdiskretes* Signal durch ein System, das eine zeitlich kontinuierlich verlaufende Signalfunktion zu diskreten Zeitpunkten abtastet. Die Signalwerte können dabei theoretisch jeden Wert aus \mathbb{R} annehmen, werden jedoch nur zu bestimmten Zeitpunkten erfasst.
- $T \subseteq \mathbb{Z}, X \subseteq \mathbb{Z}$: Wird ein analoges Signal sowohl zeitlich abgetastet wie auch amplitudenquantisiert, so entsteht ein *wert- und zeitdiskretes* Signal. Aufgrund der starken Verbreitung der digitalen Messtechnik ist dieser Signaltyp heute mit Abstand am weitesten verbreitet und wird häufig als *Digital signal* bezeichnet.

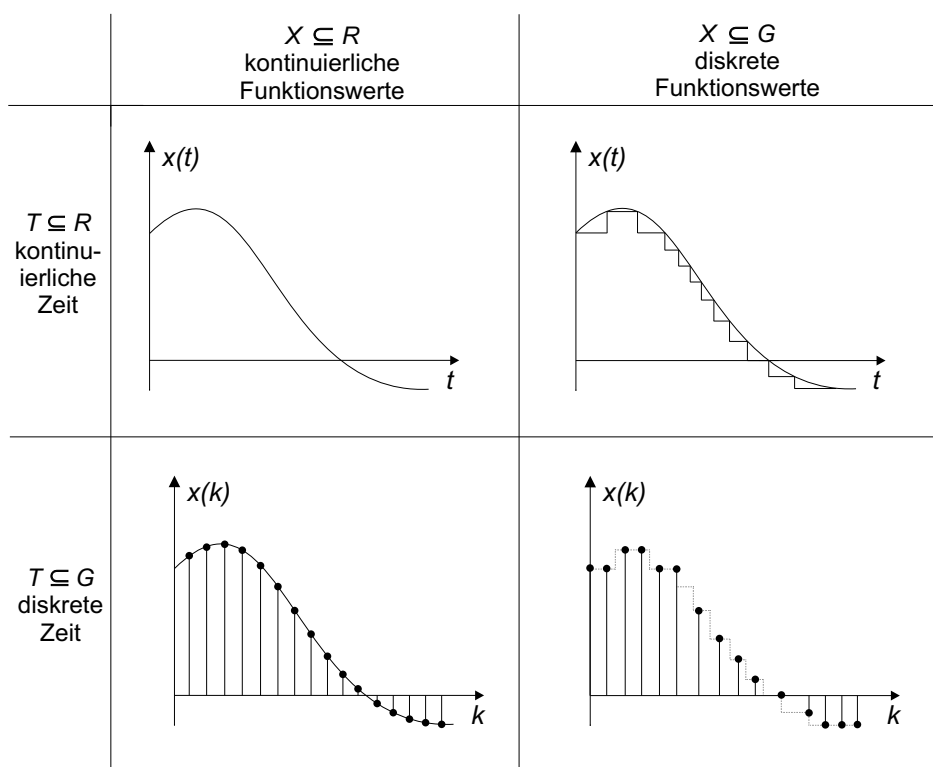


Abbildung 4.2: Einteilung von Signalen unter dem Aspekt der Kontinuität des Wertebereiches und der Abtastung.

4.2.2 Verarbeitung mit Auswertefenstern

Signale können unabhängig von der zuvor getroffenen Einteilung hinsichtlich der Kontinuität über einen beliebigen Definitionsbereich definiert sein. Bei der weiteren Verarbeitung der Signale kann es jedoch durchaus sinnvoll sein, nur Teile des Definitionsbereiches zu betrachten, um beispielsweise eine räumliche oder zeitliche Zuordnung der aus der Auswertung gewonnenen Erkenntnisse zu ermöglichen. Dies erfolgt in der Praxis häufig mit Hilfe von so genannten *Auswertefenstern*, die einen Teil des Signalverlaufes aus dem Gesamtsignal „ausschneiden“.

Der Vorgang des Ausschneidens eines Fensters aus dem Signalverlauf entspricht mathematisch der Multiplikation der Originalfunktion x mit einer Rechteckfunktion, die nur für die Dauer des so genannten Analysezeitfensters den Wert 1 annimmt. Sie wird auch als *Fensterfunktion* h bezeichnet. Damit kann der Verlauf des Signals innerhalb des Auswertefensters durch

$$x_F(t, t_k) = x(t) \cdot h_F(t, t_k) \quad (4.2)$$

mit

$$h_F(t, t_k) = \begin{cases} 1 & \text{für } t_k - \frac{l_F}{2} \leq t \leq t_k + \frac{l_F}{2} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.3)$$

beschrieben werden. Dabei bezeichnet l_F die Länge und t_k die Mitte des Auswertefensters. Verschiebt man das Auswertefenster wie in Bild 4.3 gezeigt mit der Schrittweite s_F über das zu analysierende Signal, so können die ermittelten Merkmale den zugehörigen Bereichen des Ausgangssignals zugeordnet werden, womit eine Aussage über den *Fehlerort* gemacht werden kann. Für den betrachteten Bereich erhält man mit der in Kapitel 4.1 eingeführten Analysefunktion f den Merkmalsvektor \vec{Y} aus

$$\vec{Y}(t_k) = \vec{f}(x_F(t, t_k)). \quad (4.4)$$

Die Verwendung des Merkmalsvektors \vec{Y} drückt aus, dass die Analysefunktion f im allgemeinen Fall mehrere Merkmale aus einem Signalabschnitt ermittelt. Die Position t_k des Auswertefensters wird durch die Folge

$$t_k = \left(k - \frac{1}{2}\right) \cdot s_F \quad \text{mit} \quad 1 \leq k \leq \frac{l_F}{s_F} \quad (4.5)$$

festgelegt. Für die Schrittweite $s_F = l_F$ wird in (4.4) das vollständige Signal für die Berechnung der Merkmalsvektoren berücksichtigt, $s_F \leq l_F$ liefert sich überdeckende Auswertefenster, womit eine höhere Ortsauflösung der berechneten Merkmale erreicht werden kann. $s_F > l_F$ lässt dagegen Lücken zwischen den Auswertefenstern und hat daher für die hier betrachtete Anwendung keine Bedeutung.

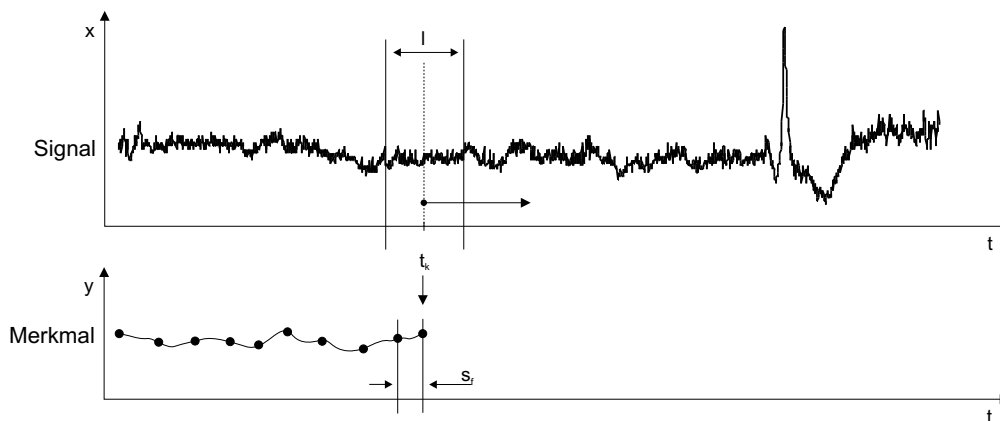


Abbildung 4.3: Verschiebung eines Auswertefensters über das zu analysierende Signal.

Um den Merkmalsvektor \vec{Y} auch für $0 < t < \frac{l_F}{2}$ und $t_{max} - \frac{l_F}{2} < t < t_{max}$ angeben zu können, muss das Signal in geeigneter Form fortgesetzt werden. Dies kann, wie allgemein bekannt, beispielsweise durch eine am Beginn bzw. Ende des Signals gespiegelte Fortsetzung erfolgen.

4.2.3 Beschreibung von Signalen im Zeitbereich

Die Darstellung von Signalen im Zeitbereich entspricht der natürlichen Betrachtungsweise von Signalen. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass Signale in der Regel als Funktion der Zeit beobachtet und erfasst werden. Beispiele für Operationen auf Zeitfunktionen sind

- die Multiplikation oder Addition von Signalen mit Konstanten oder einem anderen Signal,
- die Verschiebung eines Signals auf der Zeitachse (Translation),
- die Differentiation und Integration eines Signals.

Auf eine weitere Vertiefung dieser allgemeinen, in der systemtheoretischen Grundlagenliteratur [111, 110] ausführlich beschriebenen Zusammenhänge soll hier verzichtet werden. Stattdessen soll hier lediglich auf eine weitere, in Verbindung mit den zur Merkmalsgenerierung eingesetzten Verfahren wichtige Operation, die *Faltung*, eingegangen werden. Diese spielt unter anderem beim Verständnis der schnellen Wavelet-Transformation eine bedeutende Rolle.

Eine der wichtigsten Anwendungen der Faltung ist in der Beschreibung des Verhaltens linearer, zeitinvarianter Systeme zu sehen. Um die wichtigsten Eigenschaften dieser Art von Systemen darzustellen, soll zunächst ein beliebiges Eingangssignal $x(t)$ gemäß

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)\delta(t - \tau)d\tau \quad (4.6)$$

als *Linearkombination* von Einheitsimpulsen δ aufgefasst werden. Dies entspricht anschaulich einer Überlagerung von auf der Zeitachse verschobenen und mit einer Gewichtsfunktion $x(\tau)$ multiplizierten Einheitsimpulsen. Wie in einschlägigen Lehrbüchern (z. B. [68]) detailliert beschrieben ergibt sich die Antwort eines linearen zeitinvarianten Systems als

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)g(t - \tau)d\tau, \quad (4.7)$$

d. h. als *dieselbe* Linearkombination der Gewichtsfunktion $x(\tau)$ mit einer Funktion g , wobei g die Antwort des betrachteten Systems auf den Einheitsimpuls δ bezeichnet.

Die durch (4.7) definierte Verknüpfung wird als *Faltung* bezeichnet und kann allgemein durch den Operator $*$ ausgedrückt werden.

$$y(t) = (x * g)(t) \quad (4.8)$$

Analog zu dem in (4.7) definierten Faltungsintegral kann für nicht kontinuierliche Signale die diskrete Faltung durch den Übergang von der Integration zur Summation definiert werden.

$$(x_1 * x_2)(n\Delta t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_1(k\Delta t)x_2((n - k)\Delta t) \quad (4.9)$$

4.2.4 Beschreibung von Signalen im Frequenzbereich

Die Darstellung von Funktionen im Frequenzbereich geht auf die in der 1822 von dem französischen Physiker und Mathematiker JEAN BAPTISTE JOSEPH DE FOURIER veröffentlichten Schrift „Analytische Theorie der Wärme“ gemachte Feststellung zurück, dass sich jede periodische Funktion als Summe von Kosinus- und Sinustermen schreiben lässt [44]. Die durch die ursprüngliche Funktion beschriebene Kurve und die Sinus- und Kosinussumme sind dabei lediglich unterschiedliche Darstellungen desselben Sachverhaltes, d. h. beim Übergang von der Darstellung im Zeitbereich zur Summendarstellung im Frequenzbereich geht keinerlei Information verloren.

Für periodische Funktionen kann eine Funktion x demnach als Summe

$$x(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n) \quad (4.10)$$

geschrieben werden, wobei die Beziehungen zur Berechnung der Koeffizienten c_n sowie des Phasenwinkels φ_n in den einschlägigen Fachbüchern, z. B. [41, 83] nachgelesen werden können. Überträgt man diese Überlegungen auf nicht periodische Signale, so erhält man analog zu (4.10)

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \underline{X}(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (4.11)$$

mit dem Fourier-Integral

$$\underline{X}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (4.12)$$

das die Transformation einer nicht periodischen, betragsintegrierbaren Funktion x vom Zeitbereich in den Frequenzbereich ermöglicht.

Die Fouriertransformation erlaubt damit eine Aussage darüber, welchen Anteil die verschiedenen Frequenzen an dem betrachteten Signal $x(t)$ haben. Die Informationen über die zeitliche Abfolge bzw. die Verschiebung der einzelnen Frequenzanteile zueinander sind zwar in der Phaseninformation enthalten, jedoch über den gesamten der Transformation zugrunde liegenden Bereich verteilt.

In der praktischen Anwendung ist die Fourier-Transformation somit vor allem für periodische Signale mit bekannter Periodizität sowie für kontinuierliche oder zeitdiskrete Signale, die vollständig, d. h. zu jedem Zeitpunkt bekannt sind, geeignet. In anderen Fällen, in denen sich beispielsweise der Frequenzgehalt des zu analysierenden Signals mit der Zeit ändert oder in denen Signale aus technischen Gründen nur für einen Teil des gesamten Zeitraumes zur Verfügung stehen, wird die Interpretation der Ergebnisse zunehmend schwieriger. Einen Ausweg aus dieser Situation bietet die *gefensterte Fourier-Transformation*, bei der an Stelle des ursprünglichen Signals $x(t)$ das mit einer Fensterfunktion $w(t)$ multiplizierte Signal

$$\tilde{x}(t) = x(t) \cdot w(t) \quad (4.13)$$

analysiert wird. In [49, 41] findet sich eine Reihe von Möglichkeiten, mit denen durch geeignete Wahl von w die Störeffekte an Grenzen des Fensters reduziert werden können, darunter auch die in der Praxis

weit verbreiteten Kosinusfenster nach HAMMING und VON HANN. Trotz allem muss bei allen Verfahren mit einer festen Fenstergröße wie in [100] anschaulich dargestellt stets ein Kompromiss zwischen der Zeit- bzw. Ortsauflösung und der Frequenzauflösung eingegangen werden. Eine Verbesserung kann hier durch die im Folgenden beschriebene Klasse von Transformationen, die *Wavelet*-Transformation erzielt werden.

4.2.5 Wavelet-Transformation

Die Idee der Wavelet-Analyse beruht in erster Linie darauf, als Basisfunktionen für die Transformation keine Sinus- und Kosinusfunktionen, sondern so genannte *Wavelets* zu verwenden. Wavelets verfügen sowohl über eine definierte *Frequenz* als auch über einen definierten *Zeitpunkt* ihres Erscheinens und eignen sich daher auch für die Anwendungsfälle, in denen mit der Fourier-Analyse, auch in der gefensterter Form, keine optimalen Ergebnisse erzielt werden können. In einer mathematisch korrekten und praxistauglichen Form wurde dieser Ansatz erstmals in den späten siebziger Jahren von J. MORLET vorgeschlagen.

Kontinuierliche Wavelet-Transformation

Aus einem erzeugenden, quadratisch integrierbaren Wavelet ψ („mother wavelet“) werden durch Kombination von zeitlicher Verschiebung (Translation) zum Zeitpunkt t und Streckung bzw. Stauchung/Streckung (Dilatation) um einen Faktor $a \neq 0$ die Basisfunktionen $\psi_{a,t}$ für die Signalanalyse generiert [100].

Die Wahl des Wavelets ist dabei weitgehend frei, solange die Rücktransformation existiert, was nach [11] durch die hinreichende Bedingung

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\underline{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (4.14)$$

beschrieben werden kann. Dabei ist $\underline{\Psi}(\omega)$ die Fourier-Transformierte von ψ . Darüber hinaus muss auch die notwendige Bedingung $\underline{\Psi}(0) = 0$ oder

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(\tau) d\tau = 0 \quad (4.15)$$

erfüllt sein, woraus folgt, dass ψ eine oszillierende Funktion sein muss.

Der Übergang vom erzeugenden Wavelet zu den Basisfunktionen kann nach [41] durch

$$\psi_{a,t}(\tau) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{\tau - t}{a}\right) \quad (4.16)$$

beschrieben werden. Der entscheidende Unterschied zur gefensterter Spektralanalyse ist dabei in der Skalierung um den Faktor a zu sehen. Hat das erzeugende Wavelet die zeitliche Ausdehnung (Zeit-

fensterlänge) T , so hat $\psi_{a,t}$ die zeitliche Ausdehnung $T \cdot a$, wird also wie in Bild 4.4 für $a > 1$ einer Streckung oder für $a < 1$ einer Kontraktion unterworfen.

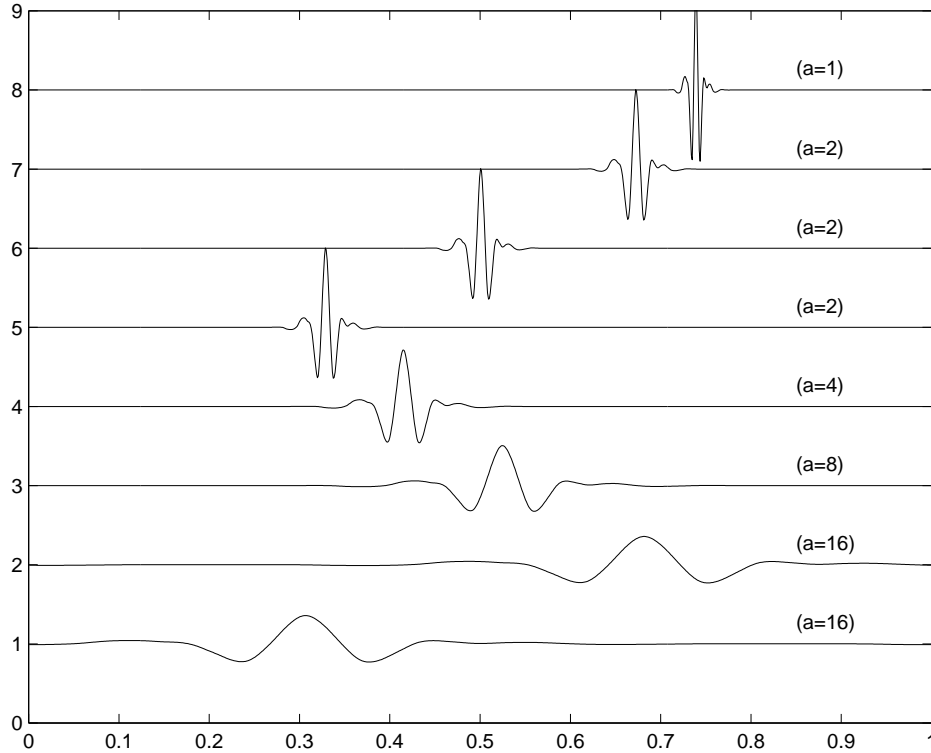


Abbildung 4.4: Translation und Dilatation von Wavelets. Das Symmetlet-8-Wavelet wird durch verschiedene Werte von a gestreckt und entsprechend der Werte für t auf der Zeitachse verschoben.

Mit diesen Voraussetzungen kann die Gleichung für die Wavelet-Transformation einer Funktion $x(t)$ als Skalarprodukt in der Form

$$\underline{X}(a, t) = \langle x, \psi_{a,t} \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \psi^* \left(\frac{\tau - t}{a} \right) d\tau \quad (4.17)$$

geschrieben werden, wobei ψ^* die konjugiert komplexe Funktion von ψ bezeichnet. Die erste bekannt gewordene kontinuierliche Wavelet-Transformation wurde von J. MORLET angegeben. In der von ihm verwendeten Basisfunktion

$$\psi \left(\frac{\tau - t}{a} \right) = \frac{1}{\sqrt{a}} e^{j \frac{2\pi(\tau-t)}{a}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\tau-t}{a} \right)^2} \quad (4.18)$$

entspricht nach [100] der erste komplexe Exponentialanteil dem der Fourier-Transformation, er wird also für die Bestimmung der Frequenz verwendet. Der zweite Exponentialanteil stellt ein zur jeweils betrachteten Frequenz „passendes“ Gauß-Fenster dar, mit dessen Hilfe die Zeit bzw. der Ort des Auftretens ermittelt werden kann.

Die von J. MORLET verwendeten Wavelets bilden keine orthogonale Basis und enthalten damit redundante Informationen. Darüber hinaus ist die Berechnung der Wavelets vergleichsweise rechenintensiv, so dass sie heute in der Praxis kaum noch verwendet werden. Hier werden heute in den meisten Fällen *orthonormale* Wavelets mit *kompaktem Definitionsbereich* in diskretisierter Form eingesetzt.

Diskrete Wavelet-Transformation

Der Übergang von der kontinuierlichen Wavelet-Transformation zu der für die digitale Signalverarbeitung geeigneteren *diskreten Wavelet-Transformation* kann formal dadurch erfolgen, dass das zu transformierende Signal $x(t)$ nur noch zu bestimmten Zeitpunkten $t = n \cdot \Delta t$ betrachtet wird. Auf diese Weise erhält man aus (4.17)

$$\underline{X}(a, n \cdot \Delta t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k\Delta t) \psi^*\left(\frac{(k-n)\Delta t}{a}\right). \quad (4.19)$$

Die Skala $a_0 = 1$ ist dabei durch das Abtastintervall Δt festgelegt, die nächst größeren Auflösungen $a_m = 2^m \Delta t$ mit $m \geq 0, m \in \mathbb{Z}$ entsprechend durch die Skalen $a_m = 2^m$. Die hier für die Basis $B = 2$ durchgeführten Überlegungen können wie in [95] beschrieben auch auf andere Basen $B \geq 2, B \in \mathbb{Z}$ übertragen werden, der Parameter m verliert dann jedoch die anschauliche Bedeutung der *Oktave*. n entspricht in allen Fällen der Position des Wavelets. Damit ergibt sich

$$\underline{X}(m, n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) \psi^*(2^{-m}k - n) = \langle x, \psi_{m,n} \rangle \quad (4.20)$$

als Transformationsvorschrift für die diskrete Wavelet-Transformation, d. h. die Wavelet-Koeffizienten entstehen durch die sukzessive Bildung des Skalarproduktes der zu transformierenden Funktion mit den Aufbaufunktionen

$$\psi_{m,n}(k) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}k - n). \quad (4.21)$$

Bei der Durchführung der Berechnung wird die höchste Ortsauflösung mit dem kleinsten Skalenfaktor a_0 erreicht. Das zugehörige Wavelet verfügt über die geringste Streckung und enthält damit auch die höchsten Frequenzanteile. Mit zunehmendem Skalenfaktor nimmt auch die Streckung des verwendeten Wavelets zu, was eine entsprechende Reduzierung der Frequenzen und damit auch der Ortsauflösung zur Folge hat. Dieser Zusammenhang kann durch die Aufteilung der *Zeit-Frequenz-Ebene* verdeutlicht werden. Wie in Bild 4.5 dargestellt ergibt sich für die Wavelet-Transformation eine *dyadische* Aufteilung der Ebene.

Die Darstellung in der Zeit-Frequenz-Ebene erlaubt auch einen anschaulichen Vergleich der verschiedenen Transformationen. Bild 4.5 zeigt neben der Wavelet-Transformation auch die weitgehend gleichmäßige Aufteilung der Ebene durch die gefensterte Fourier-Transformation und die in Abschnitt 4.2.4 beschriebene Fourier-Transformation, bei der kein direkter Bezug zwischen dem Zeitpunkt des Auftretens eines Ereignisses und dessen Repräsentation in der Transformierten mehr hergestellt werden kann.

Die Zerlegung eines Signals unter Verwendung von xyz-Wavelets als Aufbaufunktionen soll in Bild 4.6 am Beispiel eines an 1024 Stellen abgetasteten Dopplersignals verdeutlicht werden. Mit Hilfe

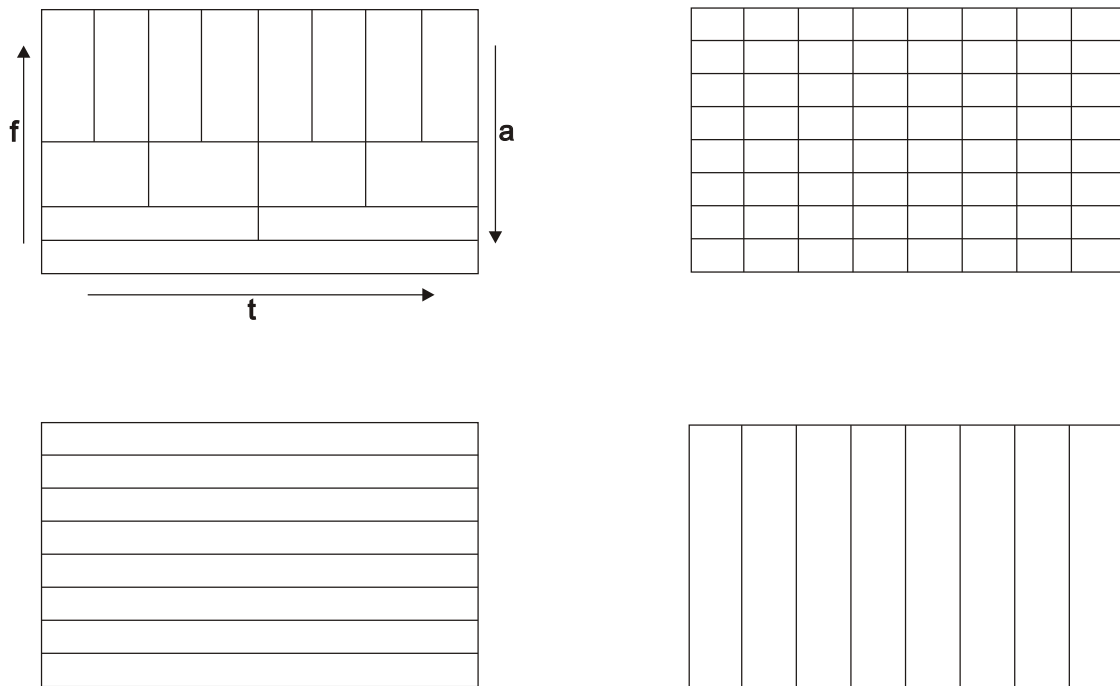


Abbildung 4.5: Darstellung verschiedener Transformationen in der Zeit-Frequenz-Ebene: Wavelets (oben links), gefensterter Fourier-Transformation (oben rechts), „gewöhnliche“ Fourier-Transformation (unten links) und Einheitsimpuls-Zerlegung (unten rechts) nach [100].

von Gleichung (4.20) können zunächst die Wavelet-Koeffizienten $\underline{X}(m, n)$ berechnet werden, die für die verschiedenen Skalen über den Ort dargestellt sind. Über die Rücktransformationsgleichung

$$x(k) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \underline{X}(m, n) \psi_{m,n}(k) \quad (4.22)$$

kann das ursprüngliche Signal wieder durch Addition der Wavelet-Komponenten $\underline{X}(m, n) \psi_{m,n}(k)$ zusammengesetzt werden.

Die schnelle Wavelet-Transformation

Die schnelle Wavelet-Transformation geht auf Verfahren der Multiraten-Signalverarbeitung (MRA = Multi Resolution Analysis) zurück. Sie wurde von STEPHANE MALLAT und YVES MEYER entwickelt und erstmals in [60] veröffentlicht. Verfahren, welche die zu analysierenden Daten bei mehreren Auflösungsstufen betrachten, waren zu diesem Zeitpunkt vor allem im Bereich der Bildverarbeitung verbreitet. Durch die skaleninvariante Interpretation konnten Bilddaten weitgehend unabhängig vom Abstand zwischen Kamera und dem zu untersuchenden Objekt ausgewertet werden.

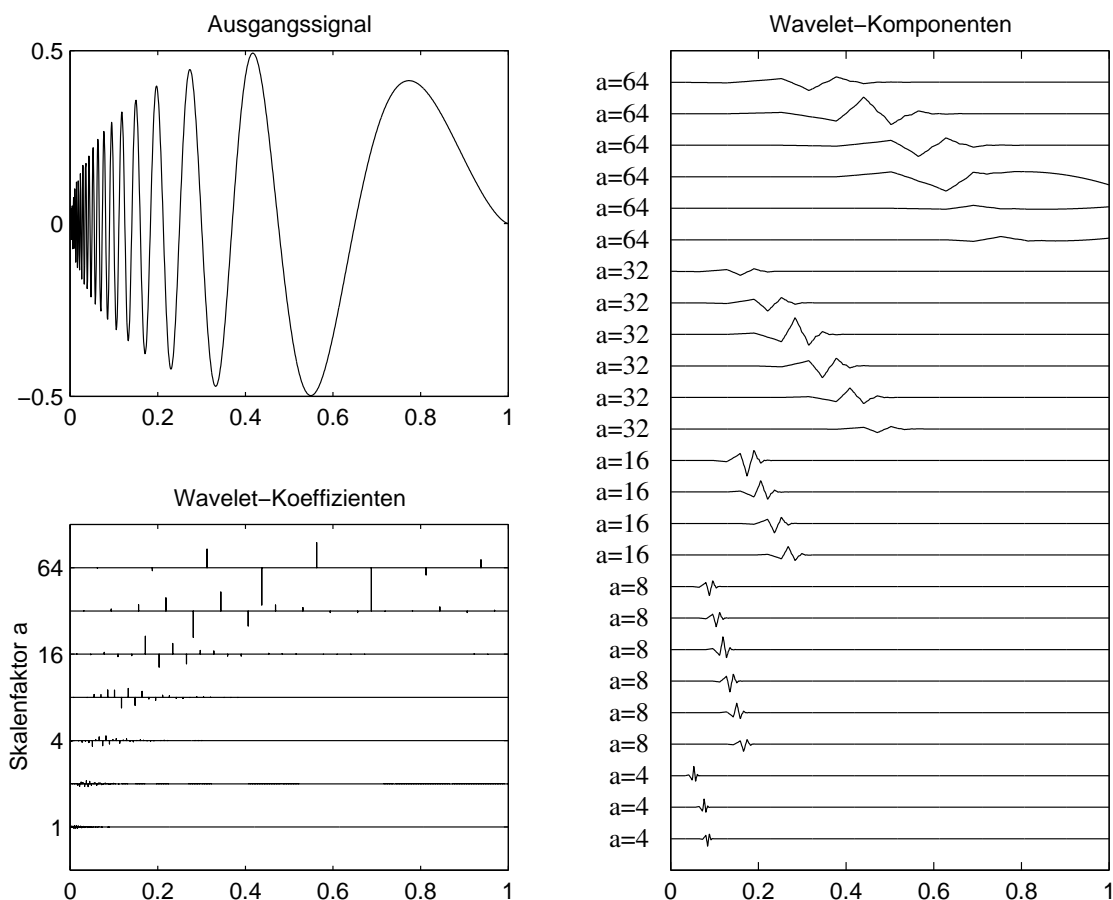


Abbildung 4.6: Wavelet-Transformation eines an 1024 Stellen abgetasteten Dopplersignals (links oben). Aus den dabei erhaltenen Wavelet-Koeffizienten (links unten) und den Basisfunktionen $\psi_{m,n}$ lassen sich die Wavelet-Komponenten (rechts) berechnen, die addiert wieder das Ausgangssignal ergeben.

Das Verfahren der schnellen Wavelet-Analyse beruht darauf, dass man das zu zerlegende Signal wie in Bild 4.7 dargestellt mehrfach nacheinander in zwei Anteile zerlegt: den groben Verlauf und die Details.

Die Extraktion der Details sowie des groben Verlaufes aus dem Eingangssignal der jeweiligen Stufe erfolgt mit Hilfe von *Quadraturfiltern*, d. h. mit Filtern, die zunächst eine Faltung und dann eine Dezimation der Auflösung durchführen. Für eine detaillierte Definition dieser Filter und ihrer grundlegenden Eigenschaften sei auf [109] verwiesen.

Im Zusammenhang mit der Mehrfachauflösung spielt die *Skalierungsfunktion* φ eine wichtige Rolle. Sie modifiziert das Eingangssignal bei mehrfacher Anwendung so, dass sich die Auflösung von Stufe zu Stufe um den Faktor zwei ändert. In einer Richtung betrachtet approximieren die in aufeinander folgenden Stufen berechneten Signale das Ausgangssignal mit immer höherer Genauigkeit, werden ihm also immer ähnlicher. In der anderen Richtung enthalten sie immer weniger Informationen, bis

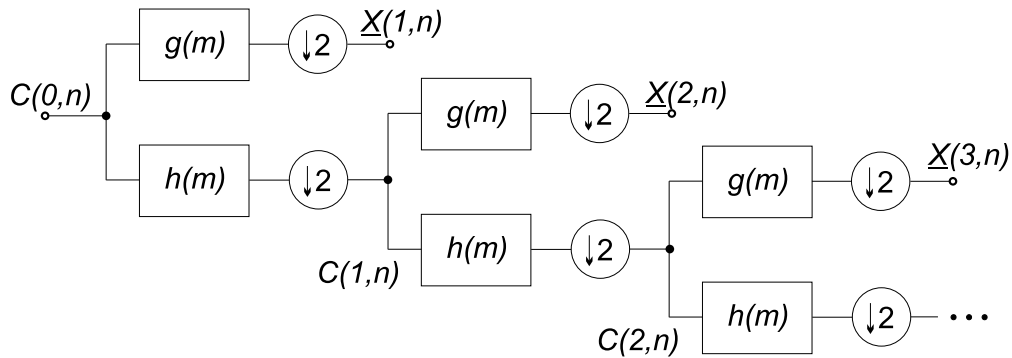


Abbildung 4.7: Funktionsweise der schnellen Wavelet-Analyse nach [41]. Das Ausgangssignal $C(0, n)$ wird auf jeder Stufe einer Hoch- und einer Tiefpassfilterung unterworfen. Nach der Hochpassfilterung mit $g(m)$ und der Halbierung der Abtastrate (dargestellt durch $\downarrow 2$) erhält man nach der ersten Stufe die Wavelet-Koeffizienten $\underline{X}(1, n)$. Das nach der Tiefpassfilterung mit $h(m)$ ebenfalls in der Abtastrate reduzierte Signal $C(1, n)$ stellt das Eingangssignal der zweiten Stufe dar und wird dort wieder in ein „Detailsignal“ $\underline{X}(2, n)$ und ein „Restsignal“ mit geringerer Auflösung zerlegt.

der Informationsgehalt schließlich ganz gegen null geht. Bei dieser Betrachtungsweise kodieren die Wavelets die Differenz zwischen zwei Auflösungsstufen. Sie enthalten also genau die Details, die man zu dem Signal einer bestimmten Auflösungsstufe hinzunehmen muss, um das Signal der doppelten Auflösung zu erhalten [44].

Die Berechnung der Koeffizienten $\underline{C}(p, n) = \langle x, \varphi_{p,n} \rangle$ für $n > 0$ und der Wavelet-Koeffizienten $\underline{X}(p, n)$ kann mit g als Hoch- und h als Tiefpassfilter unter Verwendung der so genannten Zwei-Skalen-Relation

$$\begin{aligned}\varphi_{p+1}(\tau) &= \sqrt{2} \sum_n h(n) \varphi_p(2\tau - n) \\ \psi_{p+1}(\tau) &= \sqrt{2} \sum_n g(n) \varphi_p(2\tau - n)\end{aligned}\tag{4.23}$$

mit den Rekursionsgleichungen

$$\begin{aligned}\underline{C}(p, n) &= \sum_m h(m - 2n) \underline{C}(p - 1, m), \\ \underline{X}(p, n) &= \sum_m g(m - 2n) \underline{C}(p - 1, m).\end{aligned}\tag{4.24}$$

erfolgen. Die Anwendung der Rekursionsgleichungen (4.24) auf das Ausgangssignal $x(\tau)$ führt zu der in Bild 4.8 dargestellten dyadischen Aufteilung in die Grob- und Detailanteile. Dabei bleibt die Anzahl der zur Beschreibung des Signals erforderlichen Datenpunkte bzw. Koeffizienten konstant.

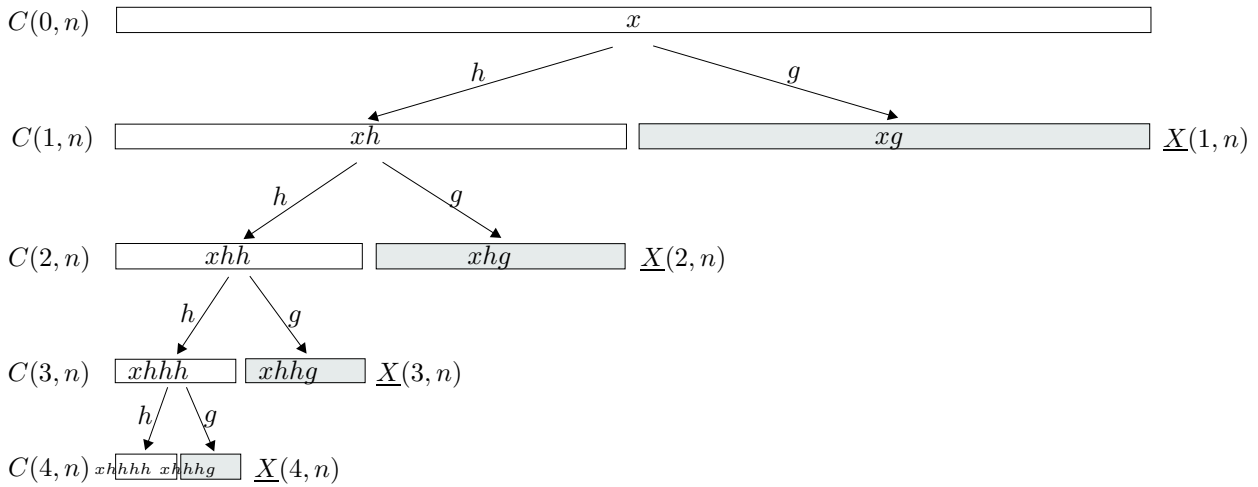


Abbildung 4.8: Dyadische Zerlegung des zu transformierenden Signals durch wiederholte Anwendung von h auf die tiefpassgefilterten Signalteile $\underline{C}(m, n)$. Die Wavelet-Koeffizienten $\underline{X}(m, n)$ entstehen durch die Anwendung des Hochpassfilters g auf das Restsignal der nächsthöheren Stufe. Das Ausgangssignal $x(\tau)$ kann aus dem Restsignal der niedrigsten Auflösungsstufe und den Wavelet-Koeffizienten aller Auflösungsstufen vollständig rekonstruiert werden.

Geht man von einem Signal aus, das in Form seiner Wavelet-Komponenten $\underline{X}(m, n)$ vorliegt, lässt sich mit Hilfe von (4.22) das ursprüngliche Signal vollständig rekonstruieren. Da die Aufbaufunktionen mit wachsendem m niederfrequenter, also größer oder weniger detailreich werden, kann mit

$$x_p(\tau) = \sum_{m=p+1}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \underline{X}(m, n) \psi_{m,n}(\tau) \tag{4.25}$$

ein Signal rekonstruiert werden, in dem die Details für $m = 0, \dots, p$ fehlen. Dies kann mit Hilfe der Darstellung von Bild 4.8 durch „Weglassen“ der Wavelet-Koeffizienten $\underline{X}(m, n)$ für alle $m \geq p$ bei der Rekonstruktion von $x(\tau)$ veranschaulicht werden. Die in diesem Fall zur Rekonstruktion des Signals verwendeten Informationen müssen anschaulich betrachtet jedoch auch vollständig im tiefpassgefilterten Restsignal $\underline{C}(p, n)$ enthalten sein, so dass formal

$$x_p(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \underline{C}(p, n) \varphi_{p,n}(\tau) \tag{4.26}$$

mit

$$\varphi_{p,n}(\tau) = 2^{-p/2} \varphi(2^{-p} \tau - n) \tag{4.27}$$

gelten muss. Unter diesen Voraussetzungen kann das „detailreichere“ Signal x_{p-1} als Summe

$$x_{p-1}(\tau) = x_p(\tau) + d_p(\tau) \tag{4.28}$$

aus dem „gröberen“ Signal x_p und einem Detailsignal d_p gebildet werden, wobei d_p aus den Wavelets der Skala 2^p gebildet wird:

$$d_p(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \underline{X}(p, n) \psi_{p,n}(\tau). \quad (4.29)$$

Eine komplette Rekonstruktion des Signals ist demnach durch

$$x(\tau) = x_m(\tau) + \sum_{p \leq m} d_p(\tau), \quad (4.30)$$

d. h. durch das tiefpassgefilterte Restsignal x_m und alle hochpassgefilterten, also mit den Wavelets der verschiedenen Skalen gebildeten Detailsignale d_p gegeben.

Wavelet-Typen

Aufgrund der vergleichsweise schwachen Anforderung hinsichtlich der Erfüllung von (4.15) an die Aufbaufunktionen von Wavelet-Basen gibt es eine ganze Reihe von Funktionsklassen, die grundsätzlich für die Wavelet-Transformation geeignet sind. Im Hinblick auf eine konkrete Aufgabenstellung ist es daher wichtig, die Eigenschaften (z. B. Orthogonalität, Symmetrie, Differenzierbarkeit ...) der verschiedenen Wavelets beurteilen zu können.

Die Eigenschaften der Wavelets stehen in einem engen Zusammenhang mit den verschiedenen Verfahren zur Erzeugung von Wavelets. Ein unter anderem in [41, 78] beschriebenes Verfahren beruht auf der rekursiven Anwendung eines Tiefpassfilters. Dabei wird jedoch zunächst nicht das Wavelet selbst, sondern die zugehörige *Skalierungsfunktion* φ_m berechnet. Aus dieser kann das zugehörige Wavelet für die nächstgrößere Auflösungsebene mit Hilfe von (4.23) nach

$$\psi_{m+1}(\tau) = \sqrt{2} \sum_n g(n) \varphi_m(2\tau - n) \quad (4.31)$$

berechnet werden. Die dabei verwendeten Filterkoeffizienten $g(n)$ stehen mit den Koeffizienten der Skalierungsfunktion über

$$g(n) = (-1)^n h(M - n) \quad (4.32)$$

in Beziehung, wobei M im Falle der Filterlänge N typisch zu $N - 1$ gewählt wird.

Für die weiteren Überlegungen soll hier nur noch die Klasse der *orthonormalen* Wavelets mit *kompaktem Definitionsbereich* betrachtet werden. Dabei bedeutet *orthonormal* einerseits, dass die Basisfunktionen zueinander orthogonal sind, d. h. dass ihr inneres Produkt für beliebige Kombinationen von Basisfunktionen (außer für sich selbst) verschwindet. Zusätzlich müssen die Basisfunktionen normiert sein, d. h. das innere Produkt einer Basisfunktion mit sich selbst muss 1 ergeben. Ein *kompakter Definitionsbereich* bedeutet, dass die Basisfunktionen lediglich in einem endlichen und zusammenhängenden Bereich von 0 verschieden sind.

Wie in [78, 13] gezeigt kann mit Hilfe der rekursiven Differenzgleichung

$$\varphi_{i+1}(\tau) = \sqrt{2} \sum_{n=0}^N h(n) \varphi_i(2\tau - n) \quad (4.33)$$

eine Familie von Wavelets definiert werden. Dabei ist N die Anzahl der nicht verschwindenden Filterkoeffizienten $h(n)$ und wird auch als *Ordnung* eines Wavelets bezeichnet. Die Koeffizienten $h(n)$ werden durch drei Orthogonalitäts- und Normalisierungsbedingungen

$$\sum_n h(n) = \sqrt{2}$$

$$\sum_n h(n)h(n-2k) = \begin{cases} 1 & \text{für } k = 0 \\ 0 & \text{für } k \neq 0 \end{cases} \quad (4.34)$$

bestimmt. Von den theoretisch unendlich vielen Wavelets sollen im Folgenden die in Bild 4.9 dargestellten und für praktische Anwendungen besonders interessanten Typen näher betrachtet werden.

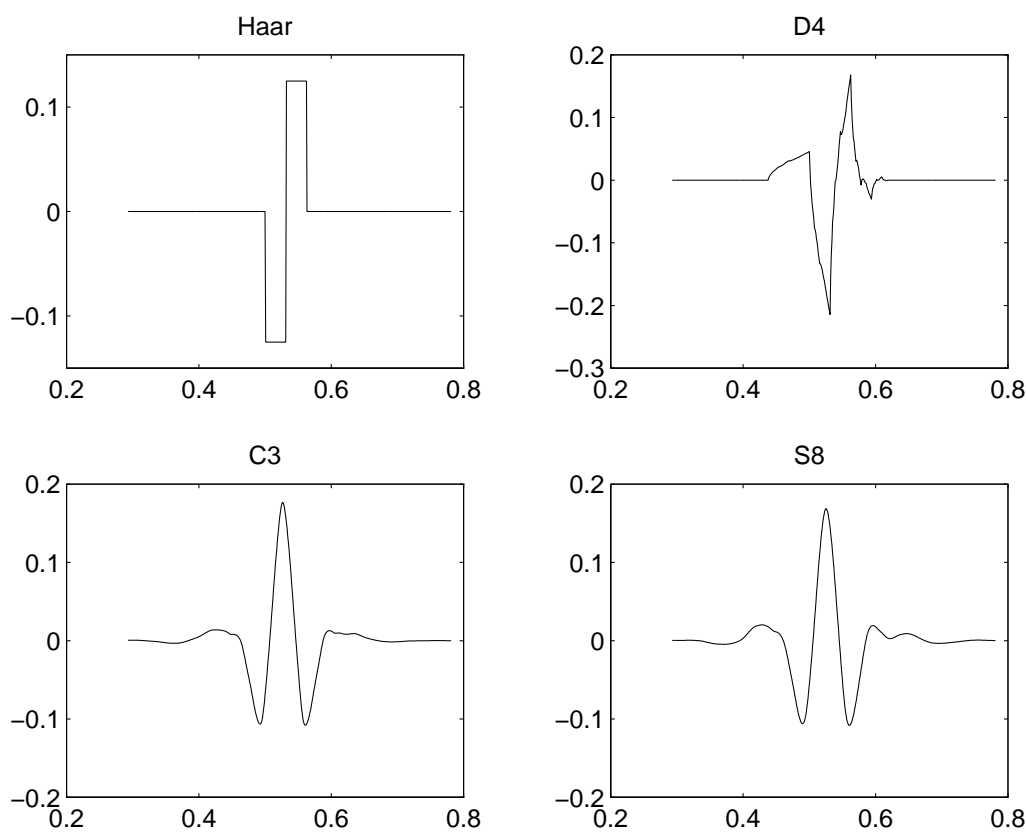


Abbildung 4.9: Beispiele für Wavelets: Das nicht kontinuierliche Haar-Walsh-Wavelet, das an einigen Stellen nur einseitig differenzierbare Daubechies-4-Wavelet (D4), ein Coiflet (C3) mit verschwindenden Momenten sowie ein symmetrisches Symmlet (S8).

Für $N = 2$ erhält man $h(0) = h(1) = 1/\sqrt{2}$, womit die $\varphi(\tau)$ zu den Haar- oder Walsh-Funktionen werden. Die zugehörigen Wavelets werden auch als *Haar-Walsh-Wavelets* bezeichnet.

Die Gleichungen (4.33) und (4.34) und deren Lösung wurden im Jahr 1988 erstmals von der belgischen Mathematikerin INGRID DAUBECHIES in [13] vorgestellt. Für $N = 4$ erhält man die Koeffizienten

$$\begin{aligned} h(0) &= \frac{1}{4\sqrt{2}}(1 + \sqrt{3}), & h(1) &= \frac{1}{4\sqrt{2}}(3 + \sqrt{3}), \\ h(2) &= \frac{1}{4\sqrt{2}}(3 - \sqrt{3}), & h(4) &= \frac{1}{4\sqrt{2}}(1 - \sqrt{3}), \end{aligned} \quad (4.35)$$

die zu den im Allgemeinen als *Daubechies-4-* oder kurz *D4-Wavelets* bezeichneten Funktionen führen. Im Gegensatz zu den Haar-Walsh-Wavelets stellen die D4-Wavelets die ersten kontinuierlichen Wavelets mit kompaktem Definitionsbereich dar. Aufgrund der rekursiven Definitionsgleichungen weisen die Wavelets ein hohes Maß an Selbstähnlichkeit auf. Wie in [33] beschrieben sind Ausschnitte aus diesem Wavelet bei der entsprechenden Vergrößerung dem ursprünglichen Wavelet sehr ähnlich. Eine weitere Konsequenz aus der Definitionsgleichung (4.33) ist, dass D4-Wavelets an einigen Stellen nicht definiert und an diesen Stellen nur einseitig differenzierbar sind [74].

Zwei weitere gebräuchliche Wavelet-Familien, die sich aufgrund ihrer symmetrischen Eigenschaften und ihrer Glattheit wesentlich besser für die Analyse von glatten Kurven und Schwingungsvorgängen eignen, sind die ebenfalls in Bild 4.9 dargestellten *Coiflets* und *Symmlets*. Die nach dem Mathematiker RONALD COIFMAN benannten *Coiflets* haben günstige Eigenschaften bezüglich verschwindender Momente, *Symmlets* sind annähernd symmetrisch und haben acht verschwindende Momente, wodurch sich die in einem Signal enthaltenen Informationen in einer vergleichsweise geringen Anzahl von Wavelet-Koeffizienten konzentrieren.

4.3 Klassifikation

Als *Klassifikation* wird im Allgemeinen der Entscheidungsprozess bezeichnet, der ein Objekt innerhalb einer Erkennungsaufgabe einer bestimmten Klasse zuordnet. Mit den in Abschnitt 4.1 eingeführten Bezeichnungen bildet die Menge aller Klassen e den Entscheidungsraum E . Die automatische Erkennung der Zugehörigkeit zu einer Klasse wird oft auch als Objekt- oder Mustererkennung (pattern recognition) bezeichnet, wobei der Begriff des Objektes als ein Oberbegriff für zu erkennende Situationen und Ereignisse fungiert [96].

Mit Ausnahme von so genannten *Ablehnungsklassen*, die alle Objekte enthalten, die *keiner* anderen Klasse zugeordnet werden können, dürfen sich die Signale der einer Klasse zuzuordnenden Objekte nur unwesentlich unterscheiden. Sie können daher gleichwertig (äquivalent) betrachtet werden. Für eine detailliertere mathematische Darstellung sei auf [110, 26, 32] verwiesen.

4.3.1 Merkmalsraum

Da Erkennungssysteme in der Regel zweistufig aufgebaut sind, werden nicht die ursprünglichen Signale x , sondern die mit Hilfe einer Analysefunktion f ermittelten Merkmalsvektoren \vec{Y} klassifiziert. Die Wahl der Merkmalsvektoren bzw. der zu ihrer Berechnung eingesetzten Analysefunktion hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Erkennungssystems. Daher sollen hier zunächst

die Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften der Merkmale und den sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Klassifikation dargestellt werden. Auf diese Weise werden die Grundlagen für das Verständnis der in Abschnitt 5.3.4 beschriebenen Vorgehensweise bei der Adaption des Erkennungssystems an die jeweilige Aufgabenstellung gelegt.

Die wesentlichsten Forderungen an die Analysefunktion sind der Erhalt der *Äquivalenzeigenschaften* und die *Separierbarkeit* des Merkmalsraumes. Durch den Erhalt der Äquivalenzeigenschaften wird sichergestellt, dass sich im Hinblick auf eine konkrete Aufgabenstellung nur geringfügig unterscheidende Signale als gleichwertig (äquivalent) betrachtet und einer Klasse zugeordnet werden. Die Forderung nach der Separierbarkeit der zu unterscheidenden Klassen soll anhand eines Beispiels für den zwei-dimensionalen Merkmalsraum dargestellt werden.

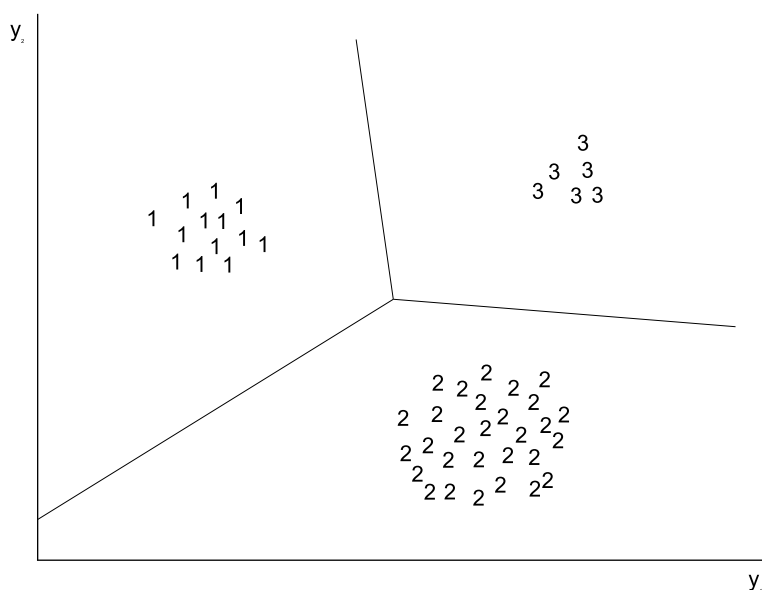


Abbildung 4.10: Realisierung von drei Klassen in einem zwei-dimensionalen Merkmalsraum mit Trennflächen zur Unterscheidung der Klassen.

Zeichnet man die zu klassifizierenden Objekte in den in Bild 4.10 dargestellten Merkmalsraum ein, so ist aufgrund der geforderten Äquivalenzeigenschaften leicht einzusehen, dass die zu einer Klasse gehörenden Objekte im Merkmalsraum Ballungsgebiete oder *Cluster* bilden. Die Grenzen zwischen den Gebieten des Merkmalsraumes, die alle zu einer Klasse gehörenden Objekte enthalten werden, als *Trennflächen* bezeichnet. In einem N -dimensionalen Merkmalsraum stellen sie Funktionen von $N - 1$ Veränderlichen dar. Aufgrund der Aufgabenstellung kann es in vielen Fällen sinnvoll erscheinen, auch die Bereiche des Merkmalsraumes zu einer Klasse zusammenzufassen, die keiner anderen Klasse sinnvoll zugeordnet werden können. Man spricht in diesem Fall von einer *Rückweisung* der zu diesen Bereichen des Merkmalsraumes gehörenden Objekte. Die vollständige Aufteilung des Merkmalsraumes wird auch als *Voronoi-Zerlegung* bezeichnet. Durch die Festlegung der Trennflächen des Merkmalsraumes wird somit das Verhalten des Klassifikators bei der Zuordnung von Merkmalsvektoren zu den zugehörigen Klassen bestimmt. Im Hinblick auf die Verwendung des Klassifikators in

einem Erkennungssystem kann die Aufteilung des Merkmalsraumes daher auch als *Lernen* bezeichnet werden. Dieser Aspekt wird in Abschnitt 4.4 näher beschrieben.

Um die Separierbarkeit der Klassen zu gewährleisten, dürfen sich die zu verschiedenen Klassen gehörenden Ballungsgebiete nicht überlappen. Je nach Form und Anordnung der Ballungsgebiete werden kompliziertere Klassifikatoren benötigt. Den einfachsten Fall stellt die in Bild 4.11 links dargestellte Anordnung der Klassen dar, die als *linear separierbar* bezeichnet wird. Während die in der mittleren Darstellung eingezeichneten Klassen noch mit einem nichtlinearen Klassifikator getrennt werden können, gibt es im Fall der rechten Anordnung keine befriedigende Möglichkeit zur Separation der Klassen.

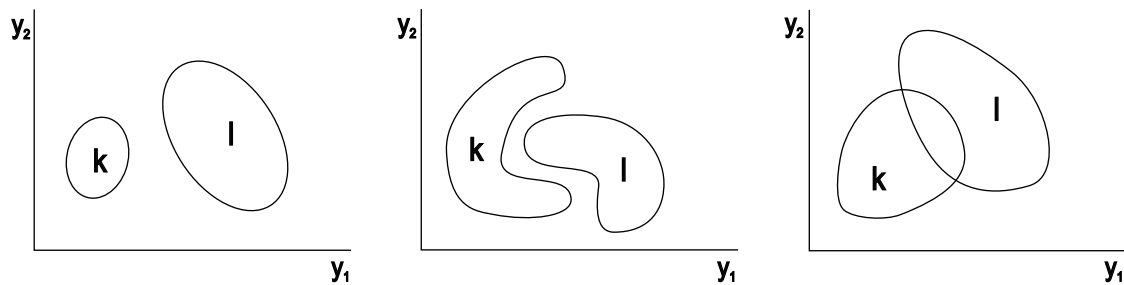


Abbildung 4.11: Separierbarkeit der Klassen k und l : linear separierbar (links), separierbar, aber nicht linear (Mitte), nicht separierbar (rechts).

4.3.2 Abstandsfunktion

Um diesen Sachverhalt weiter präzisieren zu können, soll zunächst eine Abstandsfunktion oder Metrik $d(\vec{x}, \vec{y}) \geq 0$ für alle Merkmalspaare \vec{x}, \vec{y} für den Merkmalsraum eingeführt werden. Die bekannteste und anschaulichste Abstandsfunktion ist der Euklidische Abstand, der durch die Beziehung

$$d(\vec{x}, \vec{y}) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2} \quad (4.36)$$

mit

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}, \quad \vec{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}$$

definiert wird. Um die bei inhomogenen Merkmalsvektoren, d. h. bei Merkmalsvektoren, deren Komponenten über unterschiedliche Maßeinheiten verfügen, auftretenden Schwierigkeiten zu umgehen, wird häufig eine Normierung mit einheitsbehafteten Faktoren eingeführt, so dass sich

$$d(\vec{x}, \vec{y}) = \sqrt{\left(\frac{x_1 - y_1}{w_1}\right)^2 + \left(\frac{x_2 - y_2}{w_2}\right)^2} \quad (4.37)$$

ergibt. Durch die freie Wählbarkeit der Maßzahl von w kann darüber hinaus vorhandenes Wissen über die Bedeutung der einzelnen Komponenten für den Entscheidungsprozess eingebracht werden.

Der hier betrachtete Euklidische Abstand ist nur ein Beispiel aus einer ganzen Familie von Abstandsfunktionen

$$d(\vec{x}, \vec{y}) = \sqrt[g]{\sum_{n=1}^N |x_n - y_n|^g}, \quad (4.38)$$

die aus der Minkowski-Norm für N-dimensionale Merkmalsräume abgeleitet werden können.

4.3.3 Entscheidungsfindung

Wie in Bild 4.1 dargestellt ordnet der Klassifikator den Merkmalsvektor \vec{Y} einer Klasse k zu. Die dazu benutzte Abbildung sollte so gewählt werden, dass möglichst häufig der gewünschte Fall $e = k$ eintritt, d. h. dass der Merkmalsvektor der „richtigen“ Klasse zugeordnet wird. Beispiele für die Realisierung dieser Abbildung sind aus den verschiedensten Bereichen der Informationsverarbeitung bekannt. So sind neben der hier weiter verfolgten „signalnahen“ *numerischen Klassifikation* auch regelbasierte Ansätze aus den Bereichen der Künstlichen Intelligenz und der Fuzzy-Logik bekannt [105, 24, 103].

Bei der Einführung der *Unterscheidungsfunktion* d_k geht man nach [41] davon aus, dass für jeden gegebenen Merkmalsvektor $\vec{y} \in \Upsilon^n$ der Klasse k eine Abbildung

$$d_k : \Upsilon^n \rightarrow \mathbb{N}' \subseteq \mathbb{N} \quad (4.39)$$

angegeben werden kann, die aussagt, wie gut dieser Vektor in die Klasse k passt. Um eine Entscheidungsfindung zu ermöglichen, muss sich diese anhand einer einzigen Regel nachvollziehen lassen. Diese Regel kann beispielsweise dadurch gegeben werden, dass ein Merkmalsvektor \vec{y} immer dann besser zur Klasse k als zur Klasse l passt, wenn für ihn die Relation $d_k(\vec{y}) > d_l(\vec{y})$ erfüllt ist. Für den zu klassifizierenden Merkmalsvektor \vec{y} müssen unter diesen Voraussetzungen alle $d_k(\vec{y}); k = 1, \dots, K$ berechnet und das Extremum bestimmt werden. Die Entscheidungsregel kann dann allgemein als

$$e = \arg \underset{k=1, \dots, K}{ext} d_k(\vec{y}) \quad (4.40)$$

geschrieben werden. Der Argumentoperator vor dem Extremaloperator drückt aus, dass nicht der Minimal- bzw. Maximalwert von $d_k(\vec{y})$ gesucht ist, sondern der zu ihm gehörende Index k .

4.3.4 Lineare Klassifikatoren

Ein anschauliches Beispiel für einen linearen Klassifikator stellt der *Abstandsklassifikator* dar. Er basiert auf der Annahme, dass zwei Merkmalsvektoren umso eher zu einer Klasse gehören, je geringer ihr Abstand im Merkmalsraum ist. Die Anpassung eines solchen Klassifikators an eine gegebene Aufgabenstellung beschränkt sich auf die Bestimmung je eines für die zu unterscheidenden Klassen charakteristischen Merkmalsvektors. Dieser kann entweder durch die Problemstellung vorgegeben oder aus einer Lernstichprobe ermittelt werden. In diesem Fall wird in der Regel der Mittelwertvektor $\vec{\mu}_k$ aller zur Klasse k gehörenden Merkmalsvektoren der Lernstichprobe verwendet. Die Entscheidungsregel für den Abstandsklassifikator kann durch Einsetzen der Unterscheidungsfunktion

$$d_k(\vec{y}) = d(\vec{y}, \vec{\mu}_k) \quad (4.41)$$

in (4.40) leicht gebildet werden:

$$e = \arg \min_{k=1, \dots, K} d_k(\vec{y}). \quad (4.42)$$

Wie in [41] beschrieben sind für die Unterscheidungsfunktion nicht die Absolutwerte der $d_k(\vec{y})$, sondern lediglich die Rangfolge der Werte beim Durchlaufen der Klassen $k = 1, \dots, K$ ausschlaggebend. Dies bedeutet, dass die Unterscheidungsfunktion beliebig verändert werden darf, solange diese Rangordnung erhalten bleibt. Unter Verwendung des Euklidischen Abstandes erhält man

$$\begin{aligned} e &= \arg \min_k d_k(\vec{y}) = \arg \min_k \|\vec{y} - \vec{\mu}_k\|^2 \\ &= \arg \min_k (\vec{y}^T \vec{y} - 2\vec{\mu}_k^T \vec{y} + \vec{\mu}_k^T \vec{\mu}_k) = \arg \min_k (-2\vec{\mu}_k^T \vec{y} + \vec{\mu}_k^T \vec{\mu}_k). \end{aligned} \quad (4.43)$$

Aus der Linearität der Unterscheidungsfunktion folgt, dass die Trennflächen (Hyper-)Ebenen im Merkmalsraum bilden. Für den zweidimensionalen Merkmalsraum kann die Trennfläche bzw. Trenngerade als Mittelsenkrechte zwischen den Repräsentanten (= mittlerer Merkmalsvektor) der zu trennenden Klassen konstruiert werden.

4.3.5 Statistische Klassifikatoren

Für den Einsatz linearer Klassifikatoren ist, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, die Berechnung des Zentrums der zu unterscheidenden Klassen im Merkmalsraum ausreichend. Informationen über die Form der Bereiche, in denen sich die zu den verschiedenen Klassen im Merkmalsraum gehörenden Objekte der Lernstichprobe konzentrieren, bleiben dagegen unberücksichtigt. Es gibt somit beim Einsatz linearer Klassifikatoren auch keine Möglichkeit, die Form der Trennflächen an die Form der von den verschiedenen Klassen beschriebenen Bereiche anzupassen.

Eine Möglichkeit diese Informationen zu nutzen besteht darin, die Zugehörigkeit eines Individuums zu einer Klasse mit Hilfe einer Wahrscheinlichkeitsverteilung zu beschreiben. Diese beruht auf der Vorstellung, dass die Vertreter einer bestimmten Klasse in bestimmten Bereichen (meist in der Mitte) des Ballungsgebietes häufiger auftreten als beispielsweise an seinem Rand. Mit Hilfe von statistischen Verfahren kann dies durch die Ermittlung einer geeigneten Dichtefunktion modelliert werden.

Durch die Nutzung dieses Hintergrundwissens, das beispielsweise in einer durch die Natur der Merkmale festgelegten Form der Verteilung besteht, kann aus einer Lernstichprobe eine Dichtefunktion ermittelt werden, welche die Verteilung der Merkmalsvektoren in dieser Klasse beschreibt. Im Falle eines kontinuierlichen Merkmalsraumes lässt sich dies durch die Wahrscheinlichkeitsdichte $p(\vec{y}|k)$ ausdrücken, in einem diskreten Merkmalsraum mit dem bedingten Wahrscheinlichkeitsmaß $P(k|\vec{y})$. In praktischen Aufgabenstellungen können die Individuen einiger Klassen häufiger auftreten als andere, was durch die Einführung einer *A-priori-Klassenwahrscheinlichkeit* $P(k)$ berücksichtigt werden soll.

Ist für ein zu klassifizierendes Individuum der Merkmalsvektor \vec{y} bekannt, so wird es der Klasse k zugeordnet, für welche die *A-posteriori-Wahrscheinlichkeit* $P(k|\vec{y})$ maximal ist. Dies kann formal durch die Entscheidungsregel

$$e = \arg \max_{k=1, \dots, K} P(k|\vec{y}) \quad (4.44)$$

ausgedrückt werden. Mit Hilfe der Bayes-Formel

$$P(AB) = P(A|B)P(B) = P(B|A)P(A) \quad (4.45)$$

lässt sich die A-posteriori-Wahrscheinlichkeit auf Größen zurückführen, die anhand der Lernstichprobe ermittelt bzw. geschätzt werden können. Nach entsprechender Umformung erhält man

$$P(k|\vec{y}) = \frac{P(\vec{y}|k) \cdot P(k)}{P(\vec{y})} \quad (4.46)$$

mit

$$P(\vec{y}) = \sum_{k=1}^K P(\vec{y}|k) \cdot P(k). \quad (4.47)$$

Da $P(\vec{y})$ klassenunabhängig ist, erhält man als Entscheidungsregel für den Bayes-Klassifikator

$$e = \arg \max_{k=1, \dots, K} \begin{cases} P(k) \cdot P(\vec{y}|k) & \text{Merkmalsraum diskret} \\ P(k) \cdot p(\vec{y}|k) & \text{Merkmalsraum kontinuierlich.} \end{cases} \quad (4.48)$$

Werden alle Klassen k als gleich wahrscheinlich angenommen, so kommt man zur Entscheidungsregel des in der Literatur als *Maximum-Likelihood-Klassifikator* bekannten Klassifikators:

$$e = \arg \max_{k=1, \dots, K} \begin{cases} P(\vec{y}|k) & \text{Merkmalsraum diskret} \\ p(\vec{y}|k) & \text{Merkmalsraum kontinuierlich.} \end{cases} \quad (4.49)$$

Da $\sum_k P(\vec{y}|k)$ im Allgemeinen ungleich eins ist, stellen die $P(\vec{y}|k)$ kein Wahrscheinlichkeitsmaß dar, sondern werden auch als Likelihood-Funktion bezeichnet. Für weitere, auf die statistische Entscheidungstheorie zurückgehende Klassifikatoren wird auf die Literatur (z. B. [26, 32]) verwiesen.

Approximation der Dichtefunktion

Da die in der Unterscheidungsfunktion des Bayes-Klassifikators (4.48) enthaltene Dichtefunktion $p(\vec{y}|k)$ nur in den seltensten Fällen aus der Analyse der Klassifikationsaufgabe bekannt sein dürfte, beschränkt man sich in der Praxis häufig darauf, die Dichtefunktion durch eine aus der Statistik bekannte Verteilung anzunähern. Am weitesten verbreitet ist dabei die Verwendung der Gauß- oder Normalverteilung, die im N-dimensionalen Fall durch

$$p(\vec{y}|k) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2} |\mathbf{K}_k|^{1/2}} e^{-\frac{1}{2}(\vec{y} - \vec{\mu}_k)^T \mathbf{K}_k^{-1} (\vec{y} - \vec{\mu}_k)} \quad (4.50)$$

ausgedrückt werden kann. Die $\vec{\mu}_k$ beschreiben dabei wie bereits beim Abstandsklassifikator den mittleren Merkmalsvektor der Klasse k der Lernstichprobe, \mathbf{K}_k die Kovarianzmatrix

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} \text{Var}(Y_1) & \text{Cov}(Y_1, Y_2) & \cdots & \text{Cov}(Y_1, Y_N) \\ \text{Cov}(Y_2, Y_1) & \text{Var}(Y_2) & \cdots & \text{Cov}(Y_2, Y_N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Cov}(Y_N, Y_1) & \text{Cov}(Y_N, Y_2) & \cdots & \text{Var}(Y_N) \end{pmatrix}. \quad (4.51)$$

Bezeichnen $n, m \in \{1, \dots, N\}$ die Elemente des i -ten Merkmalsvektors $\vec{y}_i = (y_{1,i}, \dots, y_{N,i})^T$ der Lernstichprobe und L_k den Umfang der Lernstichprobe für die Klasse k , so können die auf der Hauptdiagonalen der Kovarianzmatrix angeordneten Varianzen aus

$$\text{Var}(Y_n) = \frac{1}{L_k} \sum_{i=1}^{L_k} (y_{n,i} - \bar{y}_n)^2 \quad (4.52)$$

und die an den übrigen Positionen stehenden Kovarianzen aus

$$\text{Cov}(Y_n, Y_m) = \frac{1}{L_k} \sum_{i=1}^{L_k} (y_{n,i} - \bar{y}_n)(y_{m,i} - \bar{y}_m) \quad (4.53)$$

berechnet werden. Die zur Verfügung stehenden Beobachtungen stellen eine Stichprobe dar, mit deren Hilfe die Varianzen und Kovarianzen der zugehörigen Grundgesamtheit abgeschätzt werden sollen. Nach [43] wird unter diesen Bedingungen eine höhere Genauigkeit für die geschätzten Werte erreicht, wenn man in (4.52) und (4.53) von L_k zu $L_k - 1$ übergeht, so dass für die Berechnung der Kovarianzmatrix

$$\text{Var}(Y_n) = \frac{1}{L_k - 1} \sum_{i=1}^{L_k} (y_{n,i} - \bar{y}_n)^2 \quad (4.54)$$

und

$$\text{Cov}(Y_n, Y_m) = \frac{1}{L_k - 1} \sum_{i=1}^{L_k} (y_{n,i} - \bar{y}_n)(y_{m,i} - \bar{y}_m) \quad (4.55)$$

verwendet werden.

4.3.6 Beurteilung von Klassifikatoren

Die Beurteilung von Klassifikatoren erfolgt in vielen Fällen über das für einen konkreten Datensatz erzielte Klassifikationsergebnis. Die Klassifikationsleistung hängt jedoch neben den Eigenschaften des Klassifikators vor allem von den zur Klassifikation verwendeten Merkmalen ab. Dies kann beispielsweise mit Hilfe des in Abschnitt 4.3.1 eingeführten Merkmalsraumes verdeutlicht werden. Je nach Wahl der für die Klassifikation verwendeten Merkmale ändern sich die Form und der Ort des zu einer Klasse gehörenden Bereiches im Merkmalsraum. Dabei ist es leicht nachvollziehbar, dass die Auswahl der Merkmale so erfolgen kann, dass zur Separation der Klassen ein linearer Klassifikator ausreichend ist oder dass die Separation infolge Überschneidungen der zu den verschiedenen Klassen gehörenden Bereiche gar nicht möglich ist.

Bei vielen praktischen Klassifikationsaufgaben besteht die Herausforderung darin, für die gegebenen Merkmale einen geeigneten Klassifikator zu finden. Die zur Beurteilung des Klassifikationsergebnisses verwendeten Metriken bewerten somit die Eignung des eingesetzten Klassifikators für die vorliegende Aufgabenstellung. Bestehen jedoch keine Einschränkungen bezüglich der Wahl der Merkmale, so kann das Qualitätsmaß für das Klassifikationsergebnis als Beurteilung der Kombination der verwendeten Merkmale und des eingesetzten Klassifikators betrachtet werden.

Aus der Literatur ist eine Reihe von Verfahren zur Beurteilung der Güte von Klassifikatoren bekannt [35, 41]. Sie beruhen in der Regel darauf, dass die zur Verfügung stehenden Beobachtungen in eine *Lern-* und eine *Teststichprobe* aufgeteilt werden. Nachdem der Klassifikator mit den Beobachtungen der Lernstichprobe auf die vorliegende Aufgabenstellung eingestellt wurde, kann die Klassifikationsgüte mit Hilfe der in der Teststichprobe enthaltenen Objekte überprüft werden.

Die Beurteilung der Klassifikationsgüte erfolgt häufig mit Hilfe einer so genannten *Verwechslungsmatrix*, in der die korrekten Klassifikationen und die Verwechslungen zahlenmäßig erfasst und in Form einer Matrix dargestellt werden. Wird beim Aufbau der Matrix auch der Fall der *Rückweisung*, d. h. die Entscheidung, dass die zu klassifizierende Beobachtung keiner der bekannten Klassen angehört, berücksichtigt, spricht man von einer *erweiterten Verwechslungsmatrix*. Bezeichnet $h(e, k)$ die relative Häufigkeit der Fälle, in denen eine objektiv der Klasse k angehörende Beobachtung der Klasse e zugeordnet wird, so erhält man

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h(0,0) & h(0,1) & h(0,2) & \cdots & h(0,K) \\ h(1,0) & h(1,1) & h(1,2) & \cdots & h(1,K) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h(K,0) & h(K,1) & h(K,2) & \cdots & h(K,K) \end{pmatrix}. \quad (4.56)$$

Die mit 0 bezeichnete Klasse steht dabei für den Fall der Rückweisung. So beschreibt $h(0,0)$ die Entscheidungen, bei denen eine Beobachtung unbekanntem Typs korrekterweise keiner der Klassen zugeordnet wurde. Die restlichen Elemente der ersten Spalte geben Auskunft darüber, wie häufig Beobachtungen, die objektiv keiner bekannten Klasse angehören, fälschlicherweise einer dieser Klassen zugeordnet wurden. Entsprechend stehen die $h(0,1), \dots, h(0,K)$ der ersten Zeile der Matrix für falsch zurückgewiesene Beobachtungen, d. h. für die Fälle, in denen Vertreter bekannter Klassen keiner dieser Klassen zugeordnet werden konnten. Die Elemente auf der Hauptdiagonalen enthalten die relativen Häufigkeiten der korrekt getroffenen Entscheidungen, während die restlichen Elemente eine Aussage über Verwechslungen zwischen den Klassen machen.

Um die Konsequenzen von Fehlentscheidungen so gering wie möglich zu halten, erfolgt die Bewertung des Klassifikationsergebnisses oft über die im Falle von Fehlentscheidungen entstehenden Kosten. Eine einfache Bewertungsgröße für die Qualität des Klassifikators erhält man, wenn man die für die Teststichprobe ermittelten Kosten aufaddiert und auf den Umfang der Teststichprobe bezieht.

Eine alternative Möglichkeit zur Beurteilung von Klassifikatoren, die ohne die Angabe einer Kostenfunktion und die Aufteilung der zur Verfügung stehenden Beobachtungen in eine Lern- und eine Teststichprobe auskommt, ist in [12] beschrieben. Das Verfahren beruht darauf, die Güte des Klassifikators mit Hilfe eines Bewertungskriteriums, dem *Crossvalidated Quadratic Probability Measure* (CVQPM) zu beschreiben, das aus den Merkmalsvektoren der zur Verfügung stehenden Beobachtungen gebildet

werden kann. Vorteile bietet dieses Verfahren nach [34] vor allem dann, wenn nur wenige Beobachtungen zur Verfügung stehen. Darüber hinaus berücksichtigt es auch, wie sicher die einzelnen Individuen einer bestimmten Klasse zugeordnet werden. Da es aufgrund dieser Eigenschaften als Kriterium für die in Abschnitt 5.3.4 beschriebene Optimierung des Merkmalsvektors verwendet wird, sollen hier die wichtigsten Grundlagen des Verfahrens dargestellt werden.

Bewertungskriterien der genannten Art beurteilen die Zuverlässigkeit der Klassenzuweisung mit Hilfe eines *Unterscheidungskriteriums*. Dieses hat vielfach die Form

$$P = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L a(i), \quad (4.57)$$

wobei die $a(i)$ im allgemeinen Fall einen Schätzwert für die Bewertung der Klassifikation der Beobachtung \vec{y}_i darstellen. Eine einfache Möglichkeit für einen solchen Schätzwert ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein durch den Merkmalsvektor \vec{y}_i repräsentiertes Objekt der *richtigen* Klasse k zugeordnet wird.

Für die weiteren Überlegungen soll der durch

$$a_Q(i) = \frac{1}{2} + P(k|\vec{y}_{i(k)}) - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P(k|\vec{y}_i)^2 \quad (4.58)$$

definierte quadratische Schätzwert zur Beurteilung der Zuverlässigkeit der Klassifikation verwendet werden, wobei $P(k|\vec{y}_{i(k)})$ die Wahrscheinlichkeit beschreibt, mit der \vec{y}_i der *richtigen* Klasse k zugeordnet wird. Eine weitere Verfeinerung des Verfahrens wird erreicht, wenn man wie in [61] vorgeschlagen bei der Berechnung der A-posteriori-Wahrscheinlichkeit für \vec{y}_i eine Kovarianzmatrix \mathbf{K}_k sowie einen mittleren Merkmalsvektor $\vec{\mu}_k$ verwendet, bei deren Berechnung das Individuum \vec{y}_i nicht berücksichtigt wurde. Bezeichnet $P_{/i}(k|\vec{y}_i)$ die zugehörige A-posteriori-Wahrscheinlichkeit, so erhält man als Bewertungszahl für einen Klassifikator \mathfrak{K}

$$CVQPM(\mathfrak{K}) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L a_{Q/i}(i) \quad (4.59)$$

mit

$$a_{Q/i}(i) = \frac{1}{2} + P_{/i}(k|\vec{y}_{i(k)}) - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{/i}(k|\vec{y}_i)^2. \quad (4.60)$$

CVQPM nimmt Werte zwischen null und eins an, wobei größere Werte einer besseren Klassifikations-sicherheit entsprechen.

4.4 Lernen

Im Zusammenhang mit den hier betrachteten Erkennungssystemen kann *Lernen* als *Anpassung* oder *Adaption* an eine bestimmte Aufgabenstellung definiert werden. Findet dieser Prozess in einer Phase statt, in der das betrachtete System seine eigentliche Aufgabe noch nicht erfüllt, so wird zwischen einer

Lern- und einer *Kannphase* unterschieden. Erfolgt die Adaption nicht in einer dedizierten Lernphase mit Hilfe einer so genannten Lernstichprobe, sondern während der Kannphase, so spricht man auch von *Online-Lernen*.

Die bisher erläuterten Verfahren und Algorithmen haben, wie bereits in der Einleitung zu diesem Kapitel erwähnt, das Ziel, die im betrachteten Zusammenhang interessierenden Informationen aus den erfassten bzw. gespeicherten Signalen zu extrahieren. Um dies zu ermöglichen, muss daher zunächst *Wissen* über die zu extrahierenden Informationen in das Erkennungssystem eingebracht werden. Bei der Beschreibung der Funktionsweise von Erkennungssystemen in Abschnitt 4.1 wurde dieses Wissen als *Modellinformation* bezeichnet.

Das Wissen über eine konkrete Aufgabenstellung zerfällt im Allgemeinen in das Modell selbst sowie in die zugehörigen Modellparameter. Wissen, das in Algorithmen und Modellstrukturen festgeschrieben ist, wird als *prozedurales Wissen* bezeichnet. In praktischen Anwendungen beruht es in der Regel auf einem Kompromiss aus mathematisch-physikalischer Problemanalyse und heuristischen Ansätzen. Die Parameter des Modells bilden dagegen das *deklarative Wissen*. Quelle des deklarativen Wissens ist normalerweise eine Lernstichprobe [41].

Mit diesen Vorüberlegungen kann *Lernen*, d. h. die Anpassung oder *Adaption* an eine bestimmte Aufgabenstellung, als Bestimmung der noch offenen Modellparameter definiert werden. Das prozedurale Wissen kann auch als formalisiertes Expertenwissen betrachtet werden. Es kann explizit durch analytische Zusammenhänge oder in Form von Regeln vorliegen. Darüber hinaus besteht grundsätzlich auch die Möglichkeit der impliziten Repräsentation mit Hilfe neuronaler Netze, die hier jedoch nicht weiter verfolgt werden soll. Die Grenzen zwischen prozeduralem und deklarativem Wissen verschwimmen dabei in zunehmendem Maße.

Die Lernverfahren selbst können nach [106] in parallele, sequentielle, iterative und stochastische Verfahren eingeteilt werden. Für die hier beschriebene Anwendung soll jedoch nur ein stochastisches Verfahren, die so genannten evolutionären Algorithmen, weiter betrachtet werden.

4.4.1 Evolutionäre Algorithmen

Der Begriff *evolutionäre Algorithmen* steht für eine spezielle Gruppe von stochastischen Optimierungsmethoden. Sie benutzen keine Annahmen über die Eigenschaften des Parameterraumes, wodurch sie speziell bei komplexen Optimierungsproblemen ein sehr robustes Verhalten zeigen. Eine allgemeine Einführung in die verschiedenen Optimierungsverfahren findet sich in [69], ein Überblick über evolutionäre Algorithmen in [77].

Die evolutionären Algorithmen werden hier dazu eingesetzt, das Erkennungssystem an die zu detektierenden Signalformen zu adaptieren. Zu diesem Zweck werden die für die Klassifikation verwendeten Merkmale so ausgewählt, dass die Zuordnung zur zugehörigen Klasse möglichst zuverlässig erfolgt, d. h. dass der in Abschnitt 4.3.6 als Bewertungskriterium eingeführte CVQPM-Wert maximal wird.

Durch evolutionäre Algorithmen werden zu *Populationen*

$$\mathfrak{P}(t) = \{\vec{\chi}_t^{(i)}, i = 1, \dots, N\} \quad (4.61)$$

zusammengefasste Gruppen von *Individuen* durch die wiederholte Anwendung von *genetischen Operatoren* einem iterativen Evolutionsprozess unterworfen. Die dabei erzeugten Individuen werden mit Hilfe der *Fitnessfunktion* ι einer Bewertung unterzogen, die einerseits auf die Erzeugung der nächsten Generation von Individuen $\mathfrak{P}(t+1)$ einwirkt und ein Kriterium für das Erreichen des Optimierungsziels liefert.

Die genetischen Operatoren, die aus einer Population $P(t)$ die nächste Generation $\mathfrak{P}(t+1)$ erzeugen, enthalten Zufallselemente ξ und sollen mit $\hat{\Gamma}$ bezeichnet werden. Die Erzeugung der Population der jeweils nächsten Generation kann damit formal durch

$$\mathfrak{P}(t+1) = \hat{\Gamma}(\xi)\mathfrak{P}(t) \quad (4.62)$$

beschrieben werden. Dabei ist entscheidend, dass die Ausprägung der Population $\mathfrak{P}(t+1)$ von *allen* Individuen $\{\vec{\chi}_t^{(i)}\}$ der Vorgängergeneration $\mathfrak{P}(t)$ und deren Fitnesswerten $\{\iota(\vec{\chi}_t^{(i)}), i = 1, \dots, N\}$ abhängt. Da damit bei der Erzeugung einer neuen Generation die gesamte Information der Vorgängergeneration berücksichtigt wird, können die Populationen als eine sich dynamisch entwickelnde Informationsquelle über die zu optimierende Qualitätsfunktion angesehen werden [77].

Unter dem Begriff „genetische Operatoren“ werden im Allgemeinen die Operatoren *Reproduktion*, *Mutation*, *Rekombination (Kreuzung, Crossover)* und *Selektion* zusammengefasst. Bei der Erzeugung einer neuen Generation von Individuen werden in der Regel mehrere der genannten Operatoren hintereinander ausgeführt.

Bei der *Reproduktion* werden lediglich mehrere Kopien der aktuellen Population angelegt, auf die dann andere Operatoren wirken können. Im Falle der *Mutation* bedeutet dies eine meist kleine, zufällig gewählte Modifikation eines Individuums. Die *Rekombination (Kreuzung, Crossover)* führt zu einer zufälligen Kombination der Elemente (*Genome*) zweier Individuen. Im Vergleich zur Mutation kann sie, speziell bei innerhalb einer Generation stark unterschiedlichen Individuen, zu großen Sprüngen innerhalb des Parameterraums führen. Durch die *Selektion* werden auf der Basis eines Vergleichs der Fitness der Individuen einer Generation die Individuen für die nächste Generation ausgewählt. Somit stehen für den nächsten Optimierungsschritt im Durchschnitt bessere, d. h. dem Optimierungsziel näher kommende Individuen zur Verfügung, die mit Hilfe der anderen genetischen Operatoren neu variiert werden können.

Der Ablauf eines auf evolutionären Algorithmen basierenden Optimierungsvorganges ist in Bild 4.12 dargestellt. In einem ersten Schritt muss das Optimierungsproblem zunächst in eine für das eingesetzte Optimierungsverfahren geeignete Form gebracht werden (Codierung). Auf der Basis der dabei gewonnenen Darstellung des Optimierungsproblems werden nun meist zufällig mehrere Varianten des Systems (z. B. in Form von Parametersätzen) erzeugt, die anschließend in realen Versuchen oder mit Hilfe von Simulationsverfahren getestet werden. Die dabei erzielten Ergebnisse werden anschließend einer Bewertung unterzogen, welche die Grundlage für die mit Hilfe der bereits beschriebenen genetischen Operatoren durchgeführte Auswahl und Variation der Lösungen darstellt. Die Schritte Variation, Test/Simulation, Bewertung und Auswahl werden iterativ so lange fortgesetzt, bis keine nennenswerte Verbesserung der Lösungen mehr erreicht werden kann. Die auf diese Weise erhaltene optimale Lösung kann dann decodiert, d. h. in das gewünschte Zielsystem überführt werden.

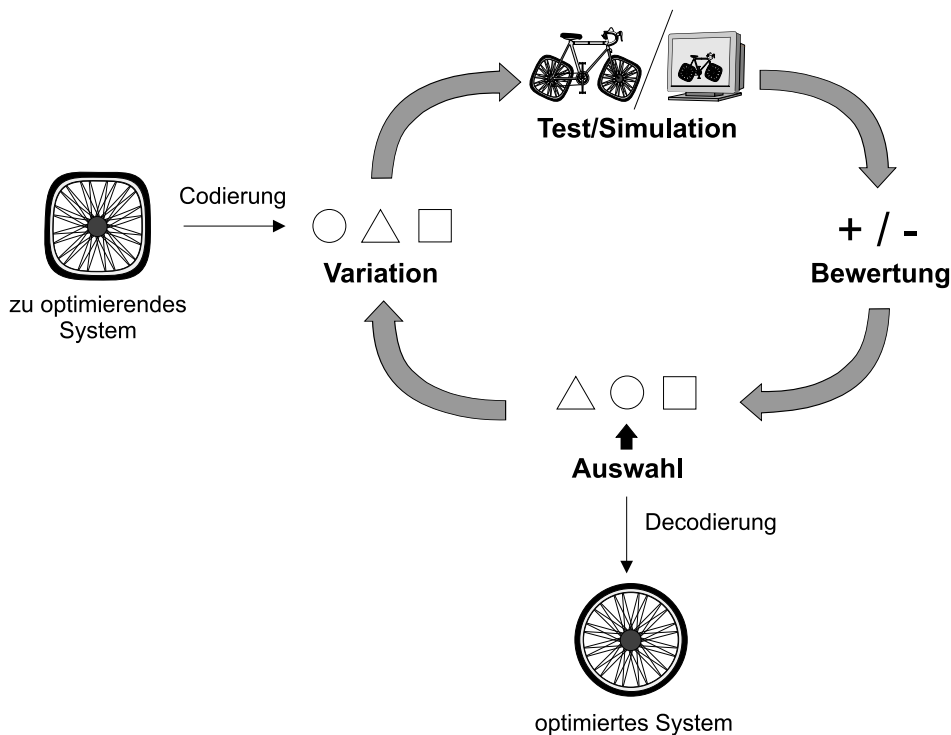


Abbildung 4.12: Iterativer Ablauf eines auf evolutionären Algorithmen basierenden Optimierungsvorgangs nach [50].

Bei den evolutionären Algorithmen können derzeit zwei Grundvarianten unterschieden werden: die *Evolutionstrategien* und die *genetischen Algorithmen*. Die Evolutionstrategien wurden in Berlin von I. RECHENBERG und H.-P. SCHWEFEL entwickelt ([80] und [89]), während die genetischen Algorithmen etwa zur selben Zeit in den USA von J. HOLLAND begründet wurden ([42]).

Evolutionstrategien

Die Evolutionstrategien wurden von Beginn an für die Anwendung auf technische Aufgabenstellungen konzipiert und lösen sich daher stärker als die genetischen Algorithmen von den biologischen Vorbildern. Die Parameter des zu optimierenden Systems werden direkt in einem Vektor $\vec{\chi}$ zusammengefasst. Die auch als *Objektparameter* χ_i bezeichneten Elemente des Vektors entsprechen also direkt geometrischen oder physikalischen Größen des Optimierungsproblems. Die Objektparameter bilden zusammen mit einem Satz von *Strategieparametern* \vec{s} (Varianzen oder Streuungen, welche die Mutationschrittweite bestimmen) ein Individuum $\vec{g} = (\vec{\chi}, \vec{s})$. Unter Anwendung der genetischen Operatoren werden die Objektparameter nun so variiert, dass sich die Bewertung der Individuen dem Maximum des von der Fitnessfunktion über den Objektparametern aufgespannten Gebirges nähert.

Dies legt nahe, dass Evolutionstrategien für *kontinuierliche* Optimierungsprobleme häufig besonders gut geeignet sind. Die zu optimierenden Parameter des Problems stellen in vielen Fällen bereits eine

„natürliche“ Form der Codierung der Optimierungsaufgabe dar, wodurch die Anwendung des Verfahrens und die Interpretation der Ergebnisse stark vereinfacht wird.

Genetische Algorithmen

Die genetischen Algorithmen lehnen sich stark an das biologische Vorbild an, was vor allem an der Repräsentation der Parametervektoren, d. h. der Codierung der Individuen deutlich wird. Der Parametervektor wird in Anlehnung an die biologische Informationscodierung aus Nukleotidsequenzen, d. h. einem String aus Symbolen eines zunächst beliebigen Alphabets gewählt. In den meisten Fällen wird eine binäre Codierung gewählt, so dass Individuen durch Strings

$$\vec{\sigma} = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 \dots \sigma_L \quad \text{mit} \quad \sigma_i \in \{0, 1\} \quad (4.63)$$

der Länge L dargestellt werden können. Im Fall von reellen Objektparametern kann der Wertebereich l der zu optimierenden Größen mit der Genauigkeit Δ in disjunkte Intervalle der Länge Δ unterteilt und abgezählt werden. $\vec{\sigma}$ ist dann die binäre Darstellung der Nummer eines Intervalls in l , L ergibt sich nach [77] aus der Anzahl der zur Abdeckung von l benötigten Subintervalle aus

$$\frac{l}{\Delta} \leq 2^L. \quad (4.64)$$

Neben diesen für die hier vorliegende Aufgabenstellung ausreichenden Möglichkeiten steht in der Literatur sowie in frei verfügbaren Implementierungen genetischer Algorithmen eine Reihe weiterer Möglichkeiten zur Codierung von Optimierungsproblemen z. B. mit Hilfe von Arrays, Listen oder baumartigen Symbolsequenzen zur Verfügung [104].

Die bereits bei den Evolutionsstrategien eingeführten genetischen Operatoren wirken bei der genetischen Algorithmen direkt auf die Symbolsequenzen. Im Falle der *Mutation*, bei welcher der Wert eines zufällig ausgewählten Symbols verändert wird, bedeutet dies beispielsweise

$$\vec{\sigma} = 0011001 \quad \longrightarrow \quad \vec{\sigma}' = 0010001. \quad (4.65)$$

Die Wahrscheinlichkeit für die Durchführung der Mutationsoperation an jedem Mitglied der Population wird mit p_m bezeichnet und typischerweise sehr klein, d. h. zwischen 10^{-3} und 10^{-2} gewählt.

Durch den *Kreuzungsoperator* (Rekombination, Crossover) werden im einfachsten Fall zwei Individuen $\vec{\sigma}_A$ und $\vec{\sigma}_B$ so miteinander gekreuzt, dass zwei neue Strings $\vec{\sigma}'_A$ und $\vec{\sigma}'_B$ entstehen. Dabei werden die Ausgangssequenzen an einer beliebigen Stelle aufgetrennt, die dabei entstehenden Teilsequenzen zwischen den Individuen ausgetauscht und zu neuen Individuen zusammengefügt. Ein Beispiel für diese auch als 2-Punkt-Crossover bezeichnete Operation ist

$$\begin{array}{l} \vec{\sigma}_A = 001|10|01 \\ \vec{\sigma}_B = 101|01|01 \end{array} \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{l} \vec{\sigma}'_A = 001|01|01 \\ \vec{\sigma}'_B = 101|10|01 \end{array}. \quad (4.66)$$

Der Kreuzungsoperator wird mit der Wahrscheinlichkeit p_c auf die Individuen einer Population angewandt. In der Praxis werden für p_c Werte zwischen 0,5 und 0,9 gewählt, wobei häufig auch Er-

weiterungen des Operators auf mehrere Bruchstellen und der Austausch von Teilsequenzen zwischen mehreren Individuen durchgeführt werden.

Die Operatoren *Selektion* und *Reproduktion* werden bei genetischen Algorithmen in einem Schritt durchgeführt. Dabei wird die Anzahl der durch Mutation und Kreuzung modifizierten Individuen einer Population $\mathfrak{P}'(t)$ entsprechend ihrer jeweiligen Fitness bei konstanter Gesamtzahl der Individuen erhöht oder verringert. Beschreibt $n_t(\vec{\sigma}_i)$ die Anzahl der in $\mathfrak{P}'(t)$ enthaltenen Individuen vom Typ $\vec{\sigma}_i$ mit

$$\sum_{\vec{\sigma}_i \in \mathfrak{P}'(t)} n_t(\vec{\sigma}_i) = N, \quad (4.67)$$

so sind nach Selektion und Reproduktion in der nächsten Generation $\mathfrak{P}(t+1)$

$$n_{t+1}(\vec{\sigma}_i) = \frac{\iota(\vec{\sigma}_i)}{\frac{1}{N} \sum_{\vec{\sigma}_j \in \mathfrak{P}'(t)} \iota(\vec{\sigma}_j) n_t(\vec{\sigma}_j)} n_t(\vec{\sigma}_i) = \frac{\iota(\vec{\sigma}_i)}{\iota(\mathfrak{P}'(t))} n_t(\vec{\sigma}_i) \quad (4.68)$$

Individuen desselben Typs vorhanden. Dabei ist $\iota(\mathfrak{P}'(t))$ die mittlere Fitness der Population $\mathfrak{P}'(t)$. Dies bedeutet, dass bei der hier beschriebenen *fitnessproportionalen Reproduktion* die mit $\iota(\vec{\sigma}_i) > \iota(\mathfrak{P}'(t))$ überdurchschnittlich gut bewerteten Individuen vermehrt und die schlechter bewerteten Individuen verringert werden.

Im Vergleich zu den Evolutionsstrategien scheinen genetische Algorithmen insbesondere für Aufgabenstellungen mit diskretem und/oder kombinatorischem Charakter geeignet zu sein. Dies kann vor allem durch die vergleichsweise starke Bedeutung des Kreuzungsoperators in Verbindung mit der binären Codierung des zu optimierenden Problems erklärt werden, was die Berücksichtigung großer Bereiche des zur Verfügung stehenden Parameterraumes während der Optimierung erwarten lässt.

Kapitel 5

Systembeschreibung

Wie bereits bei der Einführung der Qualitätsdatenrecherche in Kapitel 3 erwähnt, beinhaltet eine konkrete Implementierung sowohl das *System* als auch das zugehörige *Verfahren* zur Suche nach ähnlichen Datensätzen. Nachdem in Kapitel 4 die wichtigsten Grundlagen des Verfahrens dargestellt wurden, soll nun auf den Aufbau eines Systems zur Durchführung der Qualitätsdatenrecherche eingegangen werden. Dabei wird die Funktion des Gesamtsystems sowohl unter dem Aspekt der organisatorisch-technischen Maßnahmen einschließlich der Einbindung in die betrieblichen Prozesse als auch unter dem Gesichtspunkt der mathematisch-informationstechnischen Problemstellung, d. h. des Aufbaus und der Adaption des Suchverfahrens beschrieben.

Die Qualitätsdatenrecherche hat die primäre Aufgabe, *zusätzliche* Informationen aus bereits vorhandenen Daten zu gewinnen. Sie benötigt damit zunächst eine funktionsfähige „Umgebung“, welche die bei der Durchführung von Prüfungen anfallenden Prüfdaten und Ergebnisse erfasst und in einer geeigneten Struktur speichert. Die den Kern der Qualitätsdatenrecherche darstellenden mathematischen Verfahren müssen so in dieses Umfeld integriert werden, dass das Gesamtsystem einerseits den Anforderungen des „normalen“ Prüfbetriebes ohne Abstriche genügt und darüber hinaus die flexible und benutzerfreundliche Recherche in den zur Verfügung stehenden Datenbeständen erlaubt. Bild 5.1 gibt einen Überblick über die Komponenten eines Qualitätsdatenrecherchesystems. Es zeigt, wie das den Kern des Systems darstellende Erkennungssystem um die Fähigkeit zur Optimierung bzw. Adaption ergänzt und in ein geeignetes informationstechnisches Umfeld eingebunden wird.

5.1 Die Qualitätsdatenrecherche im CAQ-Umfeld

Das Ziel der Qualitätsdatenrecherche, zusätzliche Informationen aus vorhandenen Daten zu gewinnen, kann in der Praxis nur dann erreicht werden, wenn die Systemumgebung die erforderlichen Daten in geeigneter Form zur Verfügung stellt. Zum erfolgreichen Aufbau eines solchen Systems gehört demnach zunächst die Analyse und darauf aufbauend die Implementierung und Inbetriebnahme der einzelnen Komponenten des Gesamtsystems. Um eine erste Beurteilung der Anwendungsbereiche der Qualitätsdatenrecherche zu ermöglichen, sollen hier zunächst einige Überlegungen zur Durchführung von Prüfungen in der industriellen Praxis dargestellt werden.

Die Durchführung von Prüfungen orientiert sich in der Praxis an der Minimierung des Risikos, das sich im Falle der Nichterkennung von Defekten ergibt, und dem Streben nach einer wirtschaftlichen Optimierung des Gesamtsystems. Dies bedeutet, dass man in der Praxis stets versucht, so wenig wie

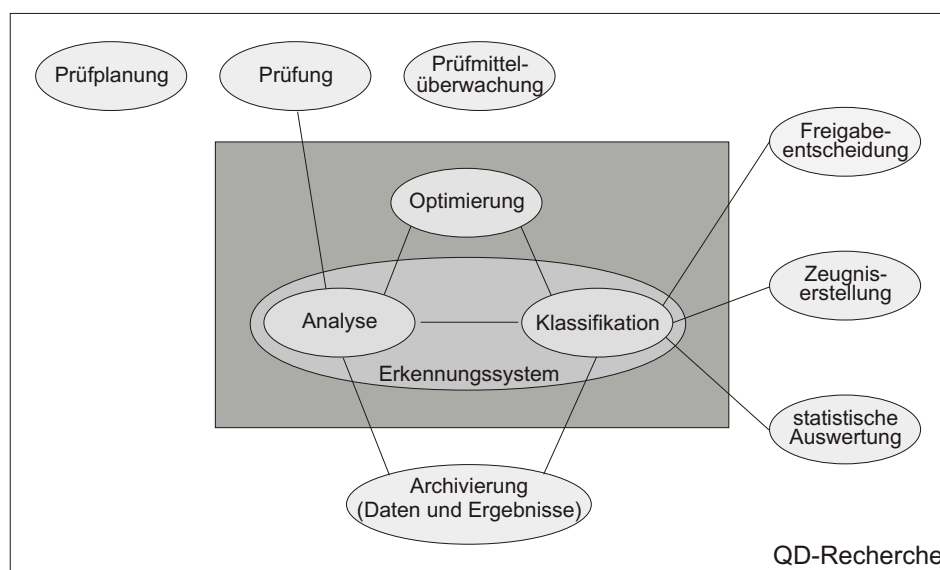


Abbildung 5.1: Kombination mathematischer mit informationstechnischen Verfahren in einem Qualitätsdatenrecherchesystem.

möglich und so viel wie nötig zu prüfen. Der für Prüfungen erforderliche Aufwand wird demnach von folgenden Faktoren beeinflusst:

- Beherrschung des Fertigungsprozesses
- Versagenskritikalität des Produktes
- Stabilität und Komplexität des Prüfverfahrens.

Betrachtet man den Produktlebenszyklus, so kann bei der Herstellung des Produktes vor allem durch die Beherrschung der Fertigungsprozesse ein positiver Einfluss erreicht werden. Die Versagenskritikalität wird in erster Linie in der Entwicklungs- und Konstruktionsphase festgelegt, während der Stabilität und Komplexität der Prüfverfahren häufig technologische Grenzen gesetzt sind. Geht man für die nachfolgenden Überlegungen von beherrschten Fertigungsprozessen aus, so bleiben als wichtigste Einflussgrößen das durch ein Versagen des Produktes entstehende Risiko sowie die Stabilität und Komplexität des Prüfverfahrens. Der individuellen Ausprägung dieser beiden Faktoren entsprechend sind in der Praxis unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Durchführung anzutreffen, auf die im Folgenden kurz eingegangen werden soll.

Den einfachsten Fall stellt die Prüfung mittels *Stichproben* dar. Dem möglichst stationär betriebenen Fertigungsprozess wird in regelmäßigen Abständen eine im Vergleich zur produzierten Menge kleine Anzahl von zu prüfenden Werkstücken entnommen. Aus den Prüfergebnissen der in dieser Stichprobe enthaltenen Prüfobjekte wird dann mit Hilfe der Statistik auf die Lage der qualitätsbestimmenden Merkmale bzw. deren Veränderung über die Zeit geschlossen. Das beschriebene Verfahren wird daher häufig auch als *statistische Prozessüberwachung* bezeichnet.

Bei der statistischen Prozessüberwachung werden meist nur die zur Überwachung des Prozesses ermittelten Kennzahlen z. B. in Form einer Regelkarte dokumentiert. Darüber hinaus ist je nach eingesetztem System auch das Führen einer Urwertkarte, welche die zugrunde liegenden Messergebnisse enthält, möglich.

Bei der 100%-Prüfung werden alle produzierten Teile einer Prüfung unterzogen. Diese Prüfung eignet sich daher vor allem bei kleinen Stückzahlen oder in Verbindung mit automatisierten Prüfeinrichtungen. Sieht man von einem je nach Durchführung der Prüfung vorhandenen Schlupf des Prüfsystems ab, kann davon ausgegangen werden, dass nach erfolgter Prüfung keine fehlerhaften Teile weiterverarbeitet oder ausgeliefert werden.

Die Einbeziehung aller Werkstücke in die Prüfung sagt zunächst noch nichts über die Dokumentation der Ergebnisse aus. Aufgrund der fehlenden Möglichkeit einer Zuordnung der Prüfergebnisse zum zugehörigen Prüfobjekt wird auf die Speicherung der Einzelergebnisse meist verzichtet. Eine Aufbereitung der Daten erfolgt häufig durch die Erstellung einer so genannten *Ausfallstatistik* sowie die Ermittlung von Kennzahlen, die eine Aussage über die Stabilität des Prozesses und das Erkennen eventuell vorhandener Trends erlauben.

Kombiniert man die 100%-Prüfung mit der Möglichkeit der individuellen Identifikation der Prüfobjekte, kann das Ergebnis der durchgeführten Prüfungen jederzeit belegbar dokumentiert werden. In Verbindung mit dem Nachweis des ordnungsgemäßen Zustandes der Prüfeinrichtung können sich Unternehmen auf diese Weise gegen mögliche Regressansprüche auf der Basis der Produkthaftung absichern. Eine weitere Verfeinerung dieses Verfahrens ist darin zu sehen, wenn nicht nur die Ergebnisse der Prüfung, sondern auch die der Auswertung zugrunde liegenden Urdaten dokumentiert werden. Dies ist in der Praxis vor allem dann von Interesse, wenn attributive Qualitätsmerkmale aus komplexen Daten (z. B. Zeitreihen oder Bilddaten) abgeleitet werden müssen.

Bei den bisher beschriebenen Prüfungen wird vorausgesetzt, dass das Prüfverfahren bzw. die zur Prüfung eingesetzte Prüfeinrichtung eine im Vergleich mit den Anforderungen an die Qualitätsmerkmale wesentlich geringere Messunsicherheit bzw. entsprechend der in Kapitel 2.2.5 eingeführten Definitionen eine geringere Stabilität aufweist. Abhängig vom Prüfverfahren kann es bei hohen Anforderungen an die Meßunsicherheit durchaus sinnvoll sein, den korrekten Zustand der Prüfeinrichtung in vergleichsweise kurzen zeitlichen Intervallen zu überprüfen. In der Regel werden dabei spezielle Werkstücke, so genannte *Masterteile* oder *Testnormale* verwendet, deren Eigenschaften hinsichtlich der betrachteten Qualitätsmerkmale sehr genau bekannt sind. Speichert man die dabei ermittelten Daten und Ergebnisse mit den an Fertigungsteilen festgestellten Daten so, dass jedes Prüfergebnis der vorhergehenden und nachfolgenden „Prüfung“ des Testnormals zugeordnet wird, so ist damit der ordnungsgemäße Zustand der Prüfeinrichtung für jedes einzelne Prüfobjekt dokumentiert.

Die Entscheidung, welcher Prüfumfang für ein bestimmtes Produkt oder Qualitätsmerkmal angewendet wird, hängt in erster Linie von den mit dem Auftreten eines Fehlers verbundenen Risiken ab. So kann die 100%-Prüfung bei der Herstellung von Produkten mit kritischen Merkmalen heute als Stand der Technik angesehen werden. Ähnliche Überlegungen werden in der Praxis auch bei der Festlegung der Maßnahmen zur Dokumentation der Ergebnisse angestellt. Entsteht durch ein fehlerhaftes Produkt ein im Vergleich zum grundsätzlich anfallenden Dokumentationsaufwand nur mäßiger (Sach-)Schaden, so wird man auf umfassende Maßnahmen zur Dokumentation der durchgeführten Prüfungen eher verzichten, als wenn erhebliche Schäden an Leib und Leben betroffener Personen zu befürchten

sind. Dies ist beispielsweise bei kerntechnischen Anlagen der Fall, bei denen der Nachweis über die durchgeführten Prüfungen mit den die Fähigkeit der Prüfeinrichtungen belegenden Daten über den Zeitraum vieler Jahre hinweg jederzeit möglich sein muss.

Konventionelle CAQ-Systeme decken einen großen Teil der im Zusammenhang mit der Durchführung von Prüfungen beschriebenen Funktionsumfänge ab. Vielfach ist jedoch festzustellen, dass im Rahmen der Qualitätsdatenrecherche ganzheitlich zu betrachtende Funktionen von verschiedenen Modulen (z. B. Prüfmittelüberwachung und Prüfdatenverwaltung) zur Verfügung gestellt werden und einander nicht mehr direkt zugeordnet werden können. Grundsätzlich steht im Zusammenhang mit der Durchführung von Prüfungen bei konventionellen CAQ-Systemen die Dokumentation und die Bewertung hinsichtlich der Produkt- oder Prozessqualität im Vordergrund.

Durch die Qualitätsdatenrecherche wird es möglich, Prüfdaten auch dann noch auswerten zu können, wenn das Prüfobjekt nicht mehr für weitere Prüfungen zur Verfügung steht. Auswertungen dieser Art sind in der Praxis vor allem für die Produkte interessant, die im Versagensfall beträchtliche Schäden erwarten lassen. Da bei dieser Gruppe von Produkten aus Gründen der Produkthaftung jedoch ohnehin ein teilweise erheblicher Aufwand zur Dokumentation der durchgeführten Prüfungen getrieben wird, stellen die Voraussetzungen für die Qualitätsdatenrecherche in der Praxis häufig nur noch einen vergleichsweise geringen Zusatzaufwand zu den ohnehin erforderlichen Maßnahmen dar.

5.1.1 Beispiel: Rohrprüfung

Um die Anschaulichkeit der nachfolgenden Beschreibung eines Qualitätsdatenrecherchesystems zu erhöhen, soll die allgemein gültige Darstellung von einem durchgängigen Beispiel begleitet werden. Als Prüfobjekt sollen *Rohre* betrachtet werden, die innerhalb des Gesamtsystems mehreren Einzelprüfungen unterzogen werden. Darunter sind zum einen „einfache“ Prüfungen wie beispielsweise die Längenprüfung, in deren Verlauf ein Zahlenwert ermittelt und mit vorgegebenen Grenzen verglichen wird. Darüber hinaus werden jedoch auch wesentlich anspruchsvollere Prüfungen betrachtet, bei denen der entlang des Umfangs ermittelte Minimal- und Maximalwert des Durchmessers über die gesamte Länge des Rohres ermittelt und auf bestimmte, für den gesuchten Fehler charakteristische Signalformen untersucht wird. Bild 5.2 zeigt beispielhaft den Durchmessererlauf eines Rohres in einem ungestörten Bereich (a) und in Bereichen, in denen der Signalverlauf aufgrund lokaler Fehlstellen gestört ist. Dabei ist zu beachten, dass die beobachtete Signalform charakteristisch für den jeweiligen Fehlertyp ist. So wird der in Bild 5.2b dargestellte Signalverlauf durch einen *Riss*, die in (c) und (d) eingezeichneten Signalformen durch regelmäßig wiederkehrende Oberflächenfehler (so genannte *Rattermarken*), die beim Schleifen entstehen, bzw. eine *Stufe* verursacht.

Obwohl der laut Spezifikation für das geprüfte Rohr zulässige Durchmesserbereich in den gezeigten Fällen an keiner Stelle überschritten wird, müssen die Abweichungen vom normalen Signalverlauf erkannt und der richtigen Ursache, d. h. dem richtigen Fehlertyp zugeordnet werden. Diese Zuordnung soll automatisch mit Hilfe eines entsprechend Bild 2.8 aufgebauten Erkennungssystems erfolgen.

Bei den dargestellten Signalen handelt es sich um so genannte *Zeitreihen*, d. h. um Signale einer unabhängigen Veränderlichen, durch welche die verschiedenen Einzelwerte z. B. über den Weg oder die Zeit den zugehörigen Bereichen des Prüfobjektes zugeordnet werden können. Diese Einschränkung auf einen Signaltyp stellt jedoch keine grundsätzliche Restriktion für die Qualitätsdatenrecherche dar.

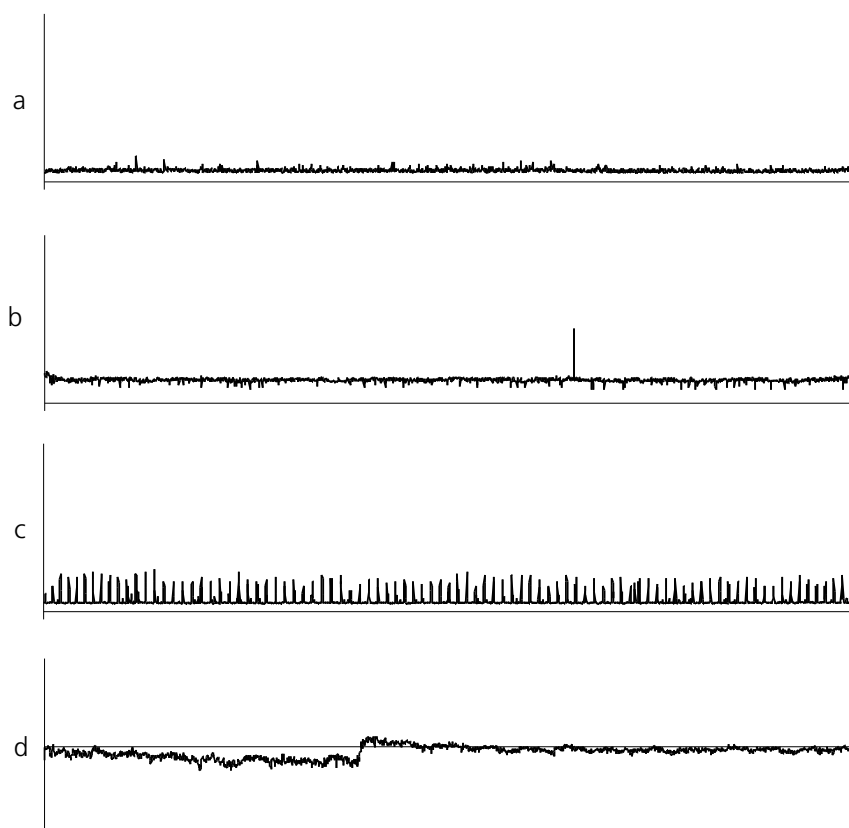


Abbildung 5.2: Beispielhafte Darstellung verschiedener Signalverläufe und Fehlerarten bei der Prüfung von Rohren: ungestörter Signalverlauf (a), Riss (b), Rattermarken (c) und Stufe (d).

Durch eine geeignete Erweiterung der Signalverarbeitungsverfahren ist eine Übertragung auf andere Signalformen (z. B. Bilddaten) jederzeit möglich.

Um die in Bild 2.8 dargestellten Signalformen voneinander unterscheiden zu können, ist die Betrachtung einzelner Werte der Zeitreihen nicht ausreichend. Es ist vielmehr erforderlich, größere Signalabschnitte in die Untersuchung einzubeziehen. Dabei stellt sich jedoch heraus, dass für die zu unterscheidenden Fehlermerkmale bzw. Klassen keine exakten analytischen Beschreibungen vorliegen. Vor diesem Hintergrund wird die für die Qualitätsdatenrecherche in Kapitel 3 aufgestellte Forderung nach der Möglichkeit zur Definition des Suchmusters anhand von Beispielen deutlich. Wie im weiteren Verlauf der Arbeit noch detaillierter dargestellt wird, adaptiert sich das Erkennungssystem mit Hilfe geeigneter Lernverfahren an die durch Beispiele zur Verfügung gestellten Signalformen und ermöglicht damit das Auffinden ähnlicher Signalverläufe in den zu analysierenden Daten.

5.2 Modellierung des Gesamtsystems

Bei der nachfolgenden Beschreibung eines die Qualitätsdatenrecherche ermöglichenden Gesamtsystems soll entsprechend der im Bereich der Softwareentwicklung verbreiteten Methode der *objektorientierten Analyse (OOA)* vorgegangen werden. Im Rahmen der objektorientierten Systementwicklung stellt die objektorientierte Analyse den ersten Schritt dar, auf den in der Regel der objektorientierte Entwurf (OOD) und die Implementierungs- und Testphasen folgen. In der Literatur wurden in den vergangenen Jahren eine ganze Reihe von Entwicklungsprozessen beschrieben, die unterschiedliche Ansätze, z. B. die lineare Entwicklung mit einem so genannten „Wasserfallmodell“ oder iterative Vorgehensweisen verfolgen, sowie spezielle Randbedingungen bestimmter Auftraggeber, z. B. Behörden, berücksichtigen [91, 25, 53, 3]. Die Vorgehensweise für die im Folgenden dargestellte Beschreibung eines Systems zur Qualitätsdatenrecherche orientiert sich an dem in [1] beschriebenen Analyseprozess. Dieser verbindet die wesentlichsten Konzepte aktueller Entwicklungsprozesse zu einem äußerst universell einsetzbaren Gesamtprozess, der aufgrund der in Form von Checklisten beschriebenen methodischen Regeln schnell in der Praxis angewandt werden kann.

Nach [1] ist das Ziel der Analyse, „die Wünsche und Anforderungen eines Auftraggebers an ein neues Softwaresystem zu ermitteln und zu beschreiben.“ Dabei „muss ein Modell des Fachkonzeptes erstellt werden, das konsistent, vollständig, eindeutig und realisierbar ist. Es ist wichtig, dass bei der (System-)Analyse alle Aspekte der Implementierung bewusst ausgeklammert werden.“ Da das Ergebnis der Analyse damit ein Modell des zu realisierenden Systems liefert, werden im Folgenden die Begriffe *Analyse* und *Modellierung* synonym verwendet.

Nachdem die *Anforderungen* an ein Qualitätsdatenrecherchesystem bereits in Kapitel 3 ausführlich dargestellt wurden, steht hier die *Beschreibung* des Systems unter dem Gesichtspunkt der Modellbildung im Vordergrund. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Integration der mathematischen Verfahren in die im Rahmen der Erfassung und Verarbeitung von Prüfdaten üblichen Abläufe.

Wie in Bild 5.3 zu erkennen, bestehen die Ergebnisse der Analyse üblicherweise aus einem Pflichtenheft für das Gesamtsystem, einem OOA-Modell und einem Prototyp der Bedienoberfläche. Diese werden in der anschließenden Entwurfsphase in einem OOD-Modell weiterentwickelt, wobei bereits Implementierungsentscheidungen, z. B. hinsichtlich zu verwendender Klassenbibliotheken und Datenbanksysteme, berücksichtigt werden. Für die nachfolgenden Ausführungen wird der Schwerpunkt auf die Beschreibung eines Qualitätsdatenrecherchesystems mit Hilfe des objektorientierten Analysemodells gelegt. Für die formalen Beschreibungen mit Hilfe von Diagrammen wird dabei auf die von GRADY BOOCH, IVAR JACOBSON und JAMES RUMBOUGH entwickelte *Unified Modeling Language (UML)* zurückgegriffen, die sich als graphische Standard-Notation für objektorientierte Inhalte etabliert hat. Nähere Informationen zur UML sind in [10, 67, 30] sowie in der Beschreibung des Standards [66] zu finden.

5.2.1 Beschreibung des Systems mit Use Cases

Den Ausgangspunkt für die OOA stellt die Identifikation von so genannten *Use Cases* dar. Der Begriff *Use Case* geht auf Ivar Jacobson zurück und wurde 1992 in [46] beschrieben. Seit dieser Zeit haben Use Cases in den meisten objektorientierten Methoden und auch in der UML einen festen Platz.

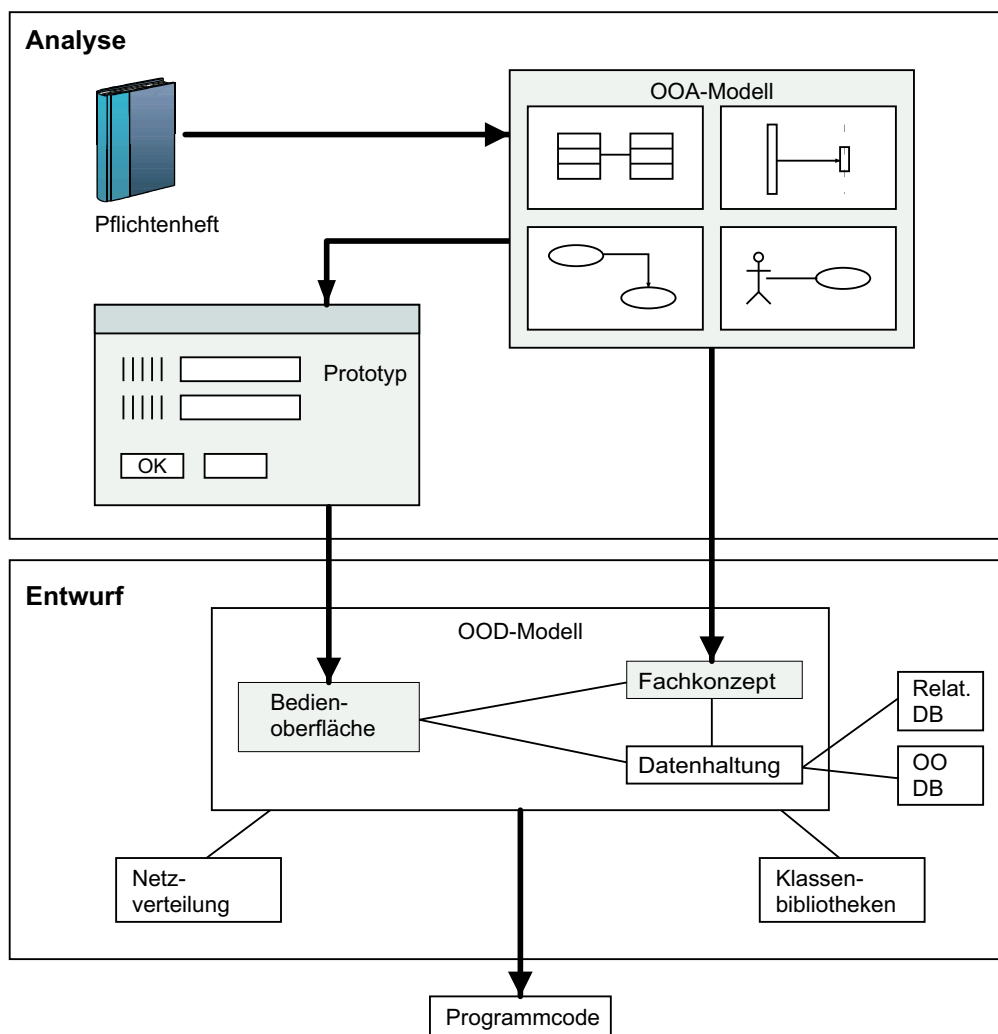


Abbildung 5.3: Ergebnisse (Artefakte) der Analyse- und Entwurfsphase bei der objektorientierten Systementwicklung nach [1].

Use Cases sollen hier im Sinne von *Geschäftsprozessen* verwendet werden. Ein Use Case besteht nach [1] aus mehreren zusammenhängenden Aufgaben, die von einem Akteur durchgeführt werden, um ein Ziel zu erreichen bzw. ein gewünschtes Ergebnis zu erstellen. Dabei versteht man unter einem *Akteur* eine Rolle, die ein Benutzer des Systems spielt und die einen gewissen Einfluss auf das System hat. Akteure sind häufig Personen, können jedoch auch von Organisationseinheiten oder externen Systemen verkörpert werden, die mit dem zu beschreibenden System kommunizieren. Die Akteure befinden sich damit stets *außerhalb* des Systems.

Die Beschreibung von Use Cases erfolgt meist umgangssprachlich. Bei umfangreicheren Systemen kann für die Beschreibung ein so genanntes *Template* verwendet werden, mit dem eine Gliederung des Use Cases vorgegeben wird. Neben dem Namen des Use Cases, dem Ziel, den beteiligten Akteuren, Vor- und Nachbedingungen bildet die eigentliche Beschreibung den Kern des Use Cases. Neben dem

Standardfall, d. h. dem in der Praxis am häufigsten auszuführenden Falle werden dabei auch *Erweiterungen*, die zusätzlich zu einer Aktion des Standardfalls auszuführen sind, und *Alternativen*, die eine Aktion der Standardverarbeitung ersetzen, berücksichtigt.

Einen Überblick über die für das Qualitätsdatenrecherchesystem identifizierten Use Cases liefert das in Bild 5.4 dargestellte Use Case-Diagramm. Der in der UML festgelegten Notation entsprechend werden die Anwendungsfälle dargestellt. Die Akteure werden, unabhängig davon, ob es sich um Personen oder externe Systeme handelt, durch Strichmännchen repräsentiert. Eine Linie zwischen Akteur und Use Case bedeutet, dass eine Kommunikation stattfindet, d. h. dass ein durch den Akteur initiiertes, von dem betrachteten System bewirkter Einfluss auf die Systemumgebung ausgeübt wird.

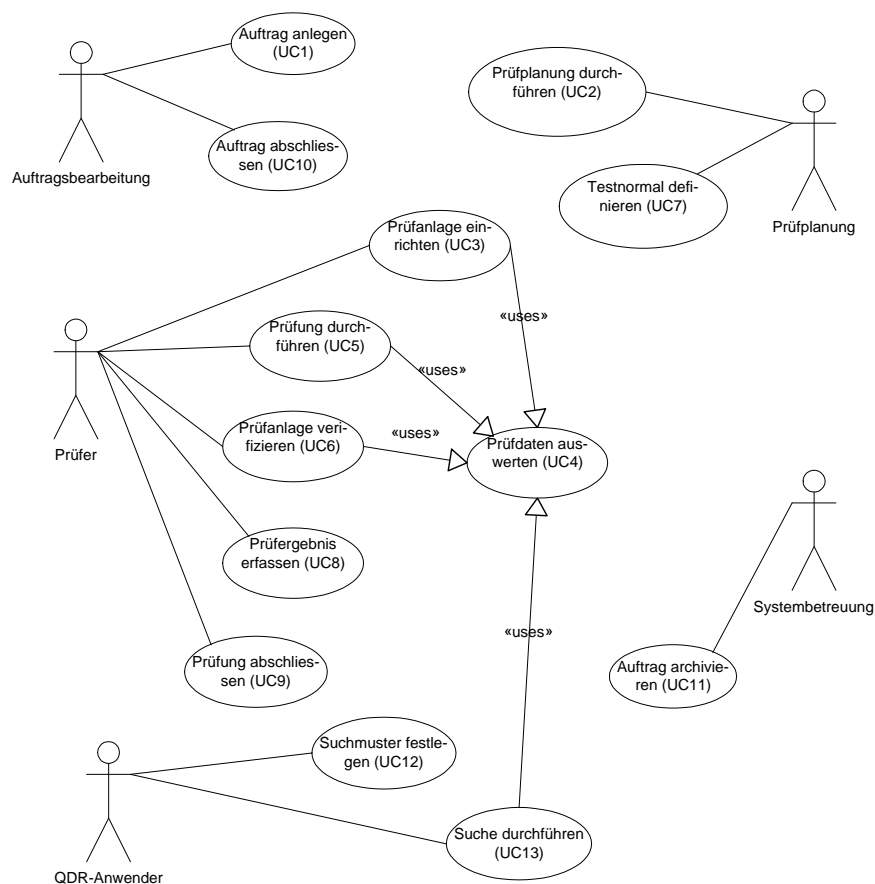


Abbildung 5.4: Das Anwendungsfalldiagramm des Qualitätsdatenrecherchesystems beschreibt die ergebnisorientierten Arbeitsabläufe bei der Benutzung durch die Anwendergruppen (Akteure). Durch das Diagramm wird deutlich, dass sowohl der mit der Qualitätsdatenrecherche als auch die mit den Prüfungen in Verbindung stehenden Anwendungsfälle auf der gemeinsam genutzten Fähigkeit zur Auswertung von Prüfdaten beruhen.

Die dargestellten Use Cases lassen sich in zwei Gruppen unterteilen: Die mit UC1 bis UC11 bezeichneten Use Cases beschreiben überwiegend die auch im „normalen“ Prüfbetrieb anzutreffenden

Abläufe, die jedoch gemäß den Anforderungen der Qualitätsdatenrecherche erweitert wurden. Sie entsprechen damit den in Kapitel als organisatorisch-technisch bezeichneten Komponenten. Die Use Cases UC12 und UC13 verkörpern die durch die Qualitätsdatenrecherche in das System eingebrachte Zusatzfunktionalität, wobei sich die mathematisch-informationstechnischen Komponenten vor allem auf UC13 konzentrieren.

Für die Use Case-Beschreibung des Qualitätsdatenrecherchesystems werden die in Tabelle 5.1 aufgeführten Rollen verwendet. Im Gegensatz zu den meisten Use Cases, die direkt mit einem der Akteure kommunizieren, existieren für „Prüfdaten auswerten“ nur Verbindungen zu anderen Use Cases. „Prüfdaten auswerten“ beschreibt ein Verhalten, das von mehreren Use Cases gemeinsam genutzt und nur ein einziges Mal modelliert wird und das den Kern eines jeden Qualitätsdatenrecherchesystems darstellt.

Auftragsbearbeitung	Anlegen und Abschließen von (Fertigungs-)Aufträgen, Eingabe und Pflege auftragsbezogener Produktdaten (Bestellmenge, Produkt . . .)
Prüfplanung	Umsetzung der Qualitätsanforderungen in Vorgaben für die durchzuführenden Prüfungen
Prüfer	Durchführung von Prüfungen unter Berücksichtigung der von der Prüfplanung gemachten Vorgaben
Systembetreuung	Unterstützung des Systembetriebs z. B. durch die Auslagerung von Prüfdaten abgeschlossener Aufträge
QDR-Anwender	Anwender des Qualitätsdatenrecherchesystems zur Durchführung von Auswertungen

Tabelle 5.1: Beschreibung der Rollen der Akteure eines Qualitätsdatenrecherchesystems.

Bild 5.5 zeigt eine für das System typische Abfolge der Use Cases und ordnet diese den Hauptakteuren bzw. den durch sie repräsentierten Rollen zu.

Die Darstellung von template-basierten Use Cases erfolgt in der Praxis häufig mit Hilfe von Tabellen. Da für die vorliegende Arbeit vor allem das grundlegende Systemverständnis und nicht die vollständige Entwicklungsdokumentation im Mittelpunkt des Interesses steht, sollen hier nur die wichtigsten Aspekte der Use Cases dargestellt werden, wobei sich die Beschreibung der Abläufe auf den Standardfall beschränkt.

Auftrag anlegen (UC1)

Ziel dieses Use Cases ist es, einen neuen (Fertigungs-)Auftrag bzw. die zu einem Auftrag gehörenden produkt- und qualitätsrelevanten Informationen für die nachfolgenden am Produktionsprozess beteiligten Prozessschritte verfügbar zu machen. Als Beispiele können hier die Artikelnummer, die bestellte Menge, Lieferzeiten, Abmessungen und Qualitätsvorgaben (Toleranzen) genannt werden.

Für die Modellierung des Systems wird die Zuständigkeit für das Anlegen neuer Aufträge der Rolle *Auftragsbearbeitung* zugeschrieben. Das Anlegen von Aufträgen ist in dem hier betrachteten Kontext an der Schnittstelle zwischen dem Verwaltungs- und dem Fertigungsbereich angesiedelt. Durch die Einführung der Rolle *Auftragsbearbeitung* können die mit dem Use Case verbundenen Tätigkeiten nun

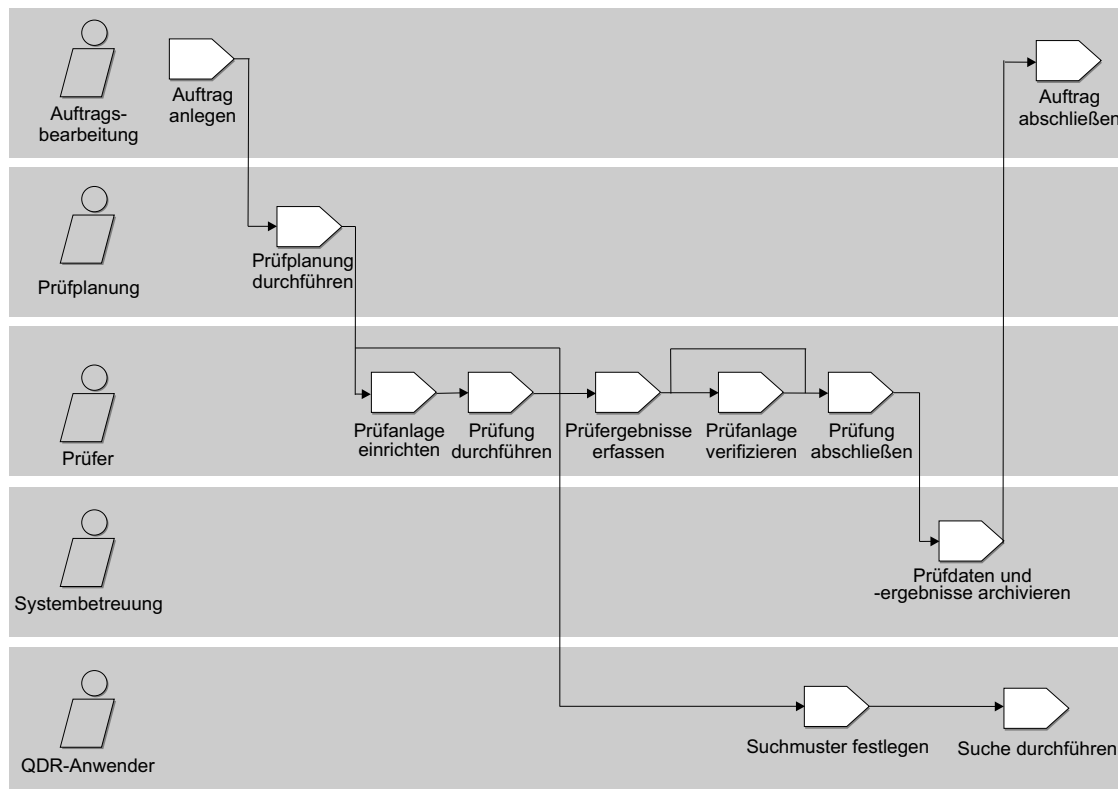


Abbildung 5.5: Typische Abfolge und Rollenzuordnung der einzelnen Prozessschritte innerhalb eines Qualitätsdatenrecherchesystems. Die im Bild nicht dargestellten Use Cases *Testnormal definieren* und *Prüfdaten auswerten* werden unabhängig von dem in der Darstellung zugrunde gelegten Ablauf der auftragsbezogenen Prüfung durchgeführt oder werden von den dargestellten Use Cases implizit genutzt.

organisatorisch einem der genannten Bereiche zugeordnet werden, ohne die Modellierung anpassen zu müssen.

Der Standardablauf des Use Cases sieht vor, dass die zu dem anzulegenden Auftrag gehörenden Daten eingegeben werden. Alternativ dazu soll es jedoch auch möglich sein, einen Auftrag des Bestandes zu kopieren und nur ausgewählte Daten zu ändern.

Prüfplanung durchführen (UC2)

Mit diesem Use Case sollen die Voraussetzungen für die in späteren Prozessschritten durchzuführenden Prüfungen festgelegt und dokumentiert werden. Da im Zusammenhang mit der Qualitätsdatenrecherche von einer 100%-Prüfung der Teile auszugehen ist, beschränkt sich die Prüfplanung auf die Festlegung der durchzuführenden Prüfungen und der Rückweisgrenzen. Sofern die in UC6 beschriebene Vorgehensweise zur Überwachung der Prüfeinrichtungen angewandt wird, ist ggf. auch das zu verwendende Testnormal festzulegen.

Für die Durchführung der Prüfplanung kann von dem Ablauf

- Auftrag auswählen
- durchzuführende Prüfungen festlegen
- Rückweiskgrenzen festlegen

ausgegangen werden.

Prüfanlage einrichten (UC3)

Mit diesem Use Case sollen die zur Prüfung eingesetzten Prüfeinrichtungen für die nachfolgenden Prüfungen vorbereitet und qualifiziert werden. Im mechanisch/elektrischen Bereich kann das Einrichten der Prüfanlage die Anpassung an die zu prüfende Teileart bzw. deren Abmessungen sowie die Justage und Einstellung von Sensoren und Messgeräten beinhalten. Im Hinblick auf das hier im Vordergrund stehende Softwaresystem ist in diesem Zusammenhang neben der Unterstützung des Einrichtprozesses vor allem die Dokumentation des Anlagenzustandes von Bedeutung. Sofern die Überwachung der Prüfeinrichtung mit einem Testnormal, das ein oder mehrere Qualitätsmerkmale bekannter Stärke umfasst, durchgeführt wird, ist es nahe liegend, dieses auch für die Einrichtung der Prüfeinrichtung zu verwenden.

Als Standardablauf kann die Folge

- Testmerkmale auf dem Testnormal auswählen
- Prüfeinrichtung auf Sollwerte und Rückweiskgrenzen einstellen
- Einstellungen mit Hilfe eines Testnormals überprüfen und ggf. korrigieren

angesehen werden. Alternativ zu diesem Ablauf ist jedoch auch die manuelle Erfassung des Einstellzustandes möglich.

Sofern beim Einrichten der Prüfanlage ein Testnormal verwendet wurde, müssen die erfassten Daten wie die im normalen Prüfbetrieb anfallenden Daten analysiert und bewertet werden. Da es sich hierbei um einen Vorgang handelt, der offensichtlich in mehreren Use Cases eine Rolle spielt, wird er in dem nachfolgend als UC4 beschriebenen Use Case separaterläutert. Wie in Bild 5.4 dargestellt wird der Use Case „Prüfdaten auswerten“ über die «Uses»-Beziehung von den Use Cases „Prüfanlage einrichten“, „Prüfung durchführen“, „Prüfanlage verifizieren“ und „Suche durchführen“ verwendet.

Prüfdaten auswerten (UC4)

Der Use Case „Prüfdaten auswerten“ hat das Ziel, aus den bei der Prüfung erfassten Signalen die in der Prüfplanung festgelegten Merkmale zur Beurteilung der Qualität zu ermitteln. Er stellt damit die in Kapitel 4.1 beschriebene Funktionalität eines Erkennungssystems für das Qualitätsdatenrecherchesystem zur Verfügung. Die eingesetzten Auswerteverfahren reichen vom einfachen Vergleich mit einem

Sollwert bis zu aufwendigen, die Signalform analysierenden und vom Anwender mit Hilfe von beispielhaften Signalmustern zu trainierenden Verfahren. Eine detaillierte Beschreibung dieser den Kern der Qualitätsdatenrecherche darstellenden Verfahren folgt in Abschnitt 5.3.1.

Wie in dem in Bild 5.4 dargestellten Use Case- Diagramm veranschaulicht, kommuniziert „Prüfdaten auswerten“ nicht direkt mit einem Akteur. Stattdessen wird es von verschiedenen anderen Use Cases über eine «Uses»-Beziehung angesprochen: von UC3 (Prüfanlage einrichten), UC5 (Prüfung durchführen), UC6 (Prüfanlage verifizieren) und UC13 (Suche durchführen). Durch die Beschreibung in einem eigenen Use Case wird es möglich, in mehreren Abläufen in gleicher Weise gefordertes Systemverhalten bereits in einer sehr frühen Phase zu identifizieren und zu dokumentieren.

Prüfung durchführen (UC5)

Mit diesem Use Case soll der Zustand eines oder mehrerer Qualitätsmerkmale eines Prüflings ermittelt und dokumentiert werden. Die Voraussetzung dafür ist, dass die verwendete Prüfanlage eingerichtet (UC3) und verifiziert (UC6) ist. Bei der Abarbeitung des Use Cases werden UC4 (Prüfdaten auswerten) und UC8 (Prüfergebnis erfassen) angesprochen.

Die Durchführung einer Prüfung kann durch folgenden Ablauf beschrieben werden:

- Prüfobjekt identifizieren
- Prüfdaten erfassen
- Prüfdaten zum Zwecke der Archivierung speichern
- Ist-Werte unter Verwendung von UC4 (Prüfdaten auswerten) für zu prüfende Merkmale ermitteln
- Ist-Werte über UC8 (Prüfergebnis erfassen) mit Soll-Werten vergleichen und
- Prüfergebnis dokumentieren.

Prüfanlage verifizieren (UC6)

Dieser Use Case hat das Ziel, den ordnungsgemäßen Zustand der Prüfeinrichtung zu überprüfen und zu dokumentieren. Die Intention des Use Cases entspricht damit weitgehend der Prüfmittelüberwachung eines konventionellen CAQ-Systems.

Die Überprüfung von Prüfeinrichtungen erfolgt in vielen Fällen mit Hilfe eines *Testnormal*s. Dabei handelt es sich um ein dem Prüfobjekt hinsichtlich des zu prüfenden Qualitätsmerkmals ähnliches Werkstück. Um eine belastbare Aussage über die Fähigkeit der Prüfeinrichtung zu ermöglichen, muss die Ausprägung des betrachteten Qualitätsmerkmals mit einer im Vergleich zur Messunsicherheit der Prüfeinrichtung deutlich höheren Genauigkeit bekannt sein. Entsprechend der Möglichkeiten der Prüfanlage kann das Testnormal auch mehrere Qualitätsmerkmale verkörpern. In diesen Fällen kann wie in UC7 beschrieben eine detaillierte Definition des Testnormal erforderlich werden.

Aufgrund der engen Verknüpfung der Prüfanlagenverifikation mit den an Prüfobjekten durchgeführten Prüfungen wird der Use Case hier über einen Akteur der Rolle *Prüfer* mit dem nachfolgenden Standardablauf ausgeführt.

- Ist-Werte für Merkmale des Testnormals erfassen
- Ist-Werte mit Soll-Werten aus Definition des Testnormals vergleichen
- Ergebnis der Verifikation dokumentieren.

Testnormal definieren (UC7)

Um die eingesetzten Prüfeinrichtungen wie in UC6 beschrieben mit Hilfe von Testnormalen verifizieren zu können, müssen die für diesen Prozess erforderlichen spezifischen Eigenschaften der eingesetzten Testnormale im System bekannt sein. Im einfachsten Fall ist es dabei ausreichend, das Testnormal, das zugehörige Qualitätsnormal mit Ist-Wert im System zu hinterlegen. Bei Testnormalen, die mehrere Qualitätsmerkmale oder Ausprägungen von Qualitätsmerkmalen verkörpern, kann es darüber hinaus erforderlich sein, z. B. den Ort der verschiedenen Ausprägungen oder Merkmalsverkörperungen festzulegen. In diesem Fall ist bei der Verifikation eines Prüfsystems die automatische Auswertung der Prüfdaten zur Ermittlung der Qualitätsmerkmale möglich.

Der Standardablauf bei der Definition eines Testnormals kann demnach wie folgt beschrieben werden:

- Testmerkmal(e) des Testnormals eingeben
- Soll-Wert(e) für Testmerkmal(e) eingeben.

Ergänzend kann für den oben beschriebenen Fall mehrerer Testmerkmale oder Merkmalsausprägungen auf einem Testnormal die

- Festlegung der Orte der Testmerkmale oder Merkmalsausprägungen auf einem Testnormal

erforderlich sein.

Prüfergebnis erfassen (UC8)

Mit der Erfassung von Prüfergebnissen sollen die Durchführung von Prüfungen und die dabei ermittelten Ergebnisse dokumentiert werden. Entsprechend der Art der Prüfung kann dies sowohl für Prüfungen erfolgen, die außerhalb des Systems durchgeführt werden, so dass nur die Ergebnisse zu dokumentieren sind. Der Use Case deckt aber auch die Fälle ab, in denen die Prüfdaten wie in UC5 beschrieben innerhalb des Systems erfasst und ausgewertet werden.

Im Hinblick auf die Zuordnung der Prüfergebnisse zu einem Prüfobjekt wird mit der Erfassung der Ergebnisse in der Regel auch die Identifikation des Prüfobjektes einhergehen, da nur so die vielfach geforderte Rückverfolgbarkeit sichergestellt werden kann. Die Erfassung von Prüfergebnissen kann somit für den Standardfall durch folgenden Ablauf beschrieben werden:

- Prüfobjekt identifizieren
- Prüfergebnis erfassen
- Prüfergebnis dokumentieren.

Für den in UC5 beschriebenen Fall von innerhalb des Systems durchgeführten Prüfungen sind alternativ die Schritte

- Identifikation des Prüfobjektes von Prüfeinrichtung übernehmen
- Prüfergebnis von Prüfeinrichtung übernehmen

erforderlich.

Prüfung abschließen (UC9)

Um die Qualität von industriell hergestellten Produkten sicherstellen zu können, müssen in den meisten Fällen mehrere Qualitätsmerkmale ermittelt und beurteilt werden. Dabei werden in der Praxis meist unterschiedliche Arten von Qualitätsmerkmalen (maßliche und Werkstoffeigenschaften, Oberflächenbeschaffenheit etc.) betrachtet. Da die verschiedenen Prüfungen häufig nicht an einem Prüfplatz durchgeführt werden können, müssen auch die Prüfergebnisse oft in mehreren Stufen erfasst und zusammengeführt werden. Wenn alle Prüfungen vollständig durchgeführt worden sind, muss daraus das Gesamtergebnis ermittelt werden. Im einfachsten Fall erfolgt dies nach der Forderung, dass alle Prüfungen mit positivem Ergebnis abgeschlossen werden mussten. Abhängig von den Materialkosten und der bei der Verarbeitung erzielten Wertschöpfung sind dabei jedoch auch differenziertere Betrachtungen anzustellen. Demzufolge muss als Ergebnis jeder Einzelprüfung außer dem Gut- und dem Schlechtfall auch noch die Möglichkeit der Nacharbeit des jeweiligen Werkstücks betrachtet werden. Abhängig von den Prüf- und Nacharbeitskosten ist es dabei wiederum möglich, die Verwendungsentcheidung unmittelbar nach den Einzelprüfungen oder erst bei der Ermittlung des Gesamtergebnisses zu treffen.

Der Rahmen für den Abschluss der Prüfung eines Werkstücks kann damit durch folgenden Standardablauf beschrieben werden:

- Prüfobjekt identifizieren
- Status der durchgeführten Prüfungen abfragen
- Gesamtstatus ermitteln
- Gesamtstatus dokumentieren.

Auftrag abschließen (UC10)

Mit dem Abschließen eines Auftrages wird die Bearbeitung, d. h. im Rahmen des hier betrachteten Systems in erster Linie die Prüfung der zu dem Auftrag gehörenden Produkte formal beendet. Dieser Schritt ist vor allem im Hinblick auf die im Workflow nachfolgenden Prozesse wichtig, da diese vielfach erst mit diesem formalen Schritt gestartet werden. Häufig wechselt mit dem Abschluss eines Auftrages auch die organisatorische Verantwortung, so dass dieser Use Case wie bereits das Anlegen von Aufträgen einem die Rolle der *Auftragsbearbeitung* verkörpernden Akteur zugeschrieben wird.

Abhängig vom Produkt und den Anforderungen an die Dokumentation der Fertigungsprozesse kann der Abschluss eines Auftrages im Standardfall folgende Prozessschritte beinhalten:

- Statistiken erstellen
- Zeugnisse erstellen
- Bearbeitungsstatus auf *abgeschlossen* setzen.

Auftrag archivieren (UC11)

Der Use Case „Auftrag archivieren“ hat das Ziel, die langfristige Dokumentation der mit dem Auftrag verbundenen Daten zu sichern. Im Gegensatz zu den bisher betrachteten Use Cases handelt es sich hier um einen unterstützenden Prozess, der normalerweise keinen unmittelbaren Einfluss auf den Auftrag selbst hat. Die Bedeutung der Archivierung der Auftragsdaten wird vielmehr vor dem Hintergrund der in vielen Fällen bestehenden Dokumentationspflicht der durchgeführten Prüfungen und der Möglichkeit nachfolgender Auswertungen mit Hilfe des Verfahrens der Qualitätsdatenrecherche deutlich.

Für die Ausführung des Use Cases wurde die neue Rolle *Systembetreuung* eingeführt. Der Standardablauf sieht vor allem das Kopieren aller zum Auftrag gehörenden Informationen auf ein Archivierungsmedium vor. Ergänzend können die Daten nach dem erfolgreichen Kopieren im ursprünglichen System gelöscht werden.

Suchmuster festlegen (UC12)

Dieser Use Case beschreibt einen Prozess außerhalb der „normalen“ Prüfung von Werkstücken. Er hat das Ziel, die bei einer nachfolgenden Suche im Rahmen der Qualitätsdatenrecherche zu verwendenden Suchmuster interaktiv festzulegen. Entsprechend der in Kapitel 3 aufgestellten Forderung nach einer anwenderfreundlichen Festlegung der Suchmuster mit Hilfe beispielhaft ausgewählter, dem gesuchten Signalverlauf ähnlicher Muster, liegt der Schwerpunkt dieses Use Cases in der Bereitstellung geeigneter graphisch interaktiver Hilfsmittel. Darüber hinaus sollen jedoch auch alle im Zusammenhang mit dem Suchmuster stehenden Informationen gespeichert und mit ergänzenden, die Wiederverwendbarkeit ermöglichenden Fakten versehen werden.

Im Standardfall kann die Festlegung von Suchmustern für die Qualitätsdatenrecherche durch folgenden Ablauf beschrieben werden:

- neue Suche anlegen, d. h. Ziel der Suche beschreiben und zugehörige Metadaten erfassen
- Suchmuster (graphisch) festlegen, d. h. aus im System vorhandenen Signalverläufen auswählen.

Als Erweiterung des Ablaufes können zusätzliche, ergänzende Suchbedingungen, z. B. die Eingrenzung des Fehlerortes auf einen bestimmten Bereich des Werkstücks, festgelegt werden. An Stelle der beschriebenen Neudefinition eines Suchmusters ist es auch möglich, eine bereits bestehende Suche zu laden und den Anforderungen entsprechend anzupassen. Auf weitere Details der Festlegung von Suchmustern wird in Kapitel 6.3 eingegangen.

Suche durchführen (UC13)

Die Durchführung einer Suche im Rahmen der Qualitätsdatenrecherche umfasst den mathematischen Teil der in Kapitel 3.4.2 beschriebenen Komponenten eines Qualitätsdatenrecherchesystems. Ziel des Use Cases bzw. der Suche im Rahmen der Qualitätsdatenrecherche ist es, zu den in UC12 festgelegten Mustern ähnliche Signalverläufe in dem durchsuchten Datenbestand aufzufinden. Die hier beschriebene Auswertung „alter“ Datenbestände wird im Normalfall außerhalb des fertigungsbegleitenden Prüfbetriebes durchgeführt, so dass für UC12 und UC13 die Rolle des QDR-Anwenders eingeführt wurde.

Da auf die Suche innerhalb der Qualitätsdatenrecherche und die dabei verwendeten Verfahren in Abschnitt 5.3.1 noch detailliert eingegangen wird, sollen hier für den Standardablauf nur die wichtigsten Punkte dargestellt werden:

- Suchraum eingrenzen
- Suche durchführen
- Suchergebnis beurteilen.

Die Identifikation und Dokumentation der Use Cases stellt einen ersten Schritt zur Modellierung des Gesamtsystems dar. Die in den Use Cases beschriebenen Prozesse bilden den Ausgangspunkt für die Entwicklung eines *statischen* und eines *dynamischen* Modells des Systems. Dabei bietet es sich an, das Gesamtsystem in die in Bild 5.6 dargestellten Teilsysteme oder Pakete aufzuteilen. Sie können bei der weiteren Analyse weitgehend eigenständig betrachtet werden und stellen hier gleichzeitig verschiedene Ausbaustufen des Systems, beginnend bei der reinen Erfassung, Verwaltung und Dokumentation von Prüfergebnissen über die Durchführung und Dokumentation von Prüfungen innerhalb des Systems bis zum Maximalausbau, der Qualitätsdatenrecherche, dar.

5.2.2 Statisches Modell des Systems

Mit dem statischen Modell des Systems sollen die Bestandteile oder *Objekte* des Systems und die zwischen ihnen bestehenden Beziehungen oder *Assoziationen* identifiziert und dokumentiert werden. Im allgemeinen Sprachgebrauch bezeichnet Objekt einen Gegenstand des Interesses, insbesondere einer Beobachtung, Untersuchung oder Messung. Objekte können ganz allgemein Dinge, Personen oder Begriffe sein.

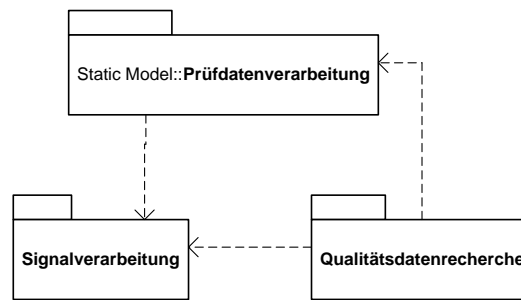


Abbildung 5.6: Paketdiagramm für die Teilkomponenten eines Qualitätsdatenrecherchesystems.

In der objektorientierten Softwareentwicklung besitzt ein Objekt einen bestimmten *Zustand* und reagiert mit einem definierten *Verhalten* auf seine Umgebung. Ein Objekt kann ein oder mehrere Objekte kennen, was durch Verbindungen zwischen den Objekten beschrieben wird. Der Zustand des Objektes wird mit Hilfe von *Attributen* bzw. deren aktuellem Wert und durch die Verbindungen zu anderen Objekten festgelegt. Das Verhalten wird durch eine Menge von für den Typ des Objektes charakteristischen Operationen beschrieben. Als Beispiel für ein Objekt im Rahmen eines Systems zur Verwaltung und Verarbeitung von Prüfdaten kann ein bestimmtes Prüfergebnis betrachtet werden. Durch das Attribut *Istwert* wird eine Eigenschaft des Ergebnisses beschrieben, die Methode *berechneErgebnis* beinhaltet das Verhalten für die Bewertung des Istwertes zur Ermittlung des Ergebnisses (z. B. Gut, Nacharbeit, Ausschuss), das in einem weiteren Attribut gespeichert wird.

Im realen System werden in vielen Fällen mehrere Objekte eines Typs existieren. In dem oben genannten Beispiel entspricht ein Objekt genau dem Ergebnis einer Prüfung, das an einem bestimmten Werkstück ermittelt wurde. Das betrachtete Objekt stellt damit quasi eine ganz bestimmte, eindeutig identifizierbare Verkörperung von allen Objekten dieses Typs gemeinsamen Eigenschaften dar. Zur Beschreibung dieses Sachverhaltes bietet die objektorientierte Softwareentwicklung das Konzept der *Klasse*. Damit legt die Klasse die Struktur (Attribute) und das Verhalten aller von ihr instanziierten Objekte fest.

Die UML stellt Klassen und Objekte in einem Rechteck dar, das horizontal in bis zu drei Bereiche unterteilt sein kann. Der oberste Abschnitt enthält wie in Bild 5.7 den Klassen- bzw. Objektnamen, die beiden anderen Bereiche die Merkmale und Methoden. In der Praxis werden diese häufig nur bei der Darstellung von Klassen explizit aufgeführt.

Mit Hilfe von *Assoziationen* können in der UML Verbindungen zwischen Objekten modelliert werden. Obwohl Assoziationen streng genommen nur zwischen Objekten bestehen, ist es üblich, auch von Assoziationen zwischen Klassen zu sprechen. Die in der UML zwischen Klassen dargestellten Assoziationen bezeichnen somit die Menge aller zwischen Objekten der betrachteten Klassen bestehenden Verbindungen. Die Kardinalitäten der in Bild 5.8 zwischen den Klassen „Prüfobjekt“ und „Prüfung“ eingezeichneten Assoziation fassen die mit Hilfe der Objekte exemplarisch dargestellten Beziehungen zwischen den Objekten der beiden Klassen zusammen.

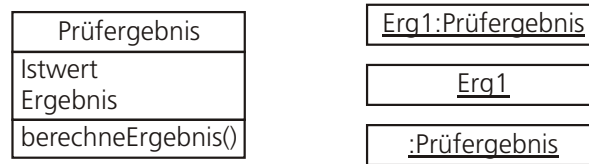


Abbildung 5.7: Graphische Darstellung einer Klasse (links) und der von ihr instanziierten Objekte (rechts) in der UML. Objekte werden generell durch das Unterstreichen des Namens gekennzeichnet. Bei der vollständigen Benennung werden Objekt- und Klassenname durch einen ‚:‘ getrennt. Alternativ kann auf die Angabe des Klassen- oder Objektname verzichtet werden.

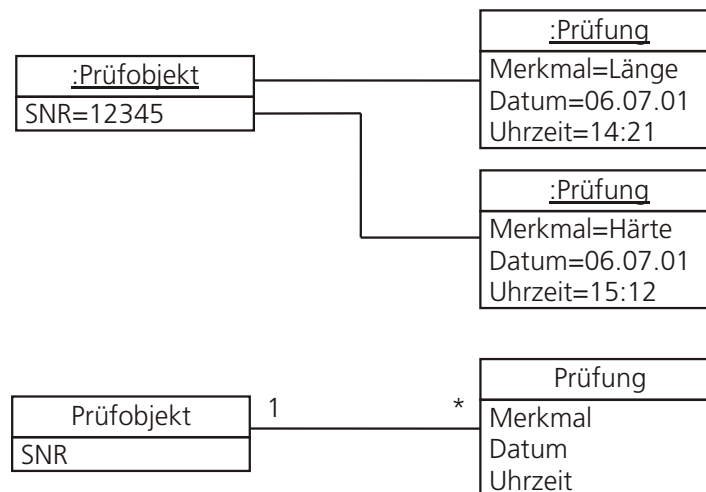


Abbildung 5.8: An einem bestimmten durch eine Seriennummer identifizierbaren Prüfobjekt können mehrere Prüfungen, z. B. hinsichtlich der geometrischen Eigenschaften (Länge) und der Materialeigenschaften (Härte), durchgeführt werden. Dieser zwischen den dargestellten Objekten exemplarisch aufgezeigte Zusammenhang wird in der Klassendarstellung durch die Kardinalitäten ‚1‘ und ‚*‘ ausgedrückt: *Einem* Prüfobjekt können *beliebig viele* Prüfungen zugeordnet werden.

Mit Hilfe von Klassen- und Objektdiagrammen soll nun ein statisches Modell aus den in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Anwendungsfällen für das Gesamtsystem zur Erfassung und Verwaltung der Prüfdaten einschließlich der Erweiterung zur Durchführung der Qualitätsdatenrecherche entwickelt und dargestellt werden.

Prüfdatenverarbeitung

Das im Folgenden modellierte System beschreibt die grundsätzlichen Strukturen und Zusammenhänge für die Erfassung und Verwaltung von Prüfdaten im Fertigungsumfeld. Für die den Schwerpunkt

der vorliegenden Arbeit bildende Qualitätsdatenrecherche stellt dies quasi die Systemumgebung dar. Die beschriebenen Strukturen entsprechen grundsätzlich in vielen Teilen denen konventioneller CAQ-Systeme. Das Modell kann damit beispielsweise als Grundlage für die Beurteilung bestehender Systeme hinsichtlich der Voraussetzungen für die Integration der Qualitätsdatenrecherche dienen.

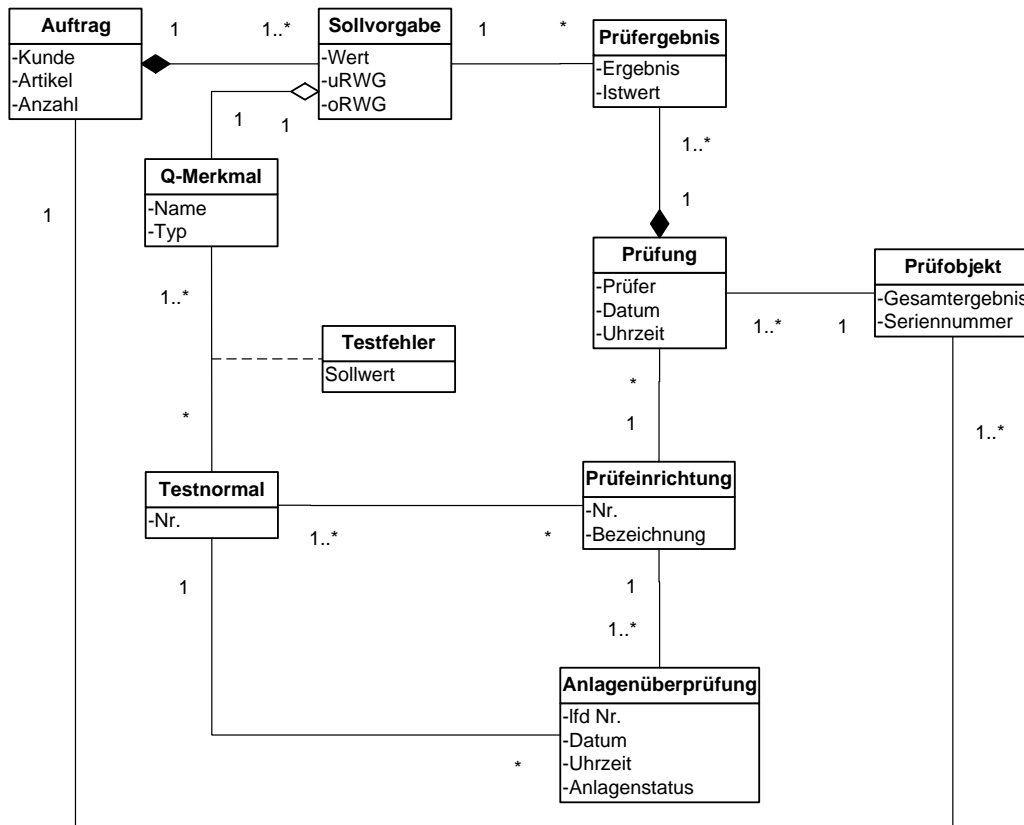


Abbildung 5.9: Klassendiagramm für die Verwaltung von Prüfdaten im Zusammenhang mit der Qualitätsdatenrecherche.

Den Ausgangspunkt für die Beschreibung des in Bild 5.9 dargestellten Klassendiagramms soll hier die Klasse *Auftrag* bilden. Sie verwaltet unter anderem Informationen über den Kunden, den von ihm bestellten Artikel sowie die zugehörige Anzahl. Da im hier beschriebenen System die Fertigung bzw. die Durchführung der fertigungsbegleitend erforderlichen Prüfungen im Mittelpunkt des Interesses steht, soll der Auftrag als *Fertigungsauftrag* verstanden werden, der nur einen Artikel enthält.

Einem Auftrag bzw. dem herzustellenden Artikel wird nun mindestens eine Sollwertvorgabe zugeordnet. Im Klassendiagramm wird dies durch die Kardinalitäten ,1‘ und ,1..*‘ der Assoziation dargestellt. Bei der zwischen den Klassen *Auftrag* und *Sollwertvorgabe* dargestellten Beziehung handelt es sich um eine spezielle Form der Assoziation, eine so genannte *Komposition*. Sie wird durch eine ausgefüllte Raute symbolisiert und sagt aus, dass die Sollwertvorgabe einen Bestandteil des Auftrages darstellt, dessen „Lebensdauer“ mit der des Auftrages gekoppelt ist. Löscht man den Auftrag aus dem System, so werden auch die zugehörigen Sollvorgaben gelöscht.

Die Sollvorgabe legt lediglich den *Sollwert* sowie eine *obere* und *untere Rückweisgrenze* fest. Die Zuordnung der Sollvorgabe zu dem zu prüfenden Merkmal wurde hier so modelliert, dass sie über eine *Aggregation* in einer eins zu eins Beziehung erfolgt. Die Aggregation, die durch eine nicht ausgefüllte Raute an der Aggregatklasse symbolisiert wird, ähnelt der bereits beschriebenen Komposition, unterscheidet sich jedoch hinsichtlich der Lebensdauer der Teil-Klasse. Dies bedeutet, dass Objekte der Klasse *Q-Merkmal* unabhängig von der Zuordnung zu einem Fertigungsauftrag bzw. Artikel existieren können. Die Objekte der Klasse *Q-Merkmal* werden durch die Attribute *Name* und *Typ* charakterisiert. Neben einer eindeutigen Bezeichnung kann so beispielsweise festgelegt werden, ob es sich im Einzelfall um ein attributives oder ein variables Merkmal handelt.

Einer Sollvorgabe für ein Qualitätsmerkmal können bei der Durchführung der Prüfungen beliebig viele Prüfergebnisse zugeordnet werden. Diese entstehen im Rahmen der Auswertung der an den einzelnen Prüfobjekten durchgeführten Prüfungen. Im Klassendiagramm wird dies dadurch deutlich, dass einem Objekt der Klasse *Auftrag* beliebig viele, jedoch mindestens ein Objekt der Klasse *Prüfobjekt* zugeordnet wird. Die Prüfobjekte können durch das Attribut *Seriennummer* identifiziert werden, der „Zustand“ steht *Gesamtergebnis* zur Verfügung.

Objekte der Klasse *Prüfobjekt* können einer theoretisch unbegrenzten Zahl von Prüfungen unterzogen werden, was sich durch eine Assoziation mit den Kardinalitäten *,1‘* und *,1... *‘* widerspiegelt. Objekte der Klasse *Prüfung*, die unter anderem durch die Attribute *Prüfer*, *Datum* und *Uhrzeit* beschrieben werden, sind über eine Komposition mit einem oder mehreren Prüfergebnissen assoziiert. Über die bereits beschriebenen Beziehungen zwischen den Klassen *Prüfergebnis*, *Sollvorgabe* und *Q-Merkmal* können jeder durchgeführten Prüfung alle erforderlichen Informationen zugeordnet werden.

In dem hier betrachteten, möglichst allgemein gültigen Modell wird davon ausgegangen, dass für die Durchführung der Prüfungen Prüfeinrichtungen verwendet werden, die in der durch die Use Cases UC6 (Prüfanlage verifizieren) und UC7 (Testnormal definieren) beschriebenen Vorgehensweise überwacht werden. Jedes Objekt der Klasse *Prüfung* wird daher einer *Prüfeinrichtung* zugeordnet, die beispielsweise über die Attribute *Nr.* und *Bezeichnung* beschrieben werden kann. Zu jeder Prüfanlage gehören nun wieder mindestens je ein Objekt der Klassen *Testnormal* und *Anlagenüberprüfung*. Durch Letztere wird ein Anlagenstatus ermittelt und dokumentiert, der zum Nachweis des ordnungsgemäßen Zustandes der Einrichtungen genutzt werden kann. Durchgeführt wird eine solche Anlagenüberprüfung mit einem Testnormal, für das ebenfalls eine entsprechende Klasse existiert. Jedem Objekt der Klasse *Testnormal* wird eine Reihe von Qualitätsmerkmalen zugeordnet. Diese Zuordnung erfolgt mit Hilfe von so genannten Testfehlern, die ihrerseits über eigene Attribute wie beispielsweise die Testfehlerstärke, d. h. den hinreichend exakt bestimmten *Sollwert* des auf dem Testnormal enthaltenen Testfehlers verfügen. Die Testfehler werden mit Hilfe von Objekten der gleichnamigen Klasse beschrieben, die im Klassendiagramm als so genannte *assoziative Klasse* dargestellt ist.

Das in Bild 5.9 gezeigte Klassendiagramm lässt zunächst offen, wie das Prüfergebnis ermittelt wird. Es ermöglicht jedoch die in UC8 beschriebene Erfassung von Prüfergebnissen in den Fällen, in denen eine subjektive Prüfung (z. B. Sichtprüfung) durchgeführt wird oder die Dokumentation der Prüfung außerhalb der Grenzen des modellierten Systems erfolgt. Da diese Vorgehensweise für die entsprechend der in Abschnitt 5.1 ausgeführten Überlegungen im Zusammenhang mit der Qualitätsdatenrecherche interessanten Anwendungsfälle nicht den Regelfall darstellt, muss im Rahmen der Analyse auch die Ermittlung von Prüfergebnissen modelliert werden.

Signalverarbeitung

Die statische Sicht des Modells zur Ermittlung von Prüfergebnissen aus den erfassten Messdaten zeigt das in Bild 5.10 dargestellte Klassendiagramm. Die Verbindung zur übergeordneten Prüfdatenverarbeitung wird durch die im oberen Bereich des Diagramms angeordneten Klassen *Q-Merkmal*, *Sollvorgabe* und *Prüfergebnis* hergestellt.

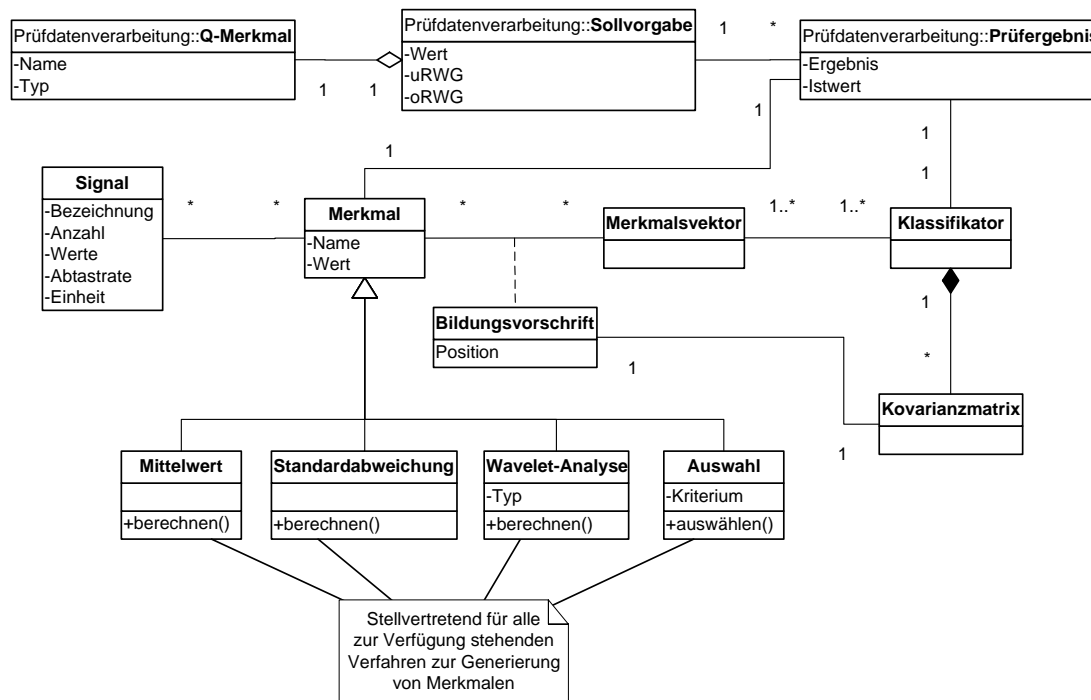


Abbildung 5.10: Klassendiagramm für die Ermittlung von Prüfergebnissen aus erfassten Prüfdaten.

Den Ausgangspunkt für die Ermittlung der Prüfergebnisse stellen im allgemeinen Fall Objekte der Klasse *Signal* dar. Als Beispiel können die in Bild 5.2 gezeigten Zeitreihen betrachtet werden. Für die Beschreibung der Signale stehen neben der *Bezeichnung* die Attribute *Werte*, *Anzahl*, *Abtaste* und *Einheit* für die Einzelwerte des Signalverlaufes zur Verfügung. Entsprechend der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Funktionsweise von Erkennungssystemen wird aus dem oder den Signalen eine Reihe von Objekten der Klasse *Merkmal* berechnet, die in einem Objekt der Klasse *Merkmalsvektor* zusammengefasst werden können.

Die Klasse *Merkmal* fasst eine Reihe von Eigenschaften von stärker spezialisierten Klassen zur Generierung von Merkmalen zusammen. Im Klassendiagramm wird dies durch eine nicht ausgefüllte Pfeilspitze der Linien zwischen den Klassen *Mittelwert*, *Wavelet-Analyse*, *Standardabweichung* und *Auswahl* symbolisiert. In der UML drückt diese Darstellung aus, dass die vier letztgenannten Klassen von der Klasse *Merkmal* abgeleitet werden, d. h. dass sie die dieser Klasse zugeschriebenen Eigenschaften *erben*. Dies bedeutet in der Praxis, dass zunächst alle für die Klasse *Merkmal* definierten Eigenschaften, d. h. in diesem Fall in erster Linie die Attribute, auch in abgeleiteten Klassen zur Ver-

fügung stehen, so dass unabhängig von der konkreten Art der Merkmalsgenerierung eine einheitliche Repräsentation der Merkmale gewährleistet werden kann. Die in den abgeleiteten Klassen implementierten Eigenschaften betreffen hier vor allem das Verhalten der Klassen, d. h. konkret die Art und Weise, in der Merkmale aus den Signalen berechnet bzw. ausgewählt werden.

Die im Klassendiagramm dargestellten Möglichkeiten zur Generierung von Merkmalen wurden stellvertretend für beliebige Verfahren zur Merkmalsgenerierung eingezeichnet. Sie repräsentieren lediglich einige grundsätzliche Möglichkeiten, Merkmale wie beispielsweise den Mittelwert oder die Standardabweichung aus den Werten der Signale zu berechnen, Transformationen wie die Wavelet-Analyse in die Generierung von Merkmalen mit einzubeziehen oder einzelne, durch ein Kriterium festgelegte Werte aus dem Signal auszuwählen und diese als Wert des Merkmals in die Ermittlung des Prüfergebnisses einzubringen.

Die Klasse *Bildungsvorschrift* beschreibt den Aufbau von Objekten der Klasse *Merkmalsvektor* aus den zur Verfügung stehenden Merkmalsvektoren. In erster Linie legt die Bildungsvorschrift die Reihenfolge der Merkmale im Merkmalsvektor fest, da diese je einer Konfiguration des Klassifikators, d. h. im hier betrachteten Fall einer *Kovarianzmatrix*, eindeutig zugeordnet ist.

Mit den in Bild 5.10 veranschaulichten Klassen können zwei Arten von Prüfungen bzw. Verfahren zur Auswertung von Prüfdaten dargestellt werden. Dabei ist entscheidend, ob bei der Auswertung jeder Wert für sich allein beurteilt werden kann oder ob die Umgebung des betrachteten Einzelwertes einen Einfluss auf die Bewertung hat. Als Beispiel für die erstgenannte Gruppe von Auswertungen, die im Folgenden als *einfache* Auswerteverfahren bezeichnet werden sollen, kann der maximale oder minimale Durchmesser eines Rohres, aber auch der Mittelwert oder die Standardabweichung der Durchmesserwerte genannt werden, da bei diesen Auswertungen die Reihenfolge der Einzelwerte keinen Einfluss auf den Merkmalswert hat. Als Beispiel für die zweite Gruppe von Auswertungen können die in Bild 5.2 dargestellten Signalverläufe für Risse, Rattermarken und Stufen genannt werden. Um diese Fehler zu erkennen, müssen zu einem Einzelwert grundsätzlich auch die benachbarten Werte betrachtet werden, da hier die *Form* des Signalverlaufes die Information über den Fehlertyp beinhaltet. Die zur Erkennung solcher Fehler eingesetzten Auswerteverfahren sollen daher im Folgenden als *signalformbewertende* Auswerteverfahren bezeichnet werden. Die Bewertung der Kritikalität eines derartigen Fehlers erfordert dabei neben dem Erkennen stets auch eine Aussage über die Stärke des Fehlers, die mit Hilfe der für diesen Fehlertyp festgelegten Rückweisgrenzen bewertet wird. Die durch die beschriebenen Klassen festgelegte Darstellung der beiden Fehlertypen soll hier mit Hilfe zweier aus Bild 5.10 abgeleiteter *Objektdiagramme* verdeutlicht werden.

Bild 5.11 zeigt die Modellierung der Auswerteverfahren für den minimalen und maximalen Außendurchmesser sowie die Wanddicke mit Hilfe von Instanzen der im Klassendiagramm dargestellten Klassen. Jedes Qualitätsmerkmal wird durch ein Objekt der Klasse *Q-Merkmal* repräsentiert, das am oberen Rand des Objektdiagramms angeordnet ist. Die zu den Qualitätsmerkmalen gehörenden Sollvorgaben werden durch Objekte der Klasse *Sollvorgabe* verkörpert, wobei die beiden den Außendurchmesser verkörpernden Merkmale von einer gemeinsamen Vorgabe abgedeckt werden.

Zur Beurteilung der genannten Qualitätsmerkmale werden die Signale *Außendurchmesser* und *Innendurchmesser* herangezogen. Die von der Klasse *Auswahl* instanziierten Objekte *Maximalwert* und *Minimalwert* wählen den jeweils gewünschten Wert aus dem Signal aus und führen diesen den von der Klasse *Prüfergebnis* instanziierten Objekten *ADmax1* und *ADmin1* zu. Die Zuordnung zum zu-

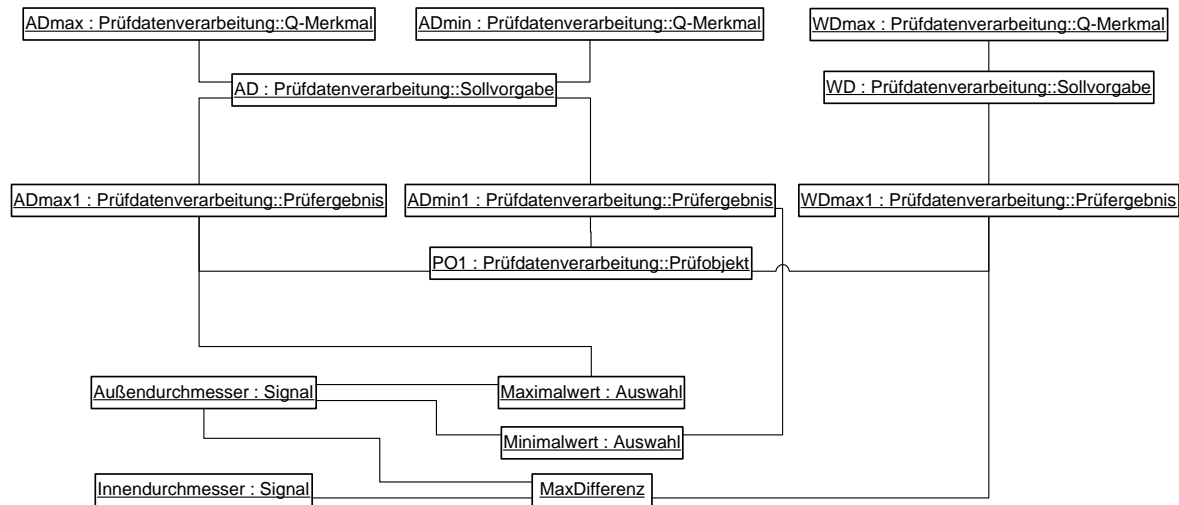


Abbildung 5.11: Modellierung *einfacher* Auswerteverfahren für den maximalen und minimalen Außendurchmesser sowie die maximale Wanddicke mit Hilfe der definierten Klassen in Form eines Objektdiagramms. Die bei einem Teil der Objekte zwischen dem Objektname(n) (links) und dem Klassennamen (rechts) stehende Bezeichnung drückt die Zugehörigkeit des Objektes bzw. der Klasse zum Paket *Prüfdatenverarbeitung* aus.

gehörigen Prüfobjekt verkörpert ein Link zwischen den Objekten der Prüfergebnisse und dem Objekt *PO1*. Die Ermittlung und Bewertung des Qualitätsmerkmals Wanddicke erfolgt analog, jedoch gehen hier zwei Signale in die Berechnung des Merkmals durch das Objekt *MaxDifferenz* ein. Bei der zu *MaxDifferenz* gehörenden Klasse handelt es sich wie bei *Minimalwert* und *Maximalwert* um eine von *Merkmal* abgeleitete Klasse, die jedoch nicht explizit im Klassendiagramm in Bild 5.10 dargestellt wurde.

Das in Bild 5.12 dargestellte Objektdiagramm zeigt exemplarisch die auf den definierten Klassen aufbauende Modellierung einer signalformbewertenden Auswertung. Den Ausgangspunkt bildet wieder eine prinzipiell beliebige Zahl von Objekten der Klasse *Signal*, die im Beispiel durch *Außendurchmesser* und *Riss_außen* repräsentiert wird. Ein Objekt der Klasse *Merkmalsvektor* nimmt die von Objekten der Klassen *Standardabweichung* und *Wavelet-Analyse* generierten Merkmale auf und führt sie einem Klassifikator zu. Dieser liefert unter Verwendung eines das „Wissen“ über das betrachtete Qualitätsmerkmal „Rattermarke“ beinhaltenden Objektes *RM* der Klasse *Kovarianzmatrix* eine Aussage darüber, ob die Form des betrachteten Signals dem für „Rattermarken“ typischen Signalverlauf entspricht. Diese Information bildet gemeinsam mit der durch ein Objekt der Klasse *Auswahl* an der aktuellen Position ermittelten Stärke des Signals *Außendurchmesser* die Grundlage für die Bewertung des Merkmals mit Hilfe der entsprechenden *Sollvorgabe* für das betrachtete Qualitätsmerkmal.

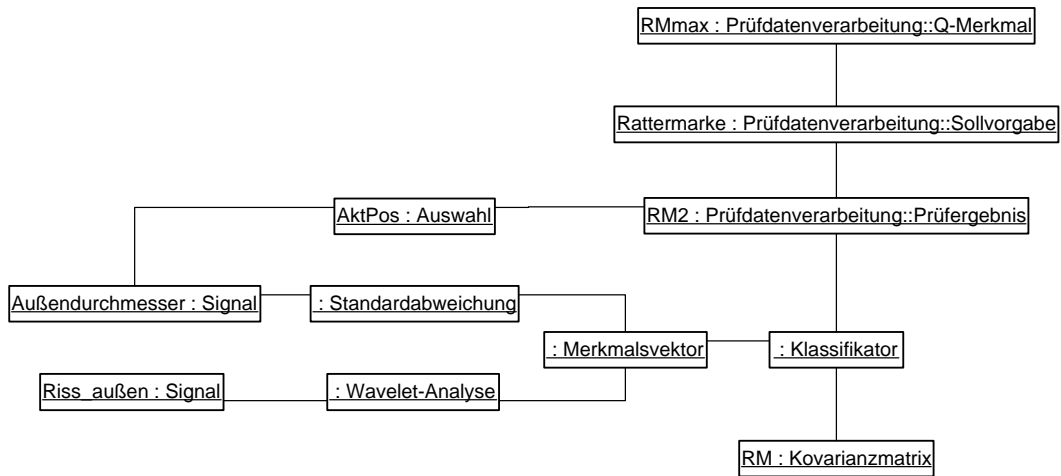


Abbildung 5.12: Modellierung eines *signalformbewertenden* Auswerteverfahrens für die Erkennung von Rattermarken, anhand eines Objektdiagramms.

Vergleicht man die *einfache* mit der *signalformbewertenden* Auswertung, so fällt auf, dass das Wissen über die zu bewertenden Qualitätsmerkmale bei den einfachen Auswerteverfahren bereits bei der Merkmalsgenerierung einfließt. So legt beispielsweise die Vorschrift, die maximale Wanddicke als Extremwert der Differenz von Außen- und Innendurchmesser zu berechnen, alle erforderlichen Freiheitsgrade fest. Im Gegensatz dazu werden die Merkmale bei der formbewertenden Auswertung zunächst ohne explizite Berücksichtigung des zu bewertenden Qualitätsmerkmals in einem Merkmalsvektor zusammengefasst, der dann mit Hilfe eines Klassifikators bewertet wird. Die Information über das Qualitätsmerkmal wird dabei durch eine *Kovarianzmatrix* verkörpert, die quasi als „Konfiguration“ des Klassifikators angesehen werden kann. Um das Erkennungssystem auf das oder die relevanten Qualitätsmerkmale einzustellen, ist es demnach notwendig, entweder geeignete Merkmale für die einfache Auswertung zu implementieren oder Klassifikatoren mit Hilfe von Kovarianzmatrizen und den zugehörigen Merkmalsvektoren für signalformbewertende Auswertungen bereitzustellen. Wie dies für den letztgenannten Fall im Rahmen der Qualitätsdatenrecherche erfolgt, soll im Folgenden dargestellt werden.

Qualitätsdatenrecherche

Im Rahmen der Qualitätsdatenrecherche sollen Signalverläufe, die anhand von Beispielen spezifiziert werden, in der Gesamtheit der zur Verfügung stehenden Daten aufgefunden werden, wobei vor allem signalformbewertende Auswerteverfahren von Bedeutung sind. Um das Erkennungssystem auf die zu suchende Signalform einzustellen, müssen ein geeigneter Merkmalsvektor und die zugehörige Kovarianzmatrix für den Klassifikator ermittelt werden. Dies erfordert leistungsfähige mathematische Verfahren, deren Zusammenspiel für das hier betrachtete System anhand des in Bild 5.13 dargestellten Klassendiagramms beschrieben werden soll.

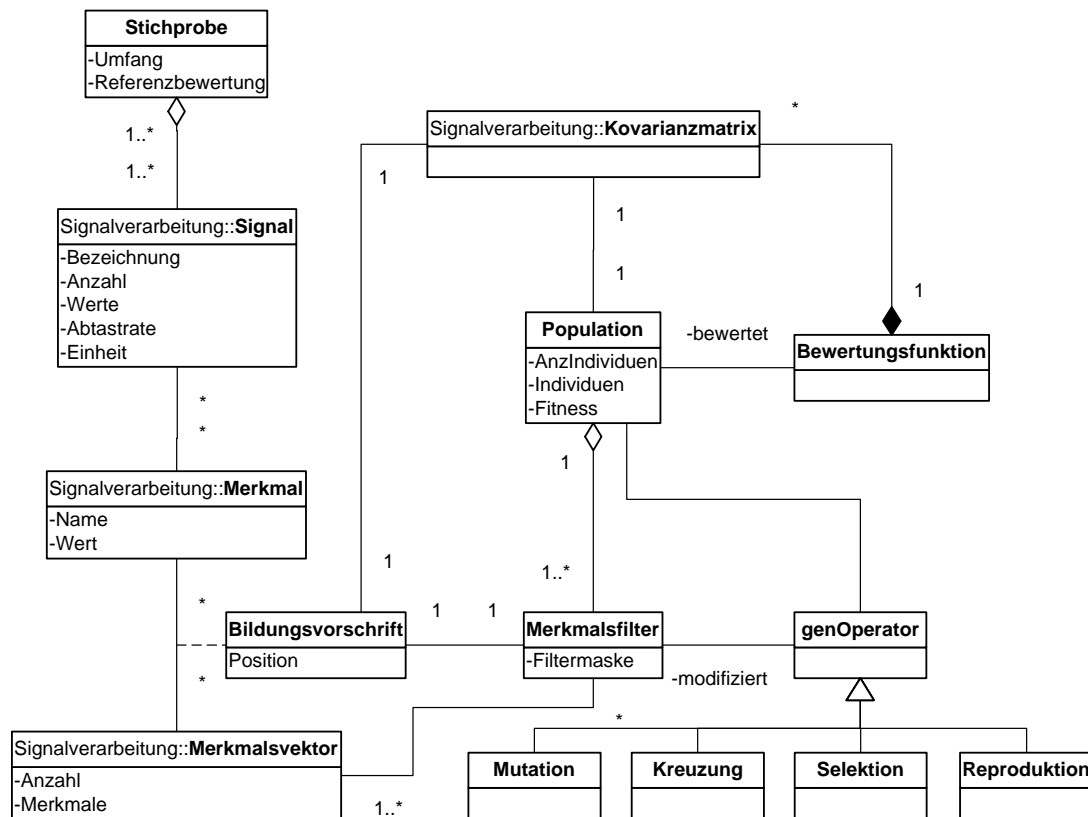


Abbildung 5.13: Adaption eines Erkennungssystems für signalformbewertende Auswertungen an, durch eine Stichprobe gegebene, Signalverläufe im Klassendiagramm.

Den Ausgangspunkt für die Adaption des Erkennungssystems stellt ein Objekt der Klasse *Stichprobe* dar. Diese enthält eine oder mehrere Beobachtungen der zu erkennenden Signalformen, die hier als Aggregation mit der Klasse *Signal* modelliert sind. Erkennen bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die gesuchte Signalform von allen anderen Signalformen so sicher wie möglich unterschieden werden soll. Die Stichprobe enthält daher neben der gesuchten Signalform auch andere, von der gesuchten zu unterscheidende Signalformen. Für die Codierung der verschiedenen Signalformen steht das Attribut *Referenzbewertung* zur Verfügung, mit dessen Hilfe die in der Stichprobe enthaltenen Beobachtungen den zu unterscheidenden Klassen zugeordnet werden können.

Wie bereits für das Paket *Signalverarbeitung* beschrieben werden aus den Signalen Merkmale berechnet, die in einem Merkmalsvektor pro Beobachtung zusammengeführt werden. Ein solcher hinreichend großer Merkmalsvektor stellt die Grundlage für die nachfolgende Auswahl der optimalen Merkmale dar. Wie in Bild 5.14 mit Hilfe eines Objektdiagramms dargestellt werden dazu alle Merkmalsvektoren allen zur Verfügung stehenden Merkmalsfiltern zugeführt. Jeder Merkmalsfilter wählt über eine Filtermaske eine Untermenge der in den Merkmalsvektoren enthaltenen Merkmale aus. Die auf diese Weise entstandenen Individuen werden zu einer *emphPopulation* zusammengefasst und mit

Hilfe einer *Bewertungsfunktion* hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Unterscheidung der durch die Referenzbewertung festgelegten Klassen bewertet. Das Ergebnis der Bewertung, die so genannte *Fitness* des jeweiligen Individuums, wird als Attribut der Klasse *Population* abgelegt und dient zusammen mit stochastischen Faktoren dazu, die Merkmalsfilter mit Hilfe der von der Klasse *genOperator* abgeleiteten genetischen Operatoren zu modifizieren. Mit Hilfe der modifizierten Merkmalsfilter und der Merkmalsvektoren wird eine neue Generation von Individuen berechnet, die auf die gleiche Weise bewertet und modifiziert werden. Dieser Ablauf wird so lange fortgesetzt, bis über eine festgelegte Anzahl von Generationen keine Verbesserung des besten Fitnesswertes einer Population mehr erreicht werden kann.

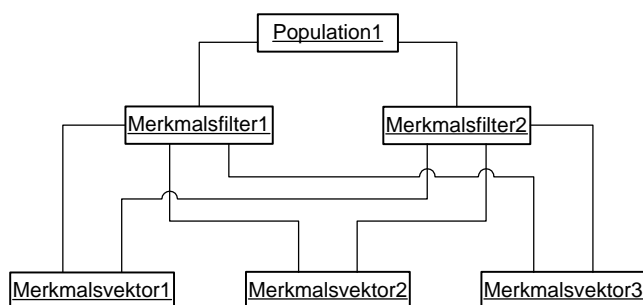


Abbildung 5.14: Beschreibung des Aufbaus einer Population aus den zur Verfügung stehenden Merkmalsvektoren mit Hilfe von verschiedenen Merkmalsfiltern im Objektdiagramm.

Das Ergebnis der Adaption wird damit durch den zur Population mit der besten Fitness gehörenden *Merkmalsfilter* repräsentiert. Die zugehörige Filtermaske kann in die Bildungsvorschrift für den Aufbau des Merkmalsvektors übernommen werden und steuert damit die Generierung von Merkmalen bei nachfolgend durchgeführten Prüfungen. Die zu der als optimal bewerteten Population gehörende *Kovarianzmatrix* findet sich ebenfalls im Paket *Signalverarbeitung* wieder und steuert bei signalform-bewerteten Qualitätsmerkmalen die Zuordnung der erfassten Signale zu den zugehörigen Klassen. Die Bildungsvorschrift für die Generierung der Merkmalsvektoren und die zugehörige Kovarianzmatrix stellen somit das Ergebnis der Adaption des Erkennungssystems an die jeweilige Aufgabenstellung dar.

5.2.3 Dynamisches Modell des Systems

Mit Hilfe des statischen Modells wurden die wichtigsten Klassen des Qualitätsdatenrecherchesystems und die zwischen ihnen bestehenden Assoziationen identifiziert und beschrieben. Dabei wurden die Hauptdaten des Systems in Form von Attributen festgelegt und Teilsysteme für einen verbesserten Überblick über das Gesamtsystem definiert.

Beim dynamischen Modell stehen *Funktionsabläufe* im Mittelpunkt des Interesses. Diese wurden bereits bei der Beschreibung der Geschäftsprozesse mittels Use Cases auf einem sehr hohen Abstrak-

tionsniveau betrachtet und sollen nun unter Einbeziehung der im statischen Modell identifizierten Klassen verfeinert und weiter ausgearbeitet werden. Nachdem zu Beginn dieses Kapitels bereits ein Überblick über die wichtigsten Prozesse eines Qualitätsdatenrecherchesystems gegeben wurde, konzentriert sich die nachfolgende Beschreibung auf die Teile des Systems, die eine im Vergleich zu konventionellen CAQ-Systemen geänderte oder erweiterte Funktionalität aufweisen.

Prüfen

Die in Bild 5.4 dargestellten Use Cases unterscheiden verschiedene Zustände, die eine Prüfanlage im Rahmen des betrachteten Gesamtprozesses annehmen kann. Das in Bild 5.15 dargestellte *Zustandsdiagramm* gibt eine Übersicht über diese Zustände und zeigt die wichtigsten Ereignisse, die zu Übergängen zwischen den einzelnen Systemzuständen führen können.

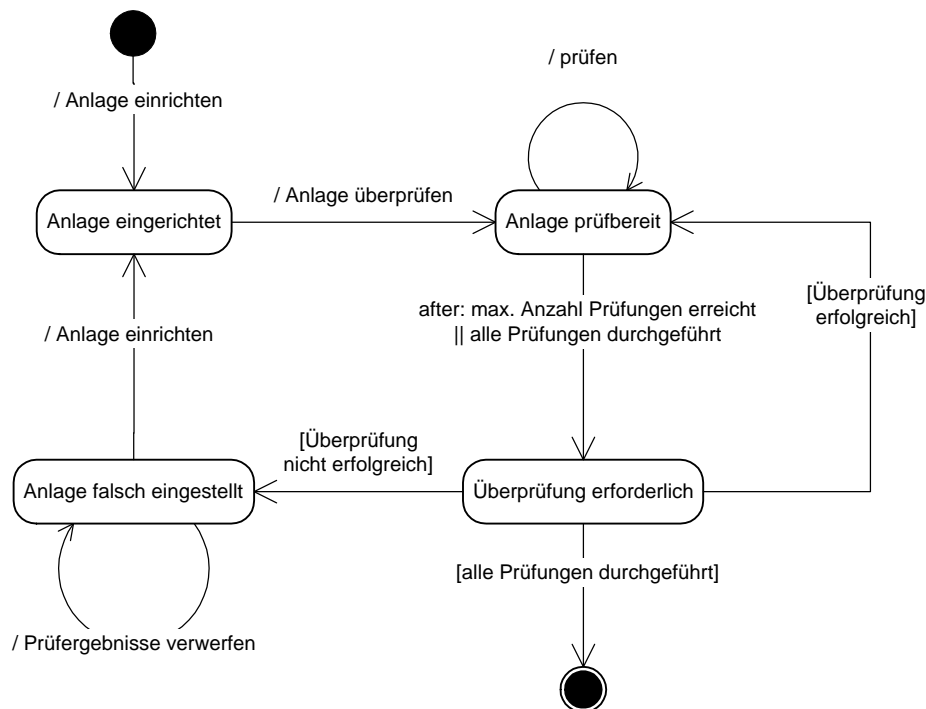


Abbildung 5.15: Zustandsdiagramm für die zur Durchführung von Prüfungen eingesetzte Prüfeinrichtung.

Abhängig von den spezifischen Eigenschaften der eingesetzten Prüfeinrichtung muss diese zunächst für die durchzuführende Prüfaufgabe eingerichtet werden. Im allgemeinsten Fall kann dies von der Justage der Sensoren bis hin zur Einstellung der Parameter zur Auswertung der Sensordaten reichen. Wenn die korrekte Einstellung der Anlage überprüft und in geeigneter Form dokumentiert ist, kann mit der Durchführung der eigentlichen Prüfungen von Werkstücken aus der Fertigung begonnen werden. Dabei ist entscheidend, dass bei der Auswertung der an den Prüflingen erfassten Prüfdaten aus-

schließlich die bei der Überwachung der Anlage verifizierten Verfahren und Einstellungen zum Einsatz kommen.

Je nach Stabilität der Prüfanlage muss deren ordnungsgemäße Funktionsweise in regelmäßigen Abständen erneut überprüft und dokumentiert werden. Die in der Praxis gebräuchlichen Intervalle reichen von einer jährlichen Überprüfung (z. B. bei Koordinatenmessgeräten) bis hin zur regelmäßigen Erfassung und Auswertung der Prüfdaten eines Testnormals nach einer bestimmten Anzahl von Prüfungen von Werkstücken aus der Produktion.

Der Übergang zwischen zwei Systemzuständen wird entweder durch ein entsprechendes Ereignis (z. B. das Erreichen der zwischen zwei Überprüfungen der Anlage maximal zulässigen Anzahl von Prüfungen) oder eine vom Anwender ausgeführte und ggf. vom System unterstützte Funktion des Systems (z. B. die erfolgreiche Überprüfung der Prüfanlage) ausgelöst.

In dem in Bild 5.16 dargestellten Aktivitätsdiagramm für die Durchführung von Prüfungen wird ausgehend vom Anlegen des Fertigungsauftrages durch die Auftragsbearbeitung zunächst die Prüfplanung durchgeführt. Nach Abschluss der damit verbundenen Aktivitäten „Prüfungen spezifizieren“ und „Rückweisgrenzen festlegen“ erfolgt eine *Und-Synchronisation* mit der Freigabe des Fertigungsauftrages, was zur Auslösung der Aktivitäten „Anlage einrichten“ und nachfolgend „Anlage überprüfen“ führt. Dabei wird die Prüfanlage zunächst in den Zustand „eingestellt“ und nach erfolgreich abgeschlossener Überprüfung in den Zustand „prüfbereit“ versetzt. Die sich anschließende Aktivität „Prüfung durchführen“ wird so lange wiederholt, bis eine erneute Überprüfung der Prüfanlage erforderlich oder der Fertigungsauftrag vollständig geprüft ist. Das Aktivitätsdiagramm endet in diesem Fall wieder im Verantwortungsbereich der Auftragsbearbeitung, die als nachfolgende Aktionen den Abschluss des Auftrages (Versand, Zeugniserstellung, Dokumentation etc.) einleiten kann.

Prüfanlage einrichten (UC3) Beim Einrichten der Prüfanlage wird in der Regel auf ein Werkstück mit bekannten Fehlermerkmalen, ein so genanntes Testnormal, zurückgegriffen. Entsprechend des in Bild 5.17 dargestellten Ablaufes wird es mit der Prüfanlage erfasst und anhand der bekannten Fehlerstärken beurteilt. Auf der Grundlage der dabei ermittelten Ergebnisse werden die Einstellungen der Prüfanlage so verändert, dass das Ergebnis der Auswertung den erwarteten Anzeigen und den in der Prüfplanung vorgegebenen Anforderungen genügt.

Prüfung durchführen (UC5) Bei der eigentlichen Prüfung werden die zugrunde liegenden Messdaten wie in Bild 5.18 dargestellt zunächst erfasst. Die mit Hilfe der in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen Auswerteverfahren ermittelten Merkmale werden anschließend auf der Basis der in der Prüfplanung festgelegten Vorgaben bewertet, so dass das Prüfobjekt als Gutteil weiterverarbeitet, der Nacharbeit zugeführt oder, wenn dies nicht mehr erfolgversprechend ist, als Ausfallteil dem normalen Ablauf entnommen werden kann.

Die im Diagramm dargestellte Vorgehensweise geht davon aus, dass die aus den Messdaten ermittelten Merkmale durch den Merkmalstyp und die zugehörige Merkmalsstärke beschrieben werden. Wie im Zusammenhang mit dem statischen Modell des Systems beschrieben, können dabei sowohl einfache als auch signalformbewertende Auswerteverfahren eingesetzt werden. Beide Verfahren liefern die für den hier beschriebenen Ablauf erforderlichen Informationen, die jedoch auf sehr verschiedene Art und Weise ermittelt werden.

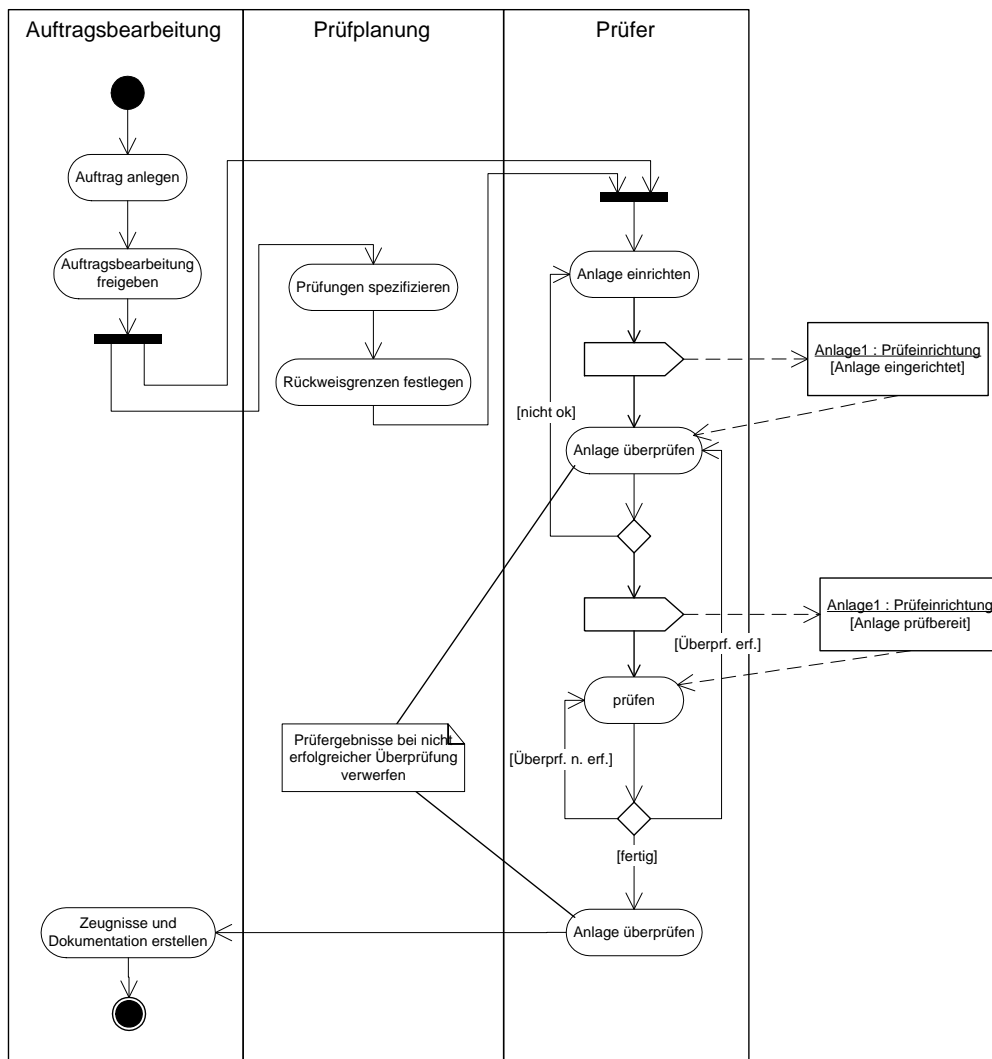


Abbildung 5.16: Aktivitätsdiagramm für den Gesamtprozess bei der Durchführung von Prüfungen an Werkstücken.

Prüfanlage verifizieren (UC6) Um sicherzustellen, dass der beim Einrichten der Prüfanlage hergestellte Zustand während des Prüfbetriebes beibehalten wird, ist in festgelegten Abständen eine Überprüfung und Dokumentation des aktuellen Zustandes der Prüfanlage erforderlich. Sofern die Möglichkeit zur Zuordnung der Prüfergebnisse zur jeweiligen Überprüfung der Anlage gegeben ist, kann auf diese Weise dokumentiert werden, dass sich die Prüfanlage zum Zeitpunkt der Prüfung jedes einzelnen Prüflings in einem ordnungsgemäßen Zustand befunden hat.

Die Überwachung der Prüfanlage erfolgt wie in Bild 5.19 dargestellt in der Regel mit Hilfe des bereits beim Einrichten benutzten Testnormals oder eines speziellen Prüflings, dessen Eigenschaften bekannt und dokumentiert sind. Zur Auswertung der an diesem Prüfobjekt erfassten Daten werden die auch im

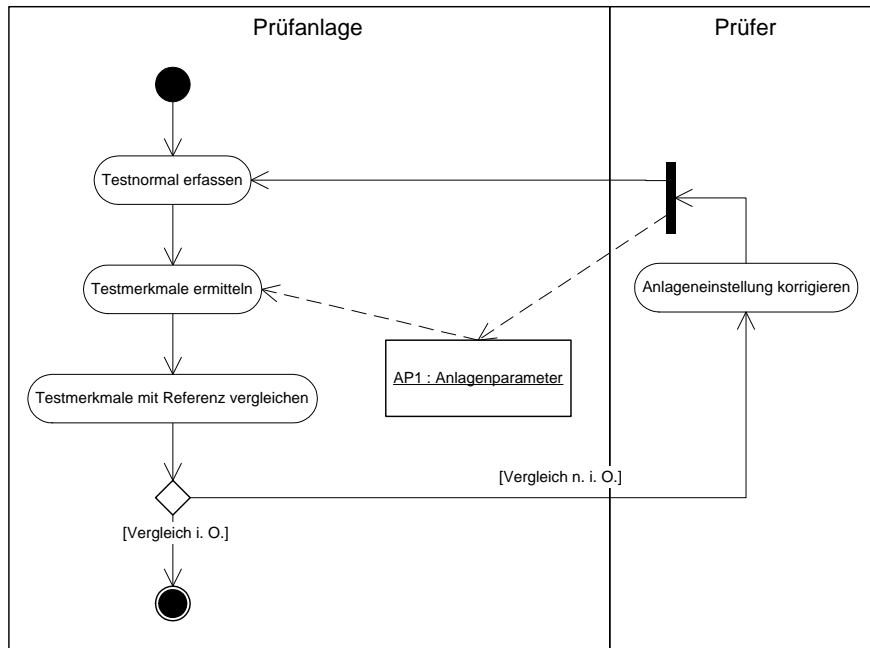


Abbildung 5.17: Einrichten der Prüfanlage.

normalen Prüfbetrieb verwendeten Verfahren eingesetzt, so dass sich die Überprüfung nicht nur auf die Datenerfassung beschränkt, sondern auch die Auswertung der Prüfdaten mit einbezieht.

Die beschriebene Vorgehensweise ist grundsätzlich für einfache und signalformbewertende Auswerteverfahren geeignet. Bei beiden Arten von Auswerteverfahren wird in erster Linie die Fehlerstärke überwacht. Prinzipiell kann dabei mit Hilfe des Erkennungssystems auch die Position des Merkmals ermittelt werden, was jedoch vor allem von den eingesetzten Auswerteverfahren und den zugehörigen Parametern abhängt. Da diese im Gegensatz zur Hardware des Prüfsystems keine unkontrollierten Schwankungen aufweisen sollten, sind sie für den hier betrachteten Aspekt der Überwachung der Prüfeinrichtung meist weniger interessant.

Neben der Überprüfung der Anlage bietet die Verwendung von Testnormalen auch eine gute Möglichkeit zur Skalierung bzw. Normierung der kompletten Verarbeitungskette von der Erfassung bis zur Bewertung. Sie kann damit die ohnehin in den meisten Fällen erforderliche Kalibrierung der Prüfeinrichtung ergänzen.

Sollte sich bei einer Überprüfung herausstellen, dass die Prüfanlage nicht über die gewünschten Leistungsdaten verfügt, müssen alle seit der letzten ordnungsgemäßen Überprüfung durchgeführten Produktprüfungen wiederholt werden.

Prüfung abschließen (UC9)

Wenn Prüfungen in mehreren Schritten durchgeführt werden, ist ein expliziter Abschluss der durchgeführten Prüfungen erforderlich. In diesem Zusammenhang muss zunächst festgestellt werden, ob alle

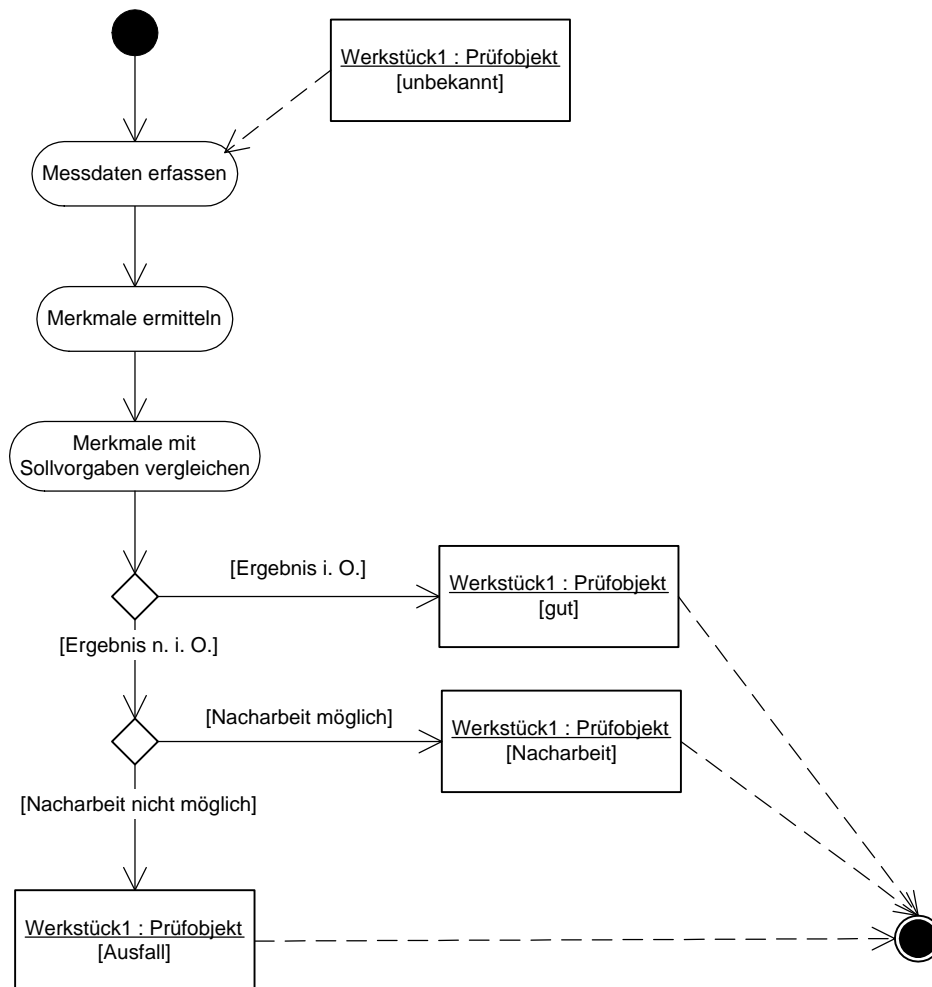


Abbildung 5.18: Durchführung von Prüfungen.

in der Prüfplanung vorgegebenen Prüfungen durchgeführt und mit positivem Ergebnis bewertet wurden. Da im Rahmen des hier betrachteten Systems davon ausgegangen wird, dass alle Prüfergebnisse erfassend an zentraler Stelle mit einem Verweis auf den Prüfling verwaltet werden, kann die Freigabeentscheidung auf der Basis dieser Daten automatisch getroffen werden. Die auf diese Annahme aufbauenden Abläufe bei der Ermittlung der Freigabeentscheidung sind in Bild 5.20 dargestellt.

Da die Ermittlung der Freigabeentscheidung im hier betrachteten Systemkontext auf der Basis von in der Datenbank gespeicherten Informationen erfolgt, muss das Prüfobjekt zunächst identifiziert werden. Die für dieses Prüfobjekt in der Datenbank gespeicherten Ergebnisse der Einzelprüfungen sind entsprechend der in der Prüfplanung festgelegten Sollvorgaben auf Vollständigkeit zu prüfen, bevor die Einzelergebnisse zu einem Gesamtergebnis zusammengefasst werden. Dabei sind nur noch die Bewertungen „Gut“ und „Ausfall“ zu unterscheiden, da eventuelle Nacharbeitsfälle bereits entsprechend des in Bild 5.18 beschriebenen Ablaufes in die Nacharbeitsschleife gesteuert wurden.

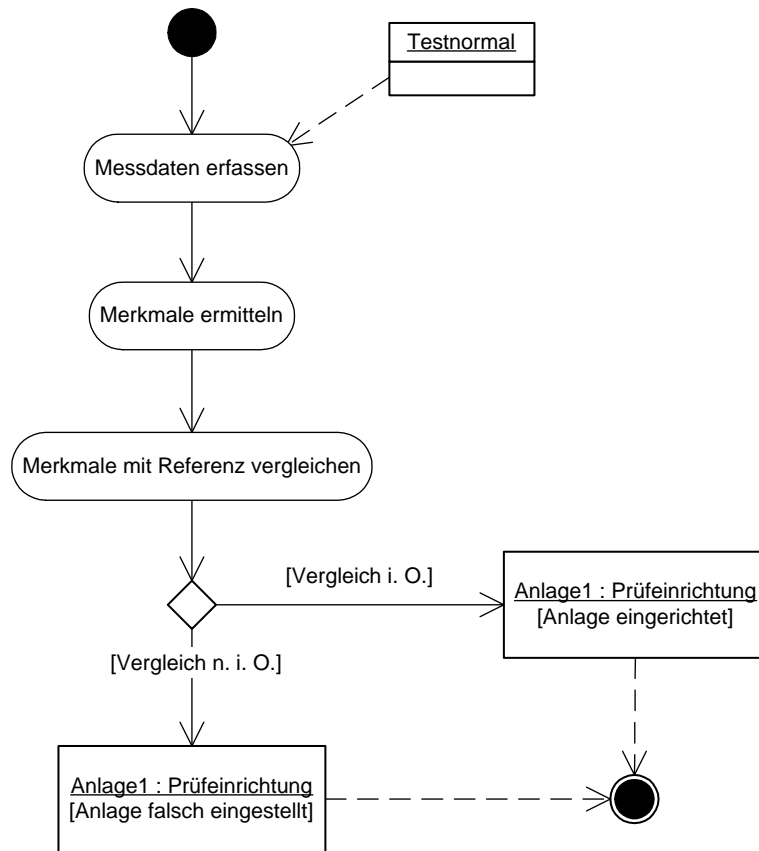


Abbildung 5.19: Überwachung der Prüfanlage.

Das für den Fall, dass die Prüfergebnisse noch nicht vollständig vorliegen, vorgesehene Nachholen der fehlenden Prüfungen führt in der Praxis häufig zu einer Unterbrechung des dargestellten Ablaufes. Da Aktivitätsdiagramme in der Regel einen zusammenhängenden Ablauf darstellen, wird dieser Fall in Bild 5.20 lediglich durch eine Notiz vermerkt.

Qualitätsdatenrecherche

Im Rahmen der Qualitätsdatenrecherche werden die erfassten bzw. archivierten Prüfdaten nach neuen, bislang nicht beachteten Merkmalen durchsucht. Dabei können folgende durch verschiedene Use Cases beschriebenen Schritte unterschieden werden:

- Beschreiben des gesuchten Merkmals (z. B. Signalverlaufs) im Rahmen von UC12,
- Durchsuchen des zur Verfügung stehenden Datenbestandes gemäß UC13.

In der Praxis muss davon ausgegangen werden, dass das gesuchte Merkmal nicht in Form einer analytischen Beschreibung oder durch präzise Regeln festgelegt werden kann. Stattdessen ist zu erwarten,

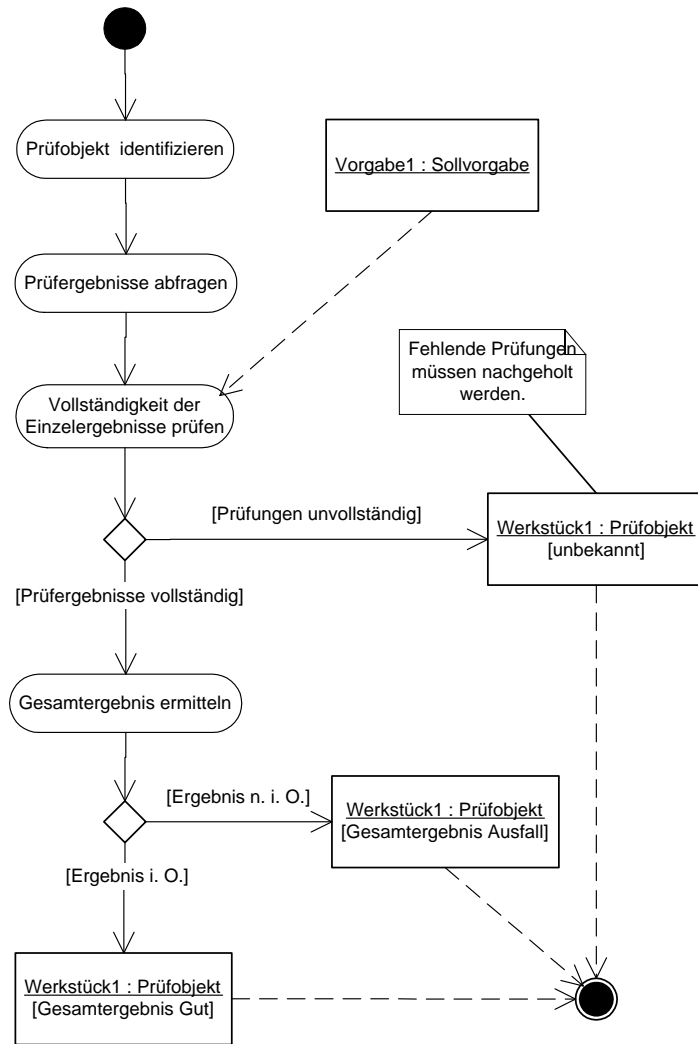


Abbildung 5.20: Abschließen der Prüfung eines Werkstückes mit Ermittlung des Gesamtprüfergebnisses.

dass häufig ein oder mehrere beispielhafte Signalverläufe für die Definition des Suchmusters herangezogen werden. Bei der nachfolgenden Suche sind dann alle Datensätze zu finden, die einen ähnlichen Verlauf aufweisen. Für diese auch als *Lernen an Mustern* bezeichnete Vorgehensweise sind verschiedene Verfahren und Anwendungen bekannt. Allen gemein ist jedoch die Forderung nach einer möglichst umfangreichen Lernstichprobe. Der Grund dafür ist in erster Linie darin zu sehen, dass es theoretisch eine sehr große Zahl von Parametern gibt, mit denen ein bestimmter Signalverlauf beschrieben werden kann. Während sich ein menschlicher Beobachter bei der Beurteilung eines Signals unbewusst auf genau die Merkmale konzentriert, die im jeweiligen Zusammenhang von Interesse sind, gibt es für ein maschinelles Erkennungssystem zunächst keine Möglichkeit, das Wesentliche vom Unwesentlichen zu trennen. Durch die Verwendung einer möglichst großen Lernstichprobe kann davon ausgegangen

werden, dass die wesentlichen Merkmale in der Stichprobe stärker vertreten sind als die weniger aussagefähigen.

Um den Einsatz der QD-Recherche auch in den Fällen zu ermöglichen, in denen nur wenige Beispiele des gesuchten Signalverlaufes zur Verfügung stehen, soll hier die in Bild 5.21 dargestellte iterative Vorgehensweise realisiert werden. Dies bedeutet, dass das Erkennungssystem zunächst nach Mustern sucht, die den zur Verfügung stehenden Beispielen in einer vorerst nicht näher spezifizierten Weise ähnlich sind. Die so selektierten Datensätze werden dem Anwender im Rahmen der interaktiven Überarbeitung der Suchmustermenge zur interaktiven Beurteilung hinsichtlich der Zugehörigkeit zur gesuchten Klasse angeboten. Die vom Anwender als relevant gekennzeichneten Datensätze werden zur Ermittlung eines neuen, gegenüber dem vorhergegangenen Durchlauf verfeinerten Selektionskriterium verwendet, mit dessen Hilfe der zur Verfügung stehende Datenbestand erneut durchsucht wird. Bei der wiederholten Anwendung dieser Vorgehensweise ist zu erwarten, dass das verwendete Selektionskriterium die gesuchten Merkmale immer präziser beschreibt, was eine Verbesserung der Suchergebnisse zur Folge hat.

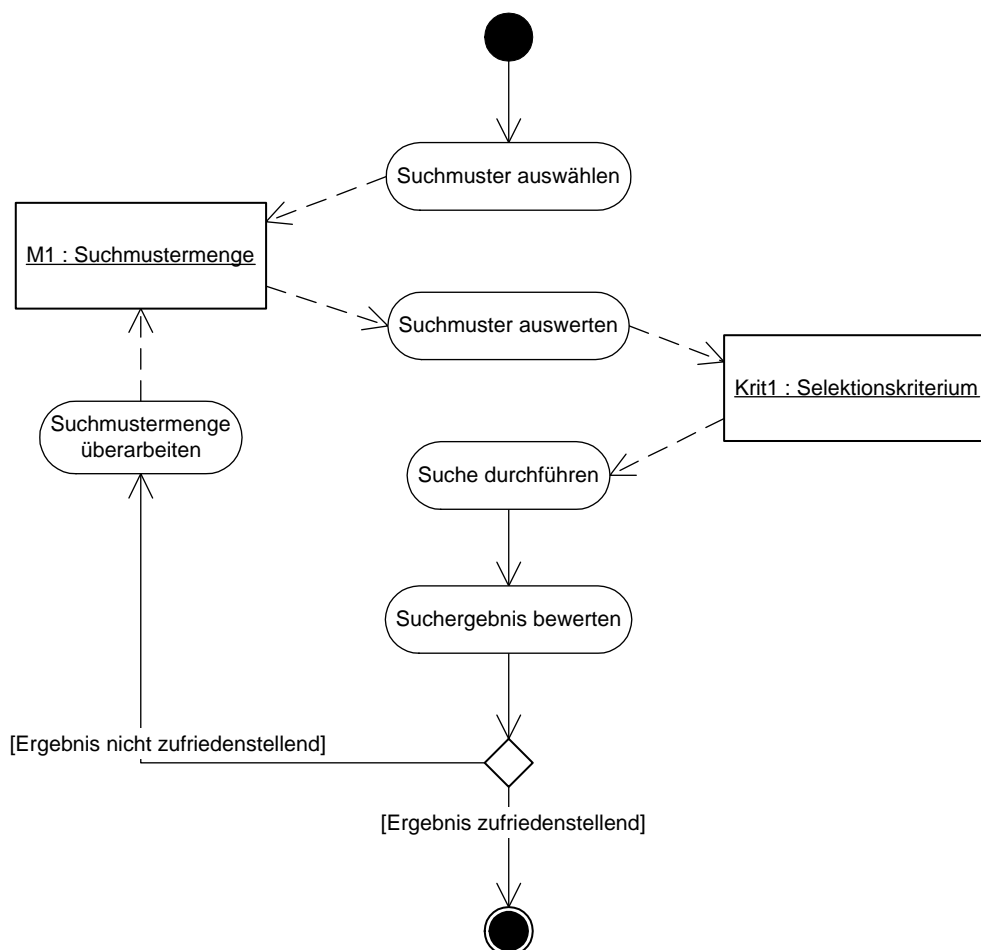


Abbildung 5.21: Aktivitätsdiagramm für die Qualitätsdatenrecherche.

Die Beschreibung der Qualitätsdatenrecherche mittels Use Cases unterscheidet die Festlegung des Suchmusters (UC12) und die eigentliche Durchführung der Suche (UC13) und gibt damit die Sicht des Anwenders wieder. Im Hinblick auf das den Kern der Qualitätsdatenrecherche darstellende Erkennungssystem erscheint dagegen eine andere Aufteilung der Funktionalität sinnvoll. Dabei wird zwischen der *Lernphase*, in der sich das System auf die zu erkennende Signalform einstellt, und der *Kannphase*, in der das gelernte Suchmuster zum Auffinden ähnlicher Signalverläufe verwendet wird, unterschieden.

In der Kannphase wird das System damit durch die Hauptaktivitäten

- Analyse der auszuwertenden Messdaten und Erzeugung der Merkmale,
- Aufbau eines Merkmalsvektors gemäß der in der Lernphase festgelegten Bildungsvorschrift und
- Klassifikation des Merkmalsvektors und Beurteilung der Fehlerstärke

beschrieben. In der Lernphase sind darüber hinaus die

- klassenspezifische Optimierung des Merkmalsvektors zur Ermittlung der Bildungsvorschrift und die
- Berechnung der in der nachfolgenden Kannphase für die Klassifikation zu verwendenden Kovarianzmatrix

erforderlich. Die Optimierung des Merkmalsvektors erfolgt durch Auswahl der für die jeweilige Klassifikationsaufgabe geeigneten Komponenten des Merkmalsvektors aus der Menge der grundsätzlich zur Verfügung stehenden Merkmale. Der Vergleich der verschiedenen Merkmalsvektoren wird mit Hilfe eines Qualitätskriteriums durchgeführt, welches die Güte der verschiedenen Merkmalsvektoren im Hinblick auf die Trennung der zu unterscheidenden Klassen beurteilt. Eine weitere Verfeinerung der Modellierung dieser für die Qualitätsdatenrecherche essentiellen Funktionalität soll mit Hilfe von *Kollaborationsdiagrammen* erfolgen. Im Gegensatz zu den Use Cases und den zu ihrer Detaillierung verwendeten Aktivitätsdiagrammen konzentrieren sich die Kollaborationsdiagramme auf das Zusammenwirken der Systembestandteile zur Realisierung der aus Sicht des Anwenders geforderten Funktionen.

Lernphase

In der Lernphase wird das Erkennungssystem an die zu erfüllende Aufgabenstellung adaptiert. Im vorliegenden Fall bedeutet dies, dass das Erkennungssystem lernt, jeweils zwei Signaltypen voneinander zu unterscheiden. Gemäß den in Abschnitt 4.4 definierten Begriffen muss dabei zwischen *prozeduralem* und *deklarativem* Wissen unterschieden werden. Um die für die Qualitätsdatenrecherche geforderte Automatisierbarkeit des Verfahrens zu gewährleisten, wird hier das prozedurale Wissen in Form einer während der Lernphase getroffenen Auswahl der bei der Klassifikation zu berücksichtigenden Merkmale aus der Menge der zur Verfügung stehenden Merkmale eingebracht. Das deklarative Wissen wird durch die klassenspezifischen mittleren Merkmalsvektoren und die zugehörigen Kovarianzmatrizen repräsentiert und bestimmt die Funktionsweise des Klassifikators. Das Zusammenspiel der in der

Lernphase benötigten Komponenten und die dabei zu beobachtenden Abläufe zeigt das in Bild 5.22 dargestellte Kollaborationsdiagramm.

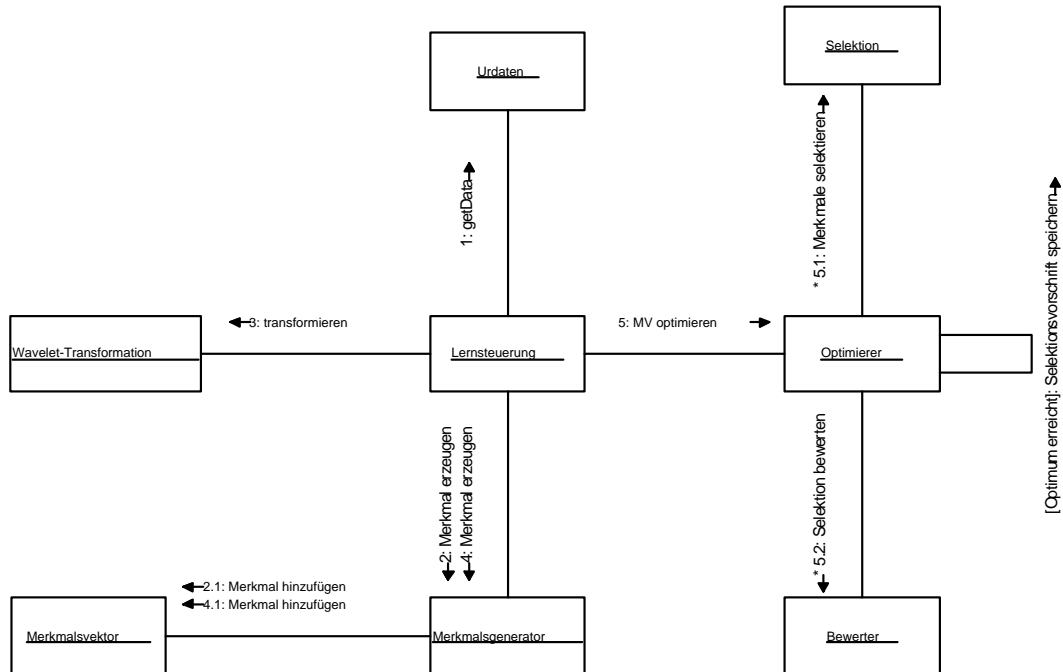


Abbildung 5.22: Anpassung des Erkennungssystems in der Lernphase. Die Nummern vor den Funktionsaufrufen beschreiben den zeitlichen Ablauf der Adaption an die Aufgabenstellung.

Der Ablauf der einzelnen Schritte zum Trainieren des Erkennungssystems wird von einer *Lernsteuerung* kontrolliert. Diese beschafft sich durch den mit ,1' bezeichneten Funktionsaufruf zunächst die zur Lernstichprobe gehörenden Daten. Zur Erzeugung aller möglichen Merkmale wird durch den Funktionsaufruf ,2' der Merkmalsgenerator aktiviert, der die aus dem ursprünglichen Signal erzeugten Merkmale durch Aufruf der mit ,2.1' gekennzeichneten Funktion zum Merkmalsvektor hinzufügt. In einem zweiten Schritt werden durch ,3' die Wavelet-Koeffizienten der Urdaten berechnet, welche die Grundlage für weitere, durch ,4' und ,4.1' berechnete Merkmale bilden. Dieser alle verfügbaren Merkmale enthaltende Merkmalsvektor stellt nun die Basis für die in Schritt 5 durchgeführte Optimierung des Merkmalsvektors dar. Diese wird durch einen *Optimierer* gesteuert, der die in der Kannphase für die Klassifikation zu verwendenden Merkmale aus der Menge der zur Verfügung stehenden Merkmale mit Hilfe der in Abschnitt 4.4.1 eingeführten genetischen Algorithmen auswählt und in Form einer Selektionsvorschrift speichert. Während der Optimierung greift der Optimierer iterativ auf die vom *Selektor* zur Verfügung gestellten genetischen Operatoren zur Variation der Selektionsvorschrift zurück (Schritt 5.1). Die auf diese Weise erzeugten Lösungsvorschläge werden in Schritt 5.2 vom *Bewerter* mit Hilfe der CVQPM bewertet. Wenn in weiteren Iterationsschritten keine Verbesserung der Lösungen mehr erreicht werden kann, wird die optimale Selektionsvorschrift als Repräsentation des prozeduralen Wissens zur Verwendung in der nachfolgenden Kannphase gespeichert.

Kannphase

In der *Kannphase* wird das in der *Lernphase* erworbene Wissen genutzt, um die zu bewertenden Signalverläufe der zugehörigen Klasse zuzuordnen. Dies entspricht der Vorgehensweise der Verifikationsphase, wobei in letzterem Fall bekannte, d. h. zuvor durch einen Spezialisten bewertete Datensätze von dem Erkennungssystem bewertet werden. Die so automatisch erzeugte Bewertung wird anschließend mit der eines erfahrenen Mitarbeiters verglichen. Das in Bild 5.23 dargestellte Kollaborationsdiagramm zeigt, wie die einzelnen Komponenten des Erkennungssystems bei der Klassifikation eines unbekanntes Signals zusammenwirken.

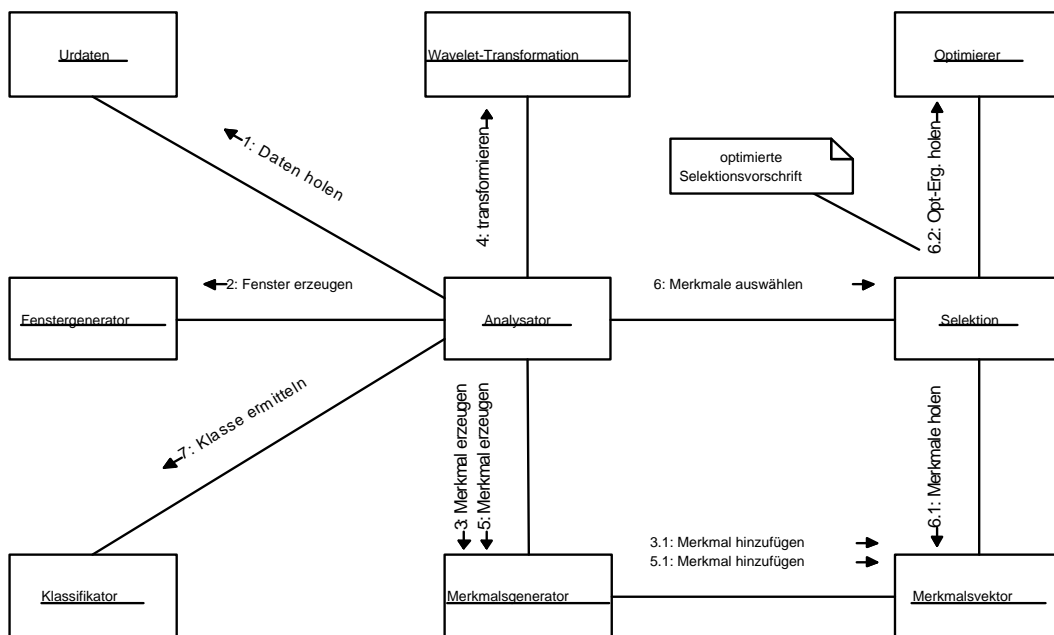


Abbildung 5.23: Zusammenwirken der verschiedenen Funktionskomponenten in der Kannphase.

Der Vorgehensweise der Lernphase entsprechend wird die Beurteilung der Signale in der Kannphase von einem *Analysator* gesteuert. Dieser sorgt zunächst dafür, dass die quasi kontinuierlich anfallenden Daten von einem *Fenstergenerator* in Auswertefenster zusammengefasst werden, aus denen mit Hilfe des *Merkmalsgenerators* unter Berücksichtigung der in der Lernphase ermittelten Selektionsvorschrift die erforderlichen Merkmale berechnet und dem Merkmalsvektor hinzugefügt werden. Mit Hilfe des dabei erzeugten Merkmalsvektors kann der zugehörige Signalabschnitt dann vom *Klassifikator* einem der bekannten Signaltypen zugeordnet werden.

5.3 Entwurf ausgewählter Systembestandteile

Nachdem im Rahmen der Analyse die wichtigsten Teile eines Qualitätsdatenrecherchesystems unter systemtechnischen Gesichtspunkten betrachtet und modelliert wurden, sollen ausgewählte Komponenten des Gesamtsystems im Sinne des Systementwurfes weiter verfeinert werden. Da sich die

Beschreibung auf die mathematischen Verfahren konzentriert, wird hier auf die Darstellung verfeinerter objektorientierter Modelle verzichtet, da diese in erster Linie für die Implementierung des Systems interessant sind und für den hier betrachteten Kontext nur einen geringen Mehrwert darstellen würden.

Den Schwerpunkt der Darstellung bildet das Verfahren für die Auswertung und die Ermittlung der Prüfergebnisse aus den ermittelten Daten. Nach der in Abschnitt 5.2.2 erfolgten Modellierung der Auswerteverfahren können dabei die *einfachen* und die *signalformbewertenden* Verfahren unterschieden werden. Während sich die Bewertung bei einfachen Prüfverfahren in den meisten Fällen auf einen Vergleich mit einem Sollwert beschränkt und damit den hier nicht näher beschriebenen Standardfall für die Ermittlung von Prüfergebnissen darstellt, erfordern die signalformbewertenden Prüfverfahren zusätzlich eine Analyse der Umgebung des Signals im betrachteten Bereich. Im Rahmen der hier vorgestellten Qualitätsdatenrecherche erfolgt dies mit Hilfe eines Erkennungssystems, das entsprechend der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Grundlagen aufgebaut ist.

5.3.1 Signalformbewertende Auswertung der Prüfdaten

Die signalformbewertende Auswertung berücksichtigt bei der Ermittlung von Prüfergebnissen in der Regel meist zwei Hauptkriterien:

- die *Form* des Signalverlaufes in der Umgebung der betrachteten Stelle und
- einen für die betrachtete Umgebung charakteristischen Wert für die *Stärke* des zugehörigen Qualitätsmerkmals.

Bei der Ermittlung des Prüfergebnisses wird zunächst untersucht, ob das Signal in der betrachteten Umgebung einen für das Qualitätsmerkmal typischen Verlauf aufweist. Wenn dies der Fall ist, so kann mit Hilfe der für dieses spezielle Qualitätsmerkmal eingeführten Rückweisgrenzen und der ermittelten Fehlerstärke das Ergebnis der Prüfung festgelegt werden. Auf diese Weise wird es z.B. möglich, für durch Risse hervorgerufene Abweichungen andere Rückweisgrenzen anzuwenden als für über einen größeren Bereich ausgedehnte Abweichungen des betrachteten Merkmals.

Für die Realisierung eines die Form von Signalverläufen bewertenden Verfahrens, das letztendlich das Treffen einer Klassifikationsentscheidung darstellt, sind Klassifikationsverfahren allein nicht ausreichend. Vielmehr muss quasi als notwendige Bedingung durch die Auswahl geeigneter Merkmale zunächst wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben die Separierbarkeit der zu unterscheidenden Klassen gewährleistet sein. Fordert man darüber hinaus, dass, wie im Fall der Qualitätsdatenrecherche notwendig, die Adaption des Erkennungssystems an die zu erkennende Signalform durch den Anwender von Fall zu Fall neu erfolgt, muss das Verfahren zur Adaption so gestaltet sein, dass keine detaillierte Kenntnis der zugrunde liegenden mathematischen Zusammenhänge erforderlich sind.

Entsprechend der in Abschnitt 4.2.1 getroffenen Einteilung von Signalen sollen für die nachfolgenden Überlegungen *wert- und zeitdiskrete* Signalverläufe

$$x : T \rightarrow X$$

mit $T \subseteq \mathbb{Z}, X \subseteq \mathbb{Z}$ im *Zeitbereich* zugrunde gelegt werden.

5.3.2 Signalanalyse

Durch die Analyse des Signalverlaufes sollen aus der Folge der Einzelwerte $x(t)$ Merkmale gewonnen werden, die eine Zuordnung des Signals zum zugehörigen Fehlertyp ermöglichen. Bereits an den in Bild 5.2 dargestellten Signalverläufen wird deutlich, dass die Analyseverfahren sowohl den Zeit- als auch den Frequenzbereich berücksichtigen müssen. Da aufgrund der Forderung nach einer möglichst universellen Anwendbarkeit des Verfahrens keine Einschränkungen hinsichtlich der Art der Signalformen getroffen werden sollen, werden zunächst verschiedene Merkmale berechnet und in einem Merkmalsvektor zusammengefasst. In einem zweiten Schritt werden dann, wie in Abschnitt 5.3.4 beschrieben, abhängig von der zu erkennenden Signalform die geeignetsten Merkmale ausgewählt.

Da die zu erkennenden Fehlermerkmale im allgemeinsten Fall in einem Teilbereich an jeder beliebigen Stelle des zu analysierenden Signalverlaufes auftreten können, wird wie in Abschnitt 4.2.2 beschrieben eine ‚gefensterte‘ Verarbeitung des Signalverlaufes durchgeführt. Das Ziel der Vorgehensweise ist dabei ganz allgemein die Ermittlung von Merkmalen, die innerhalb des betrachteten Auswertefensters eine Beurteilung des Signalverlaufes erlauben.

Aufbau des Merkmalsvektors

Um bei der Analyse des Signals sowohl den Zeit- als auch den Frequenzbereich berücksichtigen zu können, sind in der Regel mehrere Analysefunktionen f_i erforderlich, die formal zu einer Funktion $\vec{f} = (f_1, f_2, \dots, f_M)$ zusammengefasst werden können. Der für die Klassifikation zur Verfügung stehende Merkmalsvektor \vec{Y} setzt sich damit nach

$$\vec{Y} = \begin{pmatrix} \vec{Y}_1 \\ \vec{Y}_2 \\ \dots \\ \vec{Y}_m \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

aus den mit den Analysefunktionen f_i ermittelten Komponenten \vec{Y}_i ($1 \leq i \leq m$) zusammen. Die Wahl der Analysefunktionen unterliegt keinen grundsätzlichen Einschränkungen und kann somit einschließlich der Wahl der zugehörigen Parameter (z. B. Länge des Auswertefensters) frei erfolgen. Da die Wahl geeigneter Analysefunktionen erheblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Erkennungssystems hat, kommt diesem Punkt eine entscheidende Bedeutung zu.

Der hier dargestellte Ansatz beruht darauf, eine ausreichend große Anzahl von Merkmalen für die zu erkennenden Klassen zu berechnen. In einem zweiten Schritt werden mit Hilfe des in Abschnitt 4.4.1 beschriebenen Optimierungsverfahrens die Merkmale ausgewählt, die in Verbindung mit dem eingesetzten Klassifikator das beste Optimierungsergebnis liefern. Als Optimierungskriterium wird dabei die in Abschnitt 4.3.6 eingeführte und mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Beobachtungen berechnete Kennzahl für die Güte der Klassifikation verwendet. Für den hier betrachteten Anwendungsfall sollen folgende Analysefunktionen näher betrachtet werden:

- Standardabweichung innerhalb eines Auswertefensters
- Schwankung der Einzelwerte innerhalb eines Auswertefensters

- Standardabweichung der Koeffizienten der Wavelet-Transformierten in einem Auswertefenster
- Schwankung der Koeffizienten der Wavelet-Transformierten in einem Auswertefenster
- relative Position der maximalen Koeffizienten der Wavelet-Transformierten in einem Auswertefenster
- Werte ausgewählter Koeffizienten der Wavelet-Transformierten in einem Auswertefenster.

Die Beiträge der verschiedenen Analysefunktionen werden wie in Bild 5.24 dargestellt entsprechend (5.1) zu einem Merkmalsvektor zusammengefasst, der für die weitere Verarbeitung zur Verfügung steht.

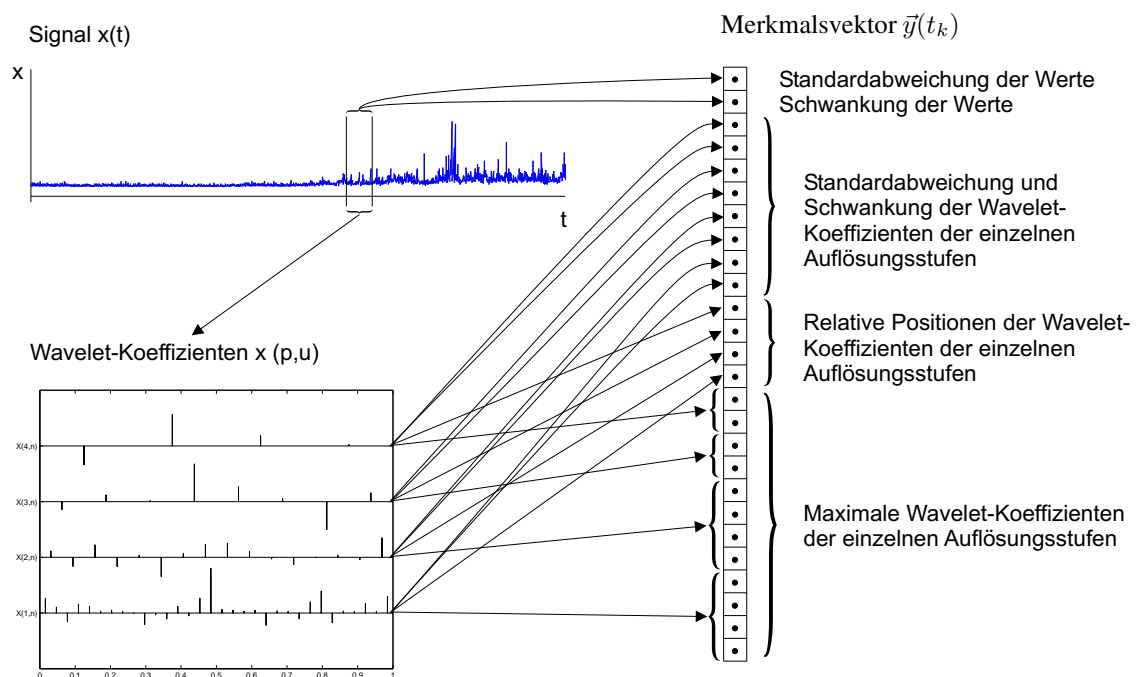


Abbildung 5.24: Berechnung der Merkmalsvektoren für das zu analysierende Signal.

Standardabweichung der Werte

Die *Standardabweichung*

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{l-1} \sum_{j=0}^{j=l-1} (x_j - \bar{x})^2} \quad \text{mit} \quad \bar{x} = \frac{1}{l} \sum_{j=0}^{j=l-1} x_j \quad (5.2)$$

liefert ein Maß dafür, wie stark das Signal im Mittel innerhalb des Auswertefensters vom Mittelwert \bar{x} abweicht.

Schwankung der Werte

Die *Schwankung*

$$s_x = \max(x_0, x_1, \dots, x_{l-1}) - \min(x_0, x_1, \dots, x_{l-1}) \quad (5.3)$$

entspricht der im Auswertefenster beobachteten maximalen Differenz von Einzelwerten des Signals. Sie ist als Merkmal für Erkennungssysteme immer dann geeignet, wenn im Bezug auf die Breite des Auswertefensters hochfrequente Veränderungen von konstanten oder sich nur langsam ändernden Verläufen unterschieden werden müssen.

Standardabweichung der Wavelet-Koeffizienten

Für die Ermittlung der auf Wavelet-Koeffizienten aufbauenden Merkmale muss zunächst eine Wavelet-Transformation der Signale im jeweiligen Auswertefenster durchgeführt werden. Auf diese Weise werden zusätzlich zu den mit (5.2) und (5.3) im Zeitbereich gebildeten Merkmalen auch Eigenschaften des Signals im Frequenzbereich in die Klassifikation einbezogen.

Wie in Abschnitt 4.2.5 beschrieben erhält man die Wavelet-Koeffizienten der ersten Auflösungsstufe $p = 1$ nach (4.24) aus

$$\underline{X}(1, n) = \sum_{j=2n}^{2n+L_F-1} g(j-2n)x(j), \quad (5.4)$$

wobei L_F die Länge des Hochpassfilters bezeichnet. Die Berechnung des Wavelet-Koeffizienten an der Stelle n erfolgt aus den Werten des Signals ab der Stelle $2n$, was zu der Reduzierung der Auflösung um den Faktor 2 pro Stufe führt. Für die Koeffizienten der nächsten Auflösungsstufe $p = 2$ erhält man analog

$$\underline{X}(2, n) = \sum_{j=2n}^{2n+L_F-1} g(j-2n)\underline{C}(1, j) \quad (5.5)$$

mit

$$\underline{C}(1, n) = \sum_{j=2n}^{2n+L_F-1} h(j-2n)x(j) \quad (5.6)$$

und allgemein aus

$$\underline{X}(p, n) = \sum_{j=2n}^{2n+L_F-1} g(j-2n)\underline{C}(p-1, j) \quad (5.7)$$

mit

$$\underline{C}(p-1, n) = \sum_{j=2n}^{2n+L_F-1} h(j-2n)\underline{C}(p-2, j), \quad (5.8)$$

wobei wie in (5.4) $\underline{C}(0, n) = x(n)$ gesetzt werden kann. Bild 5.25 zeigt die so berechneten Koeffizienten für zwei ausgewählte Fehlertypen.

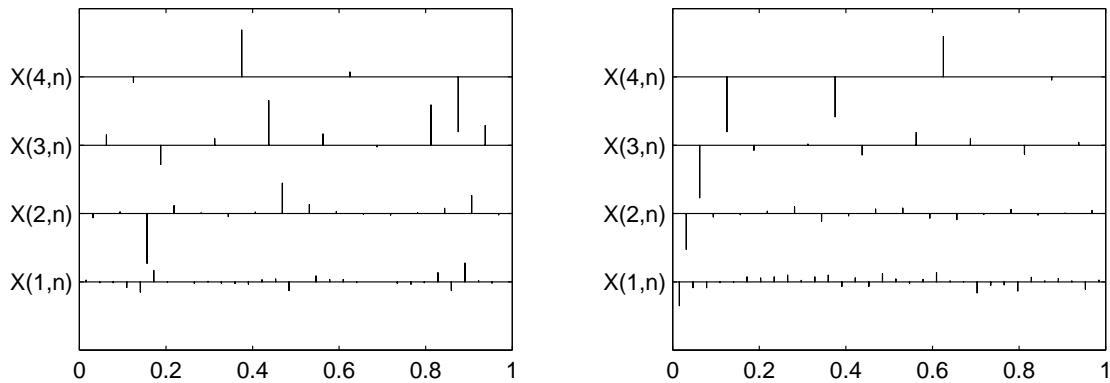


Abbildung 5.25: Graphische Darstellung der Wavelet-Koeffizienten für die Fehlertypen *Rattermarken* (links) und *Stufe* (rechts) über die Länge des Auswertefensters.

Berechnet man die Wavelet-Koeffizienten $\underline{X}(1, n)$, $\underline{X}(2, n)$, \dots , $\underline{X}(P, n)$ für die Auflösungsstufen $1, \dots, P$, so können diese zu einem Vektor \vec{W} mit

$$\vec{W} = (\underline{X}(1, n), \underline{X}(2, n), \dots, \underline{X}(P, n)) \quad (5.9)$$

der Länge k zusammengefasst werden. Mit (5.2) erhält man

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{j=0}^{j=k-1} (w_j - \bar{w})^2} \quad \text{mit} \quad \bar{w} = \frac{1}{k} \sum_{j=0}^{j=k-1} w_j \quad (5.10)$$

für die Standardabweichung der Wavelet-Koeffizienten.

Schwankung der Wavelet-Koeffizienten

Entsprechend der für die Standardabweichung dargestellten Überlegungen erhält man analog zu (5.3)

$$s_w = \max(|w_0|, |w_1|, \dots, |w_{k-1}|) - \min(|w_0|, |w_1|, \dots, |w_{k-1}|) \quad (5.11)$$

für die Schwankung der Wavelet-Koeffizienten.

Relative Positionen ausgewählter Wavelet-Koeffizienten

Die aus dem ursprünglichen Signalverlauf berechneten Wavelet-Koeffizienten liefern anschaulich betrachtet eine Aussage darüber, wie hoch die Ähnlichkeit des Signalverlaufes mit der Form des verwendeten Wavelets an der betrachteten Stelle ist. Anschaulich kann dies mit der Korrelation des Wavelets und dem zu analysierenden Signalverlauf verglichen werden, wobei das Wavelet sukzessive entlang des Signals verschoben wird. Der *Abstand* der ähnlichsten Stellen kann nun als Merkmal für eine

nachfolgende Klassifikation in den Merkmalsvektor aufgenommen werden. Die Verwendung des Abstandes macht das auf diese Weise erhaltene Merkmal zunächst unabhängig von der Position des betrachteten Signalabschnittes im Fenster. Da jedoch gewährleistet sein muss, dass die für die Abstandsberechnung verwendeten Positionen innerhalb eines Fensters liegen, geht die Länge des Auswertefensters indirekt in die Merkmalsberechnung ein. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf die praktische Anwendung, wenn in der Lern- und Überwachungsphase dieselben Fensterlängen verwendet werden.

Im Falle sich mehrfach im Auswertefenster wiederholender Signale entspricht der Abstand der ähnlichsten Stellen im Allgemeinen der Frequenz des Signals. Bezeichnen $w(n_1)$ den betragsmäßig größten und $w(n_2)$ den betragsmäßig zweitgrößten Wavelet-Koeffizienten innerhalb einer Auflösungsstufe, so erhält man aus

$$d_w = |n_1 - n_2| \quad (5.12)$$

den Abstand der beiden Koeffizienten.

Werte ausgewählter Wavelet-Koeffizienten

Zusätzlich zu den aus den Wavelet-Koeffizienten abgeleiteten Merkmalen können auch die Koeffizienten selbst in den zur Klassifikation verwendeten Merkmalsvektor aufgenommen werden. Da die Anzahl der zur Verfügung stehenden Koeffizienten von der Länge des Auswertefensters abhängt, erscheint es sinnvoll, sich auf eine unabhängig davon festgelegte Anzahl von Koeffizienten zu beschränken. Für die weiteren Betrachtungen sollen somit die *betragsmäßig größten* Koeffizienten der verschiedenen Auflösungsstufen ausgewählt werden. Die Positionen dieser Koeffizienten innerhalb des Auswertefensters entsprechen den Stellen, an denen die größten Ähnlichkeiten zwischen dem Verlauf des zu analysierenden Signals und dem verwendeten Wavelet festgestellt wurden.

Um einerseits von der absoluten Position innerhalb des Auswertefensters unabhängig zu werden und andererseits die Reihenfolge der ausgewählten Koeffizienten bei der Klassifikation berücksichtigen zu können, wird zunächst ein Schwellwert s so festgelegt, dass dieser nur von der gewünschten Anzahl von Wavelet-Koeffizienten überschritten wird. Die betragsmäßig über dem Schwellwert liegenden Wavelet-Koeffizienten werden dann wie in Bild 5.26 dargestellt in der Reihenfolge ihres Auftretens im Auswertefenster in den Merkmalsvektor übernommen.

5.3.3 Klassifikation

In dem hier betrachteten System zur Qualitätsdatenrecherche hat der Klassifikator die Aufgabe, ein Signal bzw. Ausschnitte daraus möglichst zuverlässig einer der vorgegebenen Klassen zuzuordnen oder festzustellen, dass die bewertete Beobachtung keiner der bekannten Klassen zuzuordnen ist.

Für diese Aufgabe soll hier ein *statistischer Klassifikator* eingesetzt werden. Wie in Abschnitt 4.3.5 beschrieben berücksichtigen statistische Klassifikatoren bei der Entscheidungsfindung neben der Lage des Klassenmittelpunktes auch die Verteilung der zum Lernen verwendeten Stichprobe um den mittleren Klassenvektor. Da hierbei von einer Normalverteilung der Beobachtungen ausgegangen wird, hat die Anzahl der zum Trainieren des Systems verwendeten Beobachtungen nur einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Qualität des später erzielten Klassifikationsergebnisses.

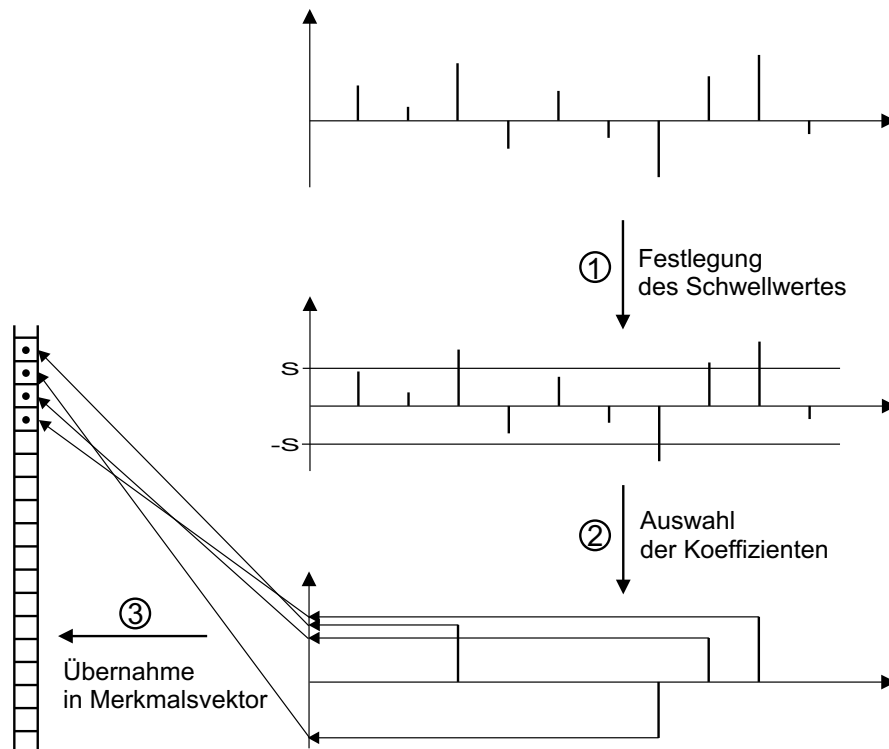


Abbildung 5.26: Übernahme ausgewählter Wavelet-Koeffizienten in den Merkmalsvektor.

Um eine unbekannte Beobachtung einer Klasse k zuzuordnen, wird zunächst wie in Abschnitt 5.3.2 beschrieben der Merkmalsvektor \vec{y} für das Signal bzw. für die zur Analyse verwendeten Auswertefenster berechnet. Da über die individuelle A-priori-Auftretenswahrscheinlichkeit der verschiedenen Klassen k in der Praxis meist keine Aussagen getroffen werden können, soll hier aufgrund der in Abschnitt 4.3.5 durchgeführten Überlegungen der Maximum-Likelihood-Klassifikator verwendet werden. Für die Entscheidungsfindung ist damit nach (4.49) die Berechnung der Wahrscheinlichkeitsdichte $p(\vec{y}|k)$ bzw. des Wahrscheinlichkeitsmaßes $P(\vec{y}|k)$ ausreichend. Unter der Annahme einer Normalverteilung der Beobachtungen können die $p(\vec{y}|k)$ aus (4.50) und den mit Hilfe der Lernstichprobe für die verschiedenen Klassen ermittelten \mathbf{K}_k und $\vec{\mu}_k$ berechnet werden.

Fordert man zusätzlich, dass der Wert der Entscheidungsfunktion einen Schwellwert P_{min} überschreiten muss, wenn die Zugehörigkeit zu einer Klasse angenommen werden soll, so muss für $p(\vec{y}|k)$ bzw. bei Berücksichtigung der A-priori-Klassenwahrscheinlichkeit für

$$\max_{k=1, \dots, K} p(k|\vec{y}) < P_{min} \quad (5.13)$$

davon ausgegangen werden, dass die Beobachtung keiner der bekannten Klassen angehört. Dieser Fall wird auch als *Rückweisung* bezeichnet.

Für das hier betrachtete Erkennungssystem sollen zwei Möglichkeiten zur Ermittlung des Klassifikationsergebnisses beschrieben werden. In beiden Fällen wird ein statistischer Klassifikator eingesetzt,

unterschiedlich ist dagegen die Vorgehensweise zur Ermittlung der Klassifikationsentscheidung. Im ersten Fall wird eine Instanz des Klassifikators auf die direkte Separierung aller zu betrachtenden Klassen trainiert. Er soll daher im Folgenden als *einstufiger* Klassifikator bezeichnet werden. Im zweiten Fall wird das Klassifikationsergebnis aus einer Reihe von Einzelklassifikationen ermittelt. Jeder Einzelklassifikator untersucht dabei die Ähnlichkeit der zuzuordnenden Beobachtung mit jeweils einer der bekannten Klassen. Diese Vorgehensweise zur Ermittlung des Klassifikationsergebnisses soll daher als *mehrstufige* Klassifikation bezeichnet werden.

Einstufige Klassifikation

Werden wie in den Abschnitten 4.3.4 und 4.3.5 beschrieben für alle zu unterscheidenden Klassen die mittleren Merkmalsvektoren $\vec{\mu}_k$ und die Kovarianzmatrizen \mathbf{K}_k berechnet, so erhält man die einfachste Form eines Klassifikators. Die Entscheidung über die Zugehörigkeit einer Beobachtung zu einer Klasse wird wie in Bild 5.27 dargestellt durch die Berechnung von nur *einem* Wert der Unterscheidungsfunktion getroffen.

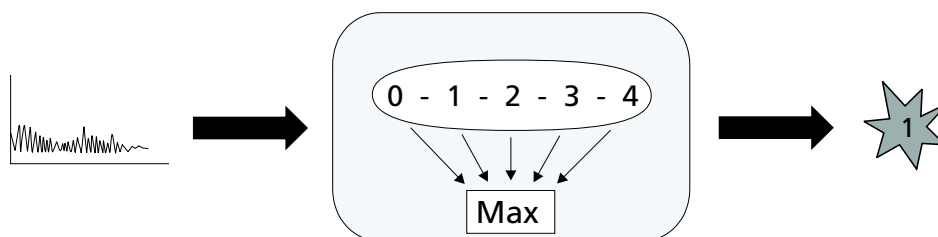


Abbildung 5.27: Zuordnung einer Beobachtung zu einer der bekannten Klassen bei der einstufigen Klassifikation.

Um eine für praktische Anwendungen ausreichende Klassifikationsgüte zu gewährleisten, muss der verwendete Merkmalsvektor grundsätzlich so aufgebaut sein, dass die in Abschnitt 4.3.1 beschriebene Separierbarkeit der Klassen gegeben ist. Diese Forderung muss auch dann noch erfüllt sein, wenn das Erkennungssystem aufgrund zusätzlicher Anforderungen um eine zusätzliche Klasse erweitert werden soll. Auf den ersten Blick ist es in diesem Fall ausreichend, die Kovarianzmatrix und den mittleren Klassenvektor der neuen Klasse zu berechnen und bei zukünftigen Entscheidungen analog zu den bereits bestehenden Klassen zu berücksichtigen. Dabei bleibt die Separierbarkeit der ursprünglichen Klassen unverändert, über die Fähigkeit zur Trennung dieser Klassen von der neuen Klasse lässt sich jedoch zunächst keine allgemein gültige Aussage treffen.

Um die Separierbarkeit der neuen Klasse von den bereits vorhandenen Klassen gewährleisten zu können, wird in vielen Fällen ein veränderter Aufbau des Merkmalsvektors erforderlich sein. Da beim einstufigen Klassifikator für alle Klassen gleich aufgebaute Merkmalsvektoren verwendet werden, kann eine negative Beeinflussung der Separierbarkeit der alten Klassen nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden. Für ein zur Qualitätsprüfung eingesetztes Erkennungssystem bedeutet dies, dass die Erkennungssicherheit des Systems nach der Erweiterung für *alle* Klassen überprüft werden muss

um sicherzustellen, dass sie nach wie vor den bestehenden Anforderungen entspricht. Diese Tatsache kann auch durch die Überlegung verdeutlicht werden, dass mit zunehmender Anzahl der Klassen die Gestalt der Trennflächen im Merkmalsraum komplizierter wird. Sollen bei unverändertem Aufbau des Merkmalsvektors nun Trennflächen für zusätzliche Klassen in die bestehende Aufteilung des Merkmalsraumes eingefügt werden, so muss damit gerechnet werden, dass für die Beschreibung dieser Trennflächen kompliziertere mathematische Modelle erforderlich sind. Die Beschränkung auf den Normalverteilungsklassifikator in seiner einstufigen Form wird daher unter diesen Voraussetzungen häufig nicht mehr die gewünschten Ergebnisse bringen, was den Einsatz anderer Klassifikatoren nahe legt, die in vielen Fällen einen deutlich höheren Umfang der in den Lernstichproben enthaltenen Zahl der Beobachtungen erfordern.

Im Gegensatz zu einem konventionellen Prüfungssystem, das einmal auf die zu erkennenden Klassen eingestellt und nur bei Änderungen des Produktes neu trainiert werden muss, ist im Falle eines Systems zur Qualitätsdatenrecherche wesentlich häufiger mit Erweiterungen des Erkennungssystems zu rechnen. Daher soll hier ein mehrstufig aufgebautes Erkennungssystem eingesetzt werden, das nicht über die beschriebenen Nachteile verfügt.

Mehrstufige Klassifikation

Der mehrstufige Klassifikator des Erkennungssystems besteht aus einer Reihe von *Elementarklassifikatoren*, die auf die Trennung von je zwei Klassen trainiert sind. Bezeichnet \mathfrak{K}_{u-k} den Elementarklassifikator zur Unterscheidung der Klassen u und k , so steht $P_{u-k}(\vec{y}|k)$ nach (4.49) für den von \mathfrak{K}_{u-k} zur Unterscheidung der Klassen u und k gelieferten Wert der Likelihood-Funktion für die Zugehörigkeit der Beobachtung \vec{y} zur Klasse k .

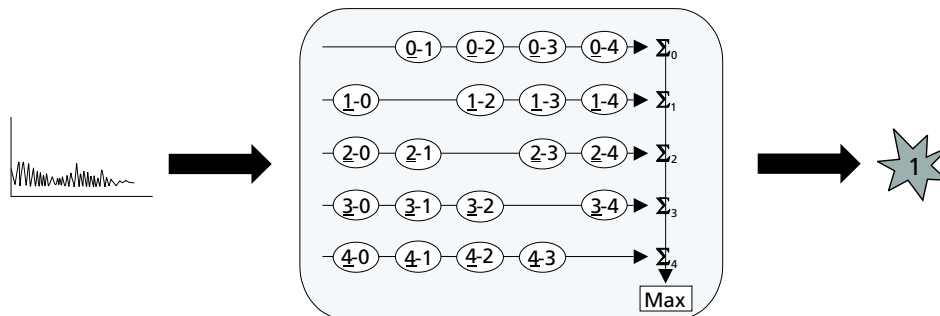


Abbildung 5.28: Zuordnung einer Beobachtung zu einer der bekannten Klassen bei der mehrstufigen Klassifikation. Die Werte der Unterscheidungsfunktion d_k entstehen durch zeilenweises Aufsummieren der Werte der Likelihood-Funktionen der einzelnen Elementarklassifikatoren.

Der „Gesamtklassifikator“ kann wie in Bild 5.28 dargestellt durch eine Matrix beschrieben werden. Die Zeilen der Matrix enthalten die Werte der von den Elementarklassifikatoren gelieferten Likelihood-Funktion. In der k -ten Zeile sind dabei die Likelihood-Werte $P_{ki}(\vec{y}|k)$ zu finden, welche die *Annahme* einer Beobachtung in der Klasse k im Vergleich zu allen anderen Klassen i für

$i \neq k$ beschreiben. Bei der Berechnung der in der Matrix enthaltenen Werte kann aus Gründen der Symmetrie $P_{ik}(\vec{y}|k) = 1 - P_{ki}(\vec{y}|k)$ gesetzt werden. Die in der Diagonale der Matrix angeordneten Elemente bleiben unbesetzt oder können zu $P_{kk}(\vec{y}|k) = 0$ gesetzt werden. Damit erhält man für die zur Entscheidungsfindung verwendete Unterscheidungsfunktion

$$d_k(\vec{y}) = \sum_{i=1}^K P_{ki}(\vec{y}|k). \quad (5.14)$$

Die Entscheidung über die Klassenzugehörigkeit von \vec{y} kann nach (4.40) aus

$$e = \arg \max_{k=1, \dots, K} d_k(\vec{y}) \quad (5.15)$$

getroffen werden. Der Fall, dass \vec{y} zu keiner der bekannten Klassen gehört, kann wieder mit Hilfe eines Schwellwertes d_{min} für d_e getroffen werden.

Im Gegensatz zu dem zuerst beschriebenen einstufigen Klassifikator kann in dem hier betrachteten Erkennungssystem für jeden Einzelklassifikator ein eigener, auf die in diesem Fall zu trennenden Klassen optimierter Merkmalsvektor verwendet werden. Dadurch können bei der Erweiterung des Erkennungssystems um neue Klassen auch neue Merkmale in die Merkmalsvektoren aufgenommen werden, die eine sichere Unterscheidung der neuen Klasse von den bereits bestehenden Klassen ermöglichen.

5.3.4 Optimierung des Merkmalsvektors

Wie in Abschnitt 5.3.2 beschrieben wird aus dem ursprünglichen Signalverlauf für die einzelnen Auswertefenster je ein Merkmalsvektor berechnet, der mit Hilfe eines entsprechend trainierten Klassifikators die Zuordnung zu einer der Klassen ermöglicht. Im Hinblick auf einen möglichst geringen Umfang der zum Trainieren des Klassifikators erforderlichen Lernstichprobe wird eine niedrige Dimension des Merkmalsraumes angestrebt. Dies soll hier dadurch erreicht werden, dass aus der Menge der zur Verfügung stehenden Merkmale nur die für die Trennung der zu unterscheidenden Klassen relevanten ausgewählt werden. Die Auswahl der Merkmale kann somit als Optimierung des Merkmalsvektors im Hinblick auf eine möglichst gute Separierbarkeit bei minimaler Länge des Merkmalsvektors aufgefasst werden.

Um die in Verbindung mit der Qualitätsdatenrecherche geforderte einfache Bedienbarkeit des Systems und seine möglichst universelle Anwendbarkeit für die verschiedensten Signalformen nicht einschränken zu müssen, soll die Optimierung des Merkmalsvektors, d. h. die Auswahl der als Eingangsgrößen für den Klassifikator zu verwendenden Merkmale, automatisch erfolgen. Zu diesem Zweck soll auf die in Abschnitt 4.4.1 beschriebenen *genetischen Algorithmen* zurückgegriffen werden.

Um genetische Algorithmen zur Lösung konkreter Probleme einsetzen zu können, ist eine geeignete *Codierung* des Problems erforderlich. Die zu optimierenden Größen müssen dabei so dargestellt werden, dass die in Kapitel 4.4.1 eingeführten genetischen Operatoren auf sie angewandt werden können. Im hier vorliegenden Fall stellt der aus dem zu bewertenden Signal berechnete vollständige Merkmalsvektor den Ausgangspunkt für die Optimierung dar. In Abhängigkeit von der zu erkennenden Signalform sollen aus dem Merkmalsvektor genau die Merkmale ausgewählt werden, die eine möglichst sichere Trennung dieser Signalform von allen anderen Signalformen zulassen. Im vorliegenden

Fall besteht das Ergebnis der Optimierung in einer Vorschrift, die angibt, welche der Merkmale in den optimierten Merkmalsvektor übernommen werden sollen.

Aus der Beschreibung der einzelnen Komponenten des Merkmalsvektors in Abschnitt 5.3.2 wird deutlich, dass im vorliegenden Fall zwei Arten von Merkmalen unterschieden werden müssen. So setzt sich der Merkmalsvektor zum einen aus einer Reihe von Merkmalen zusammen, die durch genau einen Wert pro Auswertefenster repräsentiert werden können. Die Entscheidung über die Aufnahme dieses Merkmals in den Merkmalsvektor kann daher wie in Bild 5.29 dargestellt als binäre Entscheidung aufgefasst und durch die *Phänotypen* 0 und 1 beschrieben werden. Als Beispiele für diesen Merkmalstyp können die in Abschnitt 5.3.2 eingeführten *Standardabweichungen*, *Schwankungen* oder *relativen Positionen* genannt werden. Den zweiten Merkmalstyp stellen die *Werte der Wavelet-Koeffizienten* dar. Bei diesem Merkmalstyp besteht der zu optimierende Freiheitsgrad darin, die Zahl der in den Merkmalsvektor aufzunehmenden Werte für jede Auflösungsstufe festzulegen. Im Hinblick auf die Optimierung des Merkmalsvektors mit genetischen Algorithmen können für diesen Merkmalstypen ganzzahlige Werte zwischen null und einem vorzugebenden Maximalwert als Phänotypen verwendet werden.

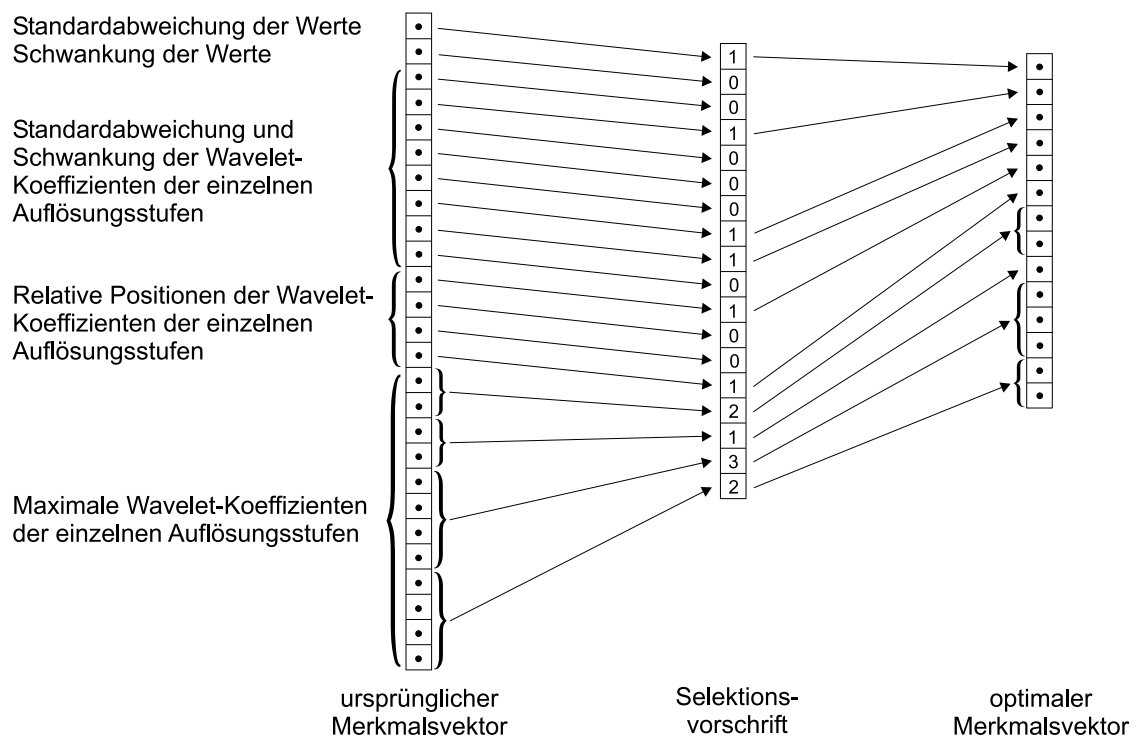


Abbildung 5.29: Selektion der zur Klassifikation zu verwendenden Merkmale aus dem zur Verfügung stehenden Merkmalsvektor.

Ausgehend von den so festgelegten Phänotypen, die noch der Begriffswelt des Optimierungsproblems entstammen, werden in einem weiteren Schritt *Genotypen* definiert, die mit Hilfe der genetischen Algorithmen mit dem Ziel der Optimierung variiert werden können. Dabei können die Phänotypen der mit einer binären Entscheidung auszuwählenden Merkmale direkt in die entsprechenden Symbole um-

gesetzt und der Reihe nach in den die Selektionsvorschrift repräsentierenden String eingefügt werden. Für die Merkmale, die mehr als zwei Möglichkeiten hinsichtlich der Übernahme in den optimierten Merkmalsvektor zulassen, wird die Anzahl der zu übernehmenden Werte in eine Binärdarstellung mit der entsprechenden Anzahl von Stellen überführt und ebenfalls in den Symbolstring aufgenommen.

Für die Lösung der Optimierungsaufgabe wird ein genetischer Algorithmus ähnlich dem von DeJong in [15] vorgeschlagenen verwendet. Er unterscheidet sich von den Standard-Algorithmen dadurch, dass die besten Individuen der letzten Generation unverändert in die jeweils nächste Generation übernommen werden. Durch dieses auch *Prinzip der Eliten* genannte Vorgehen kann die Konvergenz des Verfahrens verbessert werden, wobei jedoch zu beachten ist, dass je nach Beschaffenheit des Parameterraumes mit dieser Vorgehensweise auch die Gefahr einer frühzeitigen Einschränkung des Suchraumes verbunden ist [90].

Um im Anschluss an die Optimierung des Merkmalsvektors eine Überprüfung des Optimierungsergebnisses durchführen zu können, werden die zur Verfügung stehenden Beobachtungen in eine *Lern-* und eine *Verifikationsstichprobe* aufgeteilt. Für die Optimierung des Merkmalsvektors wird ausschließlich auf die in der Lernstichprobe enthaltenen Datensätze zurückgegriffen. Um die im Zusammenhang mit evolutionären Algorithmen erforderliche Bewertung der Individuen der verschiedenen Populationen durchführen zu können, wird die in Abschnitt 4.3.6 eingeführte *Crossvalidated Quadratic Probability Measure* (CVQPM) herangezogen. Als Ziel der Optimierung kann damit ein möglichst nahe bei eins liegender Wert für das CVQPM angesehen werden.

5.4 Erprobung des Erkennungssystems

Um die Funktionsweise des Erkennungssystems in der praktischen Anwendung darstellen zu können, muss zunächst die Erkennungsaufgabe beschrieben werden. Im betrachteten Fall soll das Auftreten der in Bild 5.30 Signalformen innerhalb eines wert- und zeitdiskreten Signalverlaufes erkannt und korrekt klassifiziert werden.

Da in der Praxis nie zwei absolut identische Signalverläufe zu beobachten sein werden, sind die in Bild 5.30 dargestellten Signale als *Beispiele* der zu erkennenden Signalformen zu betrachten. Das System soll daher die Bereiche der zu analysierenden Daten erkennen, die den dargestellten Beispielen *ähnlich* sind. Um beim Trainieren des Systems Informationen über diese Ähnlichkeit einbringen zu können, müssen für jeden zu erkennenden Signaltyp mehrere Beispiele verwendet werden. Die für jede Klasse zur Verfügung stehenden Beobachtungen werden dann zufällig der Lern- oder der Verifikationsstichprobe für die jeweilige Klasse zugeordnet, um eine Bewertung der Güte des Erkennungssystems vornehmen zu können. Im hier betrachteten Beispiel ergibt sich die in Tabelle 5.2 dargestellte Aufteilung der zur Verfügung stehenden Beobachtungen.

Zum Vergleich der in Abschnitt 5.3.3 beschriebenen verschiedenen Typen von Klassifikatoren sollen die mit den Beispieldaten erzielten Ergebnisse zunächst getrennt voneinander ermittelt und anschließend gegenübergestellt werden.

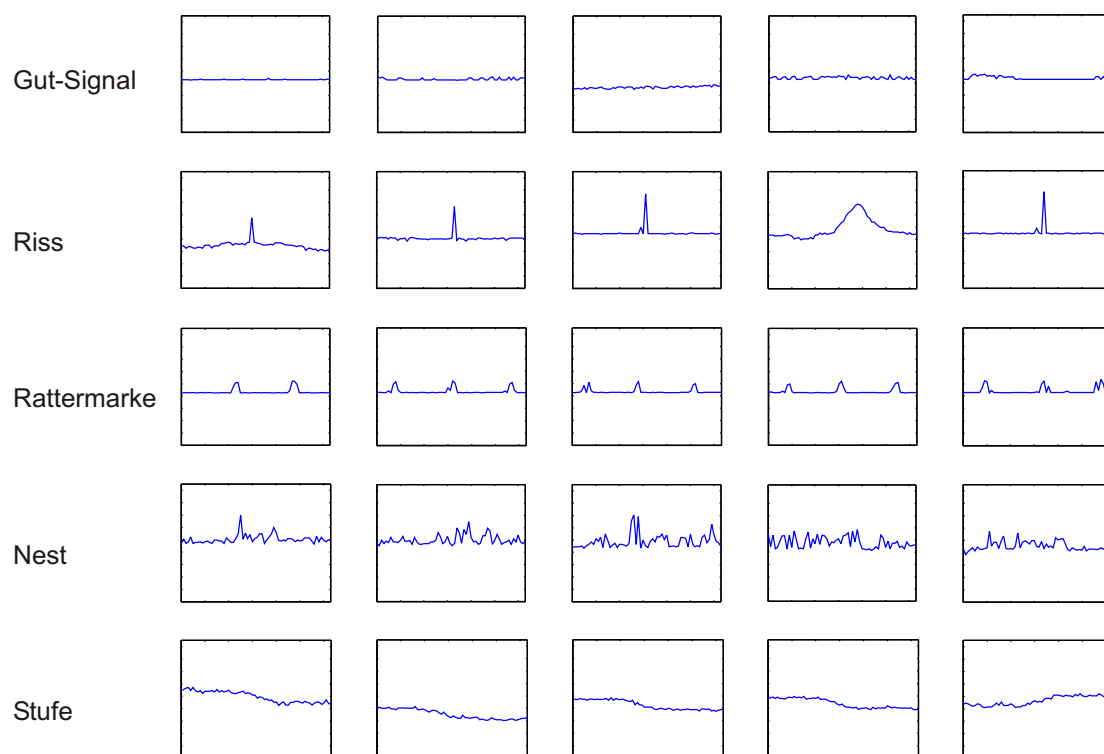


Abbildung 5.30: Beispiele der vom Erkennungssystem zu klassifizierenden Signalformen.

Einfacher Klassifikator

Wie in Abschnitt 5.3.3 beschrieben wird die Zuordnung zu den einzelnen Klassen in diesem Fall vollständig von einer Klassifikationsstufe durchgeführt. Dies bedeutet, dass der Klassifikator hier *fünf* Klassen zu unterscheiden hat. Daher ist zunächst eine Teilmenge der zur Verfügung stehenden Merkmale so zu bestimmen, dass eine möglichst gute Separierbarkeit der Klassen erreicht wird. Die dazu erforderliche Selektionsvorschrift wird nach Abschnitt 5.3.4 mit Hilfe genetischer Algorithmen so ermittelt, dass die durch den CVQPM-Wert beschriebene Güte des Klassifikators maximal wird. Der exemplarische Verlauf des CVQPM-Wertes für einen solchen Optimierungsvorgang ist in Bild 5.31 dargestellt.

Für die hier betrachtete Klassifikationsaufgabe ergibt sich auf diese Weise die in der dritten Spalte von Tabelle 5.3 aufgeführte Auswahl an Merkmalen aus der Gesamtmenge der zur Verfügung stehenden Merkmale.

Zur Darstellung des mit dem einfachen Klassifikator erzielten Ergebnisses soll in diesem Zusammenhang die in Kapitel 4.3.6 eingeführte Verwechslungsmatrix (4.56) verwendet werden, die hier zur einfacheren Interpretierbarkeit in Form einer Tabelle dargestellt ist. Da mit den Daten der Lernstichprobe keine falschen Klassifikationen erfolgten, sollen hier nur die mit den Daten der Verifikationsstichprobe erzielten Ergebnisse berücksichtigt werden.

Klasse	Lernstichprobe	Verifikationsstichprobe
Gut (0)	30	20
Riss (1)	30	20
Rattermarken (2)	30	20
Nest (3)	30	18
Stufe (4)	30	16

Tabelle 5.2: Aufteilung der zur Verfügung stehenden Beobachtungen in Lern- und Verifikationsstichprobe.

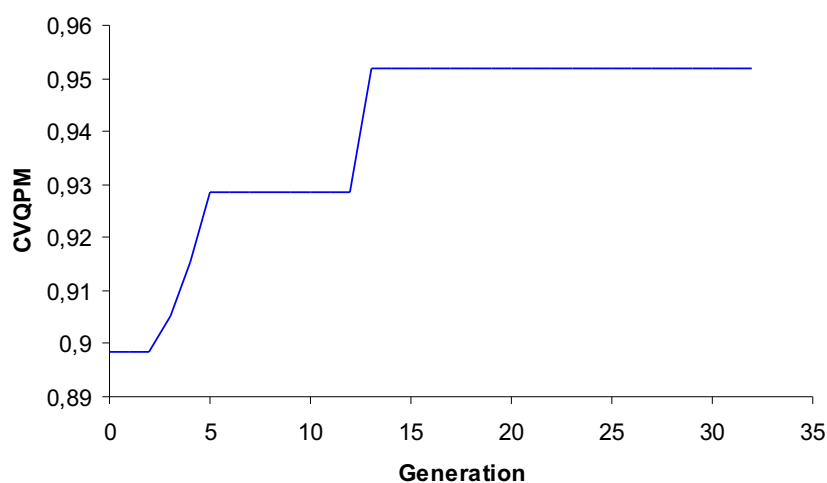


Abbildung 5.31: Verlauf des CVQPM-Wertes bei der Optimierung des Merkmalsvektors.

Die einzelnen Spalten der in Tabelle 5.4 dargestellten Verwechslungsmatrix enthalten wie bereits beschrieben die durch das Erkennungssystem getroffene Zuordnung der objektiv jeweils zu einer Klasse gehörenden Beobachtungen. Für die hier verwendete erweiterte Verwechslungsmatrix wurde darüber hinaus in der mit „Rückweisung“ („Rückw.“) bezeichneten Zeile bzw. Spalte der Fall untersucht, in dem die betrachtete Beobachtung keiner der Klassen zugeordnet werden konnte. Bei einem perfekt funktionierenden Erkennungssystem ist die Diagonale vollständig mit dem Wert 1 besetzt, bei realen Klassifikatoren verteilen sich die objektiv zu einer Klasse gehörenden relativen Häufigkeiten der Klassenzuordnungen dagegen auf je eine Spalte.

Mehrstufiger Klassifikator

Im Falle des mehrstufigen Klassifikators wird die Entscheidung über die Zugehörigkeit zu einer der bekannten Klassen wie in Kapitel 5.3.3 beschrieben durch mehrere, nacheinander durchgeführte Ver-

Pos.	Länge	Sel.	Bezeichnung
1	1	1	Standardabweichung der Werte
2	1	1	Schwankung der Werte
3	1	1	Standardabweichung der Wavelet-Koeffizienten
4	1	0	Schwankung der Wavelet-Koeffizienten
5	1	1	rel. Pos. der größten Wavelet-Koeffizienten der 4. Auflösungsstufe
6	1	0	rel. Pos. der größten Wavelet-Koeffizienten der 3. Auflösungsstufe
7	1	0	rel. Pos. der größten Wavelet-Koeffizienten der 2. Auflösungsstufe
8	1	0	rel. Pos. der größten Wavelet-Koeffizienten der 1. Auflösungsstufe
9	4	4	Wavelet-Koeffizienten der 4. Auflösungsstufe
13	8	0	Wavelet-Koeffizienten der 3. Auflösungsstufe
21	16	0	Wavelet-Koeffizienten der 2. Auflösungsstufe
37	32	1	Wavelet-Koeffizienten der 1. Auflösungsstufe

Tabelle 5.3: Selektion der Merkmale für den einstufigen Klassifikator.

zugeord. Klasse	objektive Klasse					
	Rückw.	Gut	Riss	Ratter.	Nest	Stufe
Rückw.	1	0	0.03	0	0	0
Gut	0	0.95	0	0.03	0	0
Riss	0	0.05	0.94	0	0	0.07
Ratter.	0	0	0	0.97	0	0
Nest	0	0	0.03	0	1	0
Stufe	0	0	0	0	0	0.93

Tabelle 5.4: Verwechslungsmatrix der Verifikationsstichprobe für den einfachen Klassifikator.

gleiche zwischen je zwei Klassen ermittelt. In dem hier betrachteten Beispiel, in dem fünf Klassen unterschieden werden sollen, bedeutet dies, dass aufgrund der Symmetrie der Matrix insgesamt zehn Einzelklassifikatoren zur Unterscheidung von je zwei Klassen trainiert und im Hinblick auf eine möglichst sichere Trennung der Klassen optimiert werden müssen. Die Durchführung der Optimierungsläufe erfolgt analog zu der beim einfachen Klassifikator beschriebenen Vorgehensweise, so dass hier nur die Ergebnisse, d. h. die in Tabelle 5.5 enthaltenen Selektionsvorschriften für die Merkmalsvektoren der einzelnen Klassifikatoren dargestellt werden sollen.

Wie beim einfachen Klassifikator soll das mit der Verifikationsstichprobe erzielte Klassifikationsergebnis auch für den mehrstufigen Klassifikator anhand der Verwechslungsmatrix dargestellt werden.

Pos.	Länge	0-1	0-2	0-3	0-4	1-2	1-3	1-4	2-3	2-4	3-4
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0
3	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1
4	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1
5	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1
6	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1
7	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0
8	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0
9	4	1	4	1	3	4	4	3	4	2	3
13	8	0	3	3	1	1	0	2	0	3	0
21	16	2	1	2	3	0	1	3	0	0	3
37	32	0	0	0	3	2	3	0	0	1	2

Tabelle 5.5: Selektion der Merkmale bei mehrstufiger Klassifikation.

zugeord. Klasse	objektive Klasse					
	Rückw.	Gut	Riss	Ratter.	Nest	Stufe
Rückw.	1	0	0	0	0	0
Gut	0	0.95	0	0	0	0
Riss	0	0.05	0.95	0	0	0
Ratter.	0	0	0	1	0	0
Nest	0	0	0.05	0	1	0.07
Stufe	0	0	0	0	0	0.93

Tabelle 5.6: Verwechslungsmatrix der Verifikationsstichprobe für den mehrstufigen Klassifikator. Die Verwechslungsmatrix gibt an, welcher Anteil der Beobachtungen objektiv der richtigen Klasse zugeordnet wird.

Vergleich der Klassifikatoren

Der Vergleich der in Tabelle 5.4 und Tabelle 5.6 aufgeführten Verwechslungsmatrizen zeigt, dass die beiden Klassifikatoren in Verbindung mit den hier betrachteten Signalformen ein annähernd gleich gutes Klassifikationsergebnis liefern. Der einfache Klassifikator bietet den Vorteil eines geringeren Rechenaufwandes, da für jede zu bewertende Beobachtung nur ein Merkmalsvektor ausgewertet werden muss, der mehrstufige Klassifikator bietet den Vorteil der einfachen Erweiterbarkeit um zusätzliche Klassen. Die Entscheidung für eine der hier untersuchten Varianten kann also entsprechend der anwendungsspezifischen Anforderungen getroffen werden und hat auf den prinzipiellen Verlauf der Qualitätsdatenrecherche keinen entscheidenden Einfluss.

Kapitel 6

Automatische Ultraschallprüfung von Hüllrohren

Nachdem die Intention und Funktion eines Systems zur Qualitätsdatenrecherche einschließlich der zugrunde liegenden Verfahren beschrieben wurden, sollen der Einsatz und der Nutzen eines solchen Systems anhand einer praktischen Aufgabenstellung dargestellt werden.

Wie in Kapitel 3 beschrieben ist das Verfahren der Qualitätsdatenrecherche vor allem für die Qualitätssicherung von Bauteilen interessant, deren Versagen ein erhebliches Schadensausmaß erwarten lässt. Die aus Gründen der Produkthaftung erforderliche Dokumentation der durchgeführten Prüfungen stellt eine sehr gute Ausgangsposition für die Einführung eines Qualitätsdatenrecherchesystems dar. Dabei ist es jedoch notwendig, dass die Dokumentation „maschinenlesbar“ ist, d. h. dass die Erfassung und Archivierung der Daten rechnergestützt erfolgt.

Ein Beispiel für Bauteile, die die genannten Anforderungen erfüllen, sind wie bereits in [81] beschrieben *Hüllrohre für Reaktorbrandelemente*. Die in einem Kaltumformprozess aus einer Zirkoniumlegierung hergestellten Rohre nehmen den Kernbrennstoff in Form von Tabletten auf und sind während des Einsatzes im Reaktor hohen Druck- und Temperaturbelastungen ausgesetzt. Aufgrund der im Falle des Versagens zu erwartenden Kosten muss die Qualität jedes einzelnen Hüllrohres individuell geprüft und dokumentiert werden. Für die Herstellung der Hüllrohre bzw. der Brennstäbe ist dabei die Dokumentation genauso wichtig wie das eigentliche Produkt: Ein Hüllrohr, für das keine Dokumentation vorliegt, darf nicht weiterverarbeitet werden und ist wie ein fehlerhaftes Rohr zu betrachten.

6.1 Prüfverfahren

Eine entscheidende Rolle bei der Sicherung der Qualität der Rohre spielt das Verfahren der *Ultraschallprüfung*. Das Verfahren beruht im Grundsatz darauf, dass Ultraschallwellen mit Hilfe eines Kopplmediums (z. B. Wasser) in das zu prüfende Werkstück eingeleitet werden. Die Schallwellen breiten sich im Material aus und werden an den Wänden des Werkstücks, aber auch an *Rissen* reflektiert. Das auf diese Weise entstehende Echo der ursprünglich in das Werkstück eingebrachten Schallwellen ermöglichen mit Hilfe geeigneter Auswerteverfahren eine Aussage darüber, ob und ggf. wo eine Fehlstelle im Werkstück vorliegt.

Im hier vorliegenden Fall der Prüfung von Rohren kann mit Hilfe der Ultraschallprüfung sowohl eine *Dimensionsprüfung* als auch eine Prüfung auf *Materialfehler* durchgeführt werden. Die von den um das zu prüfende Rohr rotierenden Ultraschallprüfköpfen gelieferten Signale werden, wie in Bild 6.1 dargestellt, zunächst von der prozessorgesteuerten Anlagenelektronik aufbereitet. Das Ergebnis dieser Vorverarbeitung sind im Falle der Dimensionsprüfung Informationen über den Außendurchmesser, die

Wanddicke und die Länge des Rohres. Die Materialprüfung liefert mehrere Fehlersignale, die je nach Ausrichtung der Prüfköpfe der Tiefe von Längs- bzw. Querrissen entsprechen. Zur Auswertung der Daten stellt die Anlagenelektronik eine für normale Anwendungen ausreichende Bewertung mit Hilfe von Schwellwerten zur Verfügung. Im Hinblick auf die Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten Verfahren können die von der Prüfanlage zur Verfügung gestellten Daten als Zeitreihen betrachtet werden. Daher soll hier auf eine detaillierte Beschreibung der Ultraschallprüftechnik verzichtet werden. Für eine weiter gehende Beschreibung der Grundlagen und der prüftechnischen Anwendung der Ultraschalltechnik wird z. B. auf [16, 4, 51] verwiesen.

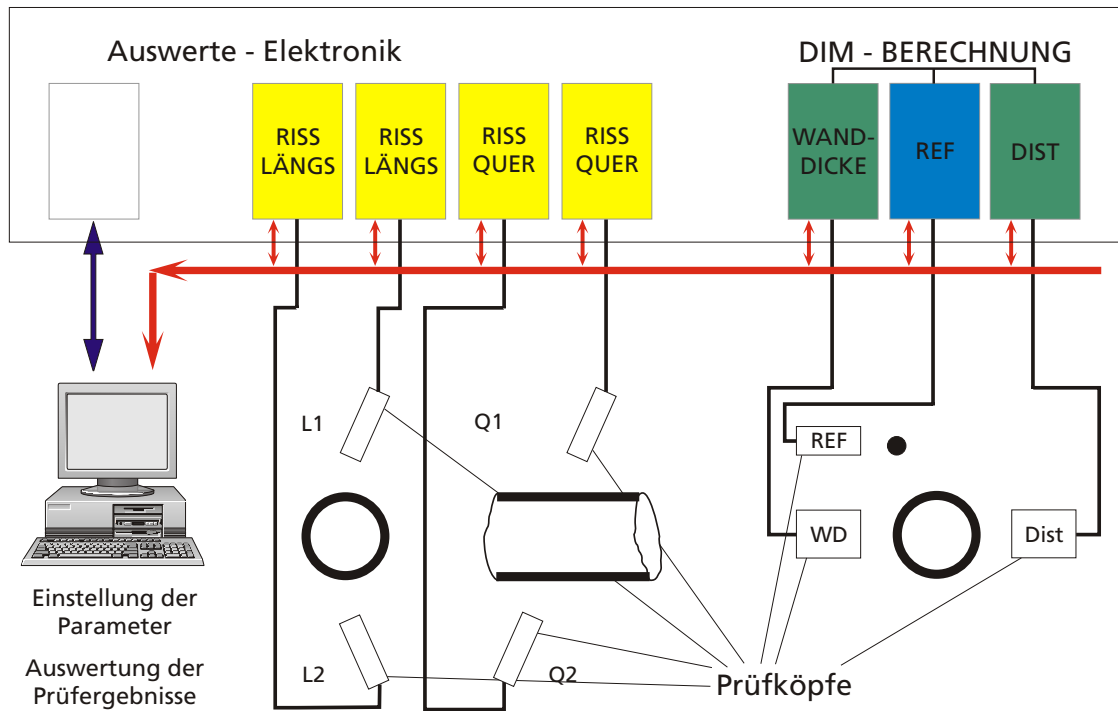


Abbildung 6.1: Prinzipieller Aufbau einer Ultraschall-Rotationsprüfanlage für die Riss- und Dimensionsfehlerprüfung nach [65].

Aufgrund der hohen Qualitätsanforderungen ist eine einfache Bewertung mittels Schwellwerten für die Prüfung von Hüllrohren nicht ausreichend. Bei der Bewertung der Rohre müssen hier neben der *Fehlerstärke* auch verschiedene *Fehlertypen* sowie der *Ort* des Fehlers auf dem Rohr unterschieden werden. Beispielsweise sind an den Rohrenden aufgrund der Beanspruchung durch nachfolgende Bearbeitungsschritte andere Rückweisgrenzen als in der Rohrmitte denkbar. Ähnliche Unterschiede bei der Bewertung der Fehleranzeigen sind auch zu beachten, wenn an einer Stelle gleichzeitig ein Längs- und ein Querfehler auftritt. Über größere Bereiche regelmäßig auftretende kleine Rissanzeigen weisen auf die Beschädigung der Rohroberfläche beim abschließenden Schleifen hin und können durch die Wiederholung dieses Bearbeitungsschrittes nachgearbeitet werden, während unregelmäßige, in geringeren Abständen aufeinander folgende Anzeigen der gleichen Stärke bereits zum Ausfall des Rohres führen können. Diese vergleichsweise feine Unterscheidung von Fehlertypen führt dazu, dass die

Prüfdaten vielfach noch in Form von Schrieben wie in Bild 6.2 dargestellt ausgedruckt und manuell bewertet werden.

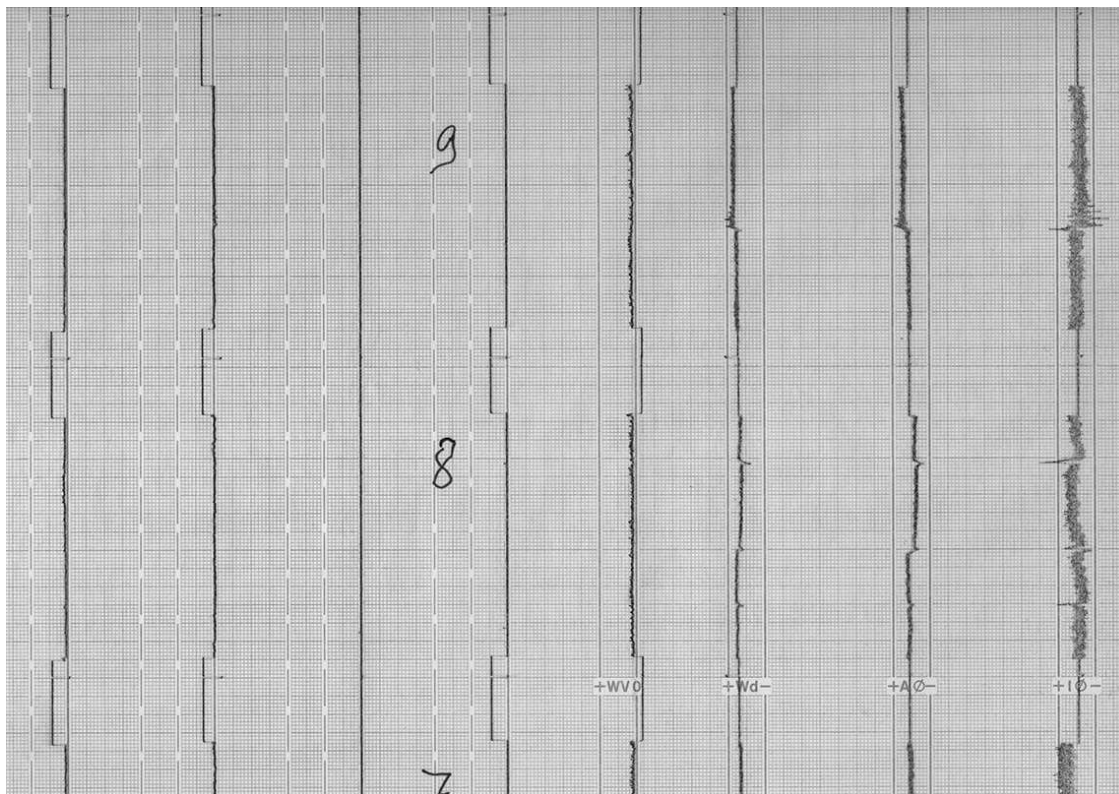


Abbildung 6.2: Auf Papier aufgezeichneter Ultraschall-Schrieb eines Hüllrohres zur manuellen Bewertung durch einen Prüfer. Die einzelnen Datenspuren zeigen Längs- und Querfehler sowie die Wandstärke, den Innen- und Außendurchmesser entlang des Rohres an.

Die in dieser Arbeit im Zusammenhang mit dem System zur Qualitätsdatenrecherche beschriebenen Verfahren ermöglichen den Aufbau eines Erkennungssystems, mit dem die Klassifikation der verschiedenen Fehlertypen und eine anschließende differenzierte Bewertung machbar werden. Aufgrund der Fähigkeit zur automatischen Adaption an die zu unterscheidenden Signalverläufe ist der Einsatz unter Produktionsbedingungen auch ohne aufwendige und applikationsspezifische Anpassungen der Software zur Signalverarbeitung möglich. Die aus Gründen der Nachweispflicht für die durchgeführten Prüfungen ohnehin erforderliche Speicherung und Archivierung der Prüfdaten ermöglicht darüber hinaus die Nutzung der Daten für weitergehende Analysen mit den Verfahren der Qualitätsdatenrecherche.

6.2 Aufbau des automatisierten Prüfsystems

Zur Realisierung eines nachgeschalteten Auswertesystems mit den genannten Eigenschaften ist es zunächst erforderlich, die von der Anlagenelektronik der Ultraschall-Prüfanlage aufbereiteten Daten an

das Auswertesystem zu übergeben. In Abhängigkeit vom technischen Stand der Anlagenelektronik ist dabei sowohl die Übergabe von Analogsignalen als auch die Anbindung über ein LAN denkbar. Um die Rückverfolgbarkeit der durchgeführten Prüfungen zu gewährleisten, wird die von einem automatischen Lesesystem erfasste individuelle Nummer des geprüften Rohres wie in Bild 6.3 dargestellt ebenfalls an das Auswertesystem übertragen und dem Schrieb zugeordnet.

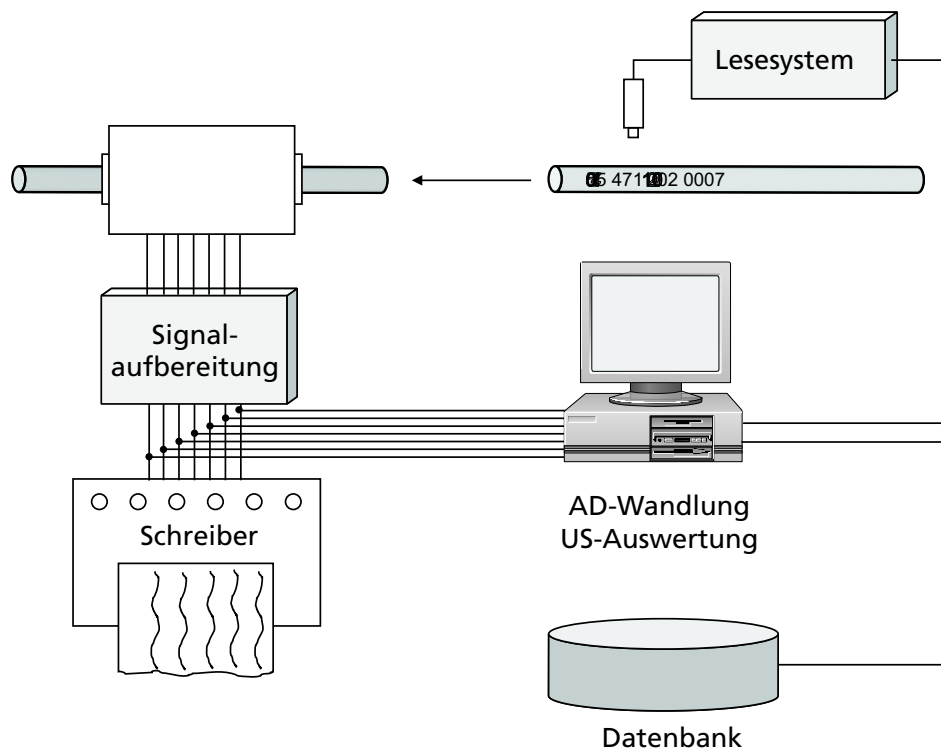


Abbildung 6.3: Anbindung des Auswertesystems zur Fehlerklassifikation und Dokumentation an die Ultraschall-Prüfanlage. Die Prüfdaten werden als Analogdaten oder über eine Netzwerkverbindung erfasst, der individuellen Nummer des geprüften Rohres zugeordnet und bewertet. Das Ergebnis der Bewertung wird zusammen mit den der Auswertung zugrunde liegenden Daten in einer Datenbank gespeichert.

Zur Unterstützung des Prüfers an der Anlage werden die erfassten Prüfdaten in Echtzeit wie in Bild 6.4 gezeigt am Bildschirm des Auswertesystems dargestellt. Soweit möglich wurden die an der Gesamtanlage erforderlichen Interaktionen mit den verschiedenen Systemen auf ein Minimum reduziert. So ist die Anmeldung des Prüfers beispielsweise nur an einem System erforderlich. Die Benutzerdaten und Berechtigungen werden nach erfolgreicher Bestätigung durch die Datenbank automatisch an alle zur Prüfanlage gehörenden Systeme verteilt.

Auf der Basis des im Auswertesystem vorliegenden Wissens werden die Prüfdaten auf bekannte Fehlermerkmale untersucht. Beim Vorhandensein von Fehlern erfolgt eine typspezifische Bewertung anhand der vorgegebenen Warn- und Rückweisgrenzen. Die auf diese Weise ermittelten Ergebnisse werden zusammen mit den ursprünglichen Daten der Ultraschall-Prüfanlage in einer Datenbank abgelegt,

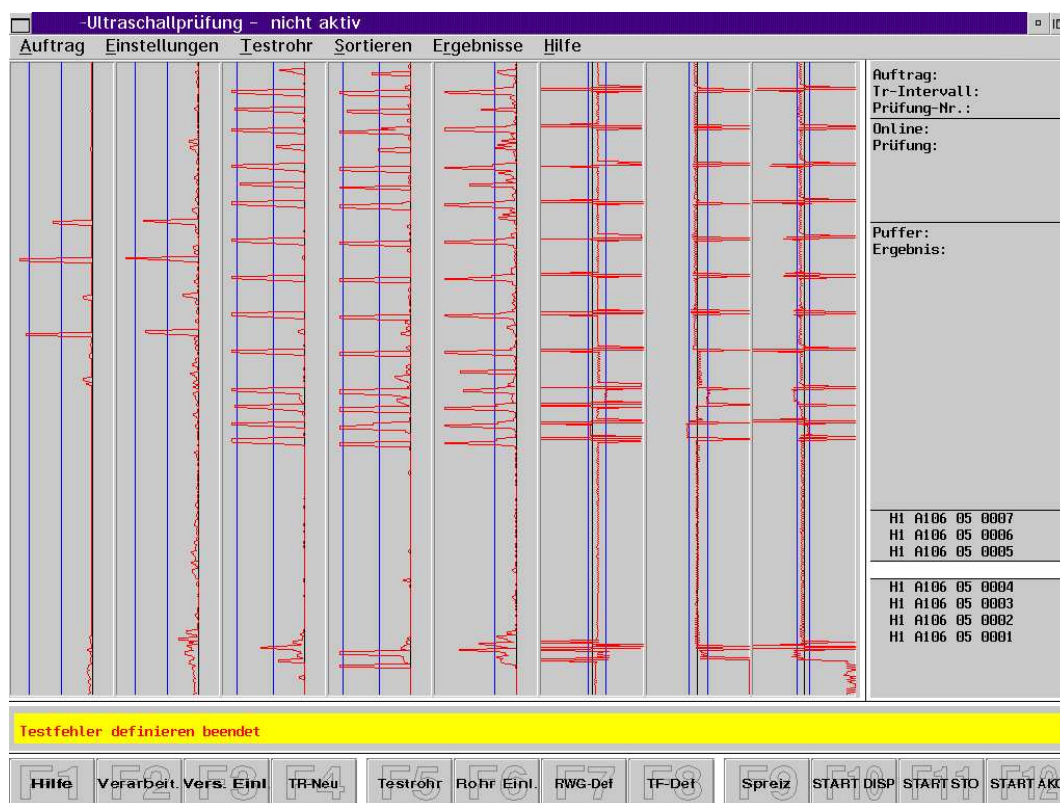


Abbildung 6.4: Die erfassten Ultraschalldaten werden vom Auswertesystem in Echtzeit dargestellt und verarbeitet. Darüber hinaus unterstützt die Anwendung die Einrichtung der Anlage und überwacht die Güte der Prüfanlage bzw. der Justierung der Prüfköpfe durch die Auswertung von in regelmäßigen Abständen durchzuführenden Testrohrdurchläufen.

so dass eine zentrale Archivierung aller im Zusammenhang mit der Prüfung anfallenden Informationen möglich wird.

Neben der Auswertung und Speicherung der Ultraschalldaten stellt das Auswertesystem auch die regelmäßige Überwachung und Dokumentation der Einstellung der Gesamtanlage sicher. Zu diesem Zweck müssen in festgelegten zeitlichen Abständen oder nach der Prüfung einer festgelegten Anzahl von Rohren so genannte *Testrohrdurchläufe* durchgeführt werden. Das Testrohr ist dabei ein der Dimension der Prüflinge entsprechendes Rohr, in das gezielt Fehler bekannter Stärke eingebracht wurden. Die bei den Testrohrdurchläufen erfassten Daten werden analog zu den Daten von Rohren aus der Produktion ausgewertet. Anhand der dabei ermittelten Fehlerstärken kann der Zustand der Prüfanlage überwacht und dokumentiert werden. Bild 6.5 zeigt eine in der beschriebenen Weise aufgebaute Prüfanlage für den Einsatz unter Produktionsbedingungen.

Die in der beschriebenen Weise funktionierenden Ultraschall-Prüfanlagen sind in ein DV-System eingebunden, das die Abläufe in der Endprüfung, wie in Bild 6.6 dargestellt, aus informationstechnischer Sicht abbildet. Dabei ist entscheidend, dass vorbereitende Arbeiten wie auch die Verwaltung und Ar-

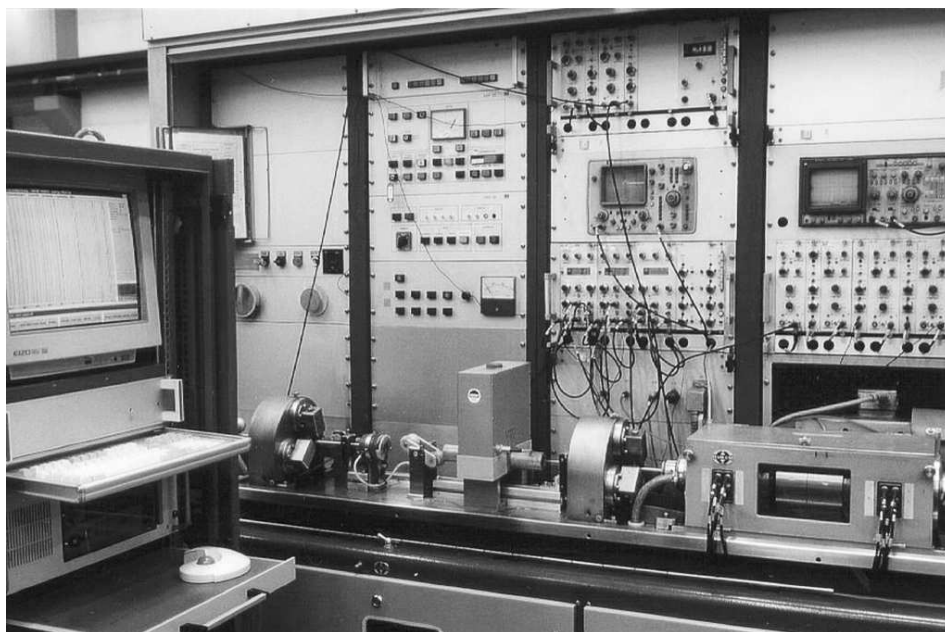


Abbildung 6.5: Prüfsystem zur automatischen Ultraschallprüfung von Hüllrohren für den Einsatz unter Produktionsbedingungen. Das Auswertesystem für die Ultraschalldaten übernimmt dabei auch die übergeordnete Steuerung des Prüfbetriebes. Dies umfasst neben der Verarbeitung der bei der Prüfung von Rohren aus der Produktion anfallenden Daten auch die Überwachung der Güte der Prüfanlage mit Hilfe von speziellen Testrohren.

chivierung der Daten zentral erfolgen, die mit der Prüfung zusammenhängenden Aufgaben jedoch im Fertigungs- bzw. Prüfbereich durchgeführt werden können.

6.3 Festlegen von Suchmustern

Ein großer Teil der an den erfassten Prüfdaten durchgeführten Auswertungen erfolgt mit Hilfe der in Kapitel 5.2.2 als „einfach“ bezeichneten Prüfverfahren. Als Beispiel können hier die Dimensionsprüfungen (Außen- und Innendurchmesser, Wanddicke, Ovalität ...) genannt werden. Das Wissen über die Vorgehensweise bei der Bewertung der Signale ist dabei explizit in den Auswerteverfahren, z. B. in Form eines Algorithmus zur Erkennung des Über- bzw. Unterschreitens von Schwellwerten, und der Art des Signales enthalten.

Neben diesen fest codierten Auswerteverfahren stehen im hier betrachteten System auch Auswerteverfahren zur Verfügung, die sich zur Laufzeit sehr flexibel auf die zu erkennende Signalform einstellen. Wie bereits erwähnt, muss bei diesen Verfahren zwischen einer Lern- und einer Kannphase unterschieden werden. In der Lernphase findet die Adaption des Erkennungssystems an die in der Kannphase zu erkennende Signalform statt. Die Adaption erfolgt mit Hilfe von ausgewählten Beispielen der zu suchenden Signalformen. Diese werden im Kontext der Qualitätsdatenrecherche meist aus bereits erfassten und ggf. in einer Datenbank gespeicherten Datensätzen entnommen.

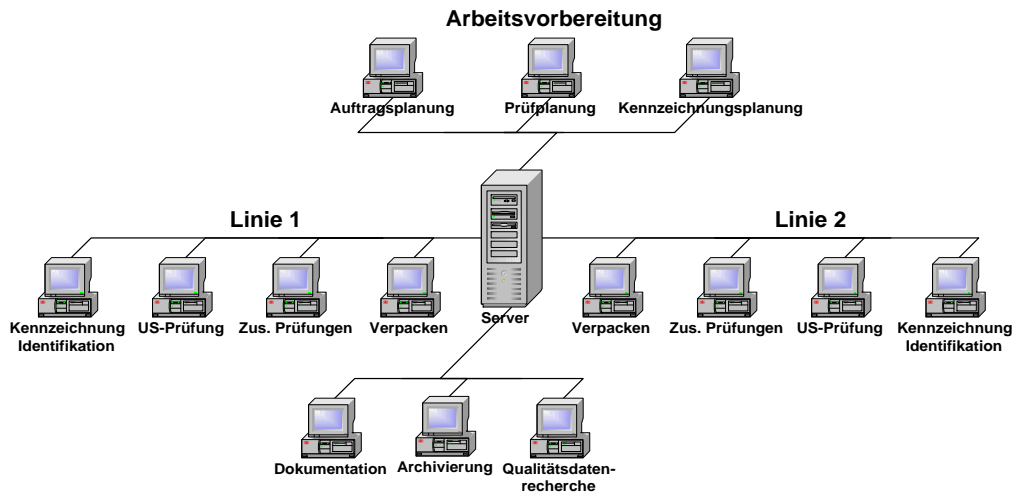


Abbildung 6.6: Abbildung der Abläufe bei der Endprüfung von Hüllrohren in eine DV-Architektur. Die Vorbereitung der Prüfungen und die Verwaltung und Archivierung der dabei erfassten Daten können zentral erfolgen, während die mit der Erfassung und Auswertung in Verbindung stehenden Aufgaben im Fertigungs- bzw. Prüfbereich durchgeführt werden.

Um die Lösung dieser Aufgabe, wie im Zusammenhang mit der Qualitätsdatenrecherche gefordert, auch Anwendern ohne spezielle Kenntnisse der zugrunde liegenden Datenstrukturen zu ermöglichen, muss ein geeignetes Werkzeug zur Verfügung gestellt werden. Bild 6.7 zeigt eine entsprechende Lösung, mit der gespeicherte Datensätze visualisiert und interaktiv kommentiert werden können. Im Rahmen der Kommentierung kann der Ort des interessierenden Signalabschnitts innerhalb des Signalverlaufes gekennzeichnet und einer, der vom Erkennungssystem zu unterscheidenden Klassen zugeordnet werden. Die auf diese Weise erfolgte Kennzeichnung des Signals bzw. einzelner Signalabschnitte wird zunächst als *Beschreibung* in einer separaten Datei gespeichert. Mit Hilfe dieser Beschreibungsdateien können dann in einem zweiten Schritt die zur Lern- und Verifikationsstichprobe benötigten Signalabschnitte aus den Datensätzen extrahiert werden.

Nachdem das Erkennungssystem mit den so gewonnenen Trainingsdaten an die interessierende Signalform adaptiert wurde, kann eine erste Suche in der zur Verfügung stehenden Grundgesamtheit der gespeicherten Daten erfolgen. Ziel der Suche ist es, Signalabschnitte zu finden, die den beim Trainieren des Systems verwendeten Beispielen mehr oder weniger ähnlich sind. Das Ergebnis der Suche wird wie das Ergebnis der manuellen Auswahl von Suchmustern in Beschreibungsdateien gespeichert, so dass das in Bild 6.7 dargestellte Werkzeug auch zur Beurteilung und zur ggf. erforderlichen interaktiven Überarbeitung des Suchergebnisses verwendet werden kann.

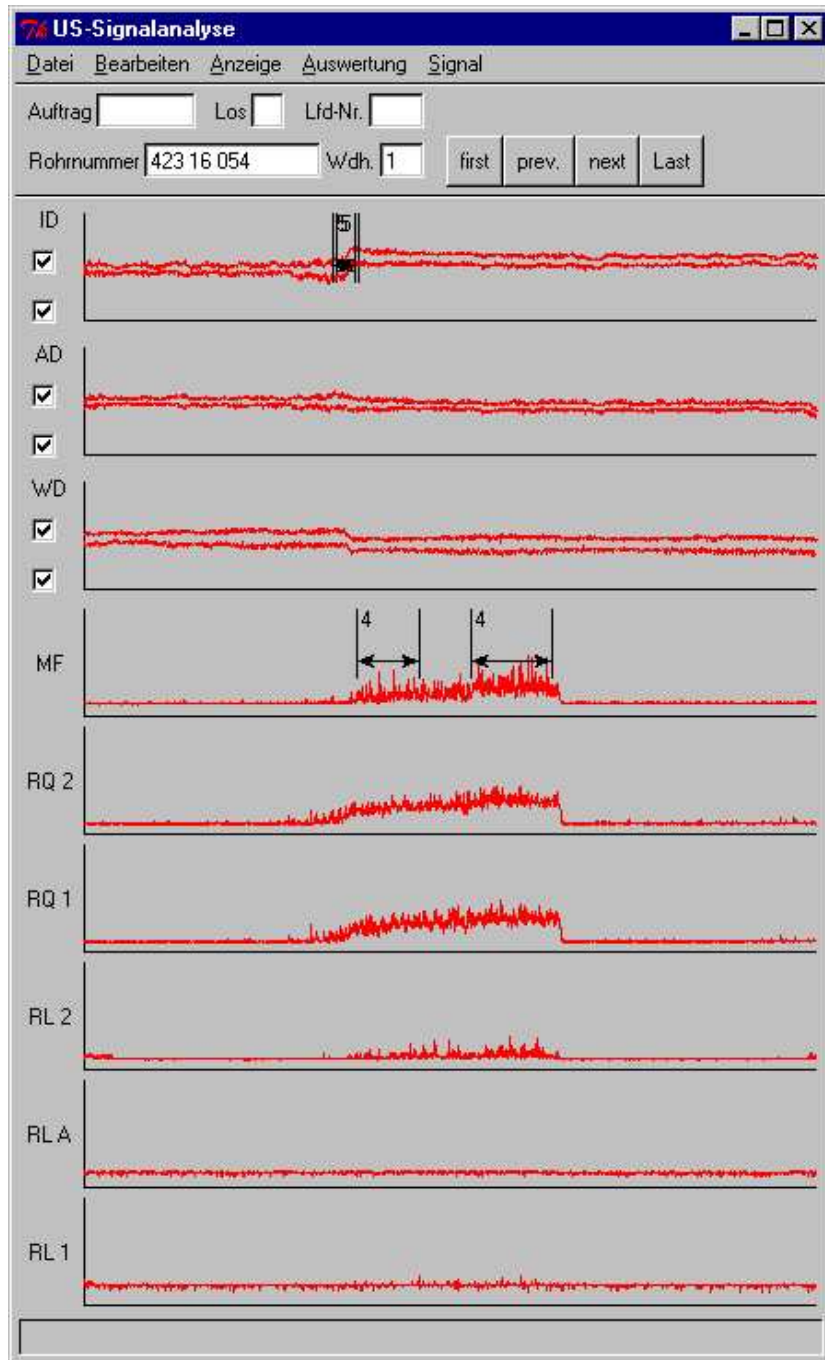


Abbildung 6.7: Graphisches Werkzeug zur Darstellung und Kommentierung der in den gespeicherten Prüfdaten enthaltenen Fehlermerkmale. Die oberen Signalspuren zeigen den Verlauf Innen- und Außendurchmesser sowie die Wanddicke eines Hüllrohres, wobei in einer Signalspur jeweils der maximale und minimale Wert auf einer Umfangslinie des Rohres dargestellt werden. Die restlichen Spuren enthalten die Anzeigen für verschiedene Arten von Rissfehlern. Die markierten Bereiche entsprechen fehlerhaften Abschnitten des Hüllrohres, wobei durch die an den Markierungen angegebene Nummer der Typ des Fehlers (im Beispiel bedeutet 1=„Nest“ und 5=Stufe) codiert wird.

Kapitel 7

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Qualitätsdatenrecherche als eine auf der operativen Ebene angesiedelte Möglichkeit zur Verbindung der Ziele von sichernder und verbessernder Qualitätssicherung entwickelt. Vor dem Hintergrund der Vision des Total Quality Managements (TQM) kann die Qualitätsdatenrecherche einen wichtigen Beitrag dazu leisten, die bei der Durchführung von Prüfungen anfallenden Daten nicht nur zur Beurteilung der aktuellen Qualitätsslage, sondern auch für die Entwicklung und Verifikation *neuer* Merkmale zur Bewertung der Produktqualität zu nutzen. Auf diese Weise ist sie in der Lage, bislang noch nicht erkannte Qualitätsprobleme an bereits im Einsatz befindlichen Produkten durch eine erneute Auswertung der archivierten Daten aufzudecken.

Im Hinblick auf die wirtschaftlichen Gesichtspunkte konnten die spezifischen Anforderungen der Qualitätsdatenrecherche so in die Welt der bereits eingeführten qualitätsorientierten C-Techniken integriert werden, dass der erwartete Nutzen bei minimalem Zusatzaufwand erreicht werden kann. Besonders günstige Voraussetzungen für den Einsatz der Qualitätsdatenrecherche sind immer dann gegeben, wenn die durchgeführten Prüfungen detailliert dokumentiert werden. So wird für Bauteile, deren Versagen ein für den Hersteller nicht akzeptables Schadensausmaß erwarten lässt, aufgrund der aktuell geltenden Regelungen für die Produkthaftung bereits heute vielfach eine, den Anforderungen der Qualitätsdatenrecherche genügende, Dokumentation durchgeführt.

Eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung der Qualitätsdatenrecherche stellt die integrierte Betrachtung der Erfassung von Mess- und Prüfdaten sowie die Überwachung der Prüfeinrichtungen in der Fertigung dar. Im Interesse einer lückenlosen Möglichkeit zur Zuordnung der Informationen wird dabei die Bedeutung der Vernetzung aller beteiligten Systeme und der *durchgängigen* Strukturierung der anfallenden Daten deutlich. Das Vorhandensein eines Systems miteinander vernetzter und auf eine gemeinsame Datenbasis zugreifender Teilsysteme erweist sich damit als „Nährboden“ für eine unter produktiven Bedingungen funktionierende Qualitätsdatenrecherche.

Um die Qualitätsdatenrecherche für die industrielle Praxis nutzbar zu machen, sind leistungsfähige mathematische Verfahren zur Signalanalyse erforderlich. Der hohe Anspruch an die Verfahren ist dabei sowohl durch die universelle Anwendbarkeit als auch durch die Forderung nach Nutzbarkeit durch nur wenig mathematisch vorgebildete Anwender begründet.

In der vorliegenden Arbeit werden alle zur Realisierung eines unter Produktionsbedingungen einsetzbaren Qualitätsdatenrecherchesystems erforderlichen Bestandteile betrachtet. Dabei werden die wesentlichsten Aspekte aller Ebenen eines solchen Systems zunächst grundsätzlich dargestellt und dann anhand eines praktischen Beispiels konkretisiert. So wird, ausgehend von der Erfassung und Vorverarbeitung der Messdaten, auf die Generierung von Merkmalen und die Bildung von Merkmalsvektoren

eingegangen. Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten zur Anpassung an unterschiedlichste Signalformen spielen Wavelets bei der Merkmalsgenerierung eine entscheidende Rolle.

Der Merkmalsvektor stellt den Ausgangspunkt für die Beschreibung der wichtigsten Grundlagen von Klassifikationsverfahren dar. Vor dem Hintergrund der durch die Qualitätsdatenrecherche aufgetragenen Anforderungen wird auf die Adaption des Erkennungssystems durch die automatische Optimierung des Merkmalsvektors eingegangen. Dabei spielen sowohl die zur Optimierung verwendeten genetischen Algorithmen als auch die zur Beurteilung der als Zielgröße wichtigen Erkennungssicherheit eine wichtige Rolle.

Die genannten Verfahren und Methoden werden ausgehend von den wichtigsten Use Cases eines Qualitätsdatenrecherchesystems unter Verwendung der Unified Modeling Language (UML) in ein erstes Analysemodell für den nachfolgenden Softwareentwurf und die Implementierung der Kernkomponenten eines Systems zur Qualitätsdatenrecherche abgebildet. Für die wichtigsten Bestandteile des Verfahrens zur Adaption des Systems an ein Suchmuster sowie zur nachfolgenden Suche nach diesem Muster wird dieser Entwurf soweit verfeinert, dass eine Verifikation des Verfahrens mit Hilfe exemplarischer Daten durchgeführt werden kann.

Am Beispiel der Endprüfung von Hüllrohren für Kernbrennstäbe wurde ein integriertes System miteinander vernetzter Anwendungen entworfen, realisiert und in den produktiven Betrieb überführt. Dabei wurde zunächst eine Verteilung der Systemfunktionen auf die verschiedenen Komponenten vorgenommen, die in Form von miteinander kooperierenden Anwendungen realisiert wurden. Auch konnten spezielle, durch das betrachtete Produkt begründete Anforderungen nach einer möglichst weitreichenden Absicherung der erfassten Daten gegen Verlust berücksichtigt werden. Ein für die zentrale Ablage der Daten in einem Datenbanksystem geeignetes Datenmodell wurde auf einem Server implementiert und zusammen mit den verschiedenen Teilanwendungen des Gesamtsystems in den produktiven Betrieb überführt.

Das auf diese Weise entstandene System bietet damit die besten Voraussetzungen zu einer Weiterentwicklung der Qualitätsdatenrecherche. Dabei können neue Auswerteverfahren für die Qualitätsdatenrecherche verfügbar gemacht werden und gleichzeitig kann die Anwenderfreundlichkeit des Systems weiter verbessert werden. Entscheidend hierbei ist, dass die hier vorgestellte Lösung alle für diese Weiterentwicklungen erforderlichen Informationen in einem integrierten System zur Verfügung stellt und somit als effiziente und komfortable Entwicklungsumgebung dienen kann.

Da für die im Rahmen der Qualitätsdatenrecherche erforderliche Analyse der Signale prinzipiell verschiedene mathematische Verfahren anwendbar sind, ist auch eine Standardisierung der Schnittstellen zur Einbindung weiterer Algorithmen denkbar. Darüber hinaus ist es grundsätzlich möglich, die Qualitätsdatenrecherche auch in Verbindung mit konventionellen CAQ-Systemen verfügbar zu machen. Die modulare Architektur der am Markt verfügbaren Systeme und die Flexibilität des hier beschriebenen Verfahrens bieten die besten Ausgangsbedingungen dafür.

Chapter 8

Summary

The "Integrated Quality Information and Enquiry System for Documented Testing of Components" developed in this work provides a new approach to take benefit from filed test data of components after placing them into circulation. Integration means, that the new methods can be seamlessly integrated into the testing processes supported by modern computer aided quality (CAQ) systems.

8.1 Motivation and Objective of Quality Data Enquiry

A large number of measures in industrial production systems focus the objective to achieve products with best quality at lowest costs. Modern CAQ-Systems help coming closer to this goal by providing suitable methods for development and production processes.

Besides all theory, the efforts of modern quality assurance cannot prevent the production of defective parts. Efficient measuring and testing technology shall identify affected parts to prevent them from being used in subsequent production steps and being placed into circulation. The consequences that result from damages caused by defective parts follow the regulations of the current product liability act. One possibility to avoid liability is to prove that the part that caused the damage has been without fault when it was produced. This can be proved by long-term documentation of the data and results from the tests of the part. Doing tests with subsequent saving of test data and results will be referred to as "documented testing" of components.

Technical and economical reasons inhibit to find all defects under manufacturing conditions. New testing equipment and methods allow more precise monitoring of product and process quality, continued development of products and manufacturing processes lead to an enhanced understanding of quality relevant features and properties. The idea of the herein developed method of *quality data enquiry* is to make these improvements available for components or products after placing them into circulation. This makes it possible to use the extended capabilities of advanced methods to reanalyse the stored data and search for new representations of faults. Compared to the well known recall actions that often concern large numbers of products that *may* be affected by the problem and result in enormous costs, the use of quality data enquiry that is integrated in quality assurance and documentation system can lead to considerable saving of costs.

The objective of this work is, to develop the idea of quality data enquiry in general and to demonstrate its principles with an illustrative example. It shall be shown that the mathematical and technical challenges that result from the implementation of a quality data enquiry system can be coped with currently available methods and technologies. This means, that the solution described in this work is

one of a large number of ways to realize a system for the concrete use of quality data enquiry under real life conditions.

The realization of a quality data enquiry system requires two main parts:

- Careful and complete acquisition of test data and information in combination with an appropriate management and saving of the data as technical enabler of quality data enquiry.
- Efficient and flexible algorithms to adapt the search to the quality relevant characteristics of interest and retrieve similar signals in the archived test data. These algorithms can be looked at as the mathematical core of quality data enquiry.

8.2 Functions Covered by Quality Data Enquiry Systems

The information technology system both embeds the quality data enquiry in existing quality assurance systems and encapsulates the required mathematical algorithms. It is therefore responsible for the use cases that set up a fully operable quality data enquiry system.

The use cases of a quality data enquiry system cover large parts of the functionality known from standard CAQ systems. This matches the approach to realize quality data enquiry as an extension to these systems. The relevant use cases cover creation of production orders (UC1) to manage administrative information on the parts that will be produced and tested. Test planning activities (UC2) are also included in state-of-the-art CAQ systems. If the extended procedure to monitor the test bench and equipment according to UC6 is applied, the test normal used for this purpose has to be defined as part of test planning (UC7). Setting up the test bench (UC3) is the last step to prepare the testing of parts from production. If a special test normal is used to monitor the test bench and measurement instruments, it is obvious to use the test normal to set up the test bench.

Execution of the test (UC5) is done with the goal to determine the current state of one or more quality features of the tested part. It includes analysis of the captured test data (UC4) and capturing of the test results (UC8). Analysis of the test data has the objective to determine the features describing the quality of the tested part from the captured values or signals. The algorithms used to do the analysis range from a simple comparison with defined acceptance levels to complicated calculations that take the shape of the captured signals into consideration. The algorithms used for these calculations make up the mathematical core of quality data enquiry.

Verification of the test bench (UC6) proves accordance of the setting of the test equipment to the requirements from test planning. The use case corresponds to "inspection equipment monitoring" in standard quality assurance systems. In the context of quality data enquiry, the verification of the test bench is focused on consistent demonstration and documentation of the correct setting of the test equipment for determination of the quality features that are relevant for the actual production order. The test standard used to set up and verify the test bench has to be defined within the scope of test planning (UC7). This includes the definition of the quality features represented on the signal captured from the test standard and their corresponding strength.

UC8 describes the gathering of the test results. This comprises tests that were performed and documented according to UC5 using special test equipment and processing of the test data that is under

control of the quality data enquiry system as well as tests that are performed after the regulations of the standard quality system. Determination of the final test result can be done when all tests required for the individual part are completed (UC9). Completion of all tests that belong to a production order (UC10) allows creating certificates for the tests and the accompanying statistics. This is the prerequisite for long-term saving of the production order (UC11).

Definition of a search pattern (UC12) is the first use case that is special and exclusive for quality data enquiry. It happens after normal testing activities; often a long time after regular testing of the parts was finished. According to the general requirement that quality data enquiry shall be usable without deeper mathematical knowledge the definition of the search pattern is done graphically. One obvious method is to identify one or more samples that are as similar as possible to the shape of the searched signal and extract it interactively for subsequent use to adapt the recognition system.

UC13 addresses the functional core of quality data enquiry: the search of signals that have a similar shape to the ones that were defined as search patterns (UC12). Searching for special patterns in archived test data is performed outside the normal testing activities of the production process. The most important steps of this use case are the limitation of the search area, the search itself and the review of the search results. If the results found in the first search run do not comply with the expectations, they can be used to refine the definition of the search pattern to start a second run.

8.3 Architecture and Functioning of the Quality Data Enquiry System

From the functional point of view, a quality enquiry system consists of three main components: signal processing, management of testing data and the quality data enquiry functions itself. State-of-the-art signal processing for the *time of the initial testing* is provided from the testing equipment. Management and storing of the testing data is part of the functionality of CAQ systems. If the CAQ system in use does not fulfil the requirements of quality data enquiry, acquisition and storing of the missing data or references must be added to the system. The system to perform quality data enquiry, i. e. analysis of stored testing data with methods that represent *current* state-of-the-art functions and search processes in stored data for special samples, include efficient signal processing functions and search algorithms as well as flexible methods for the adaptation of the system to the search pattern of interest.

Search in the stored data is performed by a *recognition system*. The decision whether the signal that has to be analyzed is similar to a search pattern is typically made with the help of *features* that are calculated from the stored data as well as from the search patterns. The features are fed into a *classification* algorithm to assign the signal to the class of signal forms that can be regarded to be similar in the context of the search.

Quality data enquiry as a method to obtain additional insight from data captured and saved at former testing activities is based on search algorithms that can be easily adapted to the current problem under investigation. Adaptation can be regarded as a *learning* of the recognition system to identify the signals of interest in the current investigation task. The quality data enquiry system described in this work implements adaptation by problem specific optimization of the selection of the features included in the feature vector that is used for classification. Further learning of the recognition system is done on the classification component by calculating mean feature vectors and covariance matrices for the classes that have to be distinguished from each other.

8.4 Validation of the Quality Data Enquiry System

To demonstrate the operation mode of a quality data enquiry system, the occurrence of several signals with a special shape shall be detected and classified in time-discrete signal data. Some of the signals sections that are representative for the classes the system has to differentiate are used for the adaptation to this special recognition problem. The remaining signal sections have to be classified with a minimum number of faults by the adapted recognition system. The system has to distinguish five classes that represent a faultless region of the part to be tested and four different kinds of faults. The results gained with learning and verification sample show convergence for the optimization of the feature selection and high recognition accuracy for the faults used in this example.

8.5 Use of Quality Data Enquiry

Usage and benefit of a quality enquiry system is illustrated with testing of cladding tubes for fuel rods. The cladding tubes are taken as an example for parts that represent a high risk of damage in case of failure. They are manufactured with a cold forming process and need thoroughly testing to prove and document the faultless condition of each individual part. The most important testing method used with cladding tubes for fuel rods is *ultrasonic testing*. Sound waves generated by a transceiver are injected into the material of the test object. Defects like cracks or inclusions generate reflections of the waves that can be detected by transceivers that acts as sensors. Variation of injection direction of the sound waves and arrangement of the sensing transceivers allow the detection of different kinds of faults in the material. The time dependant echo signal provides information on the location of the faults. Due to the fact that surfaces of the test object also act as origins of reflections, the echo signal contains additional information on the dimensions of the part, e.g. the wall thickness. Specialized devices perform the preprocessing of the echo signals received from the transceivers. The shape of the resulting signals contains information on the type of fault; the magnitude is a measure for the strength of the fault or, in case of dimensional evaluation, for the corresponding dimension, e.g. the thickness of the material.

Testing data and results gathered from ultrasonic testing are stored in a central database. Long-term storage of the data is motivated by the need to document the faultless state of the tested parts when they were placed into circulation. The organisation of test data in the database allows retrieving the test results, the original data that was used to determine the test result, the maximum permissible value for each measurand and the settings of the test equipment. In case of integrated verification of the test bench using a special test standard as described in UC6 and UC7, the data gathered with the test standard is also stored in the database. The relations between verification data, test data and test results can be regarded as the prove of the capability of the test equipment because they put the correctness of the testing results down to the defects of well known strength that are represented on the test standard. The need to identify each individual fuel rod in all following process steps, as well as at a later date when the rods are used in a nuclear power plant, makes it necessary to sign each rod with an individual unique number at the beginning of the test process. This number must be read at each test step to identify the test item and do the correct assignment of all test data and test results to the corresponding part. The database collects and stores additional data from other inspections like length, straightness deviation or surface inspection in addition to the data from ultrasonic testing.

Quality data enquiry is realized as an additional application that uses the information stored in the database. If technical advance leads to knowledge on new faults that can be detected by analysis of the stored data from ultrasonic testing, quality data enquiry makes it possible to identify the affected parts even if they are already in use. For that purpose the quality data enquiry application provides the functionality to extract the signal section that is characteristic for the new type of fault interactively from the graphical representation of the stored signal. The so defined set of examples for the search patterns is used to adapt the recognition system to the identify signal sections that are similar to the representation of the new type of fault. Next step of the proceeding is to search through archived signal data and show the search result. If the signal sections do not meet the users expectations, the best hits can be used for an optimized adaptation of the recognition system with subsequent repeat of the search.

8.6 Conclusion

Quality data enquiry as an extension of the functionality of up-to-date CAQ systems proves to be a valuable way to improve the use of data that is solely stored for documentation purposes. The combination of quality data enquiry and appropriate identification technologies presents an interesting way for a precise access on the affected parts even if they are already in use. Compared to the current practice of callbacks for a large number of parts, the method developed in this work can lead to an enormous reduction of costs for these activities.

Validation and concrete usage of the method for subsequent analysis of ultrasonic test data of cladding tubes show that mathematical and organisational practices allow the realisation of a quality data enquiry system that allows the application of the idea to testing data that was acquired and saved from a versatile testing method. Prerequisites for subsequent application of quality data enquiry are the complete acquisition and saving of all relevant information on the test item and the conditions of the execution of the test. State-of-the-art CAQ systems represent a perfect environment to perform and document tests of parts with a high risk of damage in a way that makes subsequent enquiry of saved quality data possible. The mathematical methods used to realize the functionality of quality data enquiry show the existence of adequate solutions for challenges of an implementation that works with real life data. Furthermore, the variation of mathematical methods allows more powerful implementations for specific problems that lead to extended usability of the basic idea of quality data enquiry.

Literaturverzeichnis

- [1] BALZERT, Heide: *Lehrbuch der Objektmodellierung*. Heidelberg, Berlin: Spektrum, Akademischer Verlag, 1999
- [2] BAUER, C. O.: Die europäische Dimension der Produkthaftung. In: *Kunststoffe* 81 (1991), 2, S. 86–89
- [3] BECK, Kent: *Extreme Programming. Das Manifest*. Bonn: Addison Wesley Longman Verlag GmbH, 2000
- [4] BLITZ, Jack ; SIMPSON, Geoff: *Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing*. London: Chapman & Hall, 1996
- [5] BOS, M. ; VRIELINK, J. A. M.: The Wavelet Transform for Preprocessing IR Spectra in the Identification of Mono- and Disubstituted Benzenes. In: *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 23 (1994), S. 115–122
- [6] BOSCH: Qualitätssicherung in der Bosch-Gruppe: Technische Statistik, Fähigkeit von Messanrichtungen. Robert Bosch GmbH, Zentralbereich Qualitätssicherung (ZQ). 1990 (10). – Firmenschrift
- [7] BRAUCHLE, Robert: Effiziente Prüfplanung. In: *Qualität und Zuverlässigkeit* 41 (1996), 11, S. 1300–1302
- [8] BRAUN, P.: Qualitätssicherung und Produkthaftung. In: *Lackieren. 2. Deutsches Industrielack-Kolloquium* Bd. 9. Berlin: Technik + Kommunikation Verlag, 1992, S. 64–72
- [9] BRIGHAM, E. O.: *FFT. Schnelle Fourier-Transformation*. 3. Auflage. München, Wien: R. Oldenbourg Verlag, 1987
- [10] BURKHARDT, Rainer: *UML – Unified Modeling Language: Objektorientierte Modellierung für die Praxis*. Bonn: Addison Wesley Longman Verlag GmbH, 1997
- [11] COHEN, A. ; KOVACEVIC, J.: Wavelets: The Mathematical Background. In: *IEEE Proceedings* Bd. 84, 1996, S. 514–522
- [12] COOMANS, D. ; BROEKAERT, I.: *Potential Pattern Recognition in Chemical and Medical Decision Making*. Chichester: John Wiley and Sons, 1986 (Research Studies Press.)
- [13] DAUBECHIES, I.: Orthonormal Bases of Compactly Supported Wavelets. In: *Comm. Pure & Applied Mathematics* 41 (1988), S. 909–996

- [14] DE, Rajat K. ; PAL, Nikhil R. ; PAL, Sankar K.: Feature Analysis: Neural Network and Fuzzy Set Theoretic Approaches. In: *Pattern Recognition* 30 (1997), Nr. 10, S. 1579–1590
- [15] DEJONG, Kenneth A.: *An Analysis of the Behaviour of a Class of Genetic Adaptive Systems*, University of Michigan, Dissertation, 1975
- [16] DEUTSCH, Volker ; PLATTE, Michael ; VOGT, Manfred: *Ultraschallprüfung. Grundlagen und industrielle Anwendung*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1997
- [17] DIERCKS, Jürgen: Am Anfang war das BLOB. Im Trend: Datenbanksysteme mit neuen Fähigkeiten. In: *iX* (1998), 10, S. 94–99
- [18] DIETRICH, Edgar: Verfahren zur Prüfmittelfähigkeit im Vergleich. In: *Total Quality Management – Aufgabe des Führungskreises, Tagungsbericht 9. Qualitätsleiterforum*. München: gfmt – Gesellschaft für Management und Technologie-Verlags KG, 1991, S. 781–793
- [19] DIETRICH, Edgar ; SCHULZE, Alfred: *Statistische Verfahren zur Qualifikation von Messmitteln, Maschinen und Prozessen*. 3., bearbeitete und erweiterte Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 1998
- [20] Norm DIN 1319-1 Januar 1995. Grundlagen der Messtechnik. Teil 1, Grundbegriffe
- [21] Norm DIN 55350 Teil 11 ff. August 1995. Begriffe zu Qualitätsmanagement und Statistik
- [22] Norm DIN EN ISO 9000-1 1994. Qualitätsmanagement- und Qualitätssicherungsnormen. Teil 1, Leitfaden zur Auswahl und Anwendung
- [23] Norm DIN V 19250 Mai 1994. Grundlegende Sicherheitsbetrachtungen für MSR-Schutzeinrichtungen
- [24] DROBICS, M. ; BODENHOFER, U.: Fuzzy modeling with decision trees. In: *IEEE Internat. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, 2002
- [25] DRÖSCHEL, Wolfgang ; HEUSER, Walter ; MIDDERHOFF, Rainer: *Inkrementelle und objektorientierte Vorgehensweisen mit dem V-Modell 97*. München, Wien: R. Oldenbourg Verlag, 1990
- [26] DUDA, Richard O. ; HART, Peter E.: *Pattern Classification and Scene Analysis*. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley and Sons, 1973
- [27] DUTSCHKE, Wolfgang: *Fertigungsmesstechnik*. Stuttgart: Teubner Verlag, 1993
- [28] DÜLFER, Bernd U.: *Klassifikation und Merkmalsextraktion*, Universität Freiburg i. Brsg., Dissertation, 1993
- [29] EICKHOLT, J.: *Konzeption und Bewertung des Einsatzes von CAQ-Management-Systemen*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1994
- [30] FOWLER, Martin: *UML Distilled*. Reading, Massachusetts: Addison Wesley Longman Verlag Inc., 1997

- [31] FREHR, H.-U.: *Total Quality Management – Unternehmensweise Qualitätsverbesserung*. 2. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 1994
- [32] FUKUNAGA, Keinosuke: *Introduction to Statistical Pattern Recognition*. New York: Academic Press, 1972
- [33] GRAPS, A.: An Introduction to Wavelets. In: *IEEE computational science & engineering* 2 (1995), Heft 2
- [34] HABBEMA, J.D.F. ; HILDEN, J. ; BJERREGAARD, B.: The measurement of performance in probabilistic diagnosis I: The Problem, Descriptive Tools and measures based on classification matrices. In: *Methods of Information in Medicine* 17 (1978), S. 217–226
- [35] HABERÄCKER, Peter: Untersuchungen zur Beurteilung der Güte von Klassifizierungsergebnissen. In: *DAGM Symposium Bildverarbeitung und Mustererkennung*, 1978, S. 281–295
- [36] HASCHER, Wolfgang: Ohne PC geht nichts mehr. In: *Elektronik* 48 (1999), 6, S. 82–87
- [37] HELENO, P. ; DAVIES, R. ; CORREIA, B. A. B. ; DINIS, J.: A machine vision quality control system for industrial acrylic fibre production. In: *EURASIP Journal on Applied Signal Processing* (2002), Heft 7, S. 728–735
- [38] HERING, E. ; TRIEMEL, J.: Rechnerunterstütztes Qualitätsmanagement (CAQ) – Ein ganzheitliches Qualitätskonzept begleitet den Produktlebenszyklus. In: *Werkstattblätter* Band O (1996), Heft 1144, S. 1/1144–32/1144
- [39] HERRMANN, Joachim: Methoden des modernen Qualitätsmanagements. In: *TU International. Zeitschrift für ausländische Absolventen der TU Berlin* 48/49 (2000), S. 42–44
- [40] HESSELMANN, Norbert: *Digitale Signalverarbeitung*. Zweite Auflage. Würzburg: Vogel Verlag, 1987
- [41] HOFFMANN, Rüdiger: *Signalanalyse und -erkennung*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1998
- [42] HOLLAND, J. H.: *Adaption in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975
- [43] HONERKAMP, Joseph: *Statistical Physics: An Advanced Approach with Applications*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1998
- [44] HUBBARD, Barbara B.: *Wavelets*. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, 1997
- [45] HÖPPNER, D. ; LINSS, G. ; TRÖGER, H.: Starker Verbund. Integration von PPS- und CAQ-Systemen. In: *Qualität und Zuverlässigkeit* Band 47 (2002), Heft 9, S. 911–914
- [46] JACOBSON, I. ; CHRISTERSON, M. ; JONSSON, P.: *Object-Oriented Software Engineering – A Use Case Driven Approach*. Workingham: Addison Wesley, 1992

- [47] KAMINSKE, G. F.: *Die hohe Schule des Total Quality Management*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1994
- [48] KAMINSKE, G. F. ; MALORNY, Chr.: Total Quality Management – Ein bestechendes Führungsmodell mit hohen Anforderungen und großen Chancen. In: *Führung und Organisation* (1992), 5, S. 274–278
- [49] KAMMEYER, K. D. ; KROSCHER, K.: *Digitale Signalverarbeitung: Filterung und Spektralanalyse*. Stuttgart: Teubner Verlag, 1989 (Teubner Studienbücher Elektrotechnik)
- [50] KISCHKAT, R.: Konfiguration flexibler Steuerungen in Entwicklung und Inbetriebnahme. In: WESTKÄMPER, E. (Hrsg.) ; SCHRAFT, R.-D. (Hrsg.): *Neue Methoden für Optimierung und Design* Bd. 28, 1998, S. 63, 65–73
- [51] KRAUTKRÄMER, Josef ; KRAUTKRÄMER, Herbert ; GRABENDÖRFER, Werner ; NIKLAS, Ludwig: *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. 2. neubearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1966
- [52] KRICKHAHN, Reinhard ; SCHACHTER-RADIG, Mina-Jacqueline ; STANGL, Martin: Ein wissenschaftsbasiertes System zur Prüfplanung im Bereich CAQ. In: *CIM Management* 7 (1991), 5, S. 60–69
- [53] KRUCHTEN, Philippe: *Der Rational Unified Process*. Reading, Massachusetts: Addison Wesley Longman Verlag Inc., 1999
- [54] KUNCHEVA, Ludmila I.: *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Bd. 49: *Fuzzy Classifier Design*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2000
- [55] KURZIDIM, Michael: Jäger und Sammler – Bildanalyse und -recherche mit IBMs Ultimedia Manager/2. In: *c't* (1994), 3, S. 62–63
- [56] LANGE, J.: *Möglichkeiten der Analyse von Geräuschsignalen beim Drehen*, TU Berlin, Dissertation, 1983
- [57] LANKHORST, Marc M. ; LAAN, Marten D. d.: Wavelet-based Signal Approximation with Genetic Algorithms. In: *Genetic Programming*, 1995, S. 237–255
- [58] LAUTERJUNG, C. ; SCHAKANOWSKI, U.: Prüfstände zur Fertigung und Entwicklung von Luftmassensensoren. In: *Motortechnische Zeitschrift* 59 (1998), 5, S. 338–342
- [59] LEARNED, R. E. ; WILSKY, A. S.: A Wavelet Packet Approach to Transient Signal Classification. In: *Applied and Computational Harmonics Analysis* 2 (1995), S. 265–278
- [60] MALLAT, S.: Multiresolution Approximation and Wavelets. In: *Trans. Amer. Math. Soc.* 319 (1989), S. 69–88
- [61] MALLET, Yvette ; COOMANS, Danny ; KAUTSKY, Jerry ; VEL, Olivier D.: Classification Using Adaptive Wavelets for Feature Extraction. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 19 (1997), 10, S. 1058–1066

- [62] MECKLENBURG-WEISS, R.: *Systemkonzept zur anwenderneutralen Prüfplanerstellung auf einem Kleinrechner*. Stuttgart: Teubner, 1993
- [63] MUSKULUS, B.: Qualitätssicherung bei der Sprengstoffherstellung mit Hilfe eines rechnergestützten Qualitätssicherungssystems. In: *Nobel Hefte* Band 59 (1993), Heft 1, S. 23–30
- [64] NARENDRA, Patrenahalli M. ; FUKUNAGA, Keinosuke: A Branch and Bound Algorithm for Feature Subset Selection. In: *IEEE Transactions on Computers* C-26 (1977), 9, S. 917–922
- [65] NUKEM: NUTRONIK Systeme zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. NUKEM GmbH Nutronik, Alzenau. 1998. – Firmenschrift
- [66] OBJECT MANAGEMENT GROUP. *Unified Modeling Language Specification V1.5*. März 2003
- [67] OESTEREICH, Bernd: *Objektorientierte Softwareentwicklung mit der Unified Modeling Language*. 3., aktualisierte Auflage. München, Wien: R. Oldenbourg Verlag, 1997
- [68] OPPENHEIM, Alan V. ; WILLSKY, Alan S.: *Signale und Systeme*. 2. Auflage. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1992
- [69] PAPAGEORGIOU, M.: *Optimierung*. München, Wien: R. Oldenbourg Verlag, 1991
- [70] PFEIFER, Tilo: *Qualitätsmanagement*. 2. Aufl. München, Wien: Hanser Verlag, 1995
- [71] PFEIFER, Tilo: *Qualitätsmanagement*. 3., völlig überarbeitete und erweiterte Auflage. München, Wien: Hanser Verlag, 2001
- [72] PFIFFER, J.: Dokumentation lässt sich automatisieren. Problem erkannt, Gefahr gebannt. In: *EVU Betriebspraxis* Band 41 (2002), Heft 9, S. 6, 8–9
- [73] PLAPPER, Peter W.: *Echtzeitanalyse der Signale von Multisensorsystemen*. Aachen: Verlag Shaker, 1993
- [74] PRESS, W. H. ; FLANNERY, B. P. ; TEUKOLSKY, S. A. ; VETTERLING, W. T.: *Numerical Recipes in C*. Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney: Cambridge University Press, 1992. – Chapter 13.10 S
- [75] PUDIL, P. ; NOVOVICOVA, J. ; KITTLER, J.: Floating Search Methods in Feature Selection. In: *Pattern Recognition Letters* 15 (1994), 11, S. 1119–1125
- [76] *Qualitätssicherung – Leitfaden des VDI-Gemeinschaftsausschusses CIM*. Verein Deutscher Ingenieure (VDI). 1992
- [77] RADONS, G.: Einführung in die evolutionären Algorithmen. In: WESTKÄMPER, E. (Hrsg.) ; SCHRAFT, R.-D. (Hrsg.): *Neue Methoden für Optimierung und Design* Bd. 28, 1998, S. 19, 21–40
- [78] RAMCHANDRAN, K. ; VETTERLI, M. ; HERLEY, C.: Wavelets, Subband Coding and Best Bases. In: *IEEE* Bd. 84, 1996, S. 541–560

- [79] RAYMER, Michael L. ; PUNCH, William F. ; GODMAN, Erik D. ; SANSCHAGRIN, Paul C. ; KUHN, Leslie A.: Simultaneous Feature Scaling and Selection Using a Genetic Algorithm. In: BÄCK, Thomas (Hrsg.): *Proc. of the Seventh Int. Conf. on Genetic Algorithms*. San Francisco, CA: Morgan Kaufman, 1997, S. 561–567
- [80] RECHENBERG, Ingo: *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Stuttgart-Bad Cannstatt: Frommann-Holzboog Verlag, 1973
- [81] RECKNAGEL, Matthias: Automatische Auswertung und Dokumentation von Prüfdaten sicherheitskritischer Bauteile. In: *Quality 96, 7. Internationaler Kongress für Qualitätssicherung*. Stuttgart, 1996, S. 163–167
- [82] RECKNAGEL, Matthias ; RAUH, Wolfgang: Software für die Mess- und Prüftechnik. In: *Qualität und Zuverlässigkeit* 42 (1997), 12, S. 1395–1398
- [83] RIESSINGER, Thomas: *Mathematik für Ingenieure*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1996
- [84] SAITO, N. ; COIFMAN, R. R.: Local Discriminant Bases. In: LAINE, A. F. (Hrsg.) ; UNSER, M. A. (Hrsg.): *Mathematical Imaging: Wavelet Applications in Signal and Image Processing II* Bd. 2,303, 1994
- [85] SAMEL, Uwe E.: Produkthaftungsgesetz und CAD-Archivierung. In: *CAD-CAM-Report* 12 (1993), 5, S. 138–144
- [86] SCHERER, Josef: Dokumentation als Risikoverminderung im Bereich Produkthaftung. Kayser-Threde GmbH. 2003. – Firmenschrift
- [87] SCHLENZIG, Wolfgang: Messaufgaben realisieren ist mehr als Messtechnik einsetzen. In: *Qualität und Zuverlässigkeit* 38 (1993), 9, S. 513–516
- [88] SCHROEDER, J. A. ; AHMED, T. ; CHAUDRHY, B. ; SHEPARD, S.: Non-destructive testing of structural composites and adhesively bonded composite joints: pulsed thermography. In: *Composites* Band 33A (2002), Heft 11, S. 1511–1517
- [89] SCHWEFEL, H.-P.: *Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionsstrategie*. Basel, Stuttgart: Birkhäuser Verlag, 1977
- [90] SCHÖNEBURG, Eberhard ; HEINZMANN, Frank ; FEDDERSEN, Sven: *Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien*. Bonn; Reading, Massachusetts. u. a.: Addison-Wesley Longman Verlag Inc., 1994
- [91] SCHÖNTHALER, Frank ; NÉMETH, Tibor: *Software-Entwicklungswerkzeuge: Methodische Grundlagen*. Stuttgart: Teubner Verlag, 1990 (Leitfäden der angewandten Informatik)
- [92] SIEDLECKI, W. ; SKLANSKY, J.: A Note on Genetic Algorithms for Large-Scale Feature Selection. In: *Pattern Recognition Letters* 10 (1989), 11, S. 335–347
- [93] SPATH, D. ; VOSSMANN, D. ; ANTES, C.: Automatische Erstellung von Prüfplänen und Prüfzeichnungen in CAD-Systemen. In: *Forschungstagung Qualität '97* Bd. 80–97, 1997, S. 55–75

- [94] SPATH, Dieter ; UHLIG, Albrecht ; VOSSMANN, Dirk: Qualitätsmanagement rund um das Produkt. In: *Qualität und Zuverlässigkeit* 42 (1997), 3, S. 276
- [95] STEFFEN, P. ; HELLER, P. ; GOPINATH, R. A. ; BURRUS, C. S.: Theory of Regular M-Band Wavelet Bases. In: *IEEE Transactions Signal Processing* 41 (1993), 3, S. 497–511
- [96] STEINHAGEN, H.-E. ; FUCHS, S.: *Objekterkennung. Einführung in die mathematischen Methoden der Zeichenerkennung*. Berlin: Verlag Technik, 1976
- [97] SZU, H. H. ; TELFER, B. ; KADAMBE, S.: Neural Network Adaptive Wavelets for Signal Representation and Classification. In: *Optical Engineering* 31 (1992), 1, S. 907–916
- [98] TATE, R. ; WATSON, D. ; EGLE, S.: Using Wavelets for Classifying Human in vivo Magnetic Resonance Spectra. In: ANTONIADIS, A. (Hrsg.) ; OPPENHEIM, G. (Hrsg.): *Wavelets and Statistics*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1995
- [99] TELFER, B. A. ; SZU, H. H. ; DOBECK, G. J. ; GARCIA, J. P. ; KO, H. ; DUBEY, A. ; WITHERSPOON, N.: Adaptive Wavelet Classification of Acoustic and Backscatter and Imagery. In: *Optical Engineering* 33 (1994), 2, S. 192–203
- [100] TERWIESCH, Peter: Zeit-Frequenz-Analyse und Wavelets: Eine Einführung. In: *Automatisierungstechnik* 46 (1998), 1, S. 3–14
- [101] TIMMER, Jens: *Vorverarbeitung und Klassifikation von Zeitreihen*, Universität Freiburg i. Brsg., Dissertation, 1994
- [102] TONG TRAN, Thang: *Numerische Methoden und Neuronale Netze zur Klassifikation bei einer Triggerentscheidung*, Universität Bremen, Dissertation, 1996
- [103] TOSCANO, R. ; LYONNET, P.: Diagnosis of the industrial systems by fuzzy classification. In: *ISA Transactions* Band 42 (2003), Heft 2, S. 327–335
- [104] WALL, Matthew: *GALib: A C++ Library of Genetic Algorithm Components*. 2.4. Massachusetts: Mechanical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology, 1998. – <http://lancet.mit.edu/ga>
- [105] WEN, Wei ; MENDEL, J. M.: A fuzzy logic method for modulation classification in nonideal environments. In: *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* Band 7 (1999), Heft 3, S. 333–344
- [106] WESTENDORF, C.-M.: *Einführung in die Methodik der automatischen Erkennung*. Dresden: Techn. Univ. Dresden, 1989 (Studientexte zur Sprachkommunikation; 3)
- [107] WESTKÄMPER, Engelbert: Qualitätsmanagementsysteme (QM-Systeme) nach DIN EN ISO 9000ff. In: EVERSHEIM, Walter (Hrsg.) ; SCHUH, Günther (Hrsg.): *Produktion und Management 4, Betrieb von Produktionssystemen*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1999, S. 13–43 – 13–54
- [108] WESTKÄMPER, Engelbert: Strategisches Qualitätsmanagement. In: EVERSHEIM, Walter (Hrsg.) ; SCHUH, Günther (Hrsg.): *Produktion und Management 4, Betrieb von Produktionssystemen*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1999, S. 13–1 – 13–13

- [109] WICKERHAUSER, Mladen V.: *Adaptive Wavelet-Analysis*. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 1996
- [110] WUNSCH, G. ; SCHREIBER, H.: *Digitale Systeme. Grundlagen*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1982
- [111] WUNSCH, G. ; SCHREIBER, H.: *Analoge Systeme. Grundlagen*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1993
- [112] WÜNSCHE, T.: *Integrierte Qualitätstechnik in der flexibel automatisierten Produkterstellung*, TU München, Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation, 1993
- [113] ZINKMANN, R. C.: *Die Reduzierung von Produkthaftungsrisiken*. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 1989