

**BAM** Bundesanstalt für  
Materialforschung und -prüfung

## Forschungsbericht 205

Bestimmung charakteristischer Fehlermerkmale  
zur rechnergestützten Bildauswertung von  
Schweißnahradiographien

Dr.-Ing. Peter Rose



Berlin 1995

## Aufgaben der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung ist als Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministers für Wirtschaft das technisch-wissenschaftliche Staatsinstitut der Bundesrepublik Deutschland für Materialtechnologien, Chemische Analytik und Sicherheitstechnik. Dieser Komplex stellt in allen Industrieländern einen technologischen Schlüsselbereich dar, da Materialien als Konstruktions- und Funktionswerkstoffe die Grundlage der gesamten Technik bilden. Die Materialforschung, die zuverlässige, normengerechte Prüfung und chemische Analyse sowie die sicherheitstechnische Beurteilung von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen sind wesentliche Voraussetzungen für eine leistungs- und wettbewerbsfähige Wirtschaft im Hinblick auf die Anforderungen an Qualität und Zuverlässigkeit technischer Produkte, Umweltschutzfordernisse und die Notwendigkeit der sparsamen Verwendung von Rohstoffen und Energie.

Die Bundesanstalt hat die Aufgabe, die Entwicklung der deutschen Wirtschaft zu fördern, indem sie Werkstoff- und Materialforschung betreibt, die Materialprüfung sowie die chemische Analytik und Sicherheitstechnik stetig weiterentwickelt.

In diesem Rahmen bestehen folgende Arbeitsschwerpunkte:

1. Technisch-wissenschaftliche Grundlagen des Materialwesens, der Sicherheitstechnik und der chemischen Analytik einschließlich zugehöriger Referenzmaterialien und -verfahren
2. Materialisierung einschließlich Qualitätssicherung, Materialschutz, Recycling

3. Öffentliche technische Sicherheit
4. Technologien im Umwelt- und Gesundheitsschutz
5. Technologien in der Energiesicherung
6. Technologie- und Wissenstransfer

Ihre Arbeiten gliedern sich in:

- A Forschung und Entwicklung, besonders auf denjenigen Gebieten, die der Leistungssteigerung der Wirtschaft, der Sicherheitstechnik sowie der Schaffung und Erhaltung volkswirtschaftlicher Werte dienen.
- B Prüfung und Untersuchung von Stoffen und technischen Produkten auf der Basis von Gesetzen, Verordnungen oder technischen Regeln.
- C Beratung und Information von Bundesministerien sowie Durchführung von Aufgaben, die ihr von diesen im Einvernehmen mit dem Bundesministerium für Wirtschaft übertragen werden, Durchführung von Aufträgen aus der Wirtschaft, Beratung und Information von Wirtschafts- und Verbraucherorganisationen sowie Mitwirkung in nationalen und internationalen Gremien und Normenausschüssen und bei der Technischen Zusammenarbeit mit Entwicklungsländern.

Die Ergebnisse ihrer und fremder wissenschaftlicher Arbeiten hat die Bundesanstalt zu sammeln, zu ordnen und der Allgemeinheit zugänglich und nutzbar zu machen.

## **Forschungsbericht 205**

**Bestimmung charakteristischer Fehlermerkmale  
zur rechnergestützten Bildauswertung von  
Schweißnahtradiographien**

Dr.-Ing. Peter Rose

70 Seiten, 46 Abbildungen

Herausgegeben von der

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

☒ 12200 Berlin

Telefon (030) 81 04-0

Telefax (030) 8 11 20 29

Copyright © 1995 by Wirtschaftsverlag NW

Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Herstellung:

Wirtschaftsverlag NW

Verlag für neue Wissenschaft GmbH

Am Alten Hafen 113 - 115, 27568 Bremerhaven

☒ Postfach 10 11 10, 27511 Bremerhaven

Telefon (0471) 4 60 93

Universitäts-Sigel D 83

ISSN 0938-5533

ISBN 3-89429-516-3

## Summery

Automatic Inspection of weld radiographs require a reliable detection and evaluation of the existing defects. Pretentious image processing is nessecary, to identify the rihgt defect type after the defect detection is already finished. For that, features must be extracted from the imageplane to describe the special characteristics of the different defect types. Which kind of features are most important for the recognition of the defect types will be discussed in this paper.

All features, used in this investigation, are based upon geometric shape and gray level distribution of the defect representati- on in the radiographic image. The features are tested as single features and feature combinations on more than 500 samples of real weld defects. In the one dimensional case, all features are evaluated by the Fisher discriminant and the Bhattacharyya coeffizient. For evaluation in the multi dimensional feature space the principal componant transformation is additional used. The test consider different defect types and different configurations of defect classes. The results are presented in a final statistical interpretation.

## Zusammenfassung

Die automatische Auswertung von Schweißnahtradiographien erfordert eine zuverlässige Erkennung und Beurteilung der im Röntgenbild wiedergegebenen Schweißnahtfehler. Hierzu sind aufwendige Bildverarbeitungsoperationen notwendig, die nach der Detektion der Fehler auch eine Fehlertypenbestimmung ermöglichen. Um aus den Fehlerabbildungen die zur Typenbestimmung relevanten Informationen zu gewinnen, werden Merkmale benötigt, die die charakteristischen Eigenschaften der verschiedenen Fehlertypen beschreiben. Welche Merkmale zur Unterscheidung verschiedener Fehlertypen geeignet sind und wie sich diese Merkmale an Abbildungen realer Schweißnahtfehler verhalten, wird im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

Es werden insgesamt 15 Merkmale vorgestellt, die ihre fehlerspezifischen Kennwerte aus der Geometrie und der Grauwertverteilung der Fehlerabbildungen ermitteln. Die Merkmale werden als Einzelmerkmale und als Merkmalskombination an einem Schweißnahtkatalog mit über 500 Fehlerabbildungen erprobt. Die Beurteilung der Merkmale erfolgt im eindimensionalen Fall über das Gütemaß und den Bhattacharyya-Koeffizient. Im mehrdimensionalen Merkmalsraum wird zur Beurteilung der Merkmalskombination zusätzlich die Hauptkomponententransformation eingesetzt. Die Merkmale werden anhand klassenbedingter Verteilungsdichten überprüft, wobei die Zuordnung verschiedener Fehlertypen zu unterschiedlichen Ausgangsklassen berücksichtigt wird. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in einer statistischen Auswertung zusammengefaßt und diskutiert.

## Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung	7
2	Vorbereitung des Durchstrahlungsbildes zur Ermittlung der Fehlermerkmale	8
2.1	Ablauf einer automatischen Fehlerklassifizierung	8
2.2	Abtastung des Röntgenfilms	9
2.3	Detektion der Schweißnahtfehler	10
3	Merkmalsextraktion	12
3.1	Allgemeines	12
3.2	Anforderungen an die Merkmale	13
3.3	Merkmalskategorien	13
3.4	Beschreibung der Einzelmerkmale	14
3.4	Objektbezogene Merkmale	14
3.4.1.1	Geometrische Merkmale	15
3.4.1.2	Grauwertmerkmale	20
3.4.1.3	Kombinierte Grauwert /Geometrie-Merkmale	23
3.4.2	Kontextbezogene Merkmale	24
3.4.2.1	Fehler/Schweißnaht-Merkmale	25
3.4.2.2	Fehler/Fehler-Merkmale	27
3.4.3	Tabelle der Einzelmerkmale	30
4	Verfahren der Merkmalsbeurteilung	30
4.1	Der eindimensionale Merkmalsraum	31
4.1.1	Das Gütemaß	32
4.1.2	Der Bhattacharyya-Koeffizient	32
4.2	Der mehrdimensionale Merkmalsraum	33
4.2.1	Merkmalsauswahl über eindimensionale Verteilungsdichten	34
4.2.2	Merkmalsauswahl über mehrdimensionale Verteilungsdichten	36
4.2.3	Der multiple Korrelationskoeffizient	37
4.3	Die Hauptkomponententransformation	39
4.3.1	Das Prinzip der Hauptkomponententransformation	40
4.3.2	Beurteilung von Einzelmerkmalen	41
4.3.3	Beurteilung von Merkmalskombinationen	41

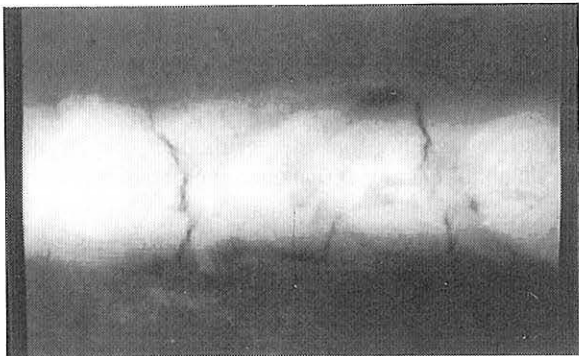
5	Erprobung und Auswertung der Merkmale an realen Schweißnahtaufnahmen	42
5.1	Eine Bilddatenbank mit katalogisierten Schweißnahtfehlern	42
5.1.1	Das Bildmaterial	42
5.1.2	Aufbau der Datenbank	42
5.1.3	Festlegung der Ausgangsklassen	45
5.2	Untersuchung der Einzelmerkmale	46
5.2.1	Normierung der Merkmale	46
5.2.2	Die klassenbedingten Verteilungsdichten	47
5.2.3	Beurteilung der Merkmale an vier Ausgangsklassen	49
5.2.4	Beurteilung der Merkmale an sechs Ausgangsklassen	50
5.3	Untersuchung von Merkmalskombinationen	52
5.3.1	Merkmalsauswahl über den multiplen Korrelationskoeffizienten	52
5.3.2	Merkmalsbeurteilung über die Hauptkomponententransformation	56
5.4	Betrachtung der Fehleranhäufungen	58
5.5	Darstellung der Ergebnisse	59
6	Zusammenfassung	61
7	Liste der Abkürzungen, Formelzeichen und Bilder	62
8	Literaturverzeichnis	64



# 1. Problemstellung

Die Auswertung von Schweißnahtaufnahmen gehört zu den schwierigsten Aufgaben der Durchstrahlungsprüfung und erfordert gut geschultes und erfahrenes Personal. Trotz zahlreicher Bemühungen, technische Erkennungssysteme für diese Aufgabe einzusetzen, sind bislang keine zufriedenstellenden Lösungen erarbeitet worden. Der Grund hierfür liegt in den hohen Anforderungen, die bezüglich der Zuverlässigkeit und der Aussagesicherheit an derartige Systeme gestellt werden müssen. Schweißnähte, insbesondere an Bauteilen mit hohen Sicherheitsanforderungen, unterliegen Prüfvorschriften, die eine exakte Bewertung aller im Röntgenbild vorhandenen Fehleranzeigen erfordern. Dabei spielt neben der Größe und der Häufigkeit der Fehler vor allem die Bestimmung des Fehlertyps eine wesentliche Rolle. Verschiedene Fehlertypen weisen unterschiedliche bruchmechanische Eigenschaften auf; das richtige Erkennen des Fehlertyps ist deshalb für die Beurteilung einer Schweißnaht von entscheidender Bedeutung.

Für die Entwicklung automatischer Auswertesysteme ist die Bestimmung der Fehlertypen jedoch ein besonders schwieriges Problem. Das Prüfobjekt Schweißnaht besitzt, wie kaum ein anderes Prüfobjekt, eine Vielzahl verschiedener Fehlertypen, die selbst vom erfahrenen Betrachter manchmal nur sehr schwer voneinander zu unterscheiden sind. Im *Bild 1* ist die Durchstrahlungsaufnahme einer Schweißnaht dargestellt, in der mehrere Fehlertypen gleichzeitig abgebildet sind, nämlich Querrisse, Schlacken und Poren. Die Schweißnahtfehler sind als dunkle Objekte im hell wiedergegebenen Bereich der Nahtüberhöhung gut zu erkennen.



*Bild 1:*  
*Durchstrahlungsaufnahme einer Schweißnaht*

Für eine automatische Fehlertypenbestimmung müssen aus den Fehlerabbildungen die charakteristischen Eigenschaften der jeweiligen Fehlertypen ermittelt werden. Hierzu sind Merkmale erforderlich, die anhand geometrischer und densitometrischer Kennwerte die Fehlerabbildungen quantitativ beschreiben.

Obwohl in vielen technischen und medizinischen Anwendungsbereichen der digitalen Bildverarbeitung mit Objekterkennungsmethoden bereits gute Ergebnisse erzielt wurden [1 bis 34], ist die Typenbestimmung von Schweißnahtfehlern bis heute ein ungelöstes Problem. Es existieren einige Arbeiten, in denen Verfahren zur Klassifizierung von Schweißnahtfehlern vorgestellt werden [35 bis 53], ein praktischer Einsatz automatischer Erkennungssysteme in der Industrie ist derzeit jedoch nicht bekannt. Maßgebend hierfür sind die noch unzureichenden Methoden, die zur Beschreibung der verschiedenen Fehlertypen eingesetzt werden. Durch die Entwicklung neuer aussagekräftiger Merkmale und durch umfangreiche Untersuchungen an realen Schweißnahtaufnahmen soll im Rahmen dieser Arbeit die Fehlertypenbestimmung verbessert werden.

Nach einer kurzen Einführung in die Problematik der automatischen Erkennung von Fehleranzeigen in Durchstrahlungsbildern werden alle hier verwendeten Fehlermerkmale ausführlich beschrieben. Es wird dargestellt, wie sich die Merkmale aus den digitalen Bildvorlagen ermitteln lassen und welche fehlerspezifischen Eigenschaften sie wiedergeben. Danach werden die statistischen Verfahren zur Beurteilung der Merkmale vorgestellt. Es werden verschiedene Verfahren zur Auswahl von Einzelmerkmalen und zur Optimierung von Merkmalskombinationen erörtert. Am Schluß der Arbeit werden die Merkmale an realen Schweißnahtfehlern erprobt und ausgewertet. Unter Anwendung der statistischen Beurteilungsverfahren werden aus einem umfangreichen Datensatz die geeigneten Merkmale bzw. Merkmalskombinationen zur Unterscheidung von Schweißnahtfehlertypen ermittelt.

Die Arbeit behandelt das Problem der automatischen Fehlertypenbestimmung in Schweißnahtaufnahmen und liefert somit einen entscheidenden Beitrag zur Einführung technischer Erkennungssysteme in der radiographischen Schweißnahtprüfung.

## 2. Vorbereitung des Durchstrahlungsbildes zur Ermittlung der Fehlermerkmale

Eine automatische Auswertung stellt besondere Anforderungen an die Qualität der Bildvorlage. Die zur Auswertung notwendigen Bildinformationen, d. h. die Abbildungen der Fehler im Durchstrahlungsbild, müssen dem Rechner möglichst störungsfrei zugänglich gemacht werden. Im allgemeinen enthält das digitalisierte Durchstrahlungsbild jedoch Rauschanteile, die sich aus der opto-elektronischen Abtastung und der nachfolgenden Digitalisierung ergeben. Diese Störungen sind systembedingte Einflüsse der verwendeten Abtastgeräte und deshalb zwar unvermeidbar, müssen jedoch durch optimale Anpassung des Abtastsystems an die radiographische Bildvorlage möglichst gering gehalten werden.

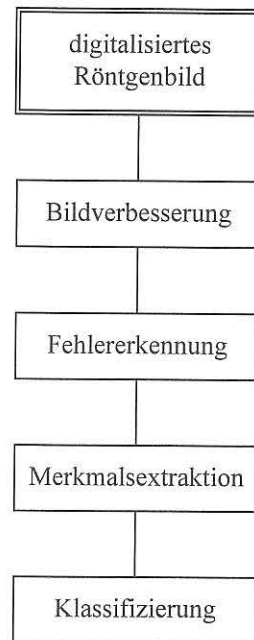
Zusätzlich kann auch das Prüfobjekt selbst Formen aufweisen, die sich im Durchstrahlungsbild den tatsächlichen Fehleranzeigen überlagern. Insbesondere bei handgeschweißten Nähten wird die Auswertung durch die mitabgebildete, unregelmäßige Nahtüberhöhung erheblich erschwert.

Zur Ermittlung von Fehlermerkmalen aus Schweißnahtdiagrammen werden deshalb am digitalisierten Röntgenbild mehrere Vorverarbeitungen durchgeführt, die diese Störungen beseitigen und die Fehler als isolierte Objekte in einem Binärbild darstellen. Wie diese Binärbilder erzeugt werden und welche Bedeutung sie für die Ermittlung der Fehlermerkmale haben, ist Inhalt dieses Kapitels.

### 2.1 Ablauf einer automatischen Fehlerklassifizierung

Die Ermittlung von Fehlermerkmalen ist nur ein Arbeitsschritt in einer Vielzahl von Bildoperationen, die für eine automatische Auswertung von Schweißnahtaufnahmen erforderlich sind. Die gesamte Verarbeitungskette, angefangen vom Bildeintrag, d. h. von der Abtastung des Röntgenfilmes mit einer Fernsehkamera, bis hin zur endgültigen Fehlerklassifizierung enthält Problemstellungen, die verschiedene Methoden der digitalen Bildverarbeitung beanspruchen. Um die Position der Merkmalsextraktion innerhalb dieser Bildauswertung deutlich zu machen, soll der gesamte Vorgang einer automatischen Fehlerklassifizierung kurz beschrieben werden.

Im *Bild 2.1-1* ist der Ablauf einer automatischen Fehlerklassifizierung dargestellt. Ausgehend von einem bereits digitalisierten Röntgenbild besteht die Prozedur aus vier Schritten, die als Bildverbesserung, Fehlererkennung, Merkmalsextraktion und Klassifizierung bezeichnet werden. Diese Verarbeitungen werden nacheinander ausgeführt und haben im einzelnen folgende Aufgaben zu erfüllen:



*Bild 2.1-1:*

*Ablauf einer automatischen Fehlerklassifizierung*

- Die Bildverbesserung soll die zur Fehlererkennung relevante Information aus dem Bildinhalt hervorheben. Im Vordergrund stehen hier die Beseitigung unerwünschter Rauschanteile und die Anhebung kontrastschwacher Fehlerabbildungen. Ziel der Bildverbesserung ist es, das abgetastete Röntgenbild so aufzubereiten, daß eine gebrauchsfähige Bildvorlage für die automatische Weiterverarbeitung entsteht.
- Die Fehlererkennung hat die Aufgabe, die in der Schweißnahtaufnahme enthaltenen Fehlerabbildungen vom übrigen Bildinhalt zu trennen. Da Schweißnahtfehler häufig mit anderen im Durchstrahlungsbild enthaltenen Strukturen (Nahtüberhöhung, Wurzeldurchhang, Raupe, usw.) überlagert sind, kommt es leicht zu Fehldetektionen. Ein Problem der Fehlererkennung besteht in der Unterdrückung dieser fehlerähnlichen Schweißnahtstrukturen, bzw. in der nachträglichen Beseitigung irrtümlich als Fehler erkannter Bildbereiche. Das Ergebnis der Fehlererkennung ist ein Binärbild, in dem die Fehlerabbildungen und der übrige Bildinhalt in nur zwei Graustufen getrennt dargestellt werden. Auf die Bildverarbeitungsmethoden zur Fehlererkennung wird in Kapitel 2.3 näher eingegangen.
- Die Merkmalsextraktion dient der Bestimmung fehlerspezifischer Eigenschaften. Sie soll die in einer Fehlerabbildung enthaltene Information zum Fehlertyp erfassen und quantitativ beschreiben. Dazu ist es notwendig, für die durch die Fehlererkennung lokalisierten

Objekte Kennwerte zu ermitteln, die den jeweils wiedergegebenen Fehlertyp möglichst genau charakterisieren. Hierzu gehören z. B. geometrische Kenngrößen wie Objektfläche, Objekumfang, maximale Längsausdehnung usw., die jedoch zur Unterscheidung verschiedener Fehlertypen in Schweißnähten bei weitem nicht ausreichen. Erst durch Berücksichtigung aller im Durchstrahlungsbild vorhandenen Informationen, auch aus der Umgebung eines Fehlers, können Merkmale gewonnen werden, deren Aussagekraft eine Fehlertypenunterscheidung ermöglicht. Im Kapitel 3 wird die Ermittlung von Fehlermerkmalen ausführlich beschrieben.

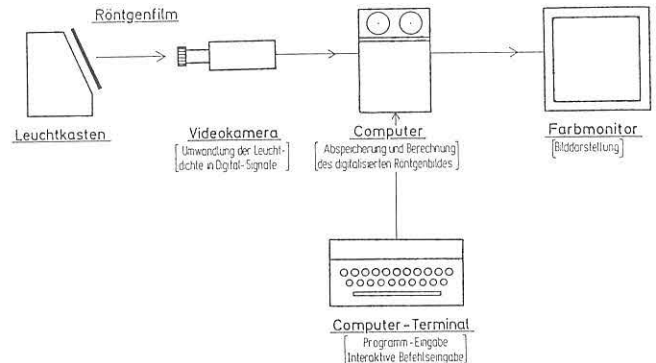
- Die Klassifizierung ist die endgültige Zuordnung der im Durchstrahlungsbild als Fehler erkannten Objekte zu Fehlertypen. Hierzu werden die in der Merkmalsextraktion ermittelten Kennwerte statistisch ausgewertet, mit dem Ziel, ähnliche Objekte zusammenzufassen und unterschiedliche Objekte voneinander zu trennen. Dieser Vorgang entspricht einer Gruppenbildung, die wegen der großen Anzahl verschiedener Fehlertypen (siehe Anhang B) bei der Klassifizierung von Schweißnahtfehlern ein besonderes Problem darstellt. Einerseits sollen viele unterschiedliche Ausgangsklassen existieren, um eine möglichst differenzierte Aussage zum Fehlertyp zu erhalten. Andererseits verlangt eine hohe Anzahl verschiedener Ausgangsklassen eine sehr strenge Definition der Klassengrenzen und führt insbesondere bei stark streuenden Merkmalen leicht zu Fehlklassifizierungen. Bei der Erstellung eines Klassifizierungssystems für Schweißnahtfehler ergibt sich somit die Frage nach einer sinnvollen Klasseneinteilung, d. h. welche Fehlertypen in einer Ausgangsklasse zusammengefaßt werden sollen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird kein Klassifizierungssystem erstellt. Es werden ausschließlich Fehlermerkmale entwickelt, die an einer großen Anzahl bereits bekannter Schweißnahtfehler getestet und beurteilt werden. Somit kommen hier nur die ersten drei Verarbeitungsschritte aus *Bild 2.1-1* zur Anwendung. Dennoch spielt die Einteilung der verschiedenen Fehlertypen in vorgegebene Ausgangsklassen eine wichtige Rolle. Je nach Wahl der Ausgangsklassen kann sich die Bedeutung einzelner Merkmale erheblich verändern. Aus diesem Grund werden die Merkmale im Kapitel 5 an verschiedenen Ausgangsklassenkonfigurationen erprobt und ausgewertet.

## 2.2 Abtastung des Röntgenfilms

Die Abtastung, Digitalisierung und Bearbeitung eines Röntgenfilms erfolgt nach dem im *Bild 2.2-1* wiedergegebenen Prinzip. Die Schweißnahtaufnahme befindet sich auf einem Filmbetrachtungsgerät und wird mit einer Fernsehkamera aufgenommen. Aus dem Ausgangssignal der Fernsehkamera wird durch Analog/Digital-Umsetzung ein Rasterbild erzeugt, das im Rechner als Digitalbild abgelegt wird. Beim hier verwendeten Bildverarbeitungssystem besitzt das Digitalbild eine geometrische Auflösung von 512x512 Bildpunkten und eine Helligkeitsauflösung von

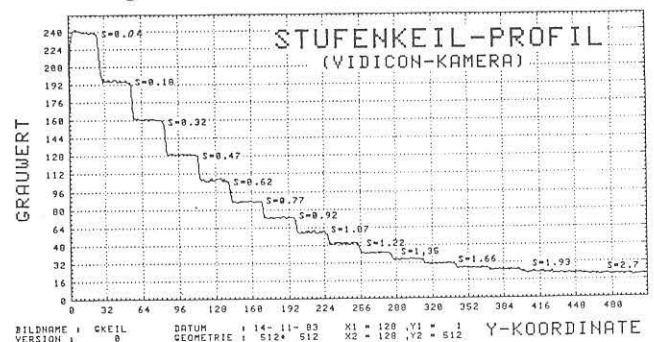
256 Graustufen pro Bildpunkt. An diesem Digitalbild werden die zur Fehlererkennung und Fehlerbeschreibung notwendigen Bildverarbeitungsoperationen durchgeführt. Die hierzu erforderlichen Programme sind in der Rechenanlage installiert und können vom Benutzer interaktiv über ein Terminal aufgerufen werden. Die Ergebnisse der Verarbeitungen, auch einzelner Verarbeitungsschritte, werden auf einem Monitor dargestellt.



*Bild 2.2-1:*  
Prinzip der digitalen Bildverarbeitung

Ein besonderes Problem bei der Erstellung des Digitalbildes liegt in der optimalen Abtastung des Röntgenfilms. Insbesondere bei Schweißnahtaufnahmen, die wegen der Nahtüberhöhung häufig sehr große Schwärzungsunterschiede aufweisen, ist es notwendig, alle am Bildeinzug beteiligten Komponenten sorgfältig aufeinander abzustimmen. Das Filmbetrachtungsgerät und die Fernsehkamera müssen so eingestellt werden, daß die Fehlerabbildungen mit möglichst hohem Kontrast im Digitalbild wiedergegeben werden. Dies erfordert genaue Kenntnisse über die Eigenschaften des Abtastsystems hinsichtlich der Schwärzungsauflösung. Aus diesem Grund wurden Untersuchungen mit mehreren Stufenkeilaufnahmen durchgeführt, die das Übertragungsverhalten beim Bildeinzug beschreiben.

Die Umwandlung von Schwärzungen im Röntgenfilm auf Grauwerte im Digitalbild erfolgt nach der im *Bild 2.2-2* wiedergegebenen Funktion. Hierbei handelt es sich um die Abtastung einer Stufenkeilaufnahme, die Schwärzungen im Bereich von 0.04 D bis 2.7 D enthält. Die verschiedenen Schwärzungen dieser Stufenkeilaufnahme



*Bild 2.2-2:*  
Grauwertprofil der Abtastung einer Stufenkeilaufnahme im Schwärzungsbereich 0.04 D bis 2.7 D

wurden mit einem Schwärzungsmeßgerät gemessen und sind im Bild für jede einzelne Stufe angegeben. Obwohl der Schwärzungsunterschied von Stufe zu Stufe stets ca. 0.15 D beträgt, zeigt die Kurve deutlich einen nichtlinearen Verlauf. Schwärzungsunterschiede im Bereich geringer Schwärzungen führen zu hohen Grauwertänderungen, d. h. die Auflösung des Abtastsystems ist hier sehr gut. Mit zunehmender Schwärzung wird die Auflösung jedoch geringer. Dies führt dazu, daß Fehlerabbildungen, die sich in dunklen Bildbereichen befinden, im Digitalbild nur kontrastschwach wiedergegeben werden. Fehlerabbildungen in hellen Bildbereichen hingegen, werden mit hohem Kontrast, d. h. mit großen Grauwertunterschieden im Digitalbild dargestellt.

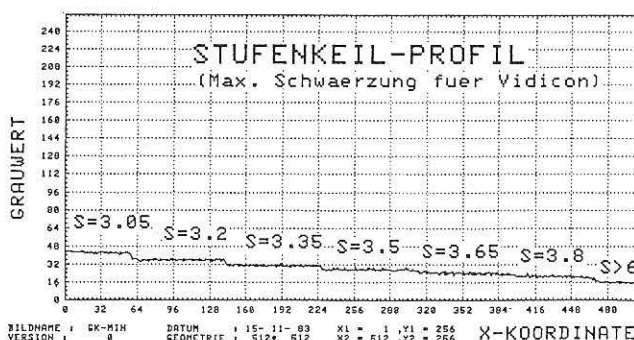
Die hohe Auflösung des Abtastsystems bei geringen Schwärzungen darf jedoch nicht dazu führen, daß bei der Anfertigung radiographischer Aufnahmen die in Regelwerken festgelegten Mindestschwärzungen (siehe DIN 54 111) nicht eingehalten werden [54]. Die Mindestschwärzungen sind für die Wiedergabe der Fehler in den Durchstrahlungsaufnahmen besonders wichtig, da sich mit zunehmender Schwärzung der Kontrast im Filmbild erhöht. Eine kontrastreiche Fehlerwiedergabe im Digitalbild kann nur erreicht werden, wenn die Fehler im Filmbild bereits kontrastreich abgebildet wurden. Aus diesem Grund muß bei der Digitalisierung von Durchstrahlungsaufnahmen nicht das Filmbild dem Abtastsystem, sondern das Abtastsystem dem Filmbild angepaßt werden. Auf die Einstellung des Abtastsystems bei den hier vorliegenden Schweißnahtaufnahmen wird in diesem Kapitel noch eingegangen. Dennoch muß der bestehende nichtlineare Zusammenhang zwischen Grauwert und Schwärzung bei der Ermittlung der Fehlermerkmale unbedingt berücksichtigt werden. Merkmale, die sich auf den Kontrast einer Fehlerabbildung beziehen, werden deshalb nach einem speziellen Verfahren, das in Kapitel 3.4.1.2 beschrieben wird, normiert.

Obwohl sich die nichtlineare Übertragungsfunktion des Bildeinzugsystems im allgemeinen nachteilig auswirkt (z. B. bei der Erfassung kontrastschwacher Details in dunklen Bildbereichen), ist sie für die Abtastung von Schweißnahtaufnahmen eher vorteilhaft. Schweißnahtfehler befinden sich wegen der Nahtüberhöhung meist in hellen Bereichen des Röntgenfilms und werden somit im Digitalbild kontrastreich wiedergegeben.

Die quantitativen Angaben der im *Bild 2.2-2* dargestellten Übertragungsfunktion beziehen sich selbstverständlich nur auf eine bestimmte Einstellung des Bildeinzugsystems. Im hier vorliegenden Fall wurde die Einstellung so gewählt, daß bei einer Schwärzung von 0 D (Filmbetrachtungsgerät ohne Film) gerade ein Grauwert von 255 erzielt wird. Bei Schwärzungen im Bereich von 1.7 D zeigt die Kurve kaum noch Grauwertänderungen, d. h. Schwärzungsunterschiede von 0.15 D werden oberhalb von 1.7 D nicht mehr registriert. Durch Erhöhung der Lichtintensität am Filmbetrachtungsgerät, bzw. durch eine größere Öffnung der Blende am Kameraobjektiv, ist es jedoch möglich, auch höhere

Schwärzungen im Digitalbild kontrastreich aufzulösen. Dies hat allerdings zur Folge, daß in Bildbereichen mit sehr geringen Schwärzungen Überblendungen auftreten, da der gesamte im Digitalbild auswertbare Grauwertbereich stets nur einen Schwärzungsbereich von ca. 1.7 D wiedergibt. Dieser für die Abtastung von Schweißnahtaufnahmen sehr geringe Schwärzungsumfang macht eine optimale Einstellung des Bildeinzugsystems erforderlich.

Bei jedem Bildeinzug wurden die Lichtintensität des Filmbetrachtungsgerätes und die Blende des Kameraobjektivs neu eingestellt. Dabei wurde darauf geachtet, daß die geringste im abgetasteten Röntgenbild vorkommende Schwärzung im Digitalbild gerade einen Grauwert von 255 erzielt. Somit wurden Überblendungen vermieden und Fehleranzeigen mit möglichst hohem Kontrast im Digitalbild abgebildet. Dokumentationen über die jeweiligen Einstellungen des Bildeinzugsystems bei den verschiedenen Abtastungen waren nicht erforderlich, da die quantitativen Zusammenhänge zwischen Schwärzungen und Grauwerten bei den Berechnungen der Fehlermerkmale keine Rolle spielen.



*Bild 2.2-3: Grauwertprofil der Abtastung einer Stufenkeilaufnahme mit Schwärzungen größer 3.05 D*

Im *Bild 2.2-3* sind die Grenzen des Bildeinzugsystems für maximal auftretende Schwärzungen wiedergegeben. Die Kurve zeigt ein Profil durch eine Stufenkeilaufnahme, deren geringste Schwärzung einen Wert von 3.05 D aufweist. Ebenfalls wie im *Bild 2.2-2* beträgt auch hier der Schwärzungsunterschied von Stufe zu Stufe ca. 0.15 D. Trotz maximaler Lichtintensität am Filmbetrachtungsgerät und maximaler Öffnung der Blende am Kameraobjektiv erreicht das Bildeinzugsystem bei der Schwärzung 3.05 D nur einen Grauwert von ca. 44. Grauwertunterschiede zwischen den einzelnen Stufen sind nur bis zu einer Schwärzung von 3.5 D eindeutig erkennbar. Oberhalb einer Schwärzung von 3.5 D können somit Schwärzungsunterschiede von 0.15 D mit dem hier verwendeten Bildeinzugsystem nicht mehr aufgelöst werden.

### 2.3 Detektion der Schweißnahtfehler

Zur Ermittlung von Fehlermerkmalen ist die Detektion der Schweißnahtfehler eine unumgängliche Voraussetzung.

Erst wenn es gelingt, die Fehlerabbildungen im Digitalbild mittels Bildverarbeitung zu erkennen und getrennt vom übrigen Bildinhalt als isolierte Objekte darzustellen, ist es möglich, fehlerspezifische Kennwerte zu ermitteln. Die Fehlerdetektion ist also eine Aufteilung bzw. Segmentierung des Bildes in fehlerhafte und fehlerfreie Bereiche. Hierzu wurde im Rahmen einer Diplomarbeit ein Verfahren entwickelt, das eine automatische Fehlererkennung durchführt. Aus dem digitalen Grautonbild einer Schweißnahtaufnahme wird ein Binärbild erstellt, das ausschließlich die im Grautonbild enthaltenen Fehleranzeigen wiedergibt. Dieses Verfahren wurde auf alle hier untersuchten Röntgenbilder zur Vorbereitung der Merkmalsextraktion angewendet und wird im folgenden kurz beschrieben. Eine ausführliche Darstellung des Verfahrens ist der Literatur [35, 38, 45] zu entnehmen.

Das Bild 2.3-1 zeigt den Ablauf einer automatischen Fehlerdetektion. Bildbeispiele zu den einzelnen Verarbeitungsschritten sind im Bild 2.3-2 wiedergegeben. Ausgehend vom bereits digitalisierten Röntgenbild (Bild 2.3-2a) wird in einem ersten Verarbeitungsschritt ein Hintergrundmodell erstellt. Dieses Hintergrundmodell (Bild 2.3-2b) ist eine extrem unscharfe Wiedergabe der vorliegenden Schweißnahtaufnahme und wird über eine Tiefpaßfilterung mit einer Filtermatrix von 50 x 50 Bildpunkten aus dem abgetasteten Röntgenbild gewonnen. Einzelne Fehlerabbil-

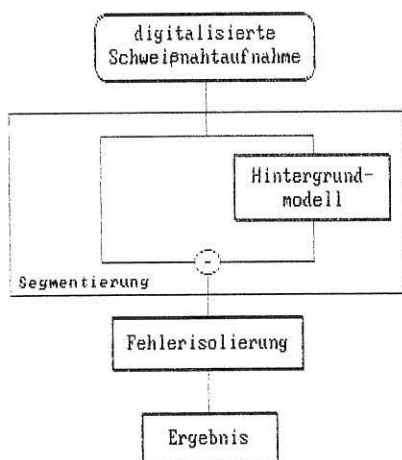


Bild 2.3-1:  
Ablauf der automatischen Fehlerdetektion

dungen werden durch die starke Tiefpaßfilterung unterdrückt und sind somit im Hintergrundmodell nicht mehr enthalten. Kleinere Nahtstrukturen (Raupe, Wurzelfurchung, usw.) werden ebenfalls unterdrückt, da die Größe der Filtermatrix so ausgelegt wurde, daß im Hintergrundmodell lediglich die Abbildung der Schweißnahtüberhöhung bestehen bleibt. Die Größe der Filtermatrix wurde anhand der hier vorliegenden Schweißnahtaufnahmen empirisch ermittelt.

In einem zweiten Verarbeitungsschritt wird das Hintergrundmodell vom ursprünglich digitalisierten Röntgenbild subtrahiert. Das so entstandene Subtraktionsbild (Bild 2.3-2c) ist eine Wiedergabe der Schweißnahtaufnahme mit weitgehend unterdrückter Abbildung der Nahtüberhöhung. Die Schweißnahtfehler erscheinen auf einem nahezu homogenen Hintergrund und sind somit für die automatische Fehlerdetektion leichter erfassbar.

In der darauf folgenden Fehlerisolierung werden die Schweißnahtfehler endgültig vom übrigen Bildinhalt getrennt. Da sich die Schweißnahtfehler im Subtraktionsbild deutlich als dunkle Objekte vom Hintergrund abheben, ist es möglich, durch eine einfache Schwellwertoperation die Fehlerabbildungen zu detektieren. Dabei werden alle Bildpunkte, deren Grauwerte sich oberhalb einer festgelegten Schwelle befinden, auf den Grauwert 0 (schwarz) gesetzt. Alle anderen Bildpunkte erhalten den Grauwert 255 (weiß). Das so erzeugte Binärbild (Bild 2.3-2d) zeigt die Fehlerabbildungen als weiße Objekte auf schwarzem Hintergrund und ist das Ergebnis der Fehlerisolierung.

Zur Ermittlung der Fehlermerkmale wurde somit eine Bildvorlage erstellt, die es ermöglicht, jeden einzelnen Fehler getrennt zu betrachten. Das Binärbild ist für die Berechnung von Fehlermerkmalen aus zwei Gründen von Bedeutung:

- Aus dem Binärbild lassen sich wichtige Informationen über die Geometrie der Fehlerabbildungen entnehmen.
- Durch Überlagerung des Binärbildes mit dem ursprünglichen Grautonbild kann der Ort eines Fehlers innerhalb der Schweißnaht markiert werden.

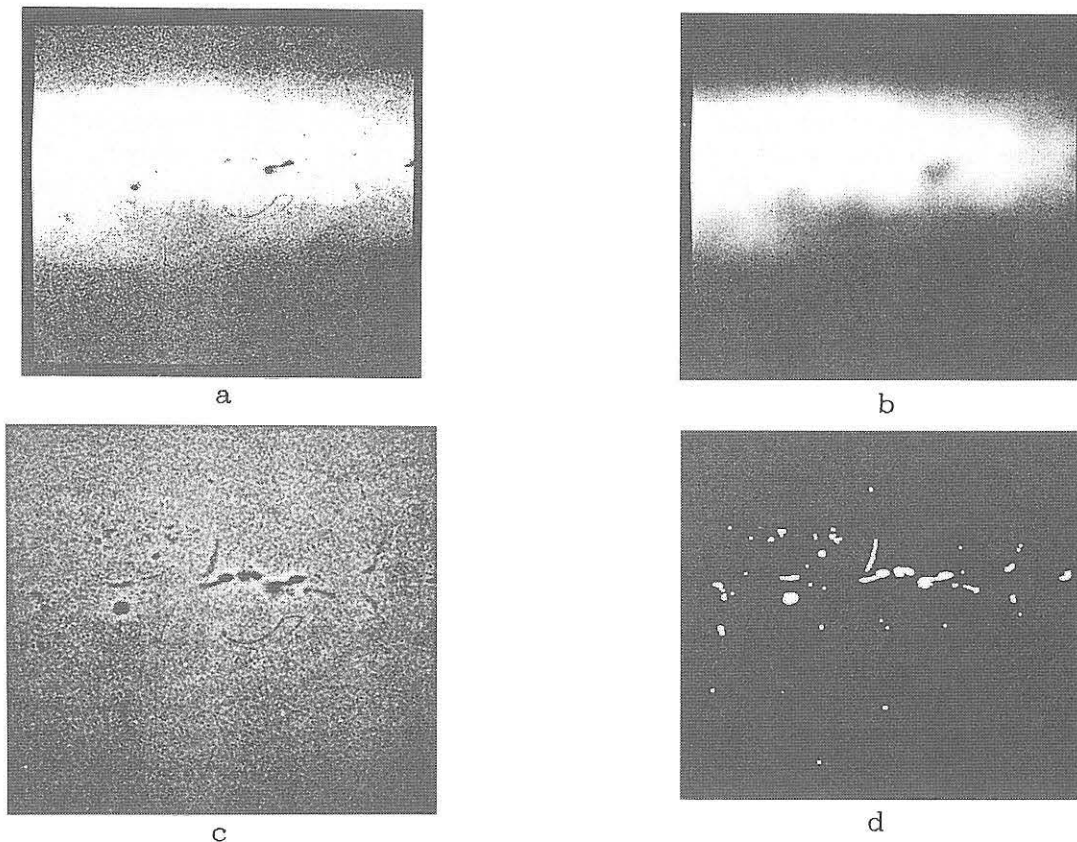


Bild 2.3-2:  
 Bildbeispiele zum Ablauf einer automatischen Fehlerdetektion  
 a) Digitalisiertes Röntgenbild  
 b) Hintergrundmodell  
 c) Subtraktionsbild  
 d) Binärbild

### 3. Merkmalsextraktion

#### 3.1 Allgemeines

Die Beschreibung radiographisch erfaßter Schweißnahtfehler durch Merkmale gehört zu den schwierigsten Aufgaben der automatischen Röntgenbildauswertung und erfordert eine anspruchsvolle analytische Verarbeitung der Bildinformation. Die Erfassung fehlerspezifischer Kennwerte aus dem Röntgenbild setzt voraus, daß die Fehlerabbildungen für verschiedene Fehlertypen charakteristische Eigenschaften hervorbringen. Ziel der Merkmalsextraktion ist es, diese Eigenschaften zu erkennen und so zu bewerten, daß eine hinreichend differenzierte Unterscheidung der Fehler möglich wird. Die Gewinnung aussagekräftiger Merkmale für Schweißnahtfehler stellt aus folgenden Gründen ein besonderes Problem dar:

- a) Die Anzahl verschiedener Fehlertypen ist beim Prüfobjekt Schweißnaht besonders hoch.
- b) Gleiche Fehlertypen können in verschiedener Größe und Form innerhalb einer Schweißnaht auftreten.

- c) Die Abbildung eines Fehlers im Röntgenbild ist stark abhängig von der Aufnahmeanordnung, der Nahtform und der Geometrie des Werkstückes.

Um die hohe Anzahl verschiedener Fehlertypen sicher voneinander zu trennen, ist es erforderlich, Merkmale einzuführen, die innerhalb einer Fehlerklasse nur geringe Abweichungen voneinander aufweisen. Die Punkte b) und c) machen deutlich, wie schwer diese Anforderung zu erfüllen ist. Geringe Veränderungen in den Fehlerabbildungen können bei empfindlichen Merkmalen dazu führen, daß es zur Bildung von Mischklassen kommt, d. h., daß verschiedene Fehlertypen in einer Ausgangsklasse zusammengefaßt werden. Es ist daher abzusehen, daß die Unterscheidung verschiedener Fehlertypen nicht anhand eines Merkmals, sondern nur durch eine sorgfältige Auswahl mehrerer voneinander unabhängiger Merkmale erfolgen kann. Welche Merkmale letztlich zur Klassifizierung herangezogen werden, hängt von den jeweiligen Anforderungen ab, d. h. welche und wieviele Fehlertypen für die vorgesehene Anwendung voneinander getrennt werden müssen.

## 3.2 Anforderungen an die Merkmale

Ausgangspunkt für die Erfassung eines Merkmals ist der im Röntgenbild detektierte Fehler (siehe Kapitel 2.3). Je nach Wahl des Bildausschnitts bei der Abtastung kann dieser Fehler sowohl in seiner Lage als auch in seiner Größe unterschiedlich wiedergegeben werden. Um den Einfluß veränderter Abtastgeometrien auf die Fehlertypenbestimmung gering zu halten, sind folgende Bedingungen an die Merkmale zu stellen:

- Merkmale müssen möglichst invariant gegen Drehung und Verschiebung der Fehler sein.
- Merkmale sind größenunabhängig zu definieren, d. h. der Bildmaßstab bleibt unberücksichtigt.

Diese Anforderungen an die Merkmale ergeben sich nicht nur allein durch die Freiheitsgrade beim Bildeinzug, sondern sind für die Beschreibung von Schweißnahtfehlern grundsätzlich von Bedeutung. Weder der Fehlerort noch die Fehlergröße sind in der Schweißnahtprüfung vorhersehbar und bilden kein eindeutiges Kriterium für eine Fehlerzuordnung. Die Tatsache, daß ein und derselbe Fehlertyp an verschiedenen Stellen der Schweißnaht mit unterschiedlicher Abmessung auftreten kann, machen die oben genannten Bedingungen erforderlich.

## 3.3 Merkmalskategorien

Aufgabe eines Merkmals ist nicht die vollständige Beschreibung sämtlicher Fehlereigenschaften, sondern lediglich die quantitative Erfassung eines Fehlerdetails. Erst das Zusammenwirken mehrerer Merkmale gibt Aufschluß über das gesamte Fehlerbild und führt dann zu einer umfassenden Fehlerbeschreibung. Bei der Zusammenstellung eines Merkmalsatzes ist deshalb darauf zu achten, daß die Einzelmerkmale möglichst unabhängig voneinander sind, d. h. die Einzelmerkmale müssen verschiedene Fehlerdetails repräsentieren. Aus diesem Grund sind für die Gewinnung der Merkmale Verfahren erforderlich, die auf verschiedene Bildinformationen der Fehlerabbildung zurückgreifen. Die folgende Einteilung der Merkmale in Kategorien soll verdeutlichen, mit welchem umfangreichen Informationsangebot eine Fehlertypenbeschreibung durchgeführt werden kann.

### Kategorie I: Objektbezogene Merkmale

In dieser Kategorie sind nur Merkmale enthalten, die sich ausschließlich aus der Fehlerabbildung selbst berechnen lassen. Die Tatsache, daß die wichtigsten charakteristischen Eigenschaften eines Fehlers auch dann erkennbar sind, wenn dieser Fehler isoliert dargestellt wird, zeigt die Bedeutung der objektbezogenen Merkmale. Eine weitere Unterteilung dieser Kategorie demonstriert den Umfang der hier gewonnenen Aussage.

- Geometrische Merkmale

Hierzu zählen alle Merkmale, die anhand des Segmentierungsergebnisses, also aus der binären Darstellung

des Fehlers die erkannte Fehlerfläche vermessen. Geometrische Merkmale beschreiben vornehmlich die Fehlerform und die Fehlerkontur.

- Grauwertmerkmale

Bei diesen Merkmalen wird die Schwärzungsverteilung innerhalb einer Fehlerabbildung statistisch ausgewertet. Die im Fehlerbereich wiedergegebenen Grauwerte geben Auskunft über den Fehlerkontrast und ermöglichen die Ermittlung von Schwärzungsschwankungen innerhalb der Fehlerabbildung. Durch eine Auswertung der Schwärzungsschwankungen am Rand der Fehlerabbildung können Aussagen über die Steilheit der Fehlerflanke gewonnen werden.

- Kombinierte Grauwert/Geometrie-Merkmale

Bei den kombinierten Grauwert/Geometrie-Merkmalen wird die Schwärzungsinformation innerhalb einer Fehlerabbildung ortsabhängig erfaßt. Dadurch ist es möglich, Besonderheiten in der Tiefenausdehnung eines Fehlers zu erkennen und diese Tiefenausdehnung in ihrer Position zu bestimmen.

### Kategorie II: Kontextbezogene Merkmale

Im Gegensatz zur Kategorie I werden hier die Fehler nicht isoliert, sondern im Zusammenhang mit dem übrigen Bildinhalt ausgewertet. Das Röntgenbild einer Schweißnaht enthält neben den Fehlerabbildungen selbst zusätzliche fehlerrelevante Informationen, die nur aus einer globalen Betrachtung des Gesamtbildes gewonnen werden können. Bei den kontextbezogenen Merkmalen erfolgt die Beschreibung eines Fehlers dadurch, daß die Fehlerabbildung auf andere im Bild vorhandene Anzeigen bezogen wird. Die kontextbezogenen Merkmale lassen sich für die Auswertung von Schweißnahtaufnahmen entsprechend der verwendeten Bildinformation in zwei Gruppen unterteilen:

- Fehler/Schweißnaht-Merkmale

Hierzu zählen alle Merkmale, die die Position eines Fehlers innerhalb der Schweißnaht bestimmen. Die Aussage, ob ein Fehler am Schweißnahttrand oder in der Schweißnahtmitte liegt, kann zur Ermittlung des Fehlertyps von entscheidender Bedeutung sein. Ebenso wichtig ist die Vorzugsrichtung bei langgestreckten Fehleranzeigen, die, bezogen auf den Schweißnahtverlauf, z. B. eine Unterscheidung von Quer- und Längsrissen ermöglicht.

- Fehler/Fehler-Merkmale

Diese Merkmale setzen die Einzelfehleranzeigen untereinander in Beziehung. Die Vermessung der Abstände zwischen einzelnen Fehlerabbildungen und die Verfolgung miteinander verketteter Anzeigen machen Zusammenhänge deutlich, die bei der Einzelfehlerbetrachtung unberücksichtigt bleiben. Fehler/Fehler-Merkmale dienen der Erfassung von Fehleranhäufungen wie Porenestern, Rißfeldern, Schlackenzeilen usw.

### Kategorie III: A-priori-Information

Hierbei handelt es sich nicht um Merkmale im Sinne der Ermittlung fehlerspezifischer Kennwerte, sondern vielmehr um eine Interpretationshilfe für die unter Kategorie I und II berechneten Merkmale. Die Darstellung eines Fehlers im Röntgenbild wird von vielerlei Faktoren beeinflusst, die sowohl von der Aufnahmeanordnung als auch von der Beschaffenheit des Werkstückes abhängig sind. Hierzu zählen z. B. die Nahtform, die Wanddicke, der Einstrahlwinkel, die verwendete Strahlenenergie u. a. m. Diese Informationen sind dem Röntgenbild nicht direkt zu entnehmen und müssen deshalb als Vorabinformationen eingebracht werden. Die Verwendung von a-priori-Informationen erhöht nicht die Aussagekraft der Merkmale selbst. Es wird lediglich sichergestellt, daß die berechneten Merkmale entsprechend den aufnahmebedingten Abbildungsverhältnissen des jeweils vorliegenden Röntgenbildes richtig bewertet werden. So kann z. B. die Lage eines Fehlers in einer Schweißnaht (Schweißnahttrand oder Schweißnahtmitte) nur dann eindeutig bestimmt werden, wenn sowohl die Form der Naht als auch der Einstrahlwinkel der Aufnahme bekannt sind. Die a-priori-Informationen werden Protokollen entnommen, die den Schweißnahtaufnahmen zusätzlich als Dokumentationsdaten beigelegt sind.

## 3.4 Beschreibung der Einzelmerkmale

Die Leistungsfähigkeit einer automatischen Fehlertypenunterscheidung hängt primär von der Aussagekraft der Einzelmerkmale ab. Erst wenn es gelingt, die spezifischen Unterschiede zwischen den verschiedenen Fehlertypen durch Merkmale zu erfassen, kann eine maschinelle Trennung der Fehler in unterschiedliche Typenklassen erfolgreich durchgeführt werden. Für das Auffinden von Merkmalen gibt es jedoch keine allgemein gültigen Regeln, da Merkmale stets problemangepaßt entwickelt werden müssen. Auch für den hier vorliegenden Fall der Fehlertypenbeschreibung kann die Suche nach geeigneten Merkmalen nur intuitiv erfolgen. Dabei spielen die Erfahrungen des menschlichen Auswerters beim Betrachten von Schweißnahtaufnahmen eine wesentliche Rolle. Die hier ausgewählten Merkmale werden vornehmlich Fehlereigenschaften beschreiben, die auch bei der visuellen Wahrnehmung von Fehlern für die Typenerkennung von entscheidender Bedeutung sind. Hierzu zählen z. B. Begriffe wie langgestreckt, rund, zerklüftet, kontrastreich usw., die häufig zur Kennzeichnung von Fehlerabbildungen verwendet werden.

Aufgabe der rechnergestützten Bildauswertung ist es nun, diese Merkmale mit Hilfe mathematischer Methoden aus dem Bildinhalt zu extrahieren. Hierzu sind häufig komplizierte analytische Verfahren notwendig, die anspruchsvolle Bildverarbeitungsprozeduren erfordern. Im folgenden soll dargestellt werden, wie die Fehlermerkmale aus den digitalisierten Röntgenbildern gewonnen werden. Hierbei geht es nicht um die präzise Beschreibung einzelner auszuführender Rechenschritte, sondern vielmehr um die Definition der

Merkmale und ihrer Aussagen hinsichtlich der Erfassung charakteristischer Fehlereigenschaften. Soweit es sich um allgemein bekannte Merkmale zur Objekterkennung handelt, sind diese durch Literaturhinweise gekennzeichnet. Da in vielen anderen Anwendungsbereichen der Bildanalyse, insbesondere der Schlifffbildauswertung und der Auswertung medizinischer Bildvorlagen, Merkmale in unüberschaubarer Anzahl bereits existieren und ständig neu entwickelt werden, können die Hinweise keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Die Mehrzahl der hier aufgeführten Merkmale sind jedoch unter dem Gesichtspunkt einer möglichst aussagekräftigen Fehlertypenbeschreibung im Rahmen dieser Arbeit neu entworfen worden. Die einzelnen Merkmale werden entsprechend der in Kapitel 3.3 festgelegten Einteilung in Kategorien vorgestellt.

### 3.4.1 Objektbezogene Merkmale

Der Berechnung objektbezogener Merkmale geht die in Kapitel 2.3 beschriebene Fehlersegmentierung voraus. Die durch die Segmentierung gekennzeichneten Fehlerbereiche werden aus dem Gesamtbild herausgenommen und einzeln, d. h. unabhängig voneinander ausgewertet.

Demnach werden objektbezogene Merkmale stets an Bildausschnitten gewonnen, die lediglich nur eine Fehlerabbildung enthalten. Diese Bildausschnitte sind rechteckförmige Teilbilder der gesamten Schweißnahtaufnahme und sind in ihrer Größe an die Ausdehnung des jeweils dargestellten Fehlers angepaßt. Der Rand eines Bildausschnitts wird als umschreibendes Rechteck bezeichnet, da er die Fläche des dargestellten Fehlers an allen vier Seiten gerade noch berührt. Es sei darauf hingewiesen, daß es bei direkt nebeneinander angeordneten Fehlern zu Überschneidungen der umschreibenden Rechtecke kommen kann. Derartige Fehleranordnungen wurden im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht berücksichtigt.

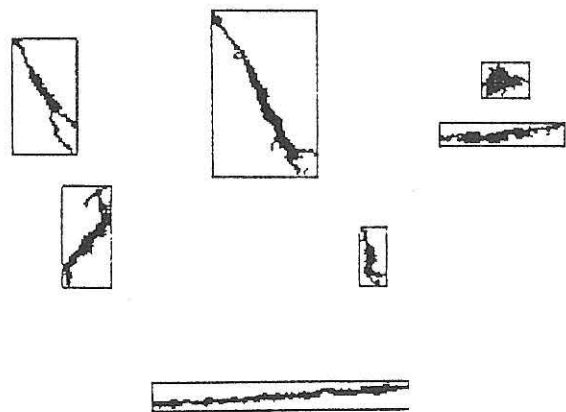


Bild 3.4-1:  
Fehlerabbildungen und umschreibende Rechtecke gemeinsam dargestellt

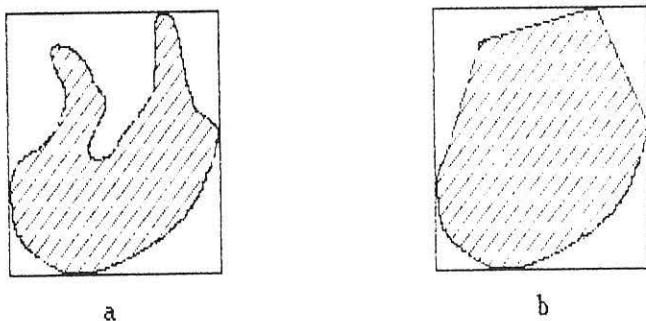


Im *Bild 3.4-1* sind mehrere umschreibende Rechtecke unterschiedlicher Fehlerabbildungen in einem Binärbild dargestellt. Da die Fehlerabbildungen im allgemeinen nur einen geringen Teil des Gesamtbildes ausmachen, reduziert sich zur Berechnung der objektbezogenen Merkmale die Datenmenge erheblich. Der Zeitaufwand, der zur Ermittlung objektbezogener Merkmale benötigt wird, hängt also direkt von der Anzahl und der Größe der Fehleranzeigen ab, die in einer Schweißnahtaufnahme enthalten sind.

### 3.4.1.1 Geometrische Merkmale

Werden bei der Auswertung der Bildausschnitte nur die Größe und Form der dargestellten Fehler berücksichtigt und nicht die Helligkeiten innerhalb der Fehlerabbildungen, so handelt es sich um geometrische Merkmale. Zur Berechnung der geometrischen Merkmale können deshalb Bildausschnitte verwendet werden, die keine abgestufte Helligkeitsinformation enthalten, sondern die Fehler lediglich in einer schwarz/weiß-Darstellung wiedergeben. Derartige

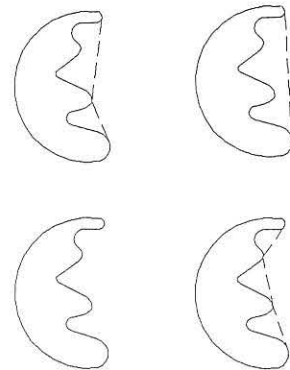
Fehlerabbildungen sind in den Ergebnisbildern der Fehlerdetektion enthalten (siehe *Bild 2.3-2d*, Seite 14). Aus diesem Grund werden bei der Ermittlung geometrischer Merkmale die auszuwertenden Fehlerbereiche nicht den digitalisierten Grautonbildern der Schweißnahtaufnahmen entnommen, sondern ausschließlich den Binärbildern, die bei der Fehlerdetektion entstehen.



*Bild 3.4-2:*  
Binäre Darstellungen einer Fehlerabbildung  
a) ursprüngliche Fehlerform  
b) konvexe Fehlerform

Das *Bild 3.4-2a* zeigt die binäre Darstellung einer Fehlerabbildung. Für die Erfassung fehlerspezifischer Kennwerte hat es sich jedoch als zweckmäßig herausgestellt, neben der ursprünglichen Abbildung eines Fehlers eine zweite vereinfachte Fehlerdarstellung einzuführen. Diese Fehlerdarstellung ist im *Bild 3.4-2b* wiedergegeben. Sie berechnet sich über die konvexe Kontur [3, 12], d. h. der Fehlerrand verläuft bei dieser Darstellung ausschließlich konvex. Enthält die Kontur der ursprünglichen Fehlerabbildung konkave Einbuchtungen, so werden diese vorerst geradlinig überbrückt. Da die konvexen und konkaven Abschnitte innerhalb einer Fehlerkontur jedoch meist sehr

unterschiedlich ausgeprägt sind, können trotz der ersten Begradigung konkaver Randverläufe wiederum Einbuchtungen auftreten. Der Vorgang der Überbrückung konkaver Einbuchtungen muß also solange wiederholt werden, bis nur noch konvexe bzw. geradlinige Konturabschnitte existieren. *Bild 3.4-3* soll diesen Vorgang an einem künstlichen Objekt verdeutlichen.



*Bild 3.4-3:*  
Ermittlung der konvexen Kontur

Für die Berechnung geometrischer Merkmale spielt die konvexe Kontur aus zwei Gründen eine wesentliche Rolle. Einerseits bewirkt die Verwendung der konvexen Kontur eine Vereinheitlichung der Fehlerbilder und trägt somit zur Stabilisierung der Merkmale bei, d. h. die Merkmalswerte erhalten innerhalb der unterschiedlichen Fehlertypen geringere Streubreiten. Andererseits können aus dem Vergleich der beiden Fehlerabbildungen, d. h. dem Unterschied zwischen ursprünglicher und konvexer Fehlerform, interessante Informationen zum Fehlertyp gewonnen werden.

#### Fehlerfläche

Ein einfaches, aber dennoch sehr wirksames geometrisches Merkmal ist die Fehlerfläche. Ist der Abbildungsmaßstab des digitalisierten Röntgenbildes bekannt, kann die Fläche eines Fehlers sehr einfach über die Anzahl der Bildpunkte bestimmt werden, die dieser Fehler im Rasterbild einnimmt.

$$FL = \sum_1^n F_p = n \cdot F_p \quad (3.4-1)$$

$F_p$ : Fläche eines Pixels  
 $n$ : Anzahl der Pixel in der Fehlerabbildung

$FL$  gibt jedoch einen Absolutwert für die gesuchte Fehlerfläche an und ist deshalb als Merkmal unbrauchbar (siehe Kapitel 3.2). Aus diesem Grund wird zusätzlich die Fläche der konvexen Fehlerdarstellung ermittelt. Sie läßt sich ebenfalls nach Gleichung 3.4-1 berechnen, wobei  $n$  jetzt allerdings die Anzahl der Pixel in der konvexen Darstellung

annimmt. Aus dem Verhältnis der beiden Flächen wird dann nach Gleichung 3.4-2 das endgültige Flächenmerkmal  $FFL$  gebildet.

$$FFL = \frac{FL}{FLC} \quad (3.4-2)$$

$FL$ : Fläche der ursprünglichen Fehlerabbildung  
 $FLC$ : Fläche der konvexen Fehlerdarstellung

Da  $FLC$  stets größer oder höchstens gleich  $FL$  ist, ergibt sich für das Flächenmerkmal ein Wertebereich von  $0 < FFL \leq 1$ .  $FFL = 1$  bedeutet, daß die Kontur der ursprünglichen Fehlerabbildung bereits einen vollständig konvexen Verlauf hat. Das Flächenmerkmal  $FFL$  gibt also an, inwieweit die Form der ursprünglichen Fehlerabbildung von einer konvexen Form abweicht. Da zwischen den Fehlerabbildungen volumenhafter und flächenhafter Fehler, insbesondere zwischen Poren und Rissen, hier große Unterschiede auftreten können, ist davon auszugehen, daß das Flächenmerkmal  $FFL$  einen wesentlichen Beitrag zur Trennung dieser Fehlerarten leistet.

### Konturlänge

Ähnlich wie die Fehlerfläche kann auch die Konturlänge einer Fehlerabbildung sehr leicht aus dem Rasterbild entnommen werden. Die Konturlänge ergibt sich aus der Anzahl aller Bildpunkte, die sich auf dem Rand der Fehlerabbildung befinden. Wird der Abbildungsmaßstab des digitalisierten Röntgenbildes wieder als bekannt vorausgesetzt, kann die Konturlänge  $KL$  nach Gleichung 3.4-3 berechnet werden.

$$KL = \sum_1^m K_p = m \cdot K_p \quad (3.4-3)$$

$K_p$ : Kantenlänge eines Pixels

$m$ : Anzahl der Pixel auf dem Rand der Fehlerabbildung

Der Wert für  $KL$  muß jedoch noch korrigiert werden, da beim Verlauf einer Kontur zwei unterschiedliche Nachbarschaftsverhältnisse zwischen Konturpunkten auftreten können. Solange zwei Konturpunkte direkt nebeneinander liegen, d. h. eine Berührung "Kante an Kante" (direkte Nachbarschaft) vorliegt, hat die Gleichung 3.4-3 Gültigkeit. Berühren sich jedoch zwei Konturpunkte nur "an einer Ecke" (indirekte Nachbarschaft), so vergrößert sich die durch sie gebildete Konturlänge um den Faktor 2.

$$KL = K_p (m_1 + m_2 \sqrt{2}) \quad (3.4-4)$$

$K_p$ : Kantenlänge eines Pixels

$m_1$ : Anzahl der Konturpunkte mit direkter Nachbarschaft

$m_2$ : Anzahl der Konturpunkte mit indirekter Nachbarschaft

Bei der Berechnung der vollständigen Konturlänge einer Fehlerabbildung muß also die Nachbarschaft der Konturpunkte berücksichtigt werden.

Ebenso wie die Flächengröße  $FL$  ergibt auch die Konturlänge  $KL$  einen Absolutwert und ist deshalb als Merkmal ungeeignet. Entsprechend der Vorgehensweise beim Flächenmerkmal  $FFL$  wird auch für das Konturmerkmal  $KTL$  das Verhältnis aus den Konturlängen der ursprünglichen Fehlerabbildung und der konvexen Fehlerdarstellung gebildet.

$$KTL = \frac{KLC}{KL} \quad (3.4-5)$$

$KL$ : Konturlänge der ursprünglichen Fehlerabbildung

$KLC$ : Konturlänge der konvexen Fehlerdarstellung

Die Konturlänge  $KLC$  der konvexen Fehlerdarstellung erscheint hier jedoch im Zähler, da die Konturlänge der ursprünglichen Fehlerabbildung  $KL$  stets größer oder höchstens gleich  $KLC$  ist. Für das Konturmerkmal  $KTL$  ergibt sich also wiederum ein Wertebereich von  $0 < KTL \leq 1$

Im Unterschied zum Flächenmerkmal  $FFL$  gibt das Konturmerkmal  $KTL$  Auskunft über die Zerklüftetheit einer Fehlerkontur. Die Beispiele in *Abbildung 3.4-4* sollen die Wirkungsweise des Konturmerkmals verdeutlichen und den Unterschied zwischen  $KTL$  und  $FFL$  herausstellen.

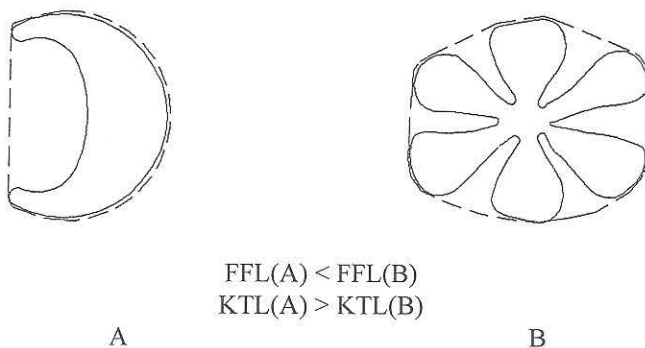


Bild 3.4-4:

Objektbeispiele zum Konturmerkmal  $KTL$  und zum Flächenmerkmal  $FFL$

Die linke Darstellung in *Bild 3.4-4* zeigt ein stark gekrümmtes Objekt mit einem sehr ruhigen Konturverlauf. Für das Konturmerkmal  $KTL$  wird sich hier wegen der nahezu gleichen Konturlängen von ursprünglicher und konvexer Objektform ein sehr hoher Wert (nahe 1) ergeben. Das Flächenmerkmal  $FFL$  hingegen kann nur einen

geringen Wert annehmen, da sich beide Flächen in der Größe stark voneinander unterscheiden. Ein völlig anderes Verhalten der beiden Merkmale  $KTL$  und  $FFL$  wird jedoch beim rechts dargestellten Objekt in *Bild 3.4-4* beobachtet. Hier liegen nahezu gleiche Flächengrößen vor, was dazu führt, daß das Flächenmerkmal  $FFL$  einen hohen Wert erreicht. Das Konturmerkmal  $KTL$  hingegen wird einen sehr kleinen Wert annehmen, da wegen der stark zerklüfteten Kontur des ursprünglichen Objekts große Unterschiede in den Kantenlängen  $KL$  und  $KLC$  auftreten.

### Formfaktor

Das Kontur- und das Flächenmerkmal zeigen an, inwieweit eine Fehlerabbildung von der konvexen Darstellung des Fehlers abweicht. Der Bezug auf die konvexe Darstellung war notwendig, da die Konturlänge und die Flächengröße als Absolutwert einzeln betrachtet keine geeigneten Merkmale abgeben. Werden jedoch die Konturlänge und die Flächengröße einer Fehlerabbildung zueinander in Beziehung gesetzt, so läßt sich ein Merkmal konstruieren, das als Formfaktor bezeichnet wird.

$$FF = \frac{KL^2}{FL} \quad (3.4-6)$$

$KL$ : Konturlänge der Fehlerabbildung

$FL$ : Fläche der Fehlerabbildung

$FF$ : Formfaktor

$FF \geq 4\pi$  wegen

$$\left. \begin{aligned} KL(\text{Kreis}) &= 2\pi R \\ FL(\text{Kreis}) &= \pi R^2 \end{aligned} \right\} \frac{KL^2}{FL} = \frac{4\pi^2 R^2}{\pi R^2} = 4\pi$$

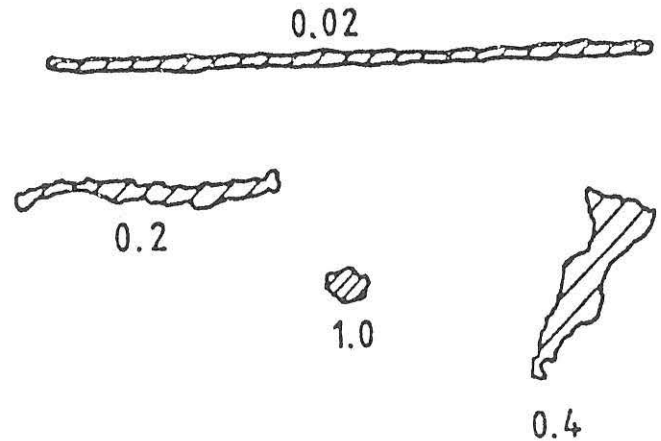
Da das Verhältnis von Konturlänge zu Fläche bei einem idealen Kreis den kleinsten Wert annimmt, können für den Formfaktor  $FF$  nach Gleichung 3.4-6 nur Werte größer oder gleich  $4\pi$  auftreten. Je mehr eine Fehlerabbildung von der idealen Kreisform abweicht, desto größer wird der Wert des Formfaktors. Durch den Formfaktor wird also erstmals die Geometrie einer Fehlerabbildung beschrieben, ohne die konvexe Fehlerdarstellung einzubeziehen. Mit Hilfe des Formfaktors ist es möglich, langgestreckte Fehleranzeigen von runden Fehlerformen zu trennen, was insbesondere zur Unterscheidung von Poren und Rissen von Bedeutung ist.

Um den Formfaktor in seinem Wertebereich den Merkmalen Konturlänge und Fehlerfläche anzugleichen, wird eine Normierung nach Gleichung 3.4-7 durchgeführt.

$$NFF = \frac{4\pi FL}{KL^2} = \frac{4\pi}{FF} \quad (3.4-7)$$

$0 < NFF \leq 1$  wegen  $4\pi \leq FF < \infty$

Der normierte Formfaktor  $NFF$  hat nun einen Wertebereich von  $0 < NFF \leq 1$ , wobei kreisähnliche Fehlerabbildungen Werte nahe 1 annehmen und die von der Kreisform abweichenden Abbildungen gegen 0 streben. Im *Bild 3.4-5* sind für einige typische Fehlerabbildungen die normierten Formfaktoren angegeben.



*Bild 3.4-5*

Normierter Formfaktor für Schweißnahtfehler unterschiedlicher Geometrie

Da der Formfaktor maßgebend von der Konturlänge abhängig ist, können stark zerklüftete Konturen die Aussage zur Fehlerform erheblich beeinflussen. Es ist daher sinnvoll, neben dem Merkmal  $NFF$  einen zweiten Formfaktor einzuführen, der sich aus der konvexen Fehlerdarstellung berechnet und als konvexer normierter Formfaktor  $CNF$  bezeichnet wird.

$$CNF = \frac{4\pi FLC}{KLC^2} \quad (3.4-8)$$

$FLC$ : Fläche der konvexen Fehlerdarstellung

$KLC$ : Konturlänge der konvexen Fehlerdarstellung

$CNF \geq NFF$  wegen

$$\left. \begin{aligned} FLC &\geq FL \\ KLC &\leq KL \end{aligned} \right\} \frac{4\pi FLC}{KLC^2} \geq \frac{4\pi FL}{KL^2}$$

Das Merkmal  $CNF$  nimmt gegenüber  $NFF$  grundsätzlich größere Werte an, da bei der konvexen Fehlerdarstellung die Fläche stets größer und die Konturlänge stets kleiner wird. Ein abgerundetes Fehlerbild, wie es die konvexe Darstellung liefert, ist besonders dann von Vorteil, wenn die Form einer Fehlerabbildung nur global erfaßt werden soll. Zur Ermittlung der fehlerspezifischen Eigenschaften werden beide Merkmale,  $NFF$  und  $CNF$ , im weiteren Verlauf der Arbeit berücksichtigt.

## Flächenschwerpunkt

Die Berechnung objektbezogener Merkmale wird stets an isolierten Fehlerabbildungen durchgeführt. Die Bildausschnitte, die zur Darstellung der einzelnen Fehler aus dem Gesamtbild entnommen werden, sind die umschreibenden Rechtecke der jeweiligen Fehlerabbildungen (siehe Kapitel 3.4.1, Seite 21). Das umschreibende Rechteck einer Fehlerabbildung wird jedoch nur durch die Ausdehnung der im Röntgenbild dargestellten Fehlerfläche bestimmt. Innerhalb des umschreibenden Rechtecks kann die Fläche einer Fehlerabbildung jede beliebige Form annehmen. Zur Charakterisierung eines Fehlers ist die Form der Fehlerfläche jedoch von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund wird das Merkmal Flächenschwerpunkt eingeführt, das auf sehr einfache Weise die Flächenanteile einer Fehlerabbildung im umschreibenden Rechteck bewertet.

Das Bild 3.4-6 zeigt den Bildausschnitt einer Fehlerabbildung, wie er dem binären Gesamtbild zur Berechnung geometrischer Merkmale entnommen wird. Die Fläche der Fehlerabbildung ist innerhalb des umschreibenden Rechtecks sehr ungleichmäßig verteilt. Um diesen Zustand der ungleichmäßigen Flächenverteilung zu beschreiben, wird zuerst der Schwerpunkt der abgebildeten Fehlerfläche ermittelt.

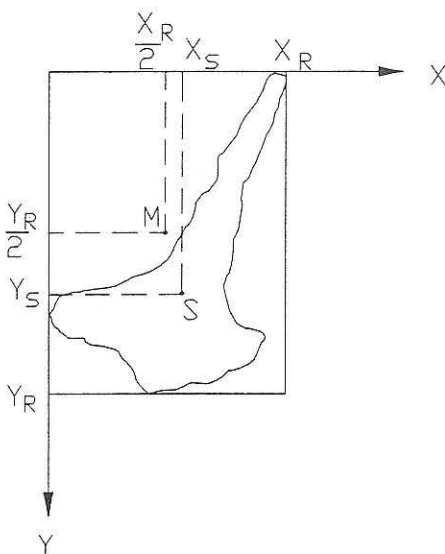


Bild 3.4-6:  
Fläche einer Fehlerabbildung im umschreibenden Rechteck

Die Koordinaten des Schwerpunktes  $S(x_S, y_S)$  einer beliebig geformten Fläche berechnen sich aus dem arithmetischen Mittel der Koordinaten aller Flächenpunkte nach dem Gleichungspaar 3.4-9.

$$x_S = \frac{1}{n} \sum_1^n x_n; \quad y_S = \frac{1}{n} \sum_1^n y_n \quad (3.4-9)$$

- $n$ : Anzahl der Bildpunkte innerhalb der Fehlerfläche  
 $x_n$  und  $y_n$ : Koordinaten der Bildpunkte, die sich innerhalb der Fehlerfläche befinden

Die Koordinaten beziehen sich stets auf die linke obere Ecke des umschreibenden Rechtecks. Da die einzelnen Fehler unabhängig voneinander betrachtet werden, kann dieser Eckpunkt für jede Auswertung erneut als Koordinatenursprung gewählt werden.

Als Maß für die ungleichmäßige Flächenverteilung wird nun der Abstand des Schwerpunktes  $S$  vom Mittelpunkt  $M$  des umschreibenden Rechtecks gewählt. Sind  $x_R$  und  $y_R$  die Koordinaten des rechten unteren Eckpunktes des umschreibenden Rechtecks, so kann der Abstand zwischen  $S$  und  $M$  nach Gleichung 3.4-10 berechnet werden.

$$\overline{SM} = \sqrt{\left(x_S - \frac{x_R}{2}\right)^2 + \left(y_S - \frac{y_R}{2}\right)^2} \quad (3.4-10)$$

$$0 \leq \overline{SM} \leq \frac{1}{2} \sqrt{x_R^2 + y_R^2} \quad \text{wegen} \quad \left. \begin{array}{l} x_{S(\max)} = x_R \\ y_{S(\max)} = y_R \end{array} \right\}$$

$$\overline{SM}_{(\max)} = \sqrt{\left(\frac{x_R}{2}\right)^2 + \left(\frac{y_R}{2}\right)^2} = \frac{1}{2} \sqrt{x_R^2 + y_R^2}$$

Der Abstand  $\overline{SM}$  kann Werte zwischen 0 und  $\frac{1}{2} \sqrt{x_R^2 + y_R^2}$  annehmen und ist somit vom Abbildungsmaßstab der Fehlerabbildung abhängig. Für das endgültige Flächenschwerpunktsmerkmal  $FSP$  wird deshalb eine Normierung nach Gleichung 3.4-11 durchgeführt.

$$FSP = \frac{2 \overline{SM}}{\sqrt{x_R^2 + y_R^2}} \quad (3.4-11)$$

$FSP$  beschreibt den Abstand des Flächenschwerpunktes der Fehlerabbildung vom Mittelpunkt des umschreibenden Rechtecks und hat nun, wie alle bisher aufgeführten Merkmale, einen Wertebereich von  $0 \leq FSP < 1$ .

Es sei darauf hingewiesen, daß  $FSP$  nicht dazu geeignet ist, langgestreckte und runde Fehlerformen voneinander zu unterscheiden. Eine langgestreckte Fehlerabbildung, die geradlinig diagonal durch das umschreibende Rechteck verläuft, besitzt ebenso wie runde Fehlerabbildungen einen Schwerpunkt, der nahe dem Rechteckmittelpunkt liegt. Das Merkmal  $FSP$  zeigt also nur an, ob die Fläche einer Fehlerabbildung bezogen auf den Mittelpunkt des umschreibenden Rechtecks symmetrisch oder unsymmetrisch angeordnet ist.

## Flächenausdehnung

Ausgehend von den im Gleichungspaar 3.4-9 ermittelten Schwerpunktskoordinaten kann ein weiteres, sehr aussage-

kräftiges Merkmal zur Beschreibung der Fehlerform aufgestellt werden. Der Verlauf der Kontur einer Fehlerabbildung wird nur durch jene Bildpunkte beschrieben, die sich am Rand der Fehlerabbildung befinden. Diese Bildpunkte werden als Konturpunkte bezeichnet. Konturpunkte sind alle Bildpunkte einer Fehlerabbildung, die mindestens einen Nachbarbildpunkt besitzen, der nicht Bestandteil der Fehlerabbildung ist. Betrachtet man die Abstände der Konturpunkte einer Fehlerabbildung zum Flächenschwerpunkt, so ergeben sich je nach Fehlerform sehr unterschiedliche Werte. Bei langgestreckten Fehlern werden sowohl kleine als auch große Abstände auftreten, während bei runden Fehlern nur geringfügige Schwankungen in den Abstandswerten zu erwarten sind. Zur Bestimmung der Fehlerform wird nun die minimale und maximale Entfernung der Kontur zum Flächenschwerpunkt aus der Fehlerabbildung bestimmt. Sind  $x_s$  und  $y_s$  die Koordinaten des Flächenschwerpunkts und  $x_K$  und  $y_K$  die Koordinaten der Konturpunkte, so berechnen sich die gesuchten Entfernungen aus dem Gleichungspaar 3.4-12.

$$DMIN = \min \left\{ \sqrt{(x_s - x_K)^2 + (y_s - y_K)^2} \right\} \quad (3.4-12)$$

$$DMAX = \max \left\{ \sqrt{(x_s - x_K)^2 + (y_s - y_K)^2} \right\}$$

mit

$K = 1, 2, 3, \dots, n$

$n$ : Anzahl der Konturpunkte

$min$ : Minimalwert für alle  $K$

$max$ : Maximalwert für alle  $K$

Aus dem Verhältnis der minimalen und maximalen Abstände ergibt sich ein Merkmal, das als Flächenausdehnung bezeichnet wird.

$$FAD = \frac{DMIN}{DMAX} \quad (3.4-13)$$

Das in Gleichung 3.4-13 beschriebene Merkmal  $FAD$  ist maßstabsunabhängig und besitzt einen Wertebereich  $0 \leq FAD \leq 1$ . Für langgestreckte Fehler wird  $FAD$  sehr kleine Werte annehmen, während bei runden Fehlerformen die Werte nahe 1 liegen.

Der Maximalwert  $FAD = 1$  wird nur erreicht, wenn die Kontur der Fehlerabbildung exakt einen Kreis beschreibt. Die Darstellung einer exakt kreisförmigen Fläche im Rasterbild ist jedoch nur möglich, wenn die Flächen der einzelnen Bildpunkte gegenüber der gesamt dargestellten Fläche vernachlässigbar klein sind, d. h., wenn die Anzahl der Bildpunkte zur Wiedergabe der gesamten Fläche unendlich groß ist. Da in der Praxis jedoch stets mit einer endlichen Anzahl von Bildpunkten gearbeitet werden muß, ist der Wert  $FAD = 1$  als obere Grenze des Wertebereichs nur von theoretischer Bedeutung.

Das Merkmal  $FAD$  ist nur begrenzt anwendbar, da vorausgesetzt werden muß, daß der Flächenschwerpunkt innerhalb der Fehlerabbildung liegt. Aus diesem Grund wird  $FAD$  ausschließlich an konvexen Fehlerdarstellungen berechnet. Das Merkmal  $FAD$  ist dem Merkmal Formfaktor (siehe Seite 27) sehr ähnlich, da beide Merkmale die Abweichung der Fehlerform von einem idealen Kreis beschreiben. Dennoch werden beide Merkmale im weiteren Verlauf der Arbeit berücksichtigt, da sie mit unterschiedlicher Empfindlichkeit reagieren. Im Bild 3.4-7 sind die Verläufe von  $FAD$  und  $NFF$  bzw.  $CNF$  für ellipsenförmige Objekte wiedergegeben.

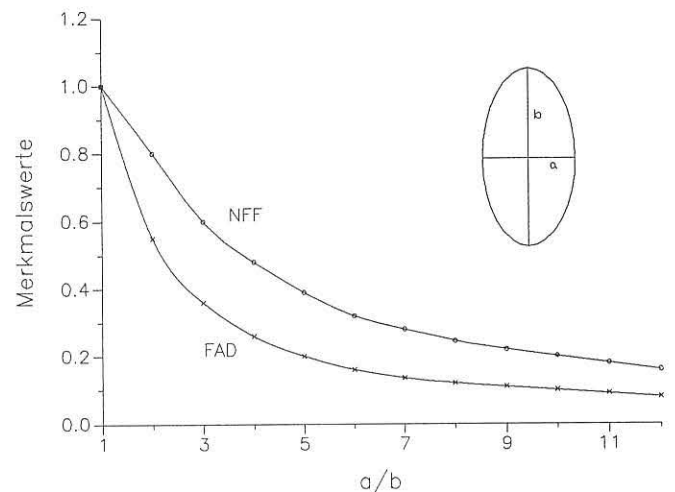


Bild 3.4-7: Kurvenverläufe der Merkmale Flächenausdehnung und Formfaktor für ellipsenförmige Objekte

Auf der Abzisse sind die Verhältnisse  $a/b$  der Ellipsenhalbachsen aufgetragen. Da die größere Halbachse  $a$  im Zähler steht, bedeuten die von links nach rechts zunehmenden Werte für  $a/b$  eine immer größer werdende Abweichung der Objektform vom idealen Kreis. Die auf der Ordinate angegebenen Merkmalswerte zeigen an, daß beide Merkmale für die ideale Kreisform ( $a/b = 1$ ) den Wert 1 annehmen.

Das Merkmal  $FAD$  erzielt für  $a/b > 1$  kleinere Werte als das Merkmal  $NFF$  und reagiert empfindlicher auf geringe Abweichungen von der idealen Kreisform. Die unterschiedlichen Verläufe von  $FAD$  und  $NFF$  lassen sich anhand der Gleichungen 3.4-7 und 3.4-14 erklären. Beide Gleichungen können für ausschließlich ellipsenförmige Objekte folgendermaßen vereinfacht werden:

$$FAD_{e11} = \frac{DMIN_{e11}}{DMAX_{e11}} = \frac{b}{a}$$

mit  $DMIN_{e11} = b$  und  $DMAX_{e11} = a$

$$NFF_{e11} = \frac{4\pi ab}{\left(\pi\sqrt{2(a^2+b^2)}\right)^2} = \frac{2ab}{(a^2+b^2)} = \frac{2b/a}{1+(b/a)^2} = \frac{2}{1+(b/a)^2} (b/a)$$

mit  $FL_{e11} = \pi ab$  und  $KL_{e11} = \pi\sqrt{2(a^2+b^2)}$

$$NFF_{e11} = \frac{2}{1+(b/a)^2} FAD_{e11} \quad (3.4-14)$$

Die Gleichung 3.4-14 beschreibt den Zusammenhang zwischen den Merkmalen  $NFF$  und  $FAD$  für ellipsenförmige Fehlerabbildungen. Da für  $a/b > 1$  stets  $\frac{2}{1+(b/a)^2} > 1$

wird, erzielt das Merkmal  $NFF$  bei ellipsenförmigen Objekten grundsätzlich größere Werte als das Merkmal  $FAD$ . Welches der beiden Merkmale zur Beschreibung der Form von Schweißnahtfehlern besser geeignet ist, kann erst nach einer Untersuchung der Merkmale an realen Fehlerabbildungen festgestellt werden.

### 3.4.1.2 Grauwertmerkmale

Wird zur Gewinnung von Merkmalen neben dem Binärbild auch das Grautonbild verwendet, so erhält man zusätzliche Informationen über die Geometrie der Fehler in Durchstrahlungsrichtung. Die Grauwerte des digitalisierten Röntgenbildes geben die Schwärzungen des Röntgenfilms wieder und beschreiben somit die Tiefenausdehnungen der Fehler. Der Zusammenhang zwischen Grauwert und Schwärzung wurde bereits im Kapitel 2.2 erörtert. Inwieweit anhand von Schwärzungen und somit auch anhand von Grauwerten die reale Tiefenausdehnung eines Fehlers quantitativ bestimmt werden kann, hängt von einer Vielzahl verschiedener Faktoren ab (Aufnahmeanordnung, Filmtyp, Filmentwicklung, Schleierschwärzung, usw.), auf die hier im einzelnen nicht eingegangen werden soll. Informationen hierzu sind der Literatur [55 bis 58] zu entnehmen. Die Tiefenausdehnungen innerhalb der Fehler können jedoch für verschiedene Fehlertypen sehr charakteristische Verläufe annehmen und sind deshalb zur Fehlertypenbestimmung von besonderer Bedeutung. Alle Merkmale, die zur Erfassung fehlerspezifischer Kennwerte die Schwärzungsverteilungen innerhalb der Fehlerabbildungen verwenden, werden als Grauwertmerkmale bezeichnet.

Die Grauwertmerkmale werden ebenso wie die geometrischen Merkmale nur an Bildausschnitten berechnet. Die umschreibenden Rechtecke der Fehlerabbildungen werden aus dem Grautonbild herausgenommen und isoliert vom übrigen Bildinhalt ausgewertet. Dabei wird der tatsächliche Fehlerbereich innerhalb des umschreibenden Rechtecks durch das jeweils korrespondierende Binärbild bestimmt. D. h., im umschreibenden Rechteck eines Grautonbildes werden nur diejenigen Bildpunkte einem Fehler zugeordnet, die auch im zugehörigen Binärbild einen Fehler ange-

zeigt haben (siehe hierzu die beiden *Bilder 2.3-2a* und *2.3-2d* auf Seite 14). Alle übrigen Bildpunkte im umschreibenden Rechteck des Grautonbildes werden als Fehlerumgebung behandelt.

Da der Kontrast einer Röntgenaufnahme von vielerlei Faktoren beeinflusst wird (verwendete Strahlenenergie, durchstrahlte Wanddicke, Film/Folien-Kombination usw.), muß darauf geachtet werden, daß die Grauwertmerkmale Aussagen liefern, die von diesen Einflußgrößen unabhängig sind. Aus diesem Grund werden Grauwertmerkmale stets auf eine fehlerspezifische Kenngröße normiert, die als mittlerer Fehlerkontrast bezeichnet wird. Der Kontrast einer Fehlerwiedergabe im Röntgenbild ergibt sich durch den Schwärzungsunterschied zwischen Fehler und Fehlerumgebung. Dieser Schwärzungsunterschied ist jedoch nur schwer zu ermitteln, da in den meisten Fällen weder in der Fehlerabbildung selbst noch in der Fehlerumgebung einheitliche Schwärzungen vorliegen. Dies gilt insbesondere für Schweißnahtaufnahmen, die häufig wegen der Nahtüberhöhung erhebliche Strukturüberlagerungen aufweisen. Durch die Rasterung des digitalisierten Röntgenbildes ist es möglich, sowohl für den Bereich der Fehlerabbildung als auch für den Bereich der Fehlerumgebung die Schwärzungen getrennt integral zu erfassen.

Werden im umschreibenden Rechteck die Grauwerte aller Bildpunkte, die innerhalb einer Fehlerabbildung liegen, aufsummiert und durch die Anzahl dieser Bildpunkte dividiert, so erhält man den mittleren Grauwert der Fehlerabbildung. Wird für alle übrigen Bildpunkte des umschreibenden Rechtecks ebenso verfahren, erhält man den mittleren Grauwert der Fehlerumgebung. Die Differenz dieser beiden mittleren Grauwerte ergibt den mittleren Fehlerkontrast  $MFK$ , der nach Gleichung 3.4-15 berechnet wird. Wegen der Quantisierung des Grautonbildes in 256 Graustufen, mit den Grauwerten  $GW = 0$  für den dunkelsten Bildpunkt und  $GW = 255$  für den hellsten Bildpunkt, kann der mittlere Fehlerkontrast  $MFK$  maximal den Wert 255 annehmen.

$$MFK = \frac{1}{m} \sum_{u=1}^m GW_u - \frac{1}{n} \sum_{f=1}^n GW_f \quad (3.4-15)$$

$MFK$ : mittlerer Fehlerkontrast  
 $GW_u$ : Grauwerte der Bildpunkte in der Fehlerumgebung  
 $GW_f$ : Grauwerte der Bildpunkte in der Fehlerabbildung  
 $m$ : Anzahl der Bildpunkte in der Fehlerumgebung  
 $n$ : Anzahl der Bildpunkte in der Fehlerabbildung

Alle nun folgenden Merkmale beziehen sich auf diesen mittleren Fehlerkontrast und sind somit von den Absolutwerten der im Grautonbild vorhandenen Grauwerte unabhängig.

#### Fehlerkontrast

Der minimale Grauwert innerhalb einer Fehlerabbildung beschreibt den Punkt der größten Tiefenausdehnung des

Fehlers. Wird in Gleichung 3.4-15 statt dem mittleren Grauwert des Fehlers dieser minimale Grauwert eingesetzt, so erhält man den maximalen Kontrast der Fehlerabbildung.

$$MAXFK = \frac{1}{m} \sum_{u=1}^m GW_u - GW_{f \min} \quad (3.4-16)$$

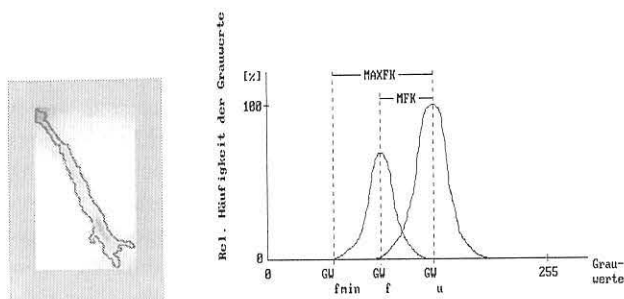
*MAXFK*: maximaler Fehlerkontrast  
*GW<sub>u</sub>* und *m*: siehe Gleichung 3.4-15  
*GW<sub>f min</sub>*: minimaler Grauwert innerhalb der Fehlerabbildung

Dieser Kontrast kann ebenso wie *MFK* wegen der vorgegebenen Anzahl von 256 Graustufen im Grautonbild höchstens einen Wert von 255 annehmen. Da es sich jedoch um den maximalen Kontrast der Fehlerabbildung handelt, kann dieser Wert nur größer oder höchstens gleich *MFK* werden. Zur Aufstellung eines Merkmals, das den Kontrast einer Fehlerabbildung beschreibt, wird deshalb eine Normierung durchgeführt, wie sie die Gleichung 3.4-17 zeigt.

$$KON = \frac{MAXFK - MFK}{255} \quad (3.4-17)$$

Das Merkmal *KON* besitzt einen Wertebereich von  $0 \leq KON \leq 1$  und zeigt an, welche Abweichung zwischen dem mittleren und dem maximalen Kontrast einer Fehlerabbildung existiert. Besitzt eine Fehlerabbildung einen Bereich mit stark ausgeprägten minimalen Grauwerten, wie er z. B. bei senkrecht abgeknickten Schlauchporen auftritt, liegt der Wert für *KON* nahe 1. Dagegen ergeben sich für *KON* sehr kleine Werte, wenn die Fehler keine ausgeprägten Tiefenausdehnungen aufweisen.

Das *Bild 3.4-8* soll verdeutlichen, wie das Merkmal *KON* aus dem digitalisierten Röntgenbild gewonnen wird. Links ist das umschreibende Rechteck einer Fehlerabbildung als Grautonbild dargestellt. Der Fehlerbereich ist schwarz umrandet und zeigt gegenüber der Fehlerumgebung deutlich niedrigere Grauwerte.



*Bild 3.4-8:*  
 Ermittlung des Fehlerkontrasts aus der Grauton Darstellung einer Fehlerabbildung

Rechts im Bild sind die Histogramme (Häufigkeitsverteilungen der Grauwerte) für den Fehler und die Fehlerumgebung getrennt aufgetragen. Die linke Verteilung gibt die Grauwerte des Fehlers wieder, die rechte Verteilung beschreibt die Fehlerumgebung. Obwohl sich beide Verteilungen teilweise überschneiden, sind die maßgebenden Grauwertanteile für Fehler und Fehlerumgebung deutlich voneinander zu unterscheiden.

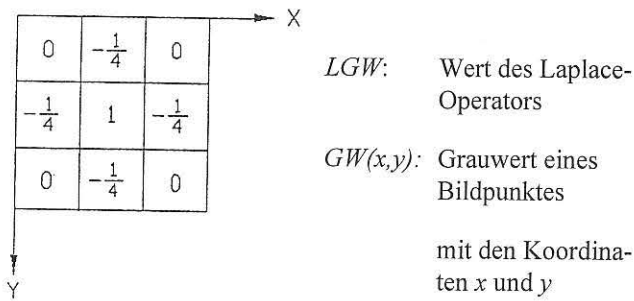
Die Mittelwerte der beiden Verteilungen sind als senkrechte Linien an den Positionen *GW<sub>f</sub>* und *GW<sub>u</sub>* eingezeichnet. Der Abstand dieser beiden Linien kennzeichnet den mittleren Fehlerkontrast *MFK*. Der minimale Grauwert der Fehlerabbildung *GW<sub>fmin</sub>*, der am linken Fußpunkt des Fehlerhistogramms liegt, ist ebenfalls durch eine senkrechte Linie markiert. Der Abstand zwischen *GW<sub>fmin</sub>* und *GW<sub>u</sub>* beschreibt den maximalen Fehlerkontrast *MAXFK*: Aus dem *Bild 3.4-8* geht deutlich hervor, daß für stark ausgeprägte minimale Grauwerte in der Fehlerabbildung große Unterschiede zwischen *MFK* und *MAXFK* entstehen. Nach Gleichung 3.4-17 führen diese Unterschiede zu großen Werten für das Merkmal *KON*, das als Fehlerkontrast bezeichnet wird.

### Homogenität

Wird in einer Fehlerabbildung nicht nur die extreme Tiefenausdehnung berücksichtigt, sondern werden alle Grauwerte innerhalb der Fehlerabbildung betrachtet, so treten bei verschiedenen Fehlern sehr unterschiedliche Strukturen auf. Einige Fehler zeigen sehr inhomogene Grautonbilder, in denen sich helle und dunkle Bildpunkte abwechseln. Hierzu zählen z. B. Risse, die wegen unterschiedlicher Orientierung zur Einstrahlrichtung starke Grauwertunterschiede aufweisen. Flankenbindefehler hingegen erzeugen homogene Grautonbilder mit nur geringen Grauwertschwankungen und langsam verlaufenden Grauwertübergängen innerhalb der Fehlerabbildung. Um diese Unterschiede zu erfassen, wird ein Merkmal eingerichtet, das als Homogenität bezeichnet wird.

Zur Ermittlung von Grautonunterschieden stellt die digitale Bildverarbeitung mehrere Verfahren zur Verfügung, die auf der Basis lokaler Differenzbildungen beruhen [30]. Dabei werden benachbarte Bildpunkte nach einer vorgegebenen Anordnung miteinander verglichen und hinsichtlich der bestehenden Grauwertunterschiede ausgewertet. Beim hier verwendeten Laplace-Operator erfolgt die Berechnung nach dem in *Bild 3.4-9* argestellten Schema.

Dies bedeutet, daß die Grauwerte der vier direkten Nachbarn eines Bildpunktes im Grautonbild mit dem Faktor 0,25 bewertet und vom Grauwert des zentralen Bildpunktes subtrahiert werden. Als direkte Nachbarn werden jene Bildpunkte bezeichnet, die den zentralen Bildpunkt entlang einer Kante berühren. Nach der Subtraktion wird der Absolutbetrag gebildet und der so gewonnene Wert wird als neuer Grauwert für den zentralen Bildpunkt eingesetzt. Wird diese Operation für alle in einem umschreibenden



$$LGW(x,y) = \left| GW(x,y) - \frac{1}{4}GW(x,y-1) - \frac{1}{4}GW(x,y+1) - \frac{1}{4}GW(x-1,y) - \frac{1}{4}GW(x+1,y) \right|$$

Bild 3.4-9:  
Berechnung des Laplace-Operators aus einer 3 x 3 Matrix

Rechteck befindlichen Bildpunkte durchgeführt, erhält man ein neues Grautonbild, dessen Grauwerte die Grautonunterschiede der ursprünglichen Fehlerabbildung beschreiben. In Bild 3.4-10 ist die Laplace-Operation an einer realen Fehlerabbildung dargestellt. Das linke Bild zeigt die ursprüngliche digitalisierte Grautondarstellung, wie sie bei der Abtastung eines Röntgenfilms gewonnen wird. Das rechte Bild zeigt das mit einem Laplace-Operator erzeugte Ergebnis. Es ist deutlich zu erkennen, daß im rechten Bild nur dann hohe Grauwerte auftreten, wenn die dazugehörigen Bereiche im linken Bild große Grautonunterschiede aufweisen.

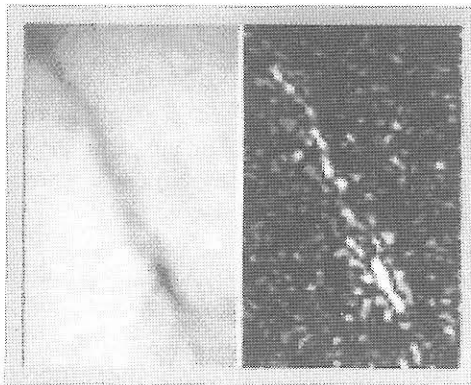


Bild 3.4-10:  
Laplace-Operation an der Grautondarstellung einer Fehlerabbildung

Werden die Grauwerte eines mit dem Laplace-Operator bearbeiteten Bildes aufsummiert und durch die Anzahl der Bildpunkte dividiert, so erhält man einen Wert, der die im ursprünglichen Grautonbild enthaltenen lokalen Grauwertunterschiede beschreibt. Zur Ermittlung der Homogenität eines Fehlers wird deshalb das umschreibende Rechteck der Fehlerabbildung mit einem Laplace-Operator bearbeitet. Danach wird von allen Bildpunkten, die innerhalb der Fehlerabbildung liegen, der Mittelwert der Grauwerte ge-

bildet und als Maß für die Homogenität eingesetzt. Dieser Wert ist jedoch noch vom absoluten Kontrast der Röntgenaufnahme abhängig und muß deshalb auf den mittleren Fehlerkontrast  $MFK$  bezogen werden. Das Merkmal  $HOM$ , das die Homogenität der Grauwerte in einer Fehlerabbildung beschreibt, kann nach Gleichung 3.4-18 berechnet werden.

$$HOM = \frac{\frac{1}{n} \sum_{f=1}^n LGW_f}{MFK} \quad (3.4-18)$$

- $LGW_f$  : Wert des Laplace-Operators eines Bildpunktes innerhalb der Fehlerabbildung
- $n$  : Anzahl der Bildpunkte innerhalb der Fehlerabbildung
- $MFK$  : mittlerer Fehlerkontrast

### Flankenverlauf

Der Grauwertverlauf beim Übergang von der Fehlerumgebung in den Fehlerbereich wird als Fehlerflanke bezeichnet. Diese Fehlerflanke ist zur Unterscheidung von Fehlertypen sehr hilfreich, da bei bestimmten Schweißnahtfehlern charakteristische Flankenverläufe auftreten können. Bei Rissen sind sehr steile Flankenverläufe zu erwarten, da bei günstiger Rißlage (maximale Tiefenausdehnung in Durchstrahlungsrichtung) die flächenhafte Materialtrennung zu einer sprunghaften Schwärzungsänderung auf dem Röntgenfilm führt. Einige volumenhafte Fehler hingegen, hierzu zählen z. B. linsenförmige Poren und Schlacken, werden einen flachen Flankenverlauf aufweisen, da hier die Tiefenausdehnung des Fehlers, ausgehend vom Fehlerrand, nur allmählich zunimmt. Es erscheint daher sinnvoll, ein Merkmal aufzustellen, das den Verlauf der Flanke in einer Fehlerabbildung beschreibt.

Um den Flankenverlauf aus dem digitalisierten Grautonbild eines Fehlers zu entnehmen, müssen die Grauwertübergänge zwischen Fehlerumgebung und Fehlerbereich ausgewertet werden. Die Anwendung des Laplace-Operators ermöglicht hier wiederum eine sehr einfache Bewertung des Flankenverlaufs. Werden die Konturpunkte einer Fehlerabbildung mit einem Laplace-Operator bearbeitet, so erhält man gerade den Grauwertunterschied zwischen Bildpunkten, die einerseits in der Fehlerumgebung und andererseits in der Fehlerabbildung liegen. Zur Beschreibung der Flanke eines Fehlers kann also das umschreibende Rechteck verwendet werden, das die Fehlerabbildung nach einer Laplace-Operation darstellt. Eine derartige Bildvorlage wurde bereits zur Berechnung des Merkmals  $HOM$  angefertigt. Werden in dieser Bildvorlage nur die Konturpunkte einer Fehlerabbildung ausgewertet, so erhält man, wenn über alle Konturpunkte gemittelt wird, ein Maß für den Flankenverlauf. Dieser Wert ist jedoch wiederum vom absoluten Kontrast der Röntgenaufnahme abhängig und muß deshalb auf den mittleren Fehlerkontrast  $MFK$  bezogen werden. Das



Merkmal *FLV*, das den Flankenverlauf in einer Fehlerabbildung beschreibt, wird nach Gleichung 3.4-19 berechnet.

$$FLV = \frac{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m LGW_k}{MFK} \quad (3.4-19)$$

$LGW_k$  : Wert des Laplace-Operators eines Konturpunktes

$m$  : Anzahl der Konturpunkte einer Fehlerabbildung

$MFK$  : mittlerer Fehlerkontrast

### 3.4.1.3 Kombinierte Grauwert/ Geometrie-Merkmale

Zu dieser Merkmalsgruppe zählen alle Merkmale, die zur Berechnung sowohl Kennwerte aus dem Binärbild als auch Kennwerte aus dem Grautonbild benötigen. Durch die Kombination von Grauwert- und Geometriedaten kann die Grauwertinformation einer Fehlerabbildung nicht nur statistisch, sondern auch ortsabhängig ausgewertet werden. Die Möglichkeit, ausgeprägte Schwärzungen in ihrer Position zu bestimmen und auf andere ausgezeichnete Punkte innerhalb der Fehlerabbildung zu beziehen, kann für die Erkennung eines Fehlertyps sehr wichtig sein. Insbesondere bei ungleichmäßig angeordneter Schwärzungsverteilung innerhalb einer Fehlerabbildung ist die gemeinsame Auswertung von Grauwert- und Ortsinformation der Bildpunkte unbedingt erforderlich. Die kombinierten Grauwert/Geometrie-Merkmale bieten also hilfreiche Unterstützung bei der Interpretation von Grauwertverteilungen und liefern somit einen wesentlichen Beitrag zur Fehlertypenunterscheidung.

#### Ort der maximalen Tiefenausdehnung

Die maximale Tiefenausdehnung eines Fehler wurde bereits beim Merkmal *KON* (Kapitel 3.4.1.2, S. 21) verwendet. Hier wurde jedoch lediglich der Kontrast ausgewertet, den diese Tiefenausdehnung im Grautonbild erzeugt. Durch ein weiteres Merkmal soll nun der Ort der maximalen Tiefenausdehnung innerhalb einer Fehlerabbildung beschrieben werden. Dabei wird der Schwerpunkt der Fehlerfläche als Bezugspunkt gewählt. Der Abstand zum Schwerpunkt soll die Positionsabweichung vom Zentrum der Fehlerabbildung demonstrieren und somit die Lage der maximalen Tiefenausdehnung kennzeichnen.

Wie die Koordinaten des Schwerpunktes berechnet werden, wurde bereits beim Merkmal *FSP* (Kapitel 3.4.1.1, S. 18) durch das Gleichungspaar 3.4-9 angegeben. Die Koordinaten der maximalen Tiefenausdehnung hingegen sind auf sehr einfache Weise dem Grautonbild zu entnehmen. Sie entsprechen den Koordinaten jenes Bildpunktes, der innerhalb der Fehlerabbildung den minimalen Grauwert besitzt. Die Gleichung 3.4-20 zeigt an, wie der Abstand  $\overline{ST}$  zwischen der maximalen Tiefenausdehnung und dem Flächenschwerpunkt berechnet wird.

$$\overline{ST} = \sqrt{(x_S - x_T)^2 + (y_S - y_T)^2} \quad (3.4-20)$$

$x_S$  und  $y_S$ : Koordinaten des Flächenschwerpunkts

$x_T$  und  $y_T$ : Koordinaten der max. Tiefenausdehnung

Dieser Abstand ist jedoch wieder vom Maßstab des abgetasteten Röntgenbildes abhängig und muß deshalb auf eine andere, schon bekannte Fehlergröße bezogen werden. Die maximale Tiefenausdehnung befindet sich innerhalb der Fehlerabbildung und kann daher vom Schwerpunkt niemals weiter entfernt sein als der maximal entfernteste Fehlerpunkt. Diese Entfernung wurde jedoch schon für das Merkmal *FAD* (Kapitel 3.4.1.1) berechnet und ist im Gleichungspaar 3.4-12 (Seite 19) als *DMAX* angegeben. Zur Erstellung des Merkmals *OMT*, das den Ort der maximalen Tiefenausdehnung in einer Fehlerabbildung beschreibt, wird deshalb *DMAX* als Normierungsgröße verwendet.

$$OMT = \frac{\overline{ST}}{DMAX} \quad (3.4-21)$$

Wie aus Gleichung 3.4-21 hervorgeht, besitzt das Merkmal *OMT* einen Wertebereich von  $0 \leq OMT \leq 1$  und nimmt nur dann große Werte an, wenn die maximale Tiefenausdehnung weit entfernt vom Schwerpunkt der Fehlerfläche angeordnet ist. Ein kleiner Wert für *OMT* tritt auf, wenn die maximale Tiefenausdehnung und der Schwerpunkt sehr nahe beieinander liegen, wie dies z. B. bei kugelförmigen volumenhaften Fehlern der Fall ist.

#### Gewichteter Flächenschwerpunkt

Bisher wurde der Flächenschwerpunkt einer Fehlerabbildung nur am Binärbild ermittelt. Wird jedoch das Grautonbild verwendet, so besteht die Möglichkeit, einen gewichteten Schwerpunkt zu berechnen, bei dem nicht nur die Orte, sondern auch die Grauwerte der einzelnen Bildpunkte einer Fehlerabbildung berücksichtigt werden. Dabei sollen niedrige Grauwerte einen starken Einfluß besitzen, da große Tiefenausdehnungen in einem Fehler durch dunkle Bildpunkte angezeigt werden.

Die Berechnung der Koordinaten des gewichteten Flächenschwerpunktes erfolgt anhand aller Bildpunkte, die sich innerhalb des umschreibenden Rechtecks der Fehlerabbildung befinden. In einem ersten Verarbeitungsschritt werden die Grauwerte aller Bildpunkte, die sich außerhalb der Fehlerfläche befinden, auf den Wert 255 gesetzt. Danach werden die Koordinaten des gewichteten Flächenschwerpunktes  $x_{gs}$  und  $y_{gs}$  nach dem Gleichungspaar 3.4-22 ermittelt.

$$x_{gs} = \frac{1}{NM} \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_n (255 - GW(x_n, y_m))}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (255 - GW(x_n, y_m))}$$

$$y_{gs} = \frac{1}{NM} \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N y_m (255 - GW(x_n, y_m))}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (255 - GW(x_n, y_m))} \quad (3.4-22)$$

- $GW$  : Grauwert eines Bildpunktes im umschreibenden Rechteck der Fehlerabbildung  
 $N$  : Anzahl der Bildpunkte des umschreibenden Rechtecks in  $x$ -Richtung  
 $M$  : Anzahl der Bildpunkte des umschreibenden Rechtecks in  $y$ -Richtung

Da die Grauwerte aller Bildpunkte außerhalb der Fehlerfläche auf den Wert 255 gesetzt wurden, haben diese Bildpunkte keinen Einfluß auf die Koordinaten  $x_{gs}$  und  $y_{gs}$ . Die Lage des gewichteten Flächenschwerpunktes wird also ausschließlich durch Bildpunkte bestimmt, die sich innerhalb der Fehlerabbildung befinden und die einen Grauwert von  $GW < 255$  aufweisen. Je niedriger der Grauwert eines Bildpunktes ist, desto stärker beeinflusst dieser Bildpunkt die Lage des gewichteten Flächenschwerpunktes.

Der gewichtete Flächenschwerpunkt kann gegenüber dem herkömmlich berechneten Flächenschwerpunkt, der nur aus dem Binärbild gewonnen wurde, eine veränderte Position im umschreibenden Rechteck einnehmen. Diese Positionsabweichung wird dann besonders groß, wenn innerhalb der Fehlerabbildung starke Grauwertschwankungen auftreten, die zum herkömmlich berechneten Flächenschwerpunkt unsymmetrisch angeordnet sind. Da je nach Fehlertyp sowohl symmetrische als auch unsymmetrische Grauwertverteilungen auftreten können, ist der Abstand der beiden Flächenschwerpunkte ein geeignetes Merkmal zur Fehlertypenerkennung. Zur Normierung wird hier ebenso wie beim Merkmal  $OMT$  (Gleichung 3.4-21, S. 23) der Kennwert  $DMAX$  verwendet (siehe Seite 19), da der gewichtete Schwerpunkt vom herkömmlichen Schwerpunkt höchstens die Entfernung  $DMAX$  annehmen kann.

Das Merkmal  $GFS$ , das die Lage des gewichteten Flächenschwerpunktes in einer Fehlerabbildung beschreibt, wird nach Gleichung 3.4-23 berechnet.

$$GFS = \frac{\sqrt{(x_{gs} - x_s)^2 + (y_{gs} - y_s)^2}}{DMAX} \quad (3.4-23)$$

- $x_{gs}$  und  $y_{gs}$ : Koordinaten des gewichteten Flächenschwerpunktes  
 $x_s$  und  $y_s$ : Koordinaten des Flächenschwerpunktes nach dem Gleichungspaar 3.4-9, S. 31  
 $DMAX$ : Abstand des maximal entferntesten Fehlerpunktes vom Schwerpunkt  $s(x_s, y_s)$

Das Merkmal  $GFS$  liefert ähnlich wie das Merkmal  $OMT$  eine Aussage, die aus einer Verknüpfung zwischen Orts- und Grauwertinformationen entsteht.  $GFS$  bietet jedoch gegenüber  $OMT$  den Vorteil, daß sich die Auswertung nicht nur auf einen besonderen Punkt der Fehlerabbildung konzentriert, sondern die Grauwerte aller Fehlerpunkte berücksichtigt werden.

### 3.4.2 Kontextbezogene Merkmale

Obwohl die objektbezogenen Merkmale wegen der exakten Beschreibung jeder einzelnen Fehlerabbildung große Aussagekraft besitzen, gehen durch die isolierte Betrachtung der Fehler wichtige Informationen verloren. So können z. B. keine Beziehungen zwischen den Fehlern untereinander hergestellt werden, was jedoch zur Erkennung von Fehleranhäufungen (z. B. Porenester, Schlackenzeilen, Rissfelder usw.) unbedingt erforderlich ist. Außerdem bleiben die Zusammenhänge, die zwischen den Fehlern und der Schweißnaht bestehen, unberücksichtigt. Diese Zusammenhänge, insbesondere die Lage der Fehler innerhalb der Schweißnaht, spielen bei der Erkennung von Flankenbindefehlern, ungenügenden Durchschweißungen und Rissen eine wichtige Rolle. Um diese Informationen der Fehlertypenerkennung zugänglich zu machen, werden die kontextbezogenen Merkmale eingeführt. Hierzu ist es notwendig, nicht nur die umschreibenden Rechtecke einzelner Fehlerabbildungen auszuwerten, sondern die Schweißnahtaufnahme in ihrer Gesamtheit zu betrachten. Dabei werden, gegenüber den objektbezogenen Merkmalen, völlig andere Anforderungen an die digitale Bildverarbeitung gestellt, da die Gewinnung kontextbezogener Merkmale voraussetzt, daß der Verlauf der Schweißnaht im Röntgenbild bekannt ist. Aus diesem Grund wurde ein Verfahren entwickelt, das den Schweißnahtverlauf erkennt und sowohl die Schweißnahtträger als auch die Schweißnahtmitte im digitalisierten Röntgenbild markiert. Wie dieses Verfahren den Schweißnahtverlauf erkennt und was unter dem Begriff "Schweißnahtmitte" zu verstehen ist, wird im folgenden beschrieben.

Bei der Abtastung der Röntgenfilme wurde stets darauf geachtet, daß die Schweißnaht im digitalisierten Röntgenbild waagrecht, d. h. in Richtung der Bildzeilen, verläuft. Werden nun in jeder Bildspalte des Digitalbildes die maximalen Grauwerte gekennzeichnet, so erhält man abgesehen von einigen Ausreißern (Filmmarkierungen, Drahtstegkennzeichnungen, Bleibuchstaben usw.), den Verlauf der maximalen Nahtüberhöhung entlang der Schweißnaht. Bedingt durch die überlagerten Strukturen aus Raupe und Wurzel, liegen diese gekennzeichneten Bildpunkte etwas verstreut im Nahtbereich. Es ist daher vorteilhaft, aus den gekennzeichneten Bildpunkten eine Gerade zu bilden, um so den Verlauf der Naht besser zu markieren. Im *Bild 3.4-11* ist diese Gerade schwarz eingezeichnet. Es ist deutlich zu erkennen, daß die Gerade den Verlauf der Schweißnaht ausgezeichnet wiedergibt. Obwohl dieses Verfahren auf überlagerte Strukturen sehr empfindlich reagiert, wurden bei allen, im Rahmen dieser Arbeit unter-

suchten Schweißnahtaufnahmen gute Ergebnisse erzielt. Bei einer gewöhnlichen V-Naht und einem Einstrahlwinkel von null Grad markiert diese Gerade gleichzeitig die Schweißnahtmitte. Für andere Nahtgeometrien und andere Einstrahlwinkel kann die Schweißnahtmitte ebenfalls aus der Lage der Geraden rekonstruiert werden. Hierzu müssen allerdings die Aufnahmeanordnung und die Probenabmessungen bekannt sein. Deshalb ist bei der Berechnung kontextbezogener Merkmale die Verwendung von a-priori-Information (Kapitel 3.3, S.14) besonders wichtig.

Zur Ermittlung der Schweißnahtländer, die im *Bild 3.4-11* ebenfalls schwarz eingezeichnet sind, wurde ein Schwellwert-Verfahren eingesetzt. Dieses Schwellwert-Verfahren arbeitet auch spaltenweise, d. h. der Schweißnahttrand wird für jede Bildspalte getrennt berechnet. Wie die beiden Bildpunkte für den oberen und den unteren Schweißnahttrand in einer Bildspalte bestimmt werden, wird am Grauwertprofil in *Bild 3.4-12* dargestellt. Dieses Profil, das für die hier untersuchten Schweißnahtaufnahmen einen typischen Grauwertverlauf entlang einer Bildspalte wiedergibt, wurde künstlich erstellt, um einige, für die Verarbeitung bedeutenden Punkte besonders hervorzuheben.

Das Profil läßt den Bereich der Nahtüberhöhung durch die hohen Grauwerte in der Mitte deutlich erkennen. Zur Ermittlung der beiden Randpunkte der Schweißnaht werden aus diesem Profil drei Grauwerte benötigt, der maximale Grauwert  $GW_{max}$  und die beiden links und rechts der Naht befindlichen minimalen Grauwerte  $GW_{lmin}$

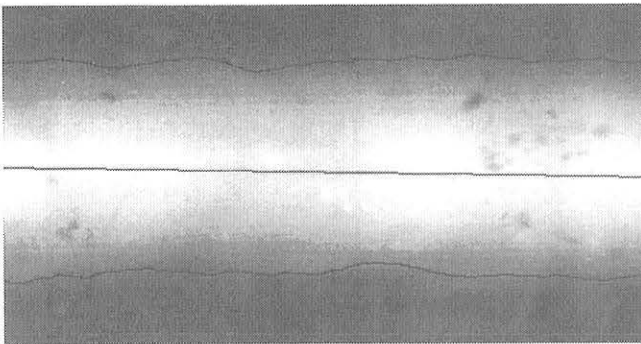


Bild 3.4-11:  
Markierung des Schweißnahtverlaufs

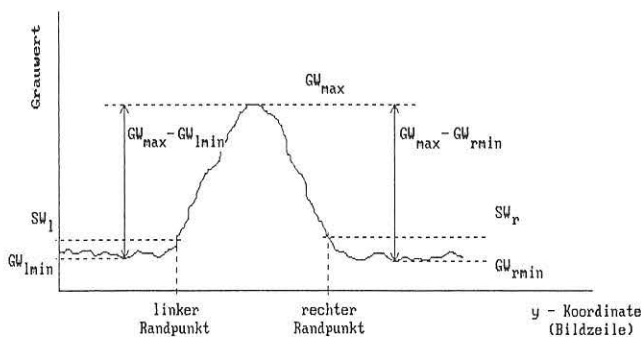


Bild 3.4-12:  
Künstlich erstelltes Profil eines typischen Grauwertverlaufs senkrecht zum Schweißnahtverlauf

und  $GW_{rmin}$ . Aus diesen Grauwerten werden nach dem Gleichungspaar 3.4-24 die beiden Schwellwerte  $SW_l$  und  $SW_r$  berechnet. Der Faktor 0.1 für die beiden Grauwertdifferenzen  $(GW_{max} - GW_{lmin})$  und  $(GW_{max} - GW_{rmin})$  wurde durch Erprobung an allen hier zur Verfügung stehenden Schweißnahtaufnahmen als ein geeigneter Wert empirisch ermittelt.

$$\begin{aligned} SW_l &= GW_{lmin} + 0,1(GW_{max} - GW_{lmin}) \\ SW_r &= GW_{rmin} + 0,1(GW_{max} - GW_{rmin}) \end{aligned} \quad (3.4-24)$$

Ausgehend vom Punkt mit dem maximalen Grauwert  $GW_{max}$  wird nun im Profil solange nach rechts gegangen, bis zum ersten mal ein Punkt mit dem Grauwert  $SW_r$  auftritt. Dieser Punkt wird als rechter Randpunkt der Schweißnaht markiert. Für den linken Randpunkt der Schweißnaht wird analog verfahren. Der linke und der rechte Schweißnahttrand müssen getrennt ermittelt werden, da das Muttermaterial auf beiden Seiten der Schweißnaht unterschiedliche Wanddicken besitzen kann.

Werden diese Operationen an allen Bildspalten des digitalisierten Röntgenbildes durchgeführt, so erhält man die Verläufe der beiden Schweißnahtländer über die gesamte abgebildete Naht. Das *Bild 3.4-11* zeigt, daß selbst bei unregelmäßig verlaufenden Schweißnahtländern hier gute Ergebnisse erzielt werden.

Allerdings muß darauf hingewiesen werden, daß die beiden Verfahren zur Ermittlung der Schweißnahtmitte und der Schweißnahtländer nur auf unbeschlossene Schweißnähte angewendet werden können, da sie mit der Abbildung der Nahtüberhöhung im Röntgenbild arbeiten. In den hier durchgeführten Untersuchungen wurden jedoch ausschließlich unbeschlossene Schweißnähte verwendet, so daß für alle Fehler, die mit objektbezogenen Merkmalen beschrieben werden, auch kontextbezogene Merkmale errechnet werden konnten. Wie diese kontextbezogenen Merkmale aus dem digitalisierten Röntgenbild gewonnen werden, wird in den beiden folgenden Kapiteln beschrieben.

### 3.4.2.1 Fehler/Schweißnaht-Merkmale

Werden die Schweißnahtmitte und die Schweißnahtländer in das Segmentierungsergebnis einer Schweißnahtaufnahme eingezeichnet, so entsteht eine Bildvorlage, aus der Zusammenhänge zwischen den Fehlern und der Schweißnaht entnommen werden können. Eine solche Bildvorlage, die mehrere Fehler gleichzeitig enthält, ist in *Bild 3.4-13* dargestellt.

Zur Gewinnung der Fehler/Schweißnaht-Merkmale werden nun die Schweißnahtmarkierungen und die Fehlerabbildungen zueinander in Beziehung gesetzt. Dabei sollen die Lage und die Richtungsorientierung der Fehler ermittelt werden.

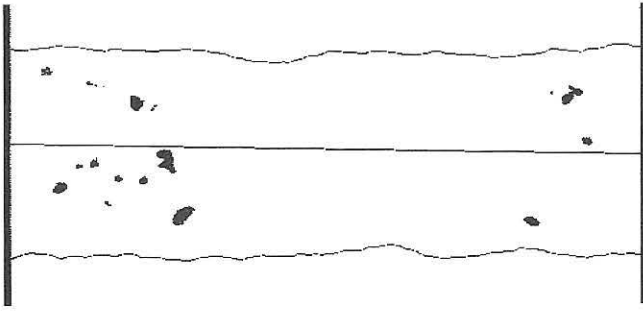


Bild 3.4-13:  
Binärbild mit Fehlerabbildungen und eingezeichneten Schweißnahtmarkierungen

### Fehlerlage

Die Information über die Lage eines Fehlers innerhalb der Schweißnaht kann für die endgültige Bestimmung des Fehlertyps entscheidend sein. Insbesondere bei langgestreckten Fehlern, die sich in Richtung des Schweißnahtverlaufs ausdehnen, bietet die Fehlerlage ein vorzügliches Auswahlkriterium. So können z. B. bei einer V-Naht, die mit einem Einstrahlwinkel von null Grad aufgenommen wurde, Wurzelfehler nur im Bereich der Schweißnahtmitte auftreten. Dagegen sind Fehlerabbildungen, die durch Einbrandkerben in der Decklage hervorgerufen werden, nur am Schweißnahttrand zu erwarten. Die Position einer Fehleranzeige im Röntgenbild liefert also eine wichtige Aussage zum Fehlertyp und soll deshalb durch das Merkmal "Fehlerlage" beschrieben werden.

Da es sich bei Fehlerabbildungen stets um flächenhafte Gebilde handelt, wird als Bezugspunkt für die Fehlerlage der Flächenschwerpunkt angegeben. Wie die Koordinaten des Flächenschwerpunkts einer Fehlerabbildung ermittelt werden, wurde bereits beim Merkmal "Flächenschwerpunkt" (Kapitel 3.4.1.1, S. 18) beschrieben. Der Abstand zwischen dem Flächenschwerpunkt und der Schweißnahtmitte kann zur Bestimmung der Fehlerlage verwendet werden. Dieser Abstand ist jedoch vom Abbildungsmaßstab abhängig und muß deshalb auf eine andere maßstabsabhängige Größe bezogen werden. Aus diesem Grund wird zusätzlich am Ort des Flächenschwerpunkts der Abstand zwischen der Schweißnahtmitte und dem Schweißnahttrand bestimmt. Das Merkmal  $FLA$ , das die Fehlerlage in einer Schweißnaht beschreibt, wird nun aus diesen beiden Abständen nach Gleichung 3.4-25 berechnet.

$$FLA = \frac{\overline{MS}}{\overline{MR}} \quad (3.4-25)$$

$\overline{MS}$  : Abstand der Schweißnahtmitte zum Flächenschwerpunkt der Fehlerabbildung

$\overline{MR}$  : Abstand der Schweißnahtmitte zum Schweißnahttrand für  $\overline{MS} > \overline{MR}$  :  $FLA = 1$

Im allgemeinen ist der Abstand  $\overline{MS}$  stets kleiner als der Abstand  $\overline{MR}$ , da die Fehlerabbildungen gewöhnlich innerhalb der markierten Schweißnahtländer liegen. Da die Erkennung der Schweißnahtländer auf einem Schwellwert-Verfahren beruht, das die minimalen Grauwerte im Muttermaterial verwendet, können extrem angeordnete Fehlerabbildungen, die sich direkt am Schweißnahttrand befinden, die Erfassung des tatsächlichen Randverlaufs beeinflussen. In diesem speziellen Fall ist es möglich, daß der Flächenschwerpunkt einer Fehlerabbildung außerhalb der markierten Schweißnahtländer liegt. Ohne die Aussage des Merkmals  $FLA$  zu verfälschen, wurde deshalb die zusätzliche Bedingung eingeführt, daß  $FLA$  für  $\overline{MS} > \overline{MR}$  den Wert 1 annimmt.

Am Bild 3.4-14 soll noch einmal die Berechnung des Merkmals  $FLA$  verdeutlicht werden. Es zeigt die vergrößerte Darstellung einer Fehlerabbildung, wobei der Fehler lediglich durch seine Kontur wiedergegeben wird. Die Abstände des Flächenschwerpunkts der Fehlerabbildung und des Schweißnahtlandes zur Schweißnahtmitte sind an einer Geraden eingezeichnet, die durch den Flächenschwerpunkt verläuft und senkrecht im Bild angeordnet ist. D. h., die Abstände  $\overline{MS}$  und  $\overline{MR}$  werden nur entlang jener Bildspalte ermittelt, in der sich auch der Flächenschwerpunkt der Fehlerabbildung befindet.

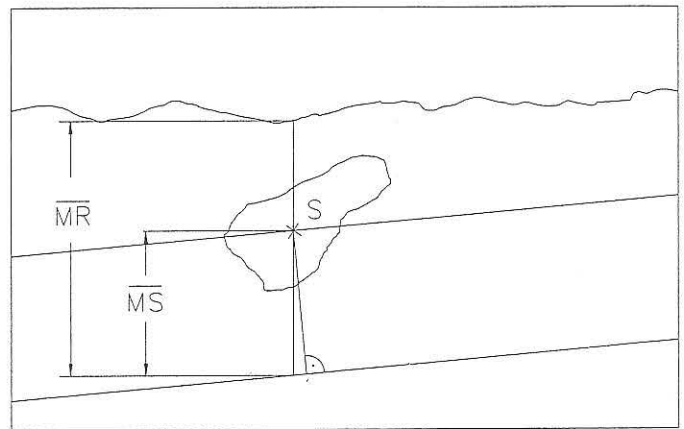


Bild 3.4-14:  
Ermittlung der Lage einer Fehlerabbildung unter Verwendung des Flächenschwerpunkts S

Eine exakte Bestimmung des Abstandes zwischen dem Flächenschwerpunkt der Fehlerabbildung und der Schweißnahtmitte müßte eigentlich entlang einer Geraden erfolgen, die durch den Flächenschwerpunkt verläuft und die senkrecht zur Mittellinie der Schweißnaht angeordnet ist. Diese Gerade ist im Bild 3.4-14 mit dem dazugehörigen 90°-Winkel eingezeichnet. Da bei der Abtastung der Röntgenfilme jedoch stets darauf geachtet wurde, daß die Mittellinien der Schweißnähte im Digitalbild nahezu waagrecht, d. h. in Richtung der Bildzeilen verlaufen, sind die Unterschiede, die zwischen den beiden verschiedenen Abstandsmessungen auftreten, nur sehr gering. Aus diesem Grund konnte hier zur Ermittlung der Abstände, die mit

wesentlich geringerem Rechenaufwand durchzuführende Messung entlang einer Bildspalte eingeführt werden.

### Fehlerrichtung

Zur Unterscheidung von Längs- und Querrissen sowie zur Bestätigung richtungsabhängiger Fehler (Wurzelfehler, Nahtversatz usw.) ist es notwendig, ein Merkmal einzurichten, das die Vorzugsrichtung innerhalb einer Fehlerabbildung beschreibt. Die Bestimmung der Vorzugsrichtung kann am maximalen Radius  $DMAX$  erfolgen, der bereits für das Merkmal "Flächenausdehnung" (Kapitel 3.4.1.1, S. 18) berechnet wurde.  $DMAX$  ist durch eine Gerade gekennzeichnet, die den Flächenschwerpunkt mit dem am weitesten entfernten Konturpunkt der Fehlerabbildung verbindet. Die Richtung dieser Geraden gibt somit die Orientierung der maximalen Fehlerausdehnung an.

Am Bild 3.4-15, das wiederum nur die Kontur einer Fehlerabbildung enthält, soll nun die Berechnung des Merkmals "Fehlerrichtung" demonstriert werden. Durch den Flächenschwerpunkt  $S$  wird eine Gerade gelegt, die parallel zu jener Geraden verläuft, die zur Markierung der Schweißnahtmitte ermittelt wurde. Der Winkel  $\alpha$ , den der maximale Radius  $DMAX$  zu dieser Geraden bildet, wird als Maß für die Fehlerrichtung verwendet. Zur Berechnung ist jedoch nur die Abweichung der Fehlervorzugsrichtung vom Nahtverlauf von Interesse und nicht der tatsächliche Wert des Winkels  $\alpha$  über den gesamten Bereich von 360 Grad. Deshalb wird das Merkmal  $RTG$ , das die Fehlerrichtung beschreibt, nach Gleichung 3.4-26 berechnet.

$$RTG = |\sin \alpha| \quad (3.4-26)$$

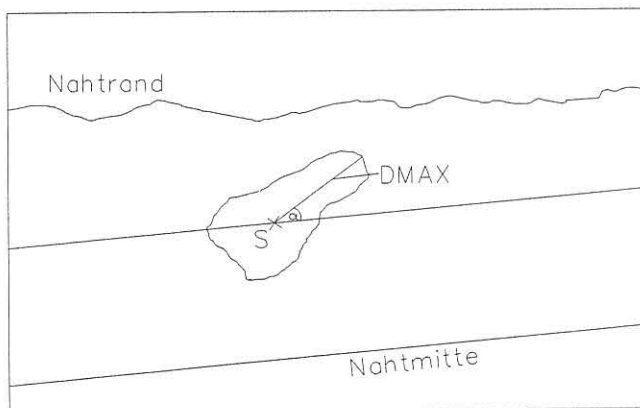


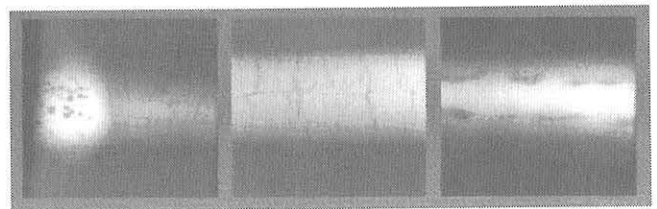
Bild 3.4-15:  
Ermittlung der Fehlerrichtung über den maximalen Radius  $DMAX$

Die Berechnung von  $RTG$  über  $\sin \alpha$  wurde deshalb gewählt, um geringe Abweichungen von der  $0^\circ$ -Richtung besonders hervorzuheben. Die Ermittlung kleiner Richtungsänderungen um  $\alpha = 0^\circ$  herum ist besonders wichtig, da für langgestreckte Anzeigen, die in Richtung der Naht verlaufen, die Anzahl verschiedener Fehlertypen besonders

groß ist (ungenügende Durchschweißung, Flankenbindefehler, Längsriß, usw.). Insbesondere zur Unterscheidung von ungenügenden Durchschweißungen und Längsrissen, die untereinander geringe Abweichungen in den Vorzugsrichtungen aufweisen können, kann die hohe Empfindlichkeit des Merkmals  $RTG$  für kleine Winkel  $\alpha$  von großem Nutzen sein.

### 3.4.2.2 Fehler/Fehler-Merkmale

Kommt es in einem Schweißnahtabschnitt zu einer Anhäufung von Fehlern gleichen Typs, so werden diese Fehler unter einer neuen Bezeichnung zusammengefaßt. Da diese Anhäufungen für verschiedene Fehlertypen in unterschiedlichen Anordnungen auftreten können, werden Bezeichnungen gewählt, die den jeweiligen Sachverhalt anschaulich beschreiben (Porennest, Schlackenzeile, usw.). Die Bezeichnungen unterschiedlicher Fehleranhäufungen sind in der DIN-Norm 8524 festgelegt [59]. Im Bild 3.4-16 sind Durchstrahlungsaufnahmen verschiedener Fehleranhäufungen dargestellt.



Porennest      Häufung von Rissen      Schlackenzeile

Bild 3.4-16:  
Schweißnahtbereiche mit unterschiedlichen Fehleranhäufungen

Um derartige Erscheinungen in einer Schweißnahtaufnahme zu erfassen, ist es notwendig, die im Segmentierungsergebnis erkannten Fehleranzeigen untereinander in Beziehung zu setzen. Da innerhalb einer Fehleranhäufung zwar unterschiedliche Fehlertypen auftreten können, jedoch nur Fehler des gleichen Typs betrachtet werden sollen, erfolgt die Auswertung stets für verschiedene Fehlertypen getrennt. Dies setzt voraus, daß im Röntgenbild bereits eine Typenerkennung der Einzelfehler stattgefunden hat. Die Merkmale zur Erkennung von Fehleranhäufungen kommen also erst zur Anwendung, wenn der Fehlertyp einer Anzeige bereits erkannt ist. Aus diesem Grund nehmen die im folgenden beschriebenen Fehler/Fehler-Merkmale gegenüber den bisher aufgeführten Merkmalen eine Sonderstellung ein. Sie führen nicht direkt zu einer Fehlertypenerkennung, sondern dienen lediglich der Verfeinerung einer bereits getroffenen Aussage. Eine Pore wird nur dann einem Porennest zugeordnet, wenn sie vorher bereits als Pore identifiziert wurde. Die Fehler/Fehler-Merkmale bauen auf eine bereits durchgeführte Fehlertypenerkennung auf und

sind deshalb bei der Beurteilung der Einzelmerkmale im Kapitel 5 nicht mit anderen Merkmalen zu vergleichen.

Ziel der Fehler/Fehler-Merkmale ist es, Fehleranhäufungen aufzufinden und nach ihrer Erscheinungsform (Fehlerzeile oder Fehlernest) zu unterscheiden. Da innerhalb einer Schweißnaht mehrere Fehleranhäufungen gleichzeitig auftreten können, müssen vorerst Verfahren angewendet werden, die die verschiedenen Anhäufungen voneinander trennen. Danach können dann die einzelnen Fehleranhäufungen unabhängig voneinander betrachtet werden und hinsichtlich ihrer Form, d. h. der Anordnung der Einzelfehler im Häufungsgebiet, beschrieben werden.

### Fehleranhäufung

Soll in einer Schweißnahtaufnahme die Existenz einer Fehleranhäufung nachgewiesen werden, so müssen für jeden Fehlertyp sowohl die Anzahl als auch die Abstände der Fehler zueinander berücksichtigt werden. Wird für das Vorhandensein einer Fehleranhäufung eine Mindestanzahl von Fehlern zugrundegelegt, so kann als erster Auswertungsschritt die Fehleranzahl pro Fehlertyp ermittelt werden. Liegt die Anzahl der Fehleranzeigen unterhalb der geforderten Mindestanzahl, so kann für diesen Fehlertyp eine Fehleranhäufung ausgeschlossen werden. Befinden sich in der auszuwertenden Schweißnahtaufnahme jedoch mehr Fehleranzeigen als die festgelegte Mindestanzahl vorschreibt, so muß überprüft werden, welche Fehler zu einer Fehleranhäufung zusammengefaßt werden können. Hierzu ist es notwendig, die Abstände zwischen den Fehleranzeigen zu kontrollieren.

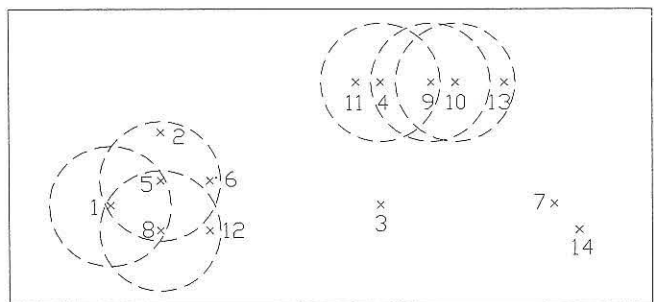
Sind in der Nachbarschaft eines Fehlers mehrere Fehleranzeigen vorhanden, so besteht ein Verdacht auf Fehleranhäufung. Deshalb wird, ausgehend vom Flächenschwerpunkt einer Fehlerabbildung, in einem vorgegebenen Abstand nach den Flächenschwerpunkten weiterer Fehlerabbildungen gesucht. Diejenigen Fehler, deren Flächenschwerpunkte sich innerhalb des vorgegebenen Abstands befinden, sind Fehlernachbarn und werden wiederum als Ausgangspunkte für die Suche nach neuen Fehlernachbarn verwendet. Dieses Verfahren wird solange fortgeführt, bis in diesem Bereich keine neuen Nachbarfehler mehr gefunden werden. Alle Fehler, deren Flächenschwerpunkte auf diese Weise zusammenhängen, werden nun zu einer Gruppe zusammengefaßt. Überschreitet die Anzahl der zusammengefaßten Fehler die geforderte Mindestanzahl für eine Fehleranhäufung, so wird diese Fehlergruppe als Fehleranhäufung gekennzeichnet. Jeder einzelne Fehler dieser Gruppe erhält dann eine zusätzliche Bezeichnung, die ihn als Bestandteil dieser Fehleranhäufung ausweist.

Die Suche nach weiteren Fehleranhäufungen muß solange fortgesetzt werden, bis innerhalb einer Schweißnahtaufnahme alle Fehler des gleichen Typs berücksichtigt wurden. Sind also nach einer Gruppenbildung weitere Fehler des gleichen Typs vorhanden, so muß das Verfahren der Gruppenbildung auf die noch verbleibenden Fehler erneut angewendet werden. Erst wenn für einen Fehlertyp alle

Fehleranzeigen abgearbeitet wurden, ist die Suche nach Fehleranhäufungen für diesen Fehlertyp beendet. Die Suche nach weiteren Fehleranhäufungen wird dann für den nächsten Fehlertyp in gleicher Weise durchgeführt.

In Bild 3.4-17 soll das Verfahren der Gruppenbildung an einer künstlich erstellten Fehleranordnung veranschaulicht werden. Im oberen Teil des Bildes sind 14 Fehler dargestellt, wobei nicht die Fehlerabbildungen selbst, sondern nur die Flächenschwerpunkte der Fehlerabbildungen als Kreuze eingezeichnet sind. Wird davon ausgegangen, daß alle Fehler vom gleichen Typ sind, so besteht die Aufgabe, die in dieser Anordnung enthaltenen Fehleranhäufungen zu erkennen. Dazu wurden die Fehler willkürlich durchnummeriert und nach dem oben beschriebenen Verfahren ausgewertet.

Fehleranordnung



Einzelfehler

Gruppe I: 1, 2, 5, 6, 8, 12

Gruppe II: 3

Gruppe III: 4, 9, 10, 11, 13

Gruppe IV: 7, 14

Fehleranzahl pro Gruppe:

I = 6

II = 1

III = 5

IV = 2

Bild 3.4-17:

Verfahren der Gruppenbildung zur Bestimmung von Fehleranhäufungen

Ausgehend vom Fehler 1 wird in einem vorgegebenen Abstand, der hier durch den gestrichelten Kreis gekennzeichnet ist, nach weiteren Fehlern gesucht. Als Nachbarfehler ergeben sich die Fehler 5 und 8. Werden nun um die Fehler 5 und 8 wiederum Kreise mit dem gleichen Radius gezogen, so ergeben sich als neue Nachbarfehler die Fehler 2, 6 und 12. Eine wiederholte Anwendung dieser Prozedur auf die Fehler 2, 6 und 12 erbringt keine neuen Nachbarfehler, so daß hiermit die erste Gruppenbildung abgeschlossen ist. Da jedoch weitere Fehler in der oberen Anordnung enthal-

ten sind, muß das Verfahren fortgesetzt werden. Es ergeben sich vier Fehlergruppen, die im unteren Teil des Bildes 3.4-17 mit den jeweils dazugehörigen Einzelfehlern aufgeführt sind.

Da es für die Abstände der Fehler innerhalb einer Fehleranhäufung keine Vorschrift gibt, wurde der Kreisradius, der für das Auffinden von Nachbarfehlern verantwortlich ist, aus Messungen an realen Schweißnahtaufnahmen ermittelt. Dazu wurden mehrere Fehleranhäufungen, die in einem Schweißnahtkatalog enthalten sind (hierauf wird im weiteren Verlauf der Arbeit noch eingegangen, siehe Kapitel 5.1.1, Seite 42) untersucht. Der gerade noch erforderliche Abstand, der notwendig war, um alle Einzelfehler den jeweiligen Fehleranhäufungen zuzuordnen, betrug 0,7 cm. Bei der Erprobung des Merkmals *FAH* im Kapitel 5.4 wurde dieser Wert verwendet.

Werden als Mindestanzahl für eine Fehleranhäufung fünf Fehler zugrundegelegt, so ergibt sich aus den Angaben zur Fehleranzahl pro Gruppe, daß nur die Gruppen I und III Fehleranhäufungen darstellen. Bei der hier vorgegebenen Fehleranordnung war dieses Ergebnis zu erwarten. Eine Mindestanzahl von fünf Fehlern hat sich auch bei Untersuchungen an realen Schweißnahtaufnahmen als praxisrelevant erwiesen. Dies wurde bei einer visuellen Begutachtung der Schweißnahtaufnahmen durch Fachpersonal festgestellt. Für das Merkmal *FAH*, das die Zuordnung eines Fehlers zu einer Fehleranhäufung beschreibt, wird deshalb folgende Definition gewählt:

$$FAH(F_{ik}) = n \quad \text{wenn } F_{ik} \in G_n \text{ und } N_{G_n} \geq 5 \quad (3.4-27)$$

$$FAH(F_{ik}) = 0 \quad \text{wenn } F_{ik} \in G_n \text{ und } N_{G_n} < 5$$

$F_{ik}$  : Fehler Nummer  $k$  vom Typ  $i$ , mit  $k = 1, 2, 3, \dots$

$G_n$  : Fehlergruppe Nummer  $n$ , mit  $n = 1, 2, 3, \dots$

$F_{ik} \in G_n$  : Fehler  $F_{ik}$  ist Element der Gruppe  $G_n$

$N_{G_n}$  : Anzahl der Elemente (Fehler) in der Gruppe  $G_n$

Durch das Merkmal *FAH* wird lediglich festgestellt, ob ein Fehler ein Einzelfehler oder Bestandteil einer Fehleranhäufung ist. Der Typ der Fehleranhäufung (z. B. Porenzeile oder Porennest) kann derzeit noch nicht ermittelt werden, da *FAH* keine Informationen über die Form der Fehleranhäufung enthält. Die Form der Fehleranhäufung wird zu einem späteren Zeitpunkt durch das Merkmal *FFA* (siehe Gleichung 3.4-29, S. 30) beschrieben.

Aus dem Gleichungspaar 3.4-27 geht hervor, daß das Merkmal *FAH* je nach Anzahl der Fehler in einer Gruppe zwei verschiedene Werte annehmen kann. Ist der Fehler, für den *FAH* berechnet wird, Element einer Gruppe, die insgesamt weniger als fünf Fehler enthält, so bekommt *FAH* den Wert Null. Enthält die Gruppe jedoch mindestens

fünf Fehler oder mehr, so bekommt *FAH* die Gruppennummer als Wert zugeordnet. Somit erhalten alle Fehler, die in einer Fehleranhäufung zusammengefaßt sind, den gleichen Wert für *FAH*. Dieser Wert ist stets größer Null, da die Gruppennummern nur aus natürlichen Zahlen bestehen. Für alle Einzelfehler hingegen nimmt *FAH* den Wert Null an.

### Form der Fehleranhäufung

Nach der Ermittlung von Fehleranhäufungen durch das Merkmal *FAH* können diese Fehleranhäufungen nun mit ihren dazugehörigen Einzelfehlern getrennt ausgewertet werden. Je nach Anordnung der Einzelfehler wird eine Fehleranhäufung entweder als Fehlerzeile oder als Fehlernest bezeichnet. Häufungen von Rissen, die von Auswertern oftmals auch als Reißfelder bezeichnet werden, obwohl dieser Begriff nicht genormt ist, weisen gegenüber Fehlernestern hinsichtlich der Anordnung der Einzelfehler keine Unterschiede auf. Aus diesem Grund werden Häufungen von Rissen im folgenden zur Vereinfachung auch als Fehlernester bezeichnet.

Ein Fehlernester liegt vor, wenn die Einzelfehler innerhalb der Fehleranhäufung flächenhaft verteilt sind. Bei einer Fehlerzeile hingegen sind die Einzelfehler in einer Reihe angeordnet, d. h. sie liegen nahezu auf einer Geraden. In der Fehleranordnung im Bild 3.4-17 werden beide Fehleranhäufungen durch die Fehlergruppen I und III dargestellt. Die Fehlergruppe I zeigt ein Fehlernester und die Fehlergruppe III eine Fehlerzeile. Beide Fehleranhäufungen können für denselben Fehlertyp (Porennester, Porenzeile) auftreten und müssen deshalb für die Fehlertypenerkennung voneinander unterscheidbar sein. Aus diesem Grund wird ein Merkmal eingerichtet, das aus der Lage der Einzelfehler die Form einer Fehleranhäufung beschreibt.

Ebenso wie bei der Gruppenbildung werden auch hier nur die Flächenschwerpunkte der Einzelfehler berücksichtigt. Die Form einer Fehleranhäufung ergibt sich also aus der Verteilung der Flächenschwerpunkte der Einzelfehler im Bild. Da sich Fehlerzeilen vornehmlich in Schweißnahttrichtung ausdehnen und die Schweißnaht im digitalisierten Röntgenbild stets annähernd waagrecht, d. h. in Richtung der Bildzeilen verläuft, liegen die Schwerpunkte der Einzelfehler bei einer Fehlerzeile annähernd auf einer Geraden, die parallel zu den Bildzeilen ausgerichtet ist. Eine Fehlerzeile besitzt also eine große Ausdehnung in Richtung der Bildzeilen und eine sehr geringe Ausdehnung in Richtung der Bildspalten. Fehlernester hingegen werden in beiden Richtungen eine nahezu gleich große Ausdehnung aufweisen.

Da sich diese Ausdehnungen im Digitalbild direkt durch  $x$ - und  $y$ -Koordinaten erfassen lassen, kann die Form einer Fehleranhäufung aus den  $x$ - und  $y$ -Koordinaten der Flächenschwerpunkte der Einzelfehler bestimmt werden. Dazu werden aus den Flächenschwerpunktskoordinaten aller Einzelfehler die Extremwerte für  $x$  und  $y$  ermittelt und nach dem Gleichungspaar 3.4-28 ausgewertet.

$$XFA = X_{max} - X_{min} \quad (3.4-28)$$

$$YFA = Y_{max} - Y_{min}$$

$X_{max}$ ,  $X_{min}$ ,  $Y_{max}$ ,  $Y_{min}$ : Extremwerte der Flächenschwerpunktskoordinaten aller Einzelfehler innerhalb einer Fehleranhäufung

Da die  $x$ -Koordinate im Digitalbild waagrecht, d. h. entlang der Bildzeilen verläuft, zeigt der Abstand  $XFA$  die waagerechte Ausdehnung der Fehleranhäufung im Bild an. Entsprechend wird die senkrechte Ausdehnung, d. h. die Ausdehnung der Fehleranhäufung in Richtung der Bildspalten, durch den Abstand  $YFA$  wiedergegeben. Beide Abstände werden nach Gleichung 3.4-29 zum Merkmal  $FFA$  zusammengefaßt.

$$FFA = \frac{YFA}{XFA} \quad (3.4-29)$$

Das Merkmal  $FFA$  beschreibt die Form einer Fehleranhäufung und nimmt für Fehlernester einen Wert nahe 1 an. Fehlerzeilen hingegen erhalten sehr geringe Werte nahe 0, da sie gewöhnlich eine große Ausdehnung in Richtung der Bildzeilen besitzen und sich der Abstand  $XFA$  im Nenner befindet.

### 3.4.3 Tabelle der Einzelmerkmale

In *Bild 3.4-18* sind alle Einzelmerkmale noch einmal in einer Tabelle zusammengefaßt. Die Einteilung entspricht der in Kapitel 3.3 angegebenen Untergliederung der Merkmale in Kategorien. Selbstverständlich erhebt diese Tabelle keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da sich leicht weitere Merkmale finden lassen, mit denen eine Typenerkennung von Schweißnahtfehlern durchgeführt werden kann. Hierbei sei insbesondere auf die große Anzahl von Merkmalen hingewiesen, die für die Objekterkennung von medizinischen und metallographischen Bildvorlagen zur Verfügung stehen und ständig neu entwickelt werden [13, 24].

## 4. Verfahren der Merkmalsbeurteilung

Das Problem bei der Beurteilung von Merkmalen liegt darin, daß eine endgültige Aussage erst nach erfolgter Klassifizierung getroffen werden kann. Erst wenn überprüft wurde, inwieweit ein gefordertes Klassifikationsziel erreicht wurde, ist es möglich, Werturteile über die verwendeten Merkmale abzugeben. Im hier vorliegenden Fall der Fehlertypenerkennung besteht das Klassifikationsziel darin, alle in einer Schweißnahtaufnahme detektierten Fehler dem richtigen Fehlertyp zuzuordnen. Eine Beurteilung der in Kapitel 3.4 aufgeführten Merkmale kann also dadurch erfolgen, daß an einer großen Anzahl von Schweißnahtaufnahmen Fehlerklassifizierungen durchgeführt werden. Die

Letztlich ist jedoch nicht die Anzahl, sondern die Auswahl der Merkmale für die Qualität der Fehlertypenerkennung von Bedeutung. Im Rahmen dieser Arbeit wurden deshalb nur eine begrenzte Anzahl spezieller Fehlermerkmale entwickelt und zusammengestellt. Die hier aufgeführten 15 Merkmale bilden das Ausgangsmaterial für die in Kapitel 5 durchgeführten Untersuchungen zur Beurteilung der Einzelmerkmale.

OBJEKTBEZOGENE MERKMALE		
Geometrische Merkmale	FFL: KTL: NFF: CNF: FSP: FAD:	Fehlerfläche Konturlänge Normierter Formfaktor Convexer norm. Formfaktor Flächenschwerpunkt Flächenausdehnung
Grauwertmerkmale	KON: HOM: FLV:	Fehlerkontrast Homogenität Flankenverlauf
Kombinierte Grauwert-/Geometrie-Merkmale	OMT: GFS:	Ort der maximalen Tiefenausdehnung Gewichteter Flächenschwerpunkt
KONTEXTBEZOGENE MERKMALE		
Fehler/Schweißnaht-Merkmale	FLA: RTG:	Fehlerlage Fehlerrichtung
Fehler/Fehler-Merkmale	FAH: FFA:	Fehleranhäufung Form der Fehleranhäufung

*Bild 3.4-18:*  
*Tabelle der Einzelmerkmale*

Da im weiteren Verlauf der Arbeit oftmals nur die Kurzbezeichnungen der Merkmale verwendet werden, befindet sich das *Bild 3.4-18* zusätzlich in einem aufklappbaren Faltblatt im Anhang A.

Ergebnisse dieser Fehlertypenklassifizierungen, d. h. die Anzahl von Richtig- und Falschzuweisungen in vorgegebene Fehlertypenklassen, sind dann ein Maß für die Qualität der Merkmale. Diese Methode der Merkmalsbeurteilung führt zu sehr realistischen Aussagen, da sie die Merkmale in einer Weise verwendet, die dem späteren praktischen Einsatz entspricht. Ein Nachteil dieser Methode besteht jedoch darin, daß sie das verwendete Klassifizierungsverfahren zusätzlich in die Beurteilung mit einbezieht.

Ziel dieser Arbeit ist es jedoch, die Merkmale unabhängig vom später verwendeten Klassifizierungsverfahren zu beur-



teilen. Aus diesem Grund wurde eine Sammlung von Schweißnahtaufnahmen verwendet, die im Kapitel 5.1.1 näher beschrieben wird. Diese Sammlung enthält eine Vielzahl typischer Schweißnahtfehler, die visuell klassifiziert und nach Fehlertypen geordnet katalogisiert wurden. Unter Verwendung dieses Fehlerkatalogs kann nun das Verhalten der Merkmale an unterschiedlichen Fehlertypen getrennt untersucht werden. Die hieraus gewonnenen Aussagen zur Beurteilung der Merkmale beziehen sich also ausschließlich auf statistische Kennwerte vorab gebildeter Fehlerklassen und sind somit vom später verwendeten Klassifizierungsverfahren unabhängig.

Mit diesen Untersuchungen sollen diejenigen Merkmale bzw. Merkmalskombinationen aus einem vorgegebenen Merkmalsatz herausgefunden werden, die für das Problem der Fehlertypenklassifizierung besondere Aussagekraft besitzen. Die nun folgenden Ausführungen behandeln die Theorie der statistischen Methoden, die zur Merkmalsbeurteilung und -auswahl verwendet werden. Die Anwendung dieser Methoden auf die in Kapitel 3 aufgeführten Merkmale erfolgt dann im Kapitel 5.

#### 4.1 Der eindimensionale Merkmalsraum

Die Probleme, die sich bei der Klassifizierung von Fehlern ergeben, lassen sich besonders deutlich demonstrieren, wenn zur Klassenzuordnung, d. h. zur Fehlertypenbestimmung, nur ein Merkmal verwendet wird. Da sich die Häufigkeiten der auftretenden Merkmalswerte hier in einer eindimensionalen Verteilungsfunktion darstellen lassen, spricht man in diesem Fall auch von einem eindimensionalen Merkmalsraum. Der Verlauf der Verteilungsfunktion gibt Auskunft über die Trennbarkeit der Fehlerklassen und beschreibt somit die Eigenschaften des Merkmals. Um die Schwierigkeiten der Klassentrennung im Merkmalsraum besser zu verdeutlichen, wird vorerst von einem Zweiklassen-Problem ausgegangen.

Sind  $\Omega_1$  und  $\Omega_2$  zwei Fehlerklassen (z. B. Risse und Poren) und  $c_v$  ein Merkmal (z. B. Formfaktor), so ergibt sich im Idealfall bei einer großen Anzahl von Stichproben eine Verteilungsdichte  $w(c_v)$ , wie sie in Bild 4.1-1 dargestellt ist. Dabei sind  $\mu_1$  und  $\mu_2$  die klassenbedingten Mittelwerte.

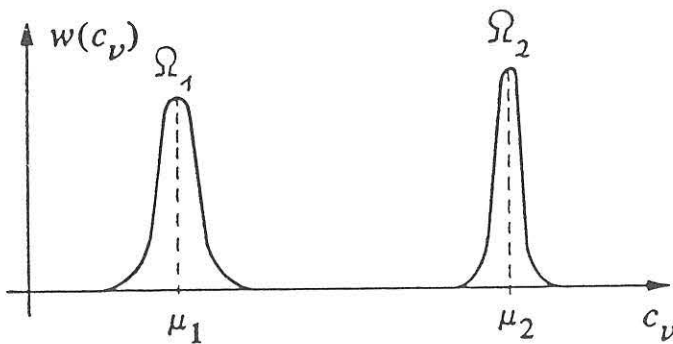


Bild 4.1-1:  
Verteilungsdichte zweier Klassen im eindimensionalen Merkmalsraum (entnommen aus Lit. [9])

Wie dem Bild zu entnehmen ist, lassen sich die beiden Klassen  $\Omega_1$  und  $\Omega_2$  vollständig voneinander trennen. Der Grund hierfür liegt in dem großen Abstand der Mittelwerte  $\mu_1$  und  $\mu_2$  und in den geringen Streuungen der Merkmalswerte innerhalb der beiden Klassen. In der Praxis treten jedoch meist weitaus schwierigere Fälle auf, wie sie in Bild 4.1-2 dargestellt sind. In den Abbildungen a) und b) kommt es zu Überschneidungen zwischen den klassenbedingten Verteilungsdichten, was zwangsläufig zur Bildung einer Mischklasse führt. Innerhalb der Überschneidungsbereiche ist keine eindeutige Klassenzuordnung möglich. In Abbildung a) wird die Überschneidung durch ungenügende Distanz zwischen den Mittelwerten  $\mu_1$  und  $\mu_2$  hervorgerufen. In Abbildung b) treten zu hohe Streuungen in den Merkmalswerten auf, um beide Klassen vollständig voneinander zu trennen. Einen Sonderfall stellt die Abbildung c) dar. Hier besitzt die Klasse  $\Omega_2$  eine Verteilungsdichte mit zwei Maxima. Eine derartige Verteilungsdichte kann sich in der Praxis z. B. für das Merkmal RTG, das die Fehlerrichtung beschreibt (siehe Kapitel 3.4.2.1) ergeben, wenn in der Klasse  $\Omega_2$  Längs- und Querrisse zusammengefaßt sind. Da sich in der Abbildung c) die beiden Maxima links und rechts vom Mittelwert der Klasse  $\Omega_1$  befinden, ergeben sich zusätzliche Schwierigkeiten bei der Klassentrennung. Eine

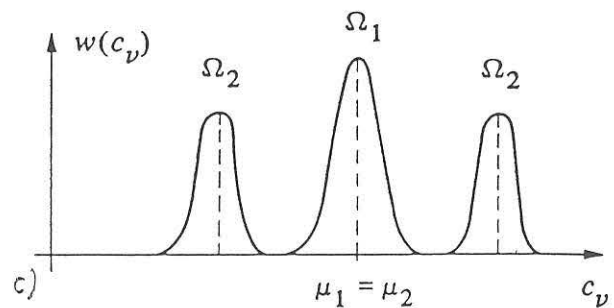
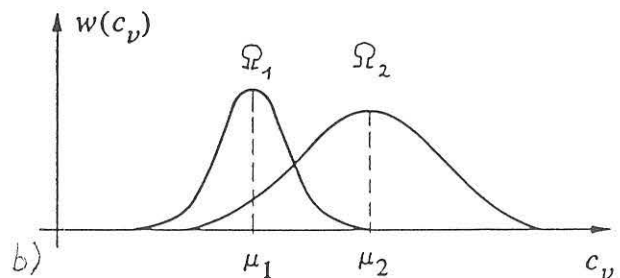
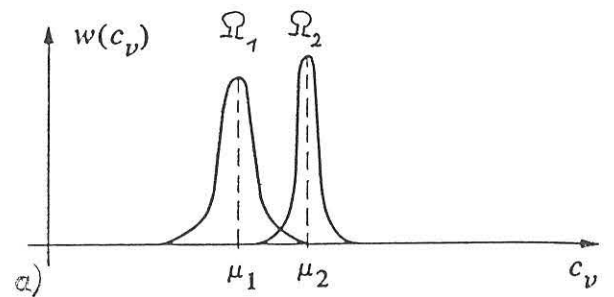


Bild 4.1-2:  
Beispiele für verschiedene Verteilungsdichten bei einem Zweiklassen-Problem (entnommen aus Lit. [9])

Zuordnung der Merkmalswerte von  $c_v$  zu den beiden Klassen  $\Omega_1$  und  $\Omega_2$  ist hier nur über mehrfach definierte Wertebereiche möglich.

$$\bar{G} = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} G[i; j] \quad (4.1-2)$$

### 4.1.1 Das Gütemaß

Grundsätzlich können die Merkmale innerhalb ihres Wertebereichs beliebige Verteilungsdichtefunktionen annehmen. Zur Beurteilung der Merkmale ist es jedoch vorteilhaft, wenn innerhalb der zu untersuchenden Ausgangsklassen normalverteilte Merkmalswerte vorliegen. In diesem Fall kann die Trennbarkeit der Ausgangsklassen anhand einfacher statistischer Kenngrößen ermittelt werden. Die Beurteilung von Merkmalen mit normalverteilten Dichtefunktionen wird in diesem Kapitel behandelt. Ein Beurteilungsverfahren für nicht normalverteilte Merkmalswerte wird im nächsten Kapitel vorgestellt.

Geht man davon aus, daß die Merkmalswerte innerhalb einer Klasse eine Normalverteilungsdichte aufweisen, kann unter Verwendung der klassenbedingten Mittelwerte und Streuungen eine Merkmalsbeurteilung durchgeführt werden. Hierzu wird in der Literatur [9] ein Gütemaß angegeben, das sich nach Gleichung (4.1-1) berechnet.

$$G = \frac{(\mu_1 - \mu_2)^2}{s_1^2 + s_2^2} \quad (4.1-1)$$

$\mu_1, \mu_2$ : klassenbedingte Mittelwerte

$s_1, s_2$ : klassenbedingte Streuungen

Das Gütemaß  $G$  kann per Definition Werte zwischen 0 und  $\infty$  annehmen, wobei hohe Werte für  $G$  eine gute Klassentrennung anzeigen. Merkmale, die weit auseinanderliegende Mittelwerte erzeugen und innerhalb der Klassen nur geringe Streuungen aufweisen, sind zur Klassifizierung besonders gut geeignet. Es ist daher offensichtlich, daß das Gütemaß nach Gleichung (4.1-1) ein geeignetes Bewertungskriterium darstellt.

Bisher wurde nur die Trennung zweier Klassen betrachtet, im allgemeinen ist jedoch die Anzahl der zu unterscheidenden Klassen wesentlich höher. Für das Gütemaß muß deshalb eine Erweiterung gefunden werden, die eine Anwendung auf ein Mehr-Klassen-Problem zuläßt. Dies wird durch mehrfachen Einsatz der Gleichung 4.1-1 erreicht. Ist  $N$  die Anzahl der zu unterscheidenden Klassen, so existieren

insgesamt  $\binom{N}{2}$  mögliche Klassenpaare. Für jedes

Klassenpaar wird nun ein  $G$  nach Gleichung (4.1-1) berechnet. Der Mittelwert aller Gütemaße  $\bar{G}$  ergibt sich dann aus Gleichung (4.1-2).

Das gemittelte Gütemaß  $\bar{G}$  bewertet alle klassenbedingten Verteilungsdichten eines Merkmals und liefert somit bei einem Klassifizierungsproblem mit vorgegebener Klasseneinteilung eine wichtige Entscheidungshilfe für die Merk-

$G[i; j]$ : Gütemaß für die beiden Klassen  $\Omega_i$  und  $\Omega_j$

$\bar{G}$ : Gemitteltes Gütemaß

$N$ : Anzahl aller Klassen

malsauswahl. Merkmale, die hohe Werte für  $\bar{G}$  erbringen, lassen eine gute Klassentrennung erwarten und sind demnach für die anstehende Klassifizierung besonders zu bevorzugen. Die alleinige Verwendung von  $\bar{G}$  zur Auswahl mehrerer Merkmale aus einem vorliegenden Merkmalsatz ist jedoch nicht zu empfehlen. Merkmale beschreiben fehlerspezifische Eigenschaften und können deshalb für einzelne, ausgewählte Fehlerklassen besondere Bedeutung besitzen. Aus diesem Grund sollen bei der Auswahl mehrerer Merkmale nicht nur das gemittelte Gütemaß  $\bar{G}$ , sondern auch die einzelnen Gütemaße  $G$  berücksichtigt werden. Auf die kombinierte Verwendung von  $G$  und  $\bar{G}$  wird im Kapitel 4.2.1 näher eingegangen.

### 4.1.2 Der Bhattacharyya-Koeffizient

Das Gütemaß berechnet sich aus den Parametern Mittelwert und Streuung, wobei vorausgesetzt wird, daß die Merkmalswerte innerhalb einer Klasse nahezu normal verteilt sind. Trifft diese Voraussetzung nicht zu, d. h., weichen die Merkmalswerte stark von einer Normalverteilung ab, verliert das Gütemaß seine Aussagegültigkeit. Dies wird in *Bild 4.1-2*, Abb. c) deutlich dargestellt. Obwohl hier die beiden Klassen  $\Omega_1$  und  $\Omega_2$  vollständig voneinander zu trennen sind, erhält das Gütemaß wegen der Gleichheit der beiden Mittelwerte  $\mu_1$  und  $\mu_2$  einen Wert von Null. Es erscheint daher sinnvoll, zur Beurteilung eines Merkmals nicht nur die statistischen Kenngrößen Mittelwert und Streuung zu verwenden, sondern die Verteilungsdichten in ihrem gesamten Verlauf zu berücksichtigen. Eine Größe, die die Überlappung zweier klassenbedingter Verteilungsdichten direkt bewertet, ist der Bhattacharyya-Koeffizient, der nach Gleichung (4.1-3) berechnet wird.

$$b = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ w_{\Omega_1}(c_v) \cdot w_{\Omega_2}(c_v) \right]^{\frac{1}{2}} dc_v \quad (4.1-3)$$

$w_{\Omega_1}(c_v)$ : Verteilungsdichte des Merkmals  $c_v$  für die Klasse  $\Omega_1$

$w_{\Omega_2}(c_v)$ : Verteilungsdichte des Merkmals  $c_v$  für die Klasse  $\Omega_2$

Wenn die beiden zu vergleichenden Verteilungsdichten keinen Überlappungsbereich aufweisen, ergibt sich für  $b$

der Wert Null. Liegen dagegen beide Verteilungsdichten vollkommen deckungsgleich übereinander, so nimmt  $b$  den Wert Eins an<sup>1)</sup>. Der Wertebereich  $0 \leq b \leq 1$  bietet die Möglichkeit, durch Logarithmierung aus dem Bhattacharyya-Koeffizienten ein dem Gütemaß  $G$  vergleichbares Bewertungsmaß  $B$  aufzustellen.

$$B = -\ln b \quad (4.1-4)$$

$B$  kann ebenso wie  $G$  Werte zwischen 0 und  $\infty$  annehmen, wobei hohe Werte für  $B$  eine gute Klassentrennung anzeigen. Die Erweiterung auf ein Mehr-Klassen-Problem erfolgt hier ebenfalls wie beim Gütemaß über die Berechnung von Klassenpaaren.

$$\bar{B} = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} B[i; j] \quad (4.1-5)$$

$B[i; j]$  : Bewertungsmaß für die beiden Klassen  $\Omega_i$  und  $\Omega_j$

$\bar{B}$  : Gemittelttes Bewertungsmaß

$N$  : Anzahl aller Klassen

Das gemittelte Bewertungsmaß  $\bar{B}$  ist zwar etwas aufwendiger zu berechnen als das gemittelte Gütemaß  $\bar{G}$ , da hier die Verteilungsdichten integral betrachtet werden, dafür ist  $\bar{B}$  gegenüber  $\bar{G}$  jedoch auf beliebig verlaufende Dichtefunktionen anwendbar.

## 4.2 Der mehrdimensionale Merkmalsraum

Bisher wurde davon ausgegangen, daß zur Klassentrennung nur ein Merkmal verwendet wird. Für komplizierte Klassifizierungsprobleme, wie der hier vorliegenden Typenunterscheidung von Schweißnahtfehlern, bei denen mehrere Ausgangsklassen (Poren, Risse, Bindefehler, Wurzelfehler usw.) existieren, reicht im allgemeinen ein Merkmal nicht aus. Meist beschreibt ein Merkmal nur eine klassenspezifische Eigenschaft und liefert somit nur einen Teilbetrag zur Gesamtklassifizierung. Eine endgültige Klassifizierung wird deshalb häufig erst durch das Zusammenwirken meh-

<sup>1)</sup> Die Fläche zwischen der Kurve der Dichtefunktion und der Merkmalsachse beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der die Merkmalswerte auftreten. Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Merkmalswert in ein vorgegebenes Intervall fällt, entspricht direkt der Fläche, die durch dieses Intervall begrenzt wird. Da der Merkmalswert auf jeden Fall im Bereich zwischen  $-$  und  $+$  liegt und das sichere Ereignis per Definition eine Wahrscheinlichkeit von 1 besitzt, hat die Gesamtfläche unter der Kurve der Dichtefunktion immer einen Wert von 1. Daraus folgt, daß der Bhattacharyya-Koeffizient  $b$  nach Gleichung (4.1-3) niemals einen Wert größer 1 annehmen kann.

rerer Merkmale erreicht. Um herauszufinden, welche Merkmalskombinationen für ein Klassifizierungsproblem am besten geeignet sind, ist es notwendig, Beurteilungskriterien aufzustellen, die das Zusammenwirken der Merkmale berücksichtigen. Entsprechend der Anzahl der verwendeten Merkmale erweitert sich der eindimensionale Merkmalsraum aus Bild 4.1-1 zu einem mehrdimensionalen Merkmalsraum, wobei die Achsen aller Einzelmerkmale orthogonal zueinander angeordnet sind.

In Bild 4.2-1 ist die perspektivische Darstellung eines zweidimensionalen Merkmalsraumes mit zwei ausgeprägten Anhäufungen klassenbedingter Merkmalswerte wiedergegeben. Vergleichbar zum eindimensionalen Beispiel in Bild 4.1-1 sind auch hier beide Klassen vollständig voneinander zu trennen, da sich die Verteilungsdichten nicht überlappen.

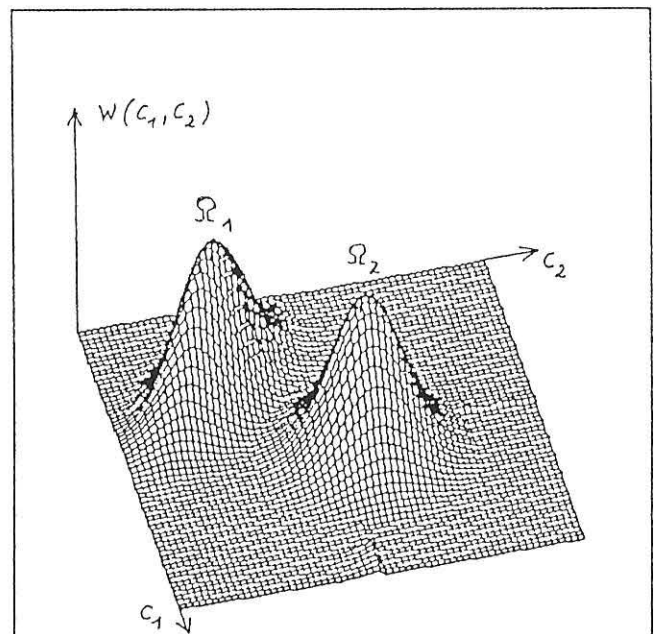


Bild 4.2-1:  
Verteilungsdichten zweier Klassen im zweidimensionalen Merkmalsraum

Obwohl die perspektivische Darstellung den Sachverhalt im Merkmalsraum sehr anschaulich wiedergibt, erhält der Betrachter nur eine eingeschränkte Übersicht. Je nach Anordnung der Verteilungsdichtefunktionen treten verdeckte Bereiche auf (z. B. hinter den Verteilungsdichtefunktionen), in denen möglicherweise vorhandene Belegungen im Merkmalsraum unentdeckt bleiben. Aus diesem Grund wird zur Darstellung zweidimensionaler Merkmalsräume das Punkt- bzw. Streuungsdiagramm bevorzugt verwendet. Hierbei wird die Häufigkeit auftretender Merkmalskombinationen durch Punktanhäufungen in der Merkmalsebene wiedergegeben. Das Punktdiagramm kann, bezogen auf die perspektivische Darstellung, als Draufsicht auf die Merkmalsebene betrachtet werden, wobei hohe Werte für die Verteilungsdichtefunktion  $w(c_1, c_2)$  durch eine enge Nachbarschaft von Punkten angezeigt werden. Der Wert einer

Verteilungsdichtefunktion wird also in eine örtliche Punktdichte umgesetzt. Das zur perspektivischen Darstellung aus Bild 4.2-1 korrespondierende Punktdiagramm ist in Bild 4.2-2 dargestellt.

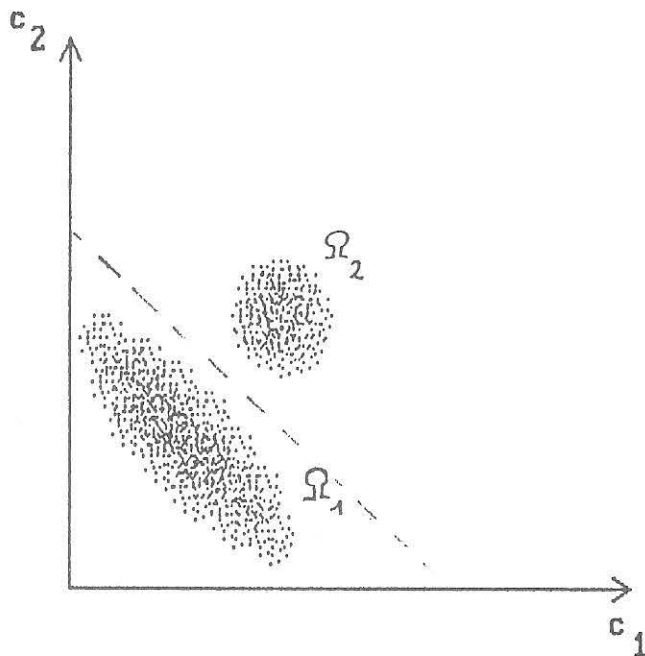


Bild 4.2-2:  
Punktdiagramm zweier Klassen im zweidimensionalen Merkmalsraum

Der Vorteil einer mehrdimensionalen Klassifizierung, d. h. die gleichzeitige Verwendung mehrerer Merkmale, wird durch dieses Beispiel deutlich demonstriert. Werden die Punkthäufungen in Bild 4.2-2 auf die jeweiligen Merkmalsachsen projiziert, so ergeben sich in beiden Fällen Überlappungen. Weder mit dem Merkmal  $c_1$  noch mit dem Merkmal  $c_2$  kann bei alleiniger Verwendung eine vollständige Klassentrennung herbeigeführt werden. Erst durch das Zusammenwirken beider Merkmale ist es möglich, den Merkmalsraum so zu unterteilen, daß eine eindeutige Klassenzuordnung getroffen werden kann. Für die hier vorliegende Anordnung kann durch die Wahl einer geeigneten Geraden der Merkmalsraum so aufgeteilt werden, daß beide Punkthäufungen vollständig in getrennten Bereichen liegen. Die Gerade, die als lineare Trennfunktion bezeichnet wird, ist im Bild 4.2-2 gestrichelt eingezeichnet. Im allgemeinen, insbesondere bei Mehrklassenproblemen, sind jedoch meist weitaus kompliziertere Trennfunktionen erforderlich.

Kommt es bei den Punkthäufungen zu flächenhaften Überlappungen im zweidimensionalen Merkmalsraum, ist eine Klassenzuordnung über Trennfunktionen nicht mehr möglich. In diesem Fall muß die Dimension des Merkmalsraumes erhöht werden. Wird zur Klassifizierung ein drittes Merkmal verwendet, so entstehen aus den flächenhaften Punkthäufungen dreidimensionale Punktwolken. Zur Klassentrennung sind dann Trennflächen erforderlich, die den dreidimensionalen Merkmalsraum in geeignete Unter-räume unterteilen.

Sind genügend Merkmale vorhanden, kann der Merkmalsraum auf diese Weise beliebig in seinen Dimensionen erweitert werden. Allerdings muß darauf hingewiesen werden, daß mit zunehmender Anzahl von Merkmalen der Rechenaufwand für die Klassifizierung erheblich steigt, da für jedes einzelne zu klassifizierende Objekt immer alle Merkmale berechnet werden müssen. Es erscheint daher sinnvoll, aus einem vorhandenen Merkmalsset nur diejenigen Merkmale auszuwählen, die zur Klassifizierung unbedingt benötigt werden. Dazu ist es jedoch erforderlich, das Zusammenwirken der Merkmale anhand der klassenbedingten Verteilungsdichten im mehrdimensionalen Merkmalsraum zu überprüfen.

## 4.2.1 Merkmalsauswahl über eindimensionale Verteilungsdichten

Zur Merkmalsauswahl kann entweder das im Kapitel 4.1.1 eingeführte Gütemaß  $G$  oder das im Kapitel 4.1.2 eingeführte Bewertungsmaß  $B$  verwendet werden. Welches der beiden Maße zur Anwendung kommt, hängt von der Verteilung der Merkmalswerte in den Ausgangsklassen ab. Hierauf wurde bereits im Kapitel 4.1.2 hingewiesen. Wie das ausgewählte Maß jedoch mit dem jeweils dazugehörigen gemittelten Maß ( $\bar{G}$  oder  $\bar{B}$ ) optimal zur Merkmalsauswahl eingesetzt wird, ist Gegenstand dieses Kapitels. Je nach Anzahl der auszuwählenden Merkmale und nach Anzahl der Ausgangsklassen ergeben sich unterschiedliche Vorgehensweisen, die im folgenden beschrieben werden.

Die einfachste Möglichkeit, Merkmale für eine mehrdimensionale Klassifizierung auszuwählen, besteht in der mehrfachen Anwendung des gemittelten Gütemaßes  $\bar{G}$  nach Gleichung (4.1-2) oder des gemittelten Bewertungsmaßes  $\bar{B}$  nach Gleichung (4.1-5). Egal, ob  $\bar{G}$  oder  $\bar{B}$  verwendet wird, die Vorgehensweise ist in beiden Fällen identisch. Sollen aus einer Gesamtanzahl von  $n$  Merkmalen nur  $m$  Merkmale ausgewählt werden, so wird vorerst für jedes der  $n$  Einzelmerkmale das gemittelte Maß  $\bar{G}$  bzw.  $\bar{B}$  gesondert berechnet. Danach werden nur jene  $m$  Merkmale ausgewählt, die die höchsten Werte für  $\bar{G}$  bzw.  $\bar{B}$  erbracht haben. Diese Methode ist zwar einfach zu berechnen, hat jedoch den Nachteil, daß die klassenspezifischen Aussagen der einzelnen Merkmale unberücksichtigt bleiben.

Eine etwas differenziertere Auswahl wird erreicht, wenn für die Einzelmerkmale nicht nur die gemittelten Maße  $\bar{G}$  bzw.  $\bar{B}$  zur Verfügung stehen, sondern das Gütemaß  $G$  nach Gleichung (4.1-1) bzw. das Bewertungsmaß  $B$  nach Gleichung (4.1-4) in seiner ursprünglichen Form verwendet wird. Entsprechend der Anzahl  $n$  der Einzelmerkmale und der Anzahl  $k$  der Ausgangsklassen ergeben sich dann  $n \cdot k \cdot (k-1)/2$  Werte für  $G$  bzw.  $B$ . Diese Werte werden nach Klassenpaaren geordnet und gemäß der Darstellung im Bild 4.2-3 in eine Matrix eingetragen.

Klassenpaare					
	[1;2]	[1;3]	[1;k]	[2;3]	[(k-1);k]
$c_1$	$G_1[1;2]$	$G_1[1;3]$	$G_1[1;k]$	$G_1[2;3]$	$G_1[(k-1);k]$
$c_2$	$G_2[1;2]$	$G_2[1;3]$	$G_2[1;k]$	$G_2[2;3]$	$G_2[(k-1);k]$
:					
$c_n$	$G_n[1;2]$	$G_n[1;3]$	$G_n[1;k]$	$G_n[2;3]$	$G_n[(k-1);k]$

$n$  : Anzahl der Merkmale

$k$  : Anzahl der Ausgangsklassen

$G_v [i; j]$  : Gütemaß des Merkmals  $c_v$  für die beiden Klassen  $\Omega_i$  und  $\Omega_j$

Bild 4.2-3:

Matrix der Gütemaße  $G$  für alle Klassenpaare

Hier wurde die Matrix für das Gütemaß  $G$  aufgestellt. Wird zur Merkmalsauswahl das Bewertungsmaß  $B$  verwendet, wird lediglich  $G$  durch  $B$  ersetzt, die Anordnung der Matrix selbst bleibt erhalten.

Für die Auswahl der Merkmale wird nun nach folgendem Schema vorgegangen. Zuerst wird innerhalb der Matrix der Maximalwert von  $G$  gesucht. Die Zeile und die Spalte, in denen sich dieser Maximalwert befindet, werden gestrichen. In der noch verbleibenden Matrix wird wiederum der Maximalwert gesucht und wiederum werden die dazugehörige Zeile und Spalte gestrichen. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis die Anzahl der gestrichenen Zeilen gleich der Anzahl der auszuwählenden Merkmale ist. Die ausgewählten Merkmale sind diejenigen, die den gestrichenen Zeilen zugeordnet sind. Mit dieser Vorgehensweise werden die optimalen Merkmale zur Trennung einzelner Klassenpaare ermittelt. Dieses Verfahren ist nur anzuwenden, wenn die Anzahl der auszuwählenden Merkmale größer oder mindestens gleich der Anzahl der zu trennenden Klassenpaare ist. Sind mehr Klassenpaare als auszuwählende Merkmale vorhanden, wird die Trennung einzelner Klassenpaare bevorzugt, da die Anzahl der ausgewählten Merkmale nicht ausreicht, um alle Klassenpaare zu berücksichtigen.

Da die Anzahl der Klassenpaare mit zunehmender Zahl der Ausgangsklassen erheblich steigt (bei 8 Ausgangsklassen ergeben sich bereits 29 Klassenpaare), wird hier ein weiteres Verfahren vorgestellt, bei dem die Anzahl der auszuwählenden Merkmale nur die Anzahl der Ausgangsklassen (nicht der Klassenpaare) erreichen muß. Dieses Verfahren ist als ein Mittelweg zwischen den beiden vorangegangenen Verfahren zu betrachten. Es verwendet auch gemittelte Gütemaße bzw. Bewertungsmaße eines Merkmals, jedoch

wird hier die Mittelung nicht über alle Klassenpaare gemeinsam, sondern nur für jede Ausgangsklasse getrennt durchgeführt. Die Beschreibung des Verfahrens erfolgt wiederum nur anhand des Gütemaßes. Selbstverständlich können die im folgenden aufgeführten Verfahrensschritte ebenso unter Verwendung des Bewertungsmaßes durchgeführt werden.

Das klassenbezogene, gemittelte Gütemaß  $\bar{G} [i]$  wird nach Gleichung 4.2-1 berechnet.

$$\bar{G}_v [i] = \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k G_v [i; j] \quad (4.2-1)$$

$\bar{G}_v [i]$  : Auf die Klasse  $\Omega_i$  bezogenes gemitteltes Gütemaß des Merkmals  $c_v$

$k$  : Anzahl der Ausgangsklassen

Der Sonderfall  $i = j$  muß nicht explizit ausgeschlossen werden, da bei identischen Verteilungsdichten das Gütemaß stets den Wert Null annimmt und somit bei der Summenbildung keinen Beitrag liefert. Entsprechend der in Bild 4.2-3 dargestellten Matrix kann auch mit den klassenbezogenen, gemittelten Maßen eine Matrix aufgestellt werden, die in Bild 4.2-4 wiedergegeben ist. Da für jedes Merkmal nur ein Wert pro Ausgangsklasse berechnet wird, hat sich die Spaltenzahl der Matrix auf die Anzahl der Ausgangsklassen reduziert.

Ausgangsklassen				
	1	2		$k$
$c_1$	$\bar{G}_1 [1]$	$\bar{G}_1 [2]$		$\bar{G}_1 [k]$
$c_2$	$\bar{G}_2 [1]$	$\bar{G}_2 [2]$		$\bar{G}_2 [k]$
:				
$c_n$	$\bar{G}_n [1]$	$\bar{G}_n [2]$		$\bar{G}_n [k]$

$n$ : Anzahl der Merkmale

$k$ : Anzahl der Ausgangsklassen

$\bar{G}_v [i]$ : Gemitteltes Gütemaß des Merkmals  $c_v$  bezogen auf die Klasse  $\Omega_i$

Bild 4.2-4:

Matrix der klassenbezogenen, gemittelten Gütemaße

Die Merkmalsauswahl wird ebenso wie im vorangegangenen Verfahren durchgeführt. Es werden immer jene Zeilen und Spalten der Matrix gestrichen, in denen sich gerade der maximale Wert für  $G_v [i]$  befindet. Auf diese Weise werden Merkmale ausgesucht, die jeweils eine Klasse von den

noch verbleibenden anderen Ausgangsklassen optimal trennen. Ein gutes Gesamtergebnis kann deshalb nur erzielt werden, wenn jede einzelne Klasse berücksichtigt wird, d. h. wenn die Anzahl der ausgewählten Merkmale mindestens gleich der Anzahl der Ausgangsklassen ist. Werden weniger Merkmale verwendet, wird die Isolierung einzelner Klassen bevorzugt, da die Anzahl der ausgewählten Merkmale nicht ausreicht, um alle Klassen gleichermaßen zu berücksichtigen.

Die hier beschriebenen Verfahren zur Merkmalsauswahl verwenden ausschließlich Maße, die sich aus den eindimensionalen Verteilungsdichten der Merkmale ergeben. Diese Maße beschreiben jedoch nur jedes Einzelmerkmal separat und geben keine Auskunft über das Zusammenwirken der Merkmale im mehrdimensionalen Merkmalsraum. Aus diesem Grund sind diese Verfahren nur auf statistisch unabhängige Merkmale erfolgreich anwendbar. Der Einsatz dieser Verfahren richtet sich, wie bereits beschrieben, nach der Anzahl der auszuwählenden Merkmale und der Anzahl der Ausgangsklassen. Sind  $m$  die Anzahl der auszuwählenden Merkmale und  $k$  die Anzahl der Ausgangsklassen, so kann zusammenfassend folgende Fallentscheidung getroffen werden:

- 1)  $m < k$  : Verwendung der gemittelten Maße  $\bar{G}$  bzw.  $\bar{B}$  zur bestmöglichen Trennung aller Ausgangsklassen untereinander
- 2)  $k \leq m < \frac{k(k-1)}{2}$  : Verwendung der klassenbezogenen, gemittelten Maße  $\bar{G}[i]$  bzw.  $\bar{B}[i]$  zur bestmöglichen Trennung einzelner Klassen von allen anderen Ausgangsklassen
- 3)  $m \geq \frac{k(k-1)}{2}$  : Verwendung der ursprünglichen Maße  $G$  bzw.  $B$  zur bestmöglichen Trennung einzelner Klassenpaare

Selbstverständlich können die drei Verfahren auch ohne Berücksichtigung der Größenverhältnisse für  $m$  und  $k$  angewendet werden. Allerdings können dann bei den Fällen 2) und 3) die bereits erwähnten Bevorzugungen einzelner Klassen bzw. Klassenpaare auftreten. Andererseits können bei Einhaltung der vorgegebenen Größenverhältnisse für  $m$  und  $k$  die Fälle 2) und 3) im Gesamtergebnis eine wesentliche Verbesserung erzielen, da hier die Merkmale nach klassenspezifischer Aussagekraft ausgesucht werden.

## 4.2.2 Merkmalsauswahl über mehrdimensionale Verteilungsdichten

Soll bei der Merkmalsauswahl das Zusammenwirken der Merkmale untereinander berücksichtigt werden, so ist es

notwendig, die Berechnung der Maße  $G$  und  $B$  nicht nur an eindimensionalen, sondern an mehrdimensionalen Verteilungsdichten durchzuführen. Erst wenn festgestellt wird, inwieweit sich klassenbedingte Verteilungsdichten im gesamten mehrdimensionalen Merkmalsraum tatsächlich überlappen (siehe Bild 4.2-2), können die verwendeten Merkmalskombinationen richtig beurteilt werden. Prinzipiell ist der Übergang von ein- auf mehrdimensionale Verteilungsdichten zur Ermittlung von  $G$  und  $B$  kein Problem. Die nun folgenden Ausführungen werden jedoch deutlich machen, daß sich der Rechenaufwand für eine mehrdimensionale Merkmalsauswahl erheblich erhöht. Da das Gütemaß  $G$  und das Bewertungsmaß  $B$  von unterschiedlichen mathematischen Ansätzen ausgehen, müssen beide Maße getrennt betrachtet werden.

Für das Bewertungsmaß  $B$  kann der Übergang auf mehrdimensionale Verteilungsdichten sehr einfach formuliert werden. Der in Gleichung 4.1-3 (Seite 32) angegebene Bhattacharyya-Koeffizient  $b$  muß lediglich auf mehrere Merkmale erweitert werden. Dies erfolgt durch Einführung eines Mehrfachintegrals, wie es in Gleichung 4.2-2 angegeben ist.

$$b_{n \text{ dim}} = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} [w_{\Omega_1}(c_1, c_2, \dots, c_n) w_{\Omega_2}(c_1, c_2, \dots, c_n)] dc_1 \dots dc_n \quad (4.2-2)$$

$w_{\Omega_1}(c_1, c_2, \dots, c_n)$ : mehrdimensionale Verteilungsdichte aus  $n$  Merkmalen für die Klasse  $\Omega_1$

$w_{\Omega_2}(c_1, c_2, \dots, c_n)$ : mehrdimensionale Verteilungsdichte aus  $n$  Merkmalen für die Klasse  $\Omega_2$

Zur Ermittlung eines gemittelten Bewertungsmaßes  $B_{n \text{ dim}}$  muß  $b_{n \text{ dim}}$  entsprechend wie beim eindimensionalen Fall (siehe Gleichungen 4.1-4 und 4.1-5) logarithmiert werden und anschließend über alle Klassenpaare gemittelt werden.

$$B_{n \text{ dim}} = -\ln b_{n \text{ dim}} \quad (4.2-3)$$

$$\bar{B}_{n \text{ dim}} = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} B_{n \text{ dim}}[i; j] \quad (4.2-4)$$

Der Wert von  $B_{n \text{ dim}}$  zeigt an, ob die verwendete Kombination aus  $n$  Merkmalen zur Klassentrennung gut oder schlecht geeignet ist. Ebenso wie beim eindimensionalen Fall kann  $B_{n \text{ dim}}$  Werte zwischen 0 und  $\infty$  annehmen, wobei ein hoher Wert für  $B_{n \text{ dim}}$  eine gute Klassentrennung bedeutet.

Es ist offensichtlich, daß eine Merkmalsauswahl über  $\bar{B}_{n \text{ dim}}$  einen sehr hohen Rechenaufwand erfordert. Soll aus einer Gesamtanzahl von  $n$  Merkmalen die am besten geeignete Merkmalskombination, bestehend aus  $m$  Merkmalen,

ermittelt werden, ist es notwendig, Gleichung 4.2-2 für alle  $\binom{n}{m}$  möglichen Merkmalskombinationen zu berechnen. Da

in Gleichung 4.2-2 stets nur zwei klassenbedingte Verteilungsdichten berücksichtigt werden, erhöht sich bei mehreren Ausgangsklassen der Aufwand nochmals entsprechend der Anzahl der möglichen Klassenpaare gemäß Gleichung 4.2-4.

Zur Verallgemeinerung des Gütemaßes  $G$  auf mehrdimensionale Verteilungsdichten ist es zweckmäßig, für die Merkmale auf eine vektorielle Schreibweise überzugehen. Die Einzelmerkmale  $c_1$  bis  $c_n$  sind Komponenten des Merkmalvektors  $\underline{c}$ , der in Gleichung 4.2-5 dargestellt ist.

$$\underline{c} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} \quad (4.2-5)$$

Zur Beschreibung des mehrdimensionalen Gütemaßes werden nun zwei neue Parameter eingeführt, die sich wie folgt aus dem Merkmalvektor  $\underline{c}$  ergeben.

$$\underline{\mu} = E \{ \underline{c} \} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N {}^j \underline{c} \quad (4.2-6)$$

$$K = E \left\{ \left[ \underline{c} - \underline{\mu} \right] \left[ \underline{c} - \underline{\mu} \right]^T \right\} \quad (4.2-7)$$

- mit  $E \{ \}$  : Erwartungswert
- $N$  : Anzahl der Stichproben
- ${}^j \underline{c}$  : j-ter Merkmalvektor aus einer Stichprobenreihe
- $T$  : Symbol für transponierten Vektor

In Gleichung 4.2-6 ist der Mittelwertvektor  $\underline{\mu}$  dargestellt. Dieser Vektor beschreibt den Mittelwert einer mehrdimensionalen Verteilung, die durch verschiedene Merkmalvektoren gebildet wurde. Die in Gleichung 4.2-7 angegebene Größe  $K$  wird als Kovarianzmatrix bezeichnet.  $K$  gibt Auskunft über die Streuungen einer Verteilung innerhalb des mehrdimensionalen Merkmalsraumes. Beide Größen  $\underline{\mu}$  und  $K$  sind als Erwartungswert definiert und können nur über eine endliche Anzahl von Stichproben geschätzt werden. Wegen der Begrenzung auf eine endliche Anzahl von Stichproben müssen zur Berechnung der Schätzwerte von  $\underline{\mu}$  und  $K$  die Gleichungen 4.2-6 und 4.2-7 in die Gleichungen 4.2-8 und 4.2-9 überführt werden.

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N {}^j \underline{c} \approx \underline{\mu} \quad (4.2-8)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[ {}^j \underline{c} - \underline{\mu} \right] \left[ {}^j \underline{c} - \underline{\mu} \right]^T \approx K \quad (4.2-9)$$

Sind  $\underline{\mu}_1$  und  $\underline{\mu}_2$  sowie  $K_1$  und  $K_2$  die klassenbedingten Mittelwertvektoren und Kovarianzmatrizen der beiden Klassen  $\Omega_1$  und  $\Omega_2$ , so kann entsprechend dem eindimensionalen Fall in Gleichung 4.1-1 (Seite 32) ein mehrdimensionales Gütemaß  $G_{ndim}$  aufgestellt werden. Dieses Gütemaß berücksichtigt das Zusammenwirken aller im Merkmalvektor  $\underline{c}$  zusammengefaßten Einzelmerkmale und ist in Gleichung 4.2-10 dargestellt.

$$G_{ndim} = \left( \underline{\mu}_1 - \underline{\mu}_2 \right)^T \left[ \frac{1}{2} (K_1 + K_2) \right]^{-1} \left( \underline{\mu}_1 - \underline{\mu}_2 \right) \quad (4.2-10)$$

Die Erweiterung des Gütemaßes  $G_{ndim}$  auf mehr als zwei Ausgangsklassen erfolgt ebenso wie beim Bewertungsmaß  $B_{ndim}$  durch Mittelung über alle Klassenpaare.

$$\bar{G}_{ndim} = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} G_{ndim} [i; j] \quad (4.2-11)$$

Vergleichbar zum eindimensionalen Fall wird auch das mehrdimensionale Gütemaß  $G_{ndim}$  über statistische Kenngrößen berechnet, die eine Normalverteilung der Merkmalswerte voraussetzen. Aus diesem Grund wird hier die Annahme gemacht, daß die Merkmalvektoren innerhalb einer Ausgangsklasse eine mehrdimensionale Normalverteilung aufweisen. Ist diese Voraussetzung nicht gegeben, muß statt dem Gütemaß  $G_{ndim}$  das Bewertungsmaß  $B_{ndim}$  verwendet werden (siehe Kapitel 4.1.2 für eindimensionale Verteilungsdichten). Das Gütemaß  $G_{ndim}$  darf also nur zur Anwendung kommen, wenn sich die Verteilungsdichte des Merkmalvektors  $\underline{c}$  für eine beliebige Ausgangsklasse  $\Omega_i$  durch Gleichung 4.2-12 beschreiben läßt.

$$w_{\Omega_i}(\underline{c}) = \frac{1}{\sqrt{|2\pi K_i|}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \underline{c} - \underline{\mu}_i \right)^T K_i^{-1} \left( \underline{c} - \underline{\mu}_i \right) \right] \quad (4.2-12)$$

- $w_{\Omega_i}(\underline{c})$  : Klassenbedingte Verteilungsdichte des Merkmalvektors  $\underline{c}$  für die Klasse  $\Omega_i$
- $\underline{\mu}_i$  : Klassenbedingter Mittelwertvektor der Klasse  $\Omega_i$
- $K_i$  : Klassenbedingte Kovarianzmatrix der Klasse  $\Omega_i$
- $K_i^{-1}$  : Inverse Matrix zur Kovarianzmatrix  $K_i$

### 4.2.3 Der multiple Korrelationskoeffizient

Trotz der Einschränkung auf normalverteilte Merkmalvektoren läßt sich das Gütemaß  $G_{ndim}$  nur mit sehr hohem Re-

chenaufwand ermitteln. Für alle Ausgangsklassen müssen die Mittelwertvektoren und Kovarianzmatrizen gesondert berechnet werden und nach den Gleichungen 4.2-10 und 4.2-11 zusammengefaßt werden. Es wird daher nach einem Weg gesucht, die Auswahl der Merkmale zu vereinfachen. Hierzu werden in der Literatur [60 bis 63] mehrere Verfahren angegeben, die anhand der statistischen Abhängigkeiten der Merkmale untereinander eine Merkmalsauswahl durchführen. Eine Kenngröße zur Erfassung statistischer Abhängigkeiten ist die Korrelation, die im allgemeinen durch den Korrelationskoeffizienten  $r$  quantitativ beschrieben wird. Für zwei Merkmale  $c_1$  und  $c_2$  ist der Korrelationskoeffizient  $r_{12}$  in Gleichung 4.2-13 dargestellt.

$$r_{12} = \frac{E \{ (c_1 - E \{ c_1 \}) \cdot (c_2 - E \{ c_2 \}) \}}{\left[ E \{ (c_1 - E \{ c_1 \})^2 \} E \{ (c_2 - E \{ c_2 \})^2 \} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (4.2-13)$$

Der Korrelationskoeffizient kann Werte zwischen  $-1$  und  $+1$  annehmen, wobei Werte um Null eine geringe Korrelation und Werte nahe der Extrema eine hohe Korrelation anzeigen. Da der Unterschied zwischen positiver und negativer Korrelation für die Merkmalsauswahl unerheblich ist, wird als Maß für die statistische Abhängigkeit der Merkmale der Absolutbetrag des Korrelationskoeffizienten  $|r|$  verwendet. Zwei Merkmale, die einen sehr niedrigen Wert für  $|r|$  erbringen, sind nahezu unkorreliert und sind deshalb für die gleichzeitige Verwendung innerhalb einer Merkmalskombination besonders gut geeignet.

Das Problem bei der Berechnung des Korrelationskoeffizienten nach Gleichung 4.2-13 besteht darin, daß stets nur zwei Merkmale miteinander verglichen werden. Zur Aufstellung einer Merkmalskombination wäre es jedoch wünschenswert, wenn sich die Abhängigkeiten eines Merkmals zu allen anderen verwendeten Merkmalen in einer Kenngröße erfassen lassen. Hierzu wird der multiple Korrelationskoeffizient  $r$  eingeführt.

Werden die Komponenten  $c_2$  bis  $c_n$  des Merkmalsvektors  $\underline{c}$  aus Gleichung 4.2-5 in einem neuen Vektor  $\underline{c}_2$  zusammengefaßt, so entsteht ein Merkmalsvektor, wie er in Gleichung 4.2-14 dargestellt ist.

$$\underline{c} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ \underline{c}_2 \end{bmatrix} \quad (4.2-14)$$

Die Kovarianzmatrix dieses Vektors ist in Gleichung 4.2-15 wiedergegeben, wobei die Elemente  $k_{11}$  ein Skalar,  $\underline{k}_{12}$  einen Zeilenvektor,  $\underline{k}_{21}$  einen Spaltenvektor und  $K_{22}$  wiederum eine Matrix darstellen.

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & \underline{k}_{12} \\ \underline{k}_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \quad (4.2-15)$$

mit:  $k_{11}: E \{ (c_1 - E \{ c_1 \}) \cdot (c_1 - E \{ c_1 \}) \}$   
 $\underline{k}_{12}: E \{ (c_1 - E \{ c_1 \}) \cdot (c_2 - E \{ c_2 \})^T \}$   
 $\underline{k}_{21}: E \{ (c_2 - E \{ c_2 \}) \cdot (c_1 - E \{ c_1 \}) \}$   
 $K_{22}: E \{ (c_2 - E \{ c_2 \}) \cdot (c_2 - E \{ c_2 \})^T \}$

Wird  $E \{ c \} = 0$  vorausgesetzt<sup>1)</sup>, so können die Elemente der Kovarianzmatrix zu einer Größe zusammengefaßt werden, die in der Literatur [9] als multipler Korrelationskoeffizient bezeichnet wird.

$$\tilde{r} = \left[ \frac{\underline{k}_{21}^T K_{22}^{-1} \underline{k}_{21}}{k_{11}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.2-16)$$

Die Größe  $\tilde{r}$  ist ein Maß für die Korrelation des Einzelmerkmals  $c_1$  zu allen anderen Merkmalen  $c_2$  bis  $c_n$  des Vektors  $\underline{c}$ . Mit dem multiplen Korrelationskoeffizienten kann also die Aufnahme eines neuen Merkmals in eine bereits bestehende Merkmalskombination überprüft werden. Ergibt das neue Merkmal für  $r$  einen Wert nahe 1, so ist es nicht sinnvoll, dieses Merkmal zusätzlich einzuführen, da es mit den bereits vorhandenen Merkmalen stark korreliert ist. Besitzt der Vektor  $\underline{c}_2$  nur eine Komponente  $c_2$ , d. h. werden nur zwei Merkmale miteinander verglichen, so geht Gleichung 4.2-16 in 4.2-13 über.

Die Berechnung des multiplen Korrelationskoeffizienten  $\tilde{r}$  hat sich gegenüber  $G_{n \text{ dim}}$  (siehe Gleichungen 4.2-10 und 4.2-11) wesentlich vereinfacht, da hier keine klassenbedingten Verteilungsdichten zu berücksichtigen sind, sondern alle Daten im gesamten Merkmalsraum gleichzeitig betrachtet werden. Dennoch ist die Berechnung und Inversion einer Kovarianzmatrix erforderlich, was bei großen Datenmengen zu einem erheblichen Rechenaufwand führt. Eine für die Praxis ausreichende Größe, die dem multiplen Korrelationskoeffizienten sehr ähnlich ist, zeigt Gleichung 4.2-17.

$$r_{\max} = \max_i |r_{1i}| \quad (4.2-17)$$

mit:  $i = 2, \dots, n$

$r_{1i}$  = Korrelationskoeffizient nach Gleichung 4.2-13 für die beiden Merkmale  $c_1$  und  $c_i$

<sup>1)</sup>  $E \{ c \} = 0$  bedeutet, daß die Mittelwerte aller Merkmale gleich null sind. Diese Voraussetzung ist nicht zwingend erforderlich, sie erleichtert jedoch die mathematische Behandlung des Verfahrens zur Merkmalsauswahl.



Durch Mehrfachanwendung der Gleichung 4.2-13 wird der maximale Korrelationskoeffizient  $r_{\max}$  ermittelt, der zwischen dem Merkmal  $c_1$  und den Merkmalen  $c_2$  bis  $c_n$  auftritt. Anhand von  $r_{\max}$  kann überprüft werden, ob eine zusätzliche Verwendung des Merkmals  $c_1$  zu den bereits ausgewählten Merkmalen  $c_2$  bis  $c_n$  sinnvoll ist. Ergibt sich für  $r_{\max}$  ein sehr hoher Wert nahe 1, ist das Merkmal  $c_1$  für die Klassifizierung ohne Bedeutung, da es mit mindestens einem der bereits vorhandenen Merkmale stark korreliert ist.

Wird in Gleichung 4.2-17 der Ausdruck  $\max_i$  durch den Ausdruck  $\min_i$  ersetzt, erhält man den minimalen Korrelationskoeffizienten  $r_{\min}$ . Dieser zeigt die geringste Korrelation an, die das noch auszuwählende Merkmal  $c_1$  mit einem der bereits ausgewählten Merkmale  $c_2$  bis  $c_n$  besitzt. Zur Merkmalsauswahl ist  $r_{\min}$  jedoch nicht geeignet, da das Kriterium zur Übernahme von  $c_1$  nicht darin besteht, ob  $c_1$  mit einem der Merkmale  $c_2$  bis  $c_n$  besonders gering korreliert ist, sondern ob innerhalb der Merkmale  $c_2$  bis  $c_n$  bereits ein zu  $c_1$  vergleichbares Merkmal existiert. Aus diesem Grund wird zur Merkmalsauswahl der maximale Korrelationskoeffizient  $r_{\max}$  nach Gleichung 4.2-17 verwendet.

Das nun folgende Verfahren zur Merkmalsauswahl soll verdeutlichen, wie durch den Einsatz von  $r_{\max}$  bzw.  $\tilde{r}$  die Aufstellung einer Merkmalskombination unterstützt werden kann. Im Kapitel 4.2.1 wurden mehrere Verfahren vorgestellt, die unter Verwendung des Gütemaßes  $G$  bzw. des Bewertungsmaßes  $B$  eine Merkmalsauswahl ermöglichen. Diese Verfahren berücksichtigen jedoch nicht die statistischen Abhängigkeiten der Merkmale untereinander. Um die Korrelation der Merkmale in die Merkmalsauswahl mit einzubeziehen ist es möglich, die verwendeten Maße mit  $r_{\max}$  bzw.  $\tilde{r}$  zu kombinieren. Für das gemittelte Gütemaß  $\bar{G}$  und für den maximalen Korrelationskoeffizienten  $r_{\max}$  wird hierzu in der Literatur [9] eine Kombination angegeben, die in Gleichung 4.2-18 dargestellt ist.

$$\bar{G}^* = (1 - r_{\max}) \cdot \bar{G} \quad (4.2-18)$$

Das Maß  $\bar{G}^*$  wird als bewertetetes gemitteltes Gütemaß bezeichnet und kann ebenso wie das gemittelte Gütemaß  $\bar{G}$  (siehe Kapitel 4.1.1) Werte zwischen 0 und  $\infty$  annehmen. Je höher der Wert für  $\bar{G}^*$  ausfällt, desto besser ist das Merkmal als Erweiterung für die bereits bestehende Merkmalskombination geeignet. Der Wert null wird erreicht, wenn das gemittelte Gütemaß  $\bar{G}$  gleich null ist, d. h. wenn die klassenbedingten Verteilungsdichten des auszuwählenden Merkmals gleiche Mittelwerte aufweisen (siehe Gleichung 4.1-1, Seite 32).  $\bar{G}^*$  wird ebenfalls null, wenn das auszuwählende Merkmal mit einem bereits ausgewählten Merkmal vollständig korreliert ist ( $r_{\max} = 1$ ). Hohe Werte

für  $\bar{G}^*$  werden nur erzielt, wenn das auszuwählende Merkmal einen hohen Wert für  $\bar{G}$  aufweist und mit allen bereits ausgewählten Merkmalen nur gering korreliert ist.

Selbstverständlich lassen sich in Gleichung 4.2-18 auch alle anderen Maße aus Kapitel 4.2.1 verwenden. Ebenso kann für  $r_{\max}$  auch der multiple Korrelationskoeffizient  $\tilde{r}$  eingesetzt werden. Die Verwendung von  $\tilde{r}$  ist jedoch nur erforderlich, wenn alle noch auszuwählenden Merkmale etwa gleiche Werte für  $r_{\max}$  erzielen und deshalb nicht nur die maximalen Korrelationen, sondern die Korrelationen zu allen bereits ausgewählten Merkmalen berücksichtigt werden sollen.

Um den Rechenaufwand möglichst gering zu halten, wird die in Gleichung 4.2-18 eingeführte Bewertung bei der Merkmalsauswahl nur schrittweise angewandt. Sollen aus einer Anzahl von  $n$  Merkmalen  $m$  Merkmale ausgewählt werden, so erfolgt die Auswahl des ersten Merkmals unverändert nach der in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Methode. Für alle  $n$  Merkmale werden die Werte eines Maßes berechnet, wobei das erste Merkmal nach dem maximal auftretenden Wert ausgesucht wird. Erst für die Auswahl der folgenden Merkmale werden nun Bewertungen nach Gleichung 4.2-18 durchgeführt. Hierzu werden stets die noch nicht ausgewählten Merkmale mit den bereits ausgewählten Merkmalen korreliert. Aus den sich ergebenden Korrelati-

onskoeffizienten ( $r_{\max}$  bzw.  $\tilde{r}$ ) und den dazugehörigen, anfangs errechneten Maßen werden nach Gleichung 4.2-18 die neuen bewerteten Maße ermittelt. Diese neuen, in Gleichung 4.2-18 mit \* bezeichneten Maße bilden die Grundlage für die jeweils anstehende Merkmalsauswahl. Die Auswahl erfolgt, vergleichbar zur Auswahl des ersten Merkmals, anhand des höchsten Wertes, der für diese bewerteten Maße erzielt wird. Dieser Vorgang wird für jedes neu auszuwählende Merkmal wiederholt. Für eine Auswahl von  $m$  Merkmalen sind also  $m-1$  Auswahlsschritte mit Bewertung erforderlich. Die Tatsache, daß bei jedem Auswahlsschritt die Korrelation der bereits ausgewählten Merkmale mit den noch nicht ausgewählten Merkmalen überprüft wird, hat zur Folge, daß die letztlich entstehende Merkmalskombination aus Einzelmerkmalen besteht, die untereinander möglichst statistisch unabhängig sind.

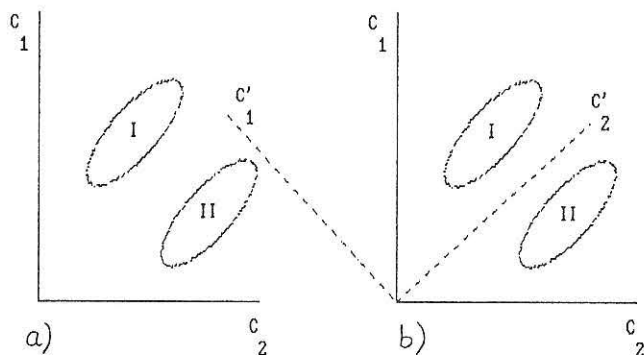
### 4.3 Die Hauptkomponententransformation

Die Hauptkomponententransformation [3, 32, 60 bis 63] ist ein Verfahren zur Beurteilung einer vorgegebenen Merkmalskombination. Im Gegensatz zum Gütemaß und Bewertungsmaß, die stets an ausgewählten klassenbedingten Verteilungsdichten berechnet werden, wird bei der Hauptkomponententransformation der gesamte Datensatz des mehrdimensionalen Merkmalsraumes geschlossen ausgewertet. Aus der Verteilung aller Merkmalswerte lassen sich, auch ungeachtet einer Klassenzuordnung, wichtige Infor-

mationen entnehmen, die das Zusammenwirken der Einzelmerkmale beschreiben. Werden z. B. in einer Merkmalskombination Einzelmerkmale verwendet, die untereinander statistisch abhängig sind, so zeigt sich diese Abhängigkeit in einer ausgeprägten richtungsorientierten Anordnung der Merkmalswerte im Merkmalsraum. Ziel der Hauptkomponententransformation ist es, derartige Abhängigkeiten der Merkmale zu erkennen und durch Neugestaltung des Merkmalsraumes die Anzahl der Merkmale auf wenige, aber sehr aussagekräftige Merkmale zu reduzieren. Aus der Neugestaltung des Merkmalsraumes können gleichzeitig die Einzelmerkmale der Merkmalskombination beurteilt werden.

### 4.3.1 Das Prinzip der Hauptkomponententransformation

Um die Vorgehensweise bei der Hauptkomponententransformation zu verdeutlichen, wird vorerst nur ein zweidimensionaler Merkmalsraum betrachtet. In diesem Merkmalsraum sollen sich zwei ausgeprägte Anhäufungen von Merkmalswerten befinden, die im *Bild 4.3-1a* durch die beiden Bereiche I und II dargestellt sind. Weder das



*Bild 4.3-1:*  
Drehung des Koordinatensystems bei der Hauptkomponententransformation.

- a) ursprüngliches Koordinatensystem,
- b) gedrehtes Koordinatensystem

Merkmal  $c_1$  noch das Merkmal  $c_2$  ist, für sich allein angewendet, in der Lage, diese beiden Anhäufungen voneinander zu trennen. Bei den Projektionen der beiden Bereiche auf die  $c_1$  bzw.  $c_2$ -Achse kommt es stets zu Überschneidungen. Erst durch eine Drehung des Koordinatensystems ist es möglich, die Trennung der beiden Anhäufungen auf nur ein Merkmal zu reduzieren. Das gedrehte Koordinatensystem ist im *Bild 4.3-1b* gestrichelt eingezeichnet. Die beiden Anhäufungen können hier durch die alleinige Verwendung des Merkmals  $c'_1$  getrennt werden. Die beiden Merkmale  $c'_1$  und  $c'_2$  sind Linearkombinationen aus den ursprünglichen Merkmalen  $c_1$  und  $c_2$ .

Die Drehung des Koordinatensystems ist bei der Hauptkomponententransformation abhängig vom vorliegenden Datensatz und wird so durchgeführt, daß die erste Hauptkomponente stets maximale Varianz aufweist. Die Orientierung der  $c'_1$ -Achse in *Bild 4.3-1b* ist also dadurch gekennzeichnet, daß die Varianz aller Merkmalswerte in dieser Richtung am größten ist. Die Orientierung der  $c'_2$ -Achse ergibt sich aus der Forderung, daß alle Hauptkomponenten orthogonal zueinander sind. Die  $c'_2$ -Achse steht also senkrecht auf der  $c'_1$ -Achse und ist somit im hier vorliegenden zweidimensionalen Fall durch die Richtung der  $c'_1$ -Achse festgelegt. Bei mehrdimensionalen Merkmalsräumen besteht jedoch die Möglichkeit, trotz Orthogonalität, die Hauptkomponenten nacheinander auf maximale Varianz auszurichten. Es entsteht also eine Rangfolge von Hauptkomponenten, die nach abnehmender Varianz geordnet sind.

Mathematisch läßt sich die Hauptkomponententransformation auf das Eigenwertproblem einer Kovarianzmatrix zurückführen. Ist  $K$  die Kovarianzmatrix des  $n$ -dimensionalen Merkmalsvektors  $\underline{c} = (c_1, c_2, \dots, c_n)^T$ , dann lassen sich aus der charakteristischen Gleichung

$$\det(K - \lambda I) = 0 \quad (4.3-1)$$

mit  $\det(\ )$ : Determinante

$\lambda$  : Eigenwert

$I$  : Einheitsmatrix

$n$  Eigenwerte ermitteln, die so geordnet werden, daß  $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_n$  ist. Durch Einsetzen der Eigenwerte in die Gleichung 4.3-2 werden die jeweils zugehörigen Eigenvektoren bestimmt.

$$(K - \lambda_m I) \underline{e}_m = \underline{0} \quad (4.3-2)$$

für  $m = 1, 2, \dots, n$

mit  $\underline{0}$  : Nullvektor

$\underline{e}_m$  : Eigenvektor zum Eigenwert  $\lambda_m$

Jeder Eigenvektor  $\underline{e}_m$  besitzt  $n$  Koordinaten und hat somit die gleiche Dimensionalität wie der Merkmalsvektor  $\underline{c}$ . Die Hauptkomponenten des Merkmalsvektors  $\underline{c}$  sind die Linearkombinationen

$$\underline{e}_1^T \cdot \underline{c}; \underline{e}_2^T \cdot \underline{c}; \dots; \underline{e}_n^T \cdot \underline{c}$$

wobei die Eigenvektoren die Richtungen der Hauptkomponenten angeben. Da die Varianzen der Linearkombinationen gleich der Eigenwerte der Kovarianzmatrix sind, besitzt die erste Hauptkomponente  $\underline{e}_1^T \cdot \underline{c}$  wegen der oben eingeführten Bedingung

$$\lambda_{i-1} > \lambda_i \quad \text{für } i = 2, 3, \dots, n$$

maximale Varianz. Alle folgenden Hauptkomponenten sind nach abnehmender Varianz geordnet.

### 4.3.2 Beurteilung von Einzelmerkmalen

Das Kriterium der maximalen Varianz, das zur Entwicklung der Hauptkomponenten verwendet wird, führt dazu, daß die Linearkombinationen optimale Merkmale für den vorliegenden Datensatz darstellen. Wenn ein Merkmal eine große Varianz über alle Klassen aufweist, kann auch davon ausgegangen werden, daß die Mittelwerte der klassenbedingten Verteilungen bei diesem Merkmal weit auseinander liegen. Große Abstände zwischen den Mittelwerten der klassenbedingten Verteilungen sind jedoch eine wichtige Voraussetzung für eine gute Klassentrennung und bestimmen maßgebend die Güte eines Merkmals (siehe Gleichung 4.1-1, Seite 32). Die bei der Hauptkomponententransformation erzeugten Linearkombinationen sind also wegen der abnehmenden Varianz zugleich nach ihrer Bedeutung geordnet. Die erste Hauptkomponente ist somit das für den vorliegenden Datensatz wichtigste Merkmal.

Um eine Beurteilung der verwendeten Einzelmerkmale vornehmen zu können, muß nun festgestellt werden, inwieweit diese Einzelmerkmale an der ersten Hauptkomponente beteiligt sind. Hierüber geben die Koordinaten des ersten Eigenvektors  $\underline{e}_1$  Auskunft. Bei der ersten Linearkombination

$$\underline{e}_1^T \cdot \underline{c} = \begin{bmatrix} e_{11} \\ e_{12} \\ \vdots \\ e_{1n} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} = e_{11} \cdot c_1 + e_{12} \cdot c_2 + \dots + e_{1n} \cdot c_n$$

treten die Koordinaten des Eigenvektors  $\underline{e}_1$  als Faktoren der Einzelmerkmale  $c_1, c_2, \dots, c_n$  auf. Die Anteile der ursprünglich verwendeten Einzelmerkmale an der ersten Hauptkomponente sind also durch die Koordinaten  $e_{11}, e_{12}, \dots, e_{1n}$  bestimmt.

Im allgemeinen werden Eigenvektoren so normiert, daß ihr Betrag gleich 1 wird. Für die Koordinaten des Eigenvektors  $\underline{e}_1$  gilt somit:

$$e_{11}^2 + e_{12}^2 + \dots + e_{1n}^2 = 1$$

Eine Beurteilung der Einzelmerkmale kann nun anhand der Gleichung 4.3-3 vorgenommen werden.

$$EM_m = e_{1m}^2 \cdot 100 \quad (4.3-3)$$

für  $m = 1, 2, \dots, n$

Der Wert von  $EM_m$  gibt an, zu wieviel Prozent das  $m$ -te Einzelmerkmal an der ersten Hauptkomponente beteiligt ist. Werden für alle  $n$  Einzelmerkmale einer Merkmalskombination die Werte  $EM_m$  getrennt ermittelt, kann aus der Verteilung aller  $EM_m$ -Werte eine Rangfolge der Einzelmerkmale nach ihrer Aussagekraft aufgestellt werden. Je höher der  $EM_m$ -Wert für ein Merkmal ausfällt, desto aussagekräftiger ist dieses Merkmal für die Klassifizierung.

### 4.3.3 Beurteilung von Merkmalskombinationen

Sollen mit der Hauptkomponententransformation nicht nur Einzelmerkmale, sondern Merkmalskombinationen beurteilt werden, ist es notwendig, alle Linearkombinationen zu betrachten. Die Varianzen der einzelnen Linearkombinationen geben Aufschluß über die statistische Abhängigkeit der verwendeten Einzelmerkmale. Eine Merkmalskombination, die nach der Transformation in allen Hauptkomponenten hohe Varianzen erzielt, besitzt statistisch unabhängige Einzelmerkmale. Treten dagegen nur in den ersten Hauptkomponenten hohe Varianzen auf, sind die Einzelmerkmale korreliert. Es ist also zu überprüfen, wie stark die Varianzen bei höherwertigen Hauptkomponenten abnehmen.

Da die Varianzen der Hauptkomponenten durch die Eigenwerte der Kovarianzmatrix repräsentiert werden, kann die Beurteilung einer Merkmalskombination auch durch die Eigenwerte dieser Matrix erfolgen. Dabei wird von den bereits sortierten Eigenwerten  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$  ausgegangen. Es werden die prozentualen kumulativen Eigenwerte  $pke(k)$  nach Gleichung 4.3-4 berechnet.

$$pke(k) = \frac{\sum_{m=1}^k \lambda_m}{\sum_{m=1}^n \lambda_m} \cdot 100 \quad (4.3-4)$$

für  $k = 1, 2, \dots, n$

$n$ : Anzahl der Einzelmerkmale, die in der Merkmalskombination verwendet werden

Die Funktion  $pke(k)$  zeigt an, welche prozentualen Anteile am Gesamtergebnis, bezogen auf die Verwendung aller Hauptkomponenten, bei zunehmender Anzahl der Eigenwerte erzielt werden. Der Verlauf von  $pke(k)$  gibt Auskunft über die Bedeutung der einzelnen Hauptkomponenten und gestattet somit eine Beurteilung der gesamten Merkmalskombination. Erreicht  $pke(k)$  hohe Werte bei niedrigen Werten für  $k$ , so besteht die Merkmalskombination aus Einzelmerkmalen, die stark miteinander korreliert sind. Ergeben sich hohe Werte für  $pke(k)$  jedoch erst bei hohen Werten für  $k$ , so sind die Einzelmerkmale untereinander statistisch unabhängig.

## 5. Erprobung und Auswertung der Merkmale an realen Schweißnahtaufnahmen

Im allgemeinen können erfahrene Auswerter aus der Abbildung eines Schweißnahtfehlers auf dem Röntgenfilm den Fehlertyp sicher bestimmen. Grenzfälle treten jedoch immer dort auf, wo das Fehlerbild durch mangelnde Kontraste, unscharfe Abbildungen oder Überlagerungen mit anderen Bildstrukturen gestört ist. Diese Einflüsse beeinträchtigen nicht nur die visuelle Auswertung, sondern sind selbstverständlich auch bei der Beschreibung der Schweißnahtfehler durch Merkmale von Bedeutung. Geringe Veränderungen in den Abbildungen der Fehler können sich bei empfindlichen Merkmalen erheblich auf die Fehlertypenbestimmung auswirken. Es ist daher unbedingt erforderlich, die Merkmale an einer möglichst großen Zahl unterschiedlicher Schweißnahtfehler, die unter realen Bedingungen aufgenommen wurden, zu testen. Aus diesem Grund wurde für die hier durchzuführenden Untersuchungen ein Schweißnahtkatalog verwendet, der eine Vielzahl praktischer Beispiele zu den wichtigsten Fehlertypen enthält.

Nach einer kurzen Beschreibung des Fehlerkatalogs werden in diesem Kapitel die Merkmale auf die Abbildungen der natürlichen Schweißnahtfehler angewendet. Die Beurteilung der Merkmale erfolgt nach den statistischen Verfahren, die im vorangegangenen Kapitel dargestellt wurden.

### 5.1 Eine Bilddatenbank mit katalogisierten Schweißnahtfehlern

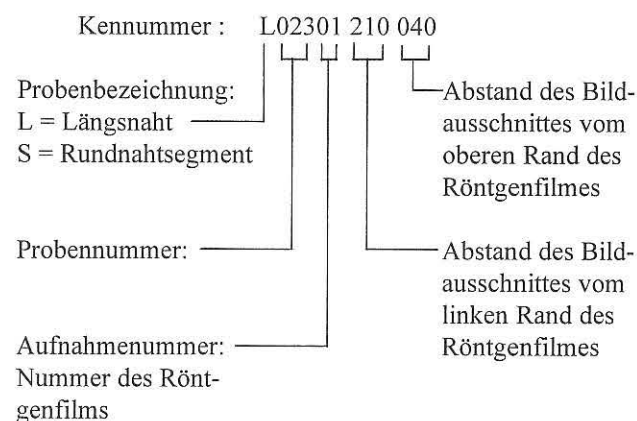
#### 5.1.1 Das Bildmaterial

Im Rahmen eines von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und dem Betriebsforschungsinstitut (BFI) gemeinsam durchgeführten Forschungsvorhabens [38] wurde ein Schweißnahtkatalog erstellt, der über 80 Röntgenfilme von ebenen Schweißnähten und Rundnahtsegmenten enthält. Es wurden ausschließlich handgeschweißte Nähte verwendet, die im unbeschleunigten Zustand durchstrahlt wurden. Die Proben bestanden aus dem Werkstoff ST 37 und wurden elektrisch geschweißt. Die Materialdicken und die Schweißnahtformen der Proben waren unterschiedlich. Die Probensammlung enthält X- und V-Nähte mit Wanddicken von 8 mm bis 20 mm. Die Durchstrahlungsaufnahmen der Schweißnahtproben wurden unter Einhaltung der in DIN 54 111, Teil 1 vorgegebenen Parameter (z. B. Strahlenenergie, Film-Fokus-Abstand, Film-Folien-Kombination, Mindestschwärzung, usw.) angefertigt. Aus den Aufnahmen wurden 160 Bildausschnitte ausgewählt, in denen insgesamt 542 Schweißnahtfehler abgebildet sind.

Die Bildausschnitte wurden, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, mit einer Fernsehkamera abgetastet und als Rasterbilder mit 512x512 Bildpunkten und 256 Graustufen pro Bildpunkt in

der Bilddatenbank abgelegt. Die Größe der Bildausschnitte auf den Röntgenfilmen betrug stets 3x3 cm<sup>2</sup>, so daß die Rasterbilder eine geometrische Auflösung von ungefähr 50x50 µm<sup>2</sup> pro Bildpunkt aufweisen.

Jedem Bildausschnitt ist eine Kennnummer zugeordnet, an der die Probe, die Aufnahme und die Position des Bildausschnittes auf dem Röntgenfilm abgelesen werden können. Als Beispiel ist hier die Kennnummer eines Bildausschnittes einer ebenen Schweißnaht dargestellt.



Zusätzlich zu den Grautonbildern wurden auch die Ergebnisse der automatischen Fehlererkennungen, d. h., die Binärbilder mit den detektierten Fehleranzeigen (siehe Kapitel 2.3), gespeichert. Da durch den Segmentierungsalgorithmus nicht alle Fehler einwandfrei erkannt wurden, war eine Nachverarbeitung der Binärbilder erforderlich. Segmentierungen, die nicht die gesamte Fläche einer Fehlerabbildung erfaßten, also den Fehler nur teilweise detektierten, wurden aus dem Binärbild entfernt. Ebenso wurden Scheinanzeigen, die durch das Segmentierungsverfahren irrtümlich als Fehler erkannt wurden, aus dem Binärbild herausgenommen. Zur Auswertung der Merkmale wurden also nur Binärbilder verwendet, die ausschließlich vollständig detektierte Fehleranzeigen enthielten.

Am Beispiel eines ausgewählten Bildpaares (Grautonbild und Binärbild) wird nun der Aufbau der Datenbank beschrieben.

#### 5.1.2 Aufbau der Datenbank

Die Datenbank enthält neben den Grauton- und Binärbildern der ausgewählten Schweißnahtabschnitte weitere Informationen, die sowohl den Prüfgegenstand als auch die Erstellung und den Inhalt der Bilder näher beschreiben. Zu jedem Bildpaar sind vier Protokolle gespeichert, die im einzelnen folgende Sachverhalte dokumentieren:

- Probenprotokoll  
Dieses Protokoll enthält alle wichtigen Angaben zur Schweißnahtprobe, wie z. B. Grundwerkstoff, Wanddicke, Nahtlänge usw. und gibt zusätzlich Auskunft über das Schweißverfahren und den Nahtzustand.
- Aufnahmeprotokoll  
Im Aufnahmeprotokoll sind die Bedingungen festgehalten, unter denen die Röntgenaufnahme angefertigt wurde. Hier sind die Angaben zur Aufnahmeanordnung, zur Strahlenquelle, zur verwendeten Film/Folien-Kombination usw. dokumentiert.
- Videoprotokoll  
Das Videoprotokoll gibt Auskunft, unter welchen Bedingungen der Röntgenfilm abgetastet wurde. Es enthält Informationen über das Abtastsystem (TV-Kamera) und zeigt an, an welcher Stelle sich der abgetastete Bildausschnitt auf dem Röntgenfilm befindet.
- Fehlerprotokoll  
Dieses Protokoll beschreibt alle im Bildausschnitt befindlichen Fehler. Zu jedem einzelnen Fehler werden die von der Merkmalsextraktion ermittelten Fehlermerkmale und das Ergebnis einer visuellen Typenklassifizierung eingetragen. Die visuelle Typenklassifizierung erfolgte durch Auswertung der Schweißnahtaufnahmen am Filmbetrachtungsgerät mit erfahrenem Fachpersonal.

Eine ausführliche Darstellung der Protokolle erfolgt anhand des Bildpaares, das im *Bild 5.1-1* wiedergegeben ist. Das links dargestellte Grautonbild zeigt die Durchstrahlungsaufnahme einer ebenen Längsnaht, in der mehrere Poren enthalten sind. Im rechten Binärbild sind die Fehler angezeigt, die zur Auswertung der Merkmale in die Datenbank eingetragen wurden.

Die Protokolle zu diesem Bildpaar befinden sich auf den Seiten 99 bis 103. Die im Proben- und Aufnahmeprotokoll

abgespeicherten Daten dienen vornehmlich der Überprüfung der Durchstrahlungsaufnahme. Durch die Zusammenfassung der Objektangaben und durch die ausführliche Beschreibung der Aufnahmeparameter ist es möglich, auch zu einem späteren Zeitpunkt die Durchstrahlungsaufnahme unter nahezu gleichen Bedingungen zu erstellen. Zur Wiederholung der Bildabtastung sind alle notwendigen Daten im Videoprotokoll eingetragen.

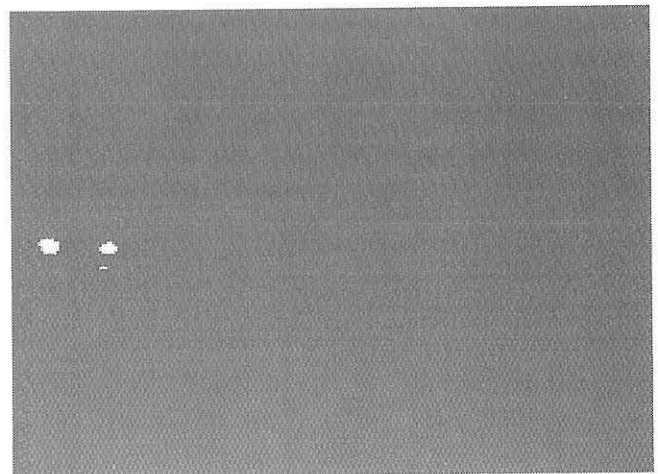
Die zur Auswertung der Merkmale wichtigen Daten befinden sich jedoch im Fehlerprotokoll. Entsprechend der Anzahl der Fehler im Binärbild enthält das Fehlerprotokoll drei Datensätze. Welcher Datensatz zu welchem Fehler gehört, kann anhand der Koordinaten ermittelt werden, die unter dem Begriff "Fehlerregion" abgespeichert sind. Dabei beschreiben  $(x_1, y_1)$  die linke obere Ecke und  $(x_2, y_2)$  die rechte untere Ecke des umschreibenden Rechtecks des jeweiligen Fehlers.

Das Ergebnis der visuellen Fehlertypenauswertung ist unter dem Begriff "DIN-Ordnungsnummer" eingetragen. Hier wurden die Ordnungsnummern verwendet, die als Kurzzeichen für Schweißnahtfehler in der DIN 8524 festgelegt sind. Ein Auszug aus dieser DIN für die wichtigsten Schweißnahtfehler befindet sich im Anhang B dieser Arbeit. Für alle drei Fehler wurde die Ordnungsnummer 2011 eingetragen, d. h., alle Fehler wurden bei der visuellen Auswertung als Poren erkannt.

Die Fehlermerkmale, die für jeden Fehler berechnet wurden, sind in den jeweiligen Datensätzen enthalten. Zusätzlich zu den Fehlermerkmalen sind auch für jeden Fehler die Koordinaten der Flächenschwerpunkte  $x_s$  und  $y_s$  angegeben, um eventuelle nachträgliche Veränderungen bei der Berechnung der Merkmale *FAH* und *FFA* (siehe Kap. 3.4.2.2) vornehmen zu können.



Grautonbild



Binärbild

*Bild 5.1-1 :*  
*Bildpaar zur Kennnummer L02501 060 035*

PROBENPROTOKOLL

Probenbezeichnung	L025
Nennweite in mm (nur bei Rundnähten)	–
Wanddicke in mm	8
Nahtlänge in mm	85
Schweißverfahren	1
1 = elektrisch	
2 = autogen	
3 = WIG	
4 = MIG	
5 = unter Pulver	
Grundwerkstoff	ST.37
Zusatzwerkstoff	unbekannt
Flankenwinkel in Grad	20
Nahtform	V-Naht
Nahtzustand	1
1 = unbeschiffen	
2 = beschiffen	
3 = Decklage beschiffen	
4 = Wurzellage beschiffen	

AUFNAHMEPROTOKOLL

Probenbezeichnung	L025
Aufnahmenummer	1
Aufnahmeanordnung (nach DIN 54 111, T1)	1/1
Einstrahlwinkel in Grad	45
Film-Fokus-Abstand in mm	800
Röhrentyp	MG320
Röhrenspannung in kV	170
Röhrenstrom in mA	10
Brennfleck-Abmessung in mm	4
Filmtyp	D4
Emulsionsnummer	1234
Verwendete Folien (Vorder- und Hinterfolie)	0,02 mm Blei
Verpackungsart	Vakuumverpackung
Bildgüteprüfkörper	BPK nach DIN 54 109
Belichtungszeit in s	120
Schwärzung	2.80
Filmentwicklung	Maschinenentwicklung
Entw. und Fixierer	Agfa G135 A,B,C / Agfa G335 A,B
Datum der Aufnahme	16.09.1983

VIDEOPROTOKOLL

Probenbezeichnung	L025
Aufnahmenummer	1
Filmausschnittskoord. (x,y)	60, 35
x = Abstand des Bildauschnitts vom linken Rand des Röntgenfilms in mm	
y = Abstand des Bildauschnitts vom oberen Rand des Röntgenfilms in mm	
Ausschnittsfläche in cm <sup>2</sup>	3 x 3
Kameratyp	Videcon (Hamamatsu C 1000)
Anzahl der Integrationen der Kamerabilder beim Bildeinzug	20
Blende des Kameraobjektivs	3.50
Datum der Aufnahme	01.11.1988

FEHLERPROTOKOLL (1. Datensatz von 3)

Probenbezeichnung	L025
Aufnahmenummer	1
Filmausschnittskoord. (x,y)	60, 35
Fehlerregion: (x <sub>1</sub> ,y <sub>1</sub> )	75, 276
(x <sub>2</sub> ,y <sub>2</sub> )	77, 278
DIN-Ordnungsnummer	2011

Fehlermerkmale:

Fehlerfläche (FFL)	1.00
Konturlänge (KTL)	1.00
Normierter Formfaktor (NFF)	0.93
Convexer norm. Formfaktor (CNF)	0.95
Flächenschwerpunkt (FSP)	0.17
Flächenausdehnung (FAD)	0.89
Fehlerkontrast (KON)	0.08
Homogenität (HOM)	0.02
Flankenverlauf (FLV)	0.04
Ort d. max. Tiefenausdehnung (OMT)	0.11
Gewicht. Flächenschwerpunkt (GFS)	0.08
Fehlerlage (FLA)	0.22
Fehlerrichtung (RTG)	0.70
Fehleranhäufung (FAH)	0
Form d. Fehleranhäufung (FFA)	–
Flächenschwerpunktskoord. (x <sub>s</sub> ,y <sub>s</sub> )	76.16, 277.16

Probenbezeichnung		L025
Aufnahmenummer		1
Filmausschnittskoord. $(x,y)$		60, 35
Fehlerregion:	$(x_1,y_1)$	73, 257
	$(x_2,y_2)$	86, 266
DIN-Ordnungsnummer		2011
Fehlermerkmale:		
Fehlerfläche	$(FFL)$	0.94
Konturlänge	$(KTL)$	0.95
Normierter Formfaktor	$(NFF)$	0.95
Convexer norm. Formfaktor	$(CNF)$	0.98
Flächenschwerpunkt	$(FSP)$	0.13
Flächenausdehnung	$(FAD)$	0.95
Fehlerkontrast	$(KON)$	0.12
Homogenität	$(HOM)$	0.12
Flankenverlauf	$(FLV)$	0.18
Ort d. max. Tiefenausdehnung	$(OMT)$	0.24
Gewicht. Flächenschwerpunkt	$(GFS)$	0.17
Fehlerlage	$(FLA)$	0.16
Fehlerrichtung	$(RTG)$	0.89
Fehleranhäufung	$(FAH)$	0
Form d. Fehleranhäufung	$(FFA)$	–
Flächenschwerpunktskoord.	$(x_s,y_s)$	81.34, 262.59

Probenbezeichnung		L025
Aufnahmenummer		1
Filmausschnittskoord. $(x,y)$		60, 35
Fehlerregion:	$(x_1,y_1)$	26, 255
	$(x_2,y_2)$	40, 266
DIN-Ordnungsnummer		2011
Fehlermerkmale:		
Fehlerfläche	$(FFL)$	0.91
Konturlänge	$(KTL)$	0.90
Normierter Formfaktor	$(NFF)$	0.96
Convexer norm. Formfaktor	$(CNF)$	0.98
Flächenschwerpunkt	$(FSP)$	0.14
Flächenausdehnung	$(FAD)$	0.95
Fehlerkontrast	$(KON)$	0.31
Homogenität	$(HOM)$	0.23
Flankenverlauf	$(FLV)$	0.27
Ort d. max. Tiefenausdehnung	$(OMT)$	0.33
Gewicht. Flächenschwerpunkt	$(GFS)$	0.26
Fehlerlage	$(FLA)$	0.19
Fehlerrichtung	$(RTG)$	0.61
Fehleranhäufung	$(FAH)$	0
Form d. Fehleranhäufung	$(FFA)$	–
Flächenschwerpunktskoord.	$(x_s,y_s)$	34.02, 261.84

### 5.1.3 Festlegung der Ausgangsklassen

Das gesamte Datenmaterial der Fehlerprotokolle umfaßt 509 Datensätze, die 11 verschiedene Fehlertypen beschreiben. Zur Erprobung der Merkmale stehen also 509 Fehlerabbildungen zur Verfügung, die sich in unterschiedlicher Anzahl auf verschiedene Fehlertypen verteilen. Wieviele Fehler pro Fehlertyp in der Datenbank eingetragen sind, zeigt die Aufstellung auf der Seite 46 oben links.

Einige Fehlertypen, wie z. B. Einbrandkerben, Endkraterisse, Porenketten, Lunker usw., sind hier nicht aufgeführt, da sie entweder in der Probensammlung nicht enthalten waren oder vom verwendeten Segmentierungsverfahren nicht einwandfrei detektiert wurden (siehe Kapitel 5.1.1,

Seite 42). Bezüglich der Fehleranhäufungen (Porennest (2013), Schlackenzeilen (3011 und 3021)) muß darauf hingewiesen werden, daß sich die hier angegebene Anzahl der Datensätze nicht auf die Anhäufungen selbst, sondern auf die Einzelfehler bezieht, die bei der visuellen Auswertung derartigen Anhäufungen zugeordnet wurden.

Die Erprobung der Merkmale wird nun folgendermaßen durchgeführt. Die in Kapitel 3 aufgeführten Merkmale werden auf alle 509 Einzelfehler angewendet und nach den in Kapitel 4 beschriebenen Verfahren beurteilt. Dabei spielen die beiden Merkmale *FAH* und *FFA* eine besondere Rolle, da diese Merkmale nicht zur Beschreibung von Einzelfehlern, sondern nur zur Erkennung und Beschreibung von Fehleranhäufungen eingesetzt werden. Aus diesem

DIN Ord.-Nr.	Fehlertyp	Anzahl der Datensätze
101	Längsriß	20
102	Querriß	38
2011	Pore	144
2013	Porennest	78
2016	Schlauchpore	65
301	Schlacke (abgerundet)	31
3011	Schlackenzeile	16
302	Schlacke (scharfkantig)	39
3021	Schlackenzeile	22
401	Bindefehler	20
402	ung. Durchschweißung	36

Grund werden die beiden Merkmale *FAH* und *FFA* zu einem späteren Zeitpunkt gesondert untersucht. Vorerst werden also nur alle objektbezogenen Merkmale und die beiden kontextbezogenen Merkmale *FLA* und *RTG* berücksichtigt (siehe Anhang A, insgesamt 13 Merkmale). Da bei diesen Merkmalen nur Einzelfehler zur Anwendung kommen, werden die Datensätze der Porennester den Poren und die Datensätze der Schlackenzeilen den Schlacken zugeordnet.

Weiterhin muß berücksichtigt werden, daß die Merkmale nicht für alle Fehlertypen die gleiche Bedeutung besitzen. Das Merkmal *RTG* wird sicherlich zur Trennung von Längs- und Querrissen gut geeignet sein, während es bei der Unterscheidung von Poren und Schlacken keine besondere Rolle spielt. Die Bedeutung der Merkmale hängt also entscheidend davon ab, welche Fehlertypen voneinander getrennt werden sollen. Auch in der Praxis werden bei der Beurteilung von Schweißnähten häufig unterschiedliche Anforderungen an die Fehlertypenbestimmung gestellt. In einigen Fällen ist eine Unterscheidung in Längs- und Querrisse erwünscht, in anderen Fällen hingegen ist nur die Erkennung des Fehlertyps "Riß" erforderlich. Es erscheint daher sinnvoll, die Merkmale an unterschiedlichen Zusammenstellungen verschiedener Fehlertypen zu erproben. Aus diesem Grund werden im Rahmen dieser Arbeit zwei verschiedene Konfigurationen von Ausgangsklassen untersucht, die im folgenden dargestellt sind.

Die Ausgangsklassenkonfiguration A ist nach den Fehlerhauptgruppen der DIN 8524 (siehe Anhang B) eingerichtet. Bei der Ausgangsklassenkonfiguration B wurden die Risse und die Poren zusätzlich in Längsrisse und Querrisse bzw. Poren und Schlauchporen unterteilt. An beiden Konfigurationen wird im nächsten Kapitel die Beurteilung der Merkmale durchgeführt.

Ausgangsklassenkonfiguration A

Klasse	Fehlertyp	Anzahl der Datensätze
I	Riß (101, 102)	58
II	Pore (2011, 2013, 2016)	287
III	Schlacke (301, 3011, 302, 3021)	108
IV	Bindefehler (401, 402) und ung. Durchschweißung	56

Ausgangsklassenkonfiguration B

Klasse	Fehlertyp	Anzahl der Datensätze
I	Längsriß (101)	20
II	Querriß (102)	38
III	Pore (2011, 2013)	222
IV	Schlauchpore (2016)	65
V	Schlacke (301, 3011, 302, 3021)	108
VI	Bindefehler (401, 402) und ung. Durchschweißung	56

## 5.2 Untersuchung der Einzelmerkmale

### 5.2.1 Normierung der Merkmale

Die meisten Merkmale, die im Kapitel 3 aufgeführt sind, können Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Wie dieser Wertebereich jedoch ausgeschöpft wird, hängt vom vorliegenden Datenmaterial ab. Es ist anzunehmen, daß die verschiedenen Merkmale innerhalb ihrer Wertebereiche völlig unterschiedliche Belegungen aufweisen. Um statistische Kenngrößen, wie klassenbedingte Mittelwerte und Streuungen direkt miteinander vergleichen zu können, ist es vorteilhaft, die Merkmalswerte einheitlich darzustellen. Aus diesem Grund wurde eine Normierung durchgeführt, die jedes einzelne Merkmal anhand seiner auftretenden Werte in einen Bereich von 0 bis 100 überführt. Dazu werden aus allen 509 Einträgen, die für jedes Merkmal existieren, der minimale und maximale Wert des jeweiligen Merkmals ermittelt. Die Berechnung der neuen Merkmalswerte erfolgt dann nach Gleichung 5.2-1.



$$c_{nv} = \frac{c_v - c_{v \min}}{c_{v \max} - c_{v \min}} 100 \quad (5.2-1)$$

$c_{v \min}$  : minimal auftretender Merkmalswert

$c_{v \max}$  : maximal auftretender Merkmalswert

$c_v$  : ursprünglicher Merkmalswert

$c_{nv}$  : normierter Merkmalswert

Die Normierung ist für die Berechnung der Güte- und Bewertungsmaße ohne Bedeutung. Für die Darstellung der klassenbedingten Verteilungsdichten, die im folgenden Kapitel behandelt werden, ist sie jedoch von großem Nutzen. Sie führt zu einer einheitlichen Skalierung und erleichtert somit den Vergleich der Merkmale untereinander.

## 5.2.2 Die klassenbedingten Verteilungsdichten

Für die Ausgangsklassenkonfiguration A sind die klassenbedingten Verteilungsdichten der Einzelmerkmale auf den folgenden Seiten im *Bild 5.2-1* graphisch dargestellt. Dabei wurde für jedes Einzelmerkmal eine eigene Grafik angefertigt. Die Grafiken der 13 Einzelmerkmale (*FAH* und *FFA* bleiben unberücksichtigt, siehe Kap. 5.1.3) enthalten jeweils vier Kurvenverläufe, die die Verteilungsdichten der vier Ausgangsklassen der Konfiguration A (Risse, Poren, Schlacken, Bindefehler und ungenügende Durchschweißungen) wiedergeben.

Vergleichbare Grafiken der Einzelmerkmale für die Konfiguration B würden entsprechend der Anzahl der Ausgangsklassen jeweils sechs Kurvenverläufe enthalten. Da jedoch in den bereits bestehenden Grafiken die vier Kurvenverläufe der Konfiguration A nur schwer voneinander zu unterscheiden sind, wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die Darstellung der Konfiguration B verzichtet.

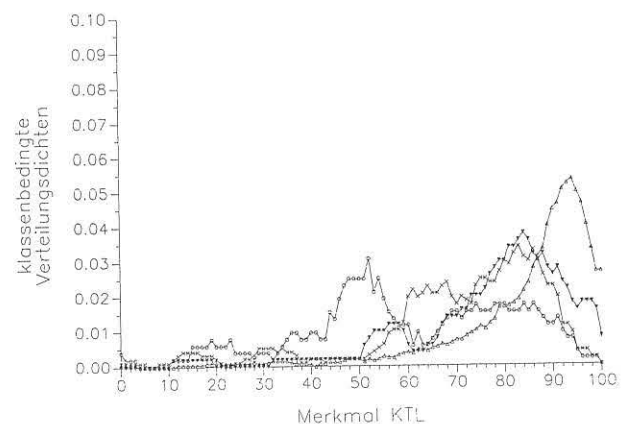
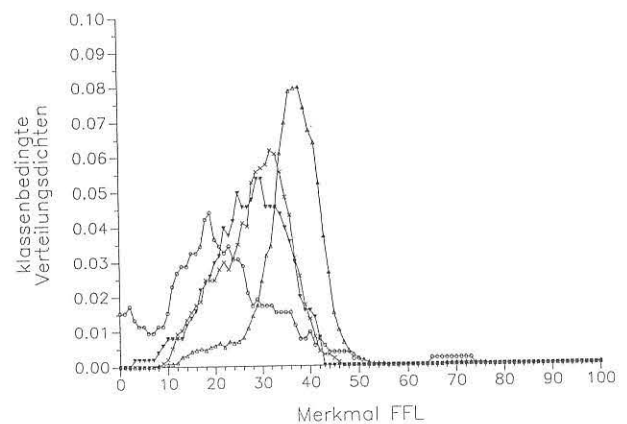
Da beide Konfigurationen am selben Datenmaterial berechnet werden und einige Klassen der Konfiguration A mit einigen Klassen der Konfiguration B identisch sind, gelten einzelne der hier dargestellten Kurvenverläufe auch für die Ausgangsklassenkonfiguration B. So entsprechen z. B. die Verteilungsdichten der Klassen III (Schlacke) und IV (Bindefehler und ungenügende Durchschweißung) aus A den Verteilungsdichten der Klassen V (Schlacke) und VI (ungenügende Durchschweißung) aus B.

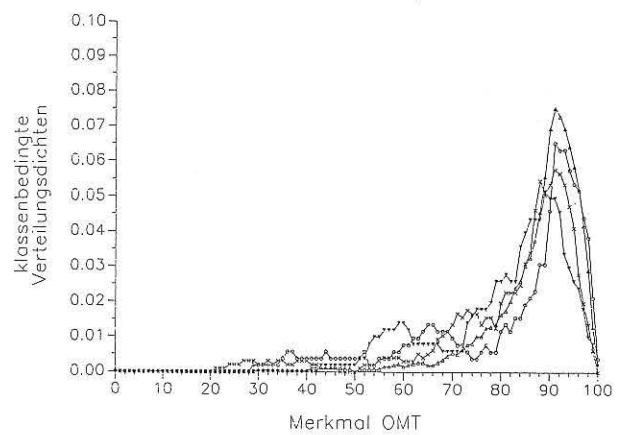
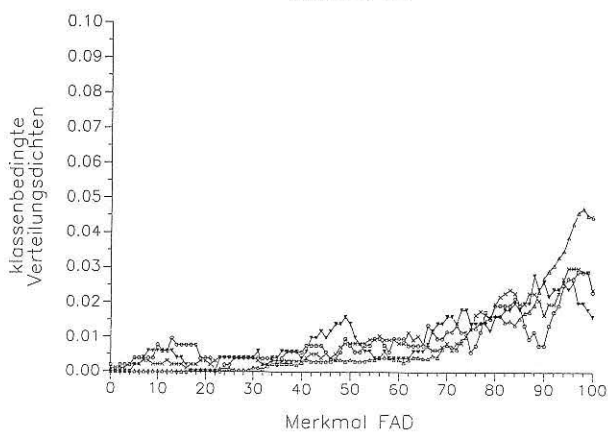
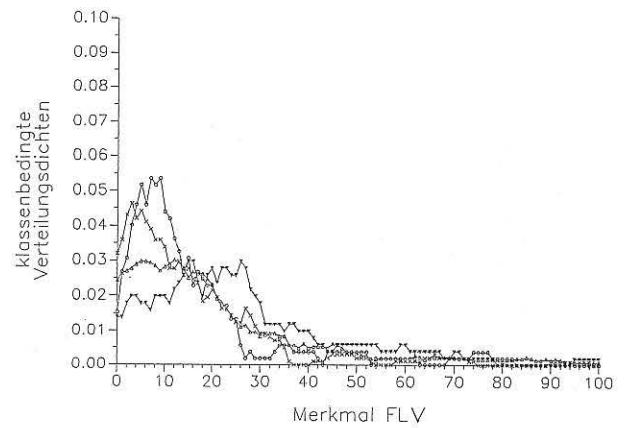
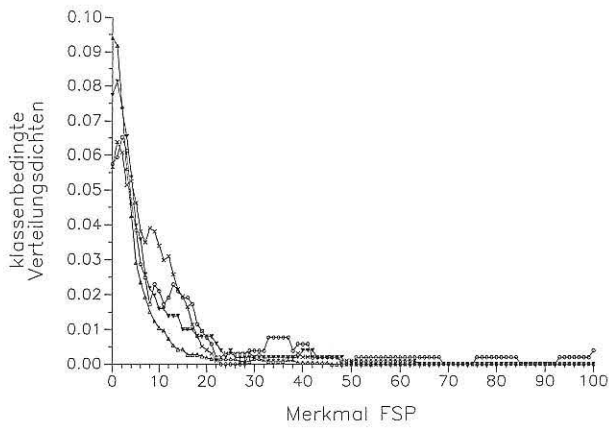
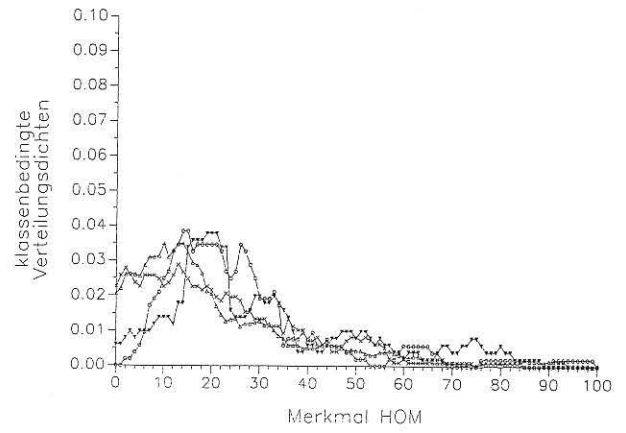
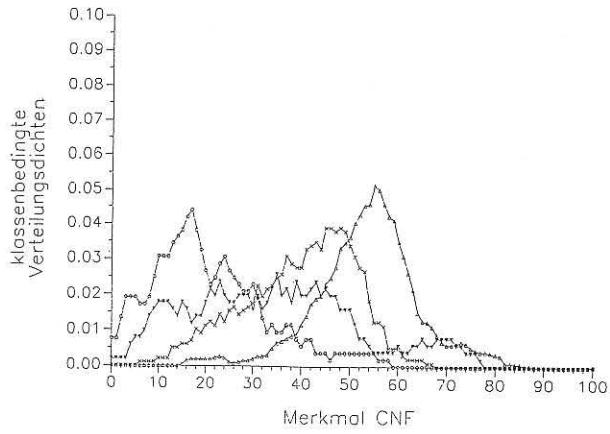
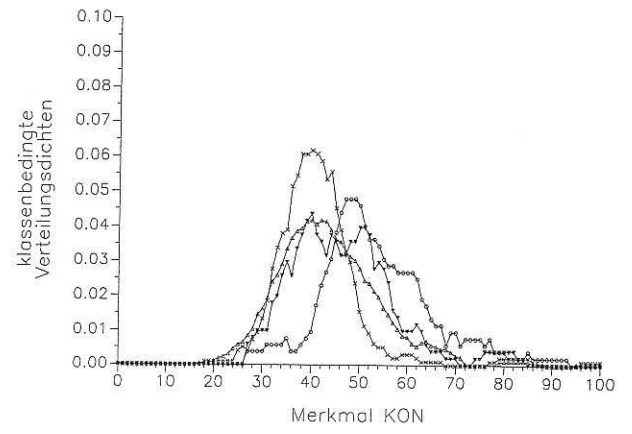
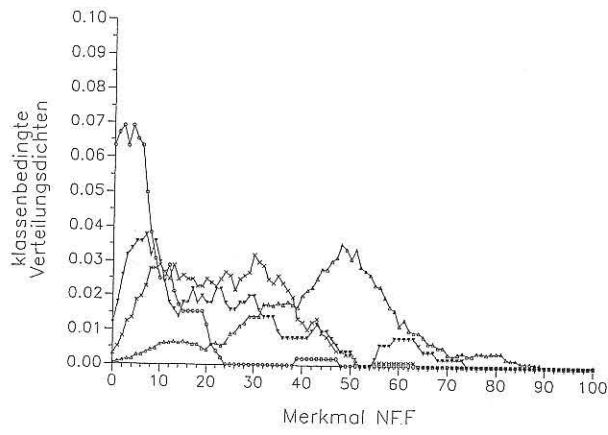
Für die hier wiedergegebenen klassenbedingten Verteilungsdichten der Konfiguration A wurde folgende Symbolik gewählt:

Symbol	Klasse
○	I (Risse)
△	II (Poren)
✕	III (Schlacken)
▼	IV (Bindefehler und ung. Durchschweißungen)

Um die Auswertung der Kurvenverläufe zu erleichtern, befindet sich im Anhang A ein aufklappbares Faltblatt, das die Tabelle der Einzelmerkmale nach *Bild 3.4-18* und die hier gewählte Zuordnung der Symbole zu den Ausgangsklassen wiedergibt. Allgemein kann festgestellt werden, daß kein Einzelmerkmal in der Lage ist, alle Klassen voneinander zu trennen. Selbst die Unterscheidung von nur zwei Ausgangsklassen ist bei allen Merkmalen schwierig und ist nur in Einzelfällen eingeschränkt möglich. Die besten Ergebnisse liefern hier die Merkmale *NFF* und *CNF*, die zur Trennung von Rissen und Poren eingesetzt werden können. Auch die Merkmale *FFL* und *KTL* zeigen für diese beiden Ausgangsklassen noch brauchbare Verteilungsdichten. Zur Trennung von Rissen und Bindefehlern bzw. ungenügenden Durchschweißungen hingegen sind die Merkmale *RTG*, *FLV* und *FLA* am besten geeignet. Mit dem Merkmal *KON* lassen sich, wenn auch nur unvollständig, Risse und Schlacken voneinander unterscheiden. Alle anderen Merkmale zeigen erhebliche Überdeckungen in den Kurvenverläufen und werden deshalb bei alleiniger Verwendung für die Trennung von Fehlertypen nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Aus den Kurvenverläufen der klassenbedingten Verteilungsdichten können die Eigenschaften der Merkmale nur grob abgeschätzt werden. Um detaillierte Aussagen über die Leistungsfähigkeit der Merkmale zu erhalten, ist es notwendig, die Verteilungen der Merkmalswerte statistisch auszuwerten. Hierzu dienen die im Kapitel 4 beschriebenen Beurteilungsverfahren, die in den nun folgenden Kapiteln auf die Merkmale angewendet werden.





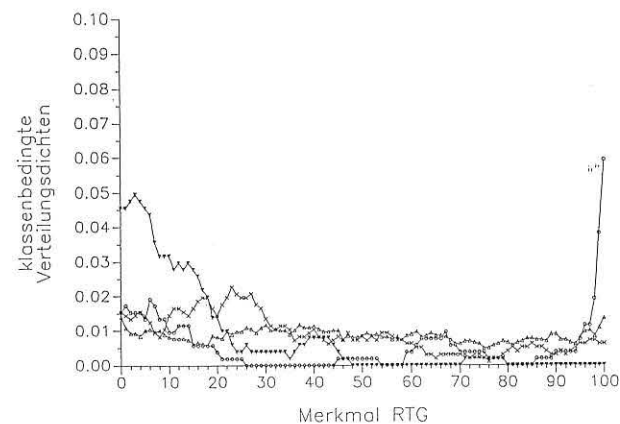
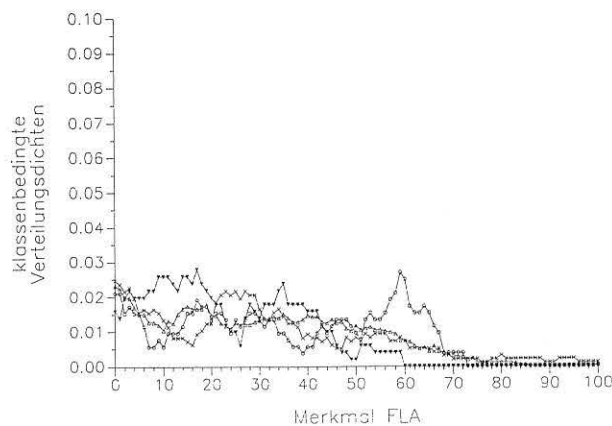
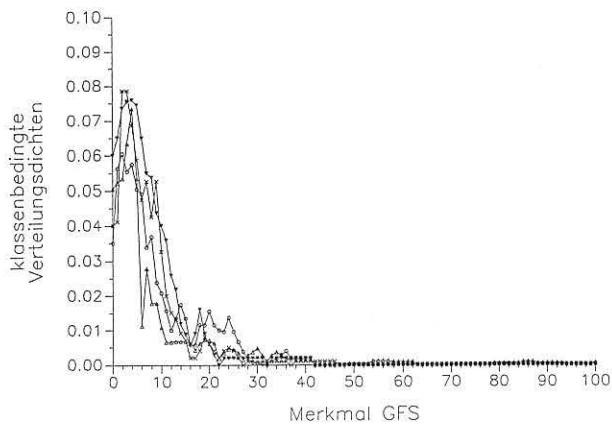


Bild 5.2-1 :  
Klassenbedingte Verteilungsdichten aller Merkmale für die Ausgangsklassenkonfiguration A

### 5.2.3 Beurteilung der Merkmale an vier Ausgangsklassen

Die Beurteilung der Merkmale für die Ausgangsklassenkonfiguration A erfolgt anhand der Güte- und Bewertungsmaße, wie sie im Kapitel 4.1 beschrieben wurden. Dazu wurden für jedes Merkmal die Güte- und Bewertungsmaße aller Klassenpaare einzeln berechnet und gemeinsam mit den gemittelten Werten nach den Gleichungen 4.1-2 (Seite 32) und 4.1-5 (Seite 33) in eine Tabelle eingetragen. Die Ergebnisse sind in den Bildern 5.2-2 und 5.2-3 wiedergegeben.

$G$	I/II	I/III	I/IV	II/III	II/IV	III/IV	Mitl.
<i>FFL</i>	1.11	0.30	0.21	0.63	0.76	0.01	0.51
<i>KTL</i>	1.00	0.16	0.50	0.41	0.12	0.10	0.38
<i>NFF</i>	4.74	1.50	0.70	1.12	0.88	0.00	1.49
<i>CNF</i>	4.30	1.40	0.43	0.83	0.91	0.07	1.32
<i>FSP</i>	0.26	0.07	0.11	0.20	0.11	0.02	0.13
<i>FAD</i>	0.31	0.03	0.00	0.18	0.29	0.01	0.14
<i>KON</i>	0.37	0.61	0.21	0.02	0.03	0.11	0.22
<i>HOM</i>	0.06	0.06	0.02	0.00	0.13	0.12	0.07
<i>FLV</i>	0.02	0.00	0.14	0.05	0.04	0.20	0.08
<i>OMT</i>	0.06	0.00	0.00	0.09	0.13	0.00	0.05
<i>GFS</i>	0.01	0.06	0.01	0.02	0.00	0.03	0.02
<i>FLA</i>	0.02	0.02	0.15	0.00	0.06	0.05	0.05
<i>RTG</i>	0.12	0.40	1.50	0.10	1.02	0.50	0.61

Rangfolge nach dem gemittelten Gütemaß:

*NFF, CNF, RTG, FFL, KTL, KON, FAD, FSP, FLV, HOM, FLA, OMT, GFS*

Rangfolge nach dem Auswahlverfahren Kapitel 4.2.1, Fall 3 :

*NFF, RTG, CNF, FFL, KTL, FLV*

Bild 5.2-2 :

Tabelle der Gütemaße  $G$  für alle Klassenpaare bei vier Ausgangsklassen (Konfiguration A)

Aus Bild 5.2-2 ist zu entnehmen, daß die höchsten Werte für  $G$  bei den Merkmalen *NFF* und *CNF* zur Trennung der Klassen I (Risse) und II (Poren) auftreten. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Aussagen, die im vorangegangenen Kapitel an den klassenbedingten Verteilungsdichten gewonnen wurden. Ebenso wird die gute Trennung der Klassen I (Risse) und IV (Bindefehler und ungenügende Durchschweißungen) durch das Merkmal *RTG* bestätigt. Auch die Merkmale *FFL* und *KTL* zeigen, ausgenommen von einigen Ausnahmen, insgesamt gute Werte für  $G$ . Dagegen erbringen die Grauwertmerkmale, insbesondere *HOM* und *FLV*, sowie die kombinierten Grauwert/Geometrie-Merkmale *OMT* und *GFS* keine guten Klassentrennungen.

Unterhalb der Tabelle sind im Bild 5.2-2 zwei Rangfolgen angegeben, die die Merkmale nach ihrer Wichtigkeit geordnet enthalten. In der ersten Rangfolge wurde als Kriterium das gemittelte Gütemaß  $\bar{G}$  verwendet. Hier zeigt sich noch einmal die besondere Aussagekraft der beiden Merkmale *NFF* und *CNF*. Die zweite Rangfolge wurde nach dem Auswahlverfahren, das in Kapitel 4.2.1 beschrieben wurde, erstellt. Da hier die Anzahl der Merkmale größer als die Anzahl der Klassenpaare ist, wurde nach Fall drei (siehe Seite 36) vorgegangen. Entsprechend den sechs Klassenpaaren sind hier die sechs wichtigsten Merkmale aufge-

führt. Besonders bemerkenswert ist die veränderte Reihenfolge der ersten drei Merkmale. Das Merkmal *RTG* nimmt hier die Position zwei ein, während *CNF* erst an dritter Stelle genannt wird. Diese Veränderung ergibt sich dadurch, daß die besonders gute Trennung der Klassen I (Risse) und II (Poren) durch das Merkmal *CNF* bereits vorher durch das Merkmal *NFF* abgedeckt wurde.

<i>B</i>	I/II	I/III	I/IV	II/III	II/IV	III/IV	Mitl.
<i>FFL</i>	0.86	0.47	0.46	0.41	0.46	0.16	0.47
<i>KTL</i>	0.85	0.64	0.87	0.49	0.32	0.38	0.59
<i>NFF</i>	1.91	0.91	0.79	0.58	0.75	0.29	0.87
<i>CNF</i>	1.53	0.86	0.84	0.47	0.82	0.43	0.83
<i>FSP</i>	0.33	0.26	0.29	0.19	0.16	0.24	0.25
<i>FAD</i>	0.48	0.51	0.46	0.26	0.38	0.45	0.45
<i>KON</i>	0.46	0.70	0.39	0.17	0.26	0.32	0.38
<i>HOM</i>	0.38	0.42	0.56	0.17	0.43	0.51	0.41
<i>FLV</i>	0.35	0.35	0.57	0.27	0.49	0.48	0.41
<i>OMT</i>	0.24	0.42	0.58	0.16	0.26	0.32	0.33
<i>GFS</i>	0.02	0.05	0.04	0.04	0.03	0.06	0.04
<i>FLA</i>	0.39	0.42	0.76	0.24	0.33	0.46	0.44
<i>RTG</i>	0.67	1.16	1.08	0.30	0.64	0.65	0.75

Rangfolge nach dem gemittelten Bewertungsmaß:

*NFF, CNF, RTG, KTL, FFL, FAD, FLA, FLV, HOM, KON, OMT, FSP, GFS*

Rangfolge nach dem Auswahlverfahren Kapitel 4.2.1, Fall 3 :

*NFF, RTG, KTL, CNF, HOM, FFL*

Bild 5.2-3 :

Tabelle der Bewertungsmaße *B* für alle Klassenpaare bei vier Ausgangsklassen (Konfiguration *A*)

Für die Beurteilung der Merkmale nach Bewertungsmaß *B* ergeben sich vergleichbare Aussagen. Aus Bild 5.2-3 ist allerdings zu entnehmen, daß hier auch die Grauwertmerkmale eine wichtige Rolle spielen. Die Bewertungsmaße für *HOM* und *FLV* liegen insgesamt wesentlich höher als die vergleichbaren Gütemaße. Dies hat dazu geführt, daß *HOM* bei der Auswahl der sechs wichtigsten Merkmale bereits vor dem Merkmal *FFL* genannt wird. Der Grund hierfür liegt darin, daß beim Bewertungsmaß die klassenbedingten Streuungen unberücksichtigt bleiben. Ein Vergleich der beiden Merkmale *FFL* und *HOM* anhand der klassenbedingten Verteilungsdichten in Bild 5.2-1 zeigt deutlich, daß *HOM* für alle Klassen erheblich höhere Streuungen aufweist.

Bezüglich der Überschneidungen von Klassen bietet *HOM*, wegen des leicht erhöhten Verlaufs der Klasse IV (Bindefehler und ungenügende Durchschweißungen) bei

Merkmalswerten zwischen 68 und 82, jedoch geringe Vorteile. Aus dem gleichen Grund erscheint bei der Beurteilung der Merkmale nach dem Bewertungsmaß das Merkmal *KTL* stets vor dem Merkmal *FFL*. Hier spielt der ausgeprägte Verlauf der Klasse I (Risse) beim Merkmal *KTL* zwischen den Werten 34 und 56 die entscheidende Rolle.

## 5.2.4 Beurteilung der Merkmale an sechs Ausgangsklassen

Die Beurteilung der Merkmale für die Ausgangsklassenkonfiguration *B* erfolgt ebenso wie im vorangegangenen Kapitel anhand der Güte- und Bewertungsmaße. Die Maße aller Klassenpaare sind in den Bildern 5.2-4 und 5.2-5 wiedergegeben.

Veränderungen sind vor allem bei dem Merkmal *RTG* aufgetreten. Durch die zusätzliche Aufteilung der Risse in Längs- und Querrisse bekommt dieses Merkmal besondere Bedeutung. Sowohl beim Güte- als auch beim Bewertungsmaß treten hier zur Trennung der Klassen I (Längsrisse) und II (Querrisse) besonders hohe Werte auf. Noch ausgeprägter fallen bei diesem Merkmal jedoch die Werte zur Trennung der Klassen II (Querrisse) und VI (Bindefehler und ungenügende Durchschweißungen) aus. Das Gütemaß erreicht hier einen Wert von 11.83 und das Bewertungsmaß einen Wert von 3.14. Der Grund, daß diese Werte höher ausfallen als die Werte für das Klassenpaar I/II, liegt in der festgelegten Richtungsorientierung der Bindefehler und der ungenügenden Durchschweißungen. Während Längsrisse nicht immer über die gesamte Länge einheitlich waagrecht ausgerichtet sind, treten bei Bindefehlern und ungenügenden Durchschweißungen kaum Abweichungen vom waagerechten Verlauf auf.

Die Erweiterung auf sechs Ausgangsklassen hat auch bei den Merkmalen *NFF* und *CNF* zu Veränderungen geführt. Selbstverständlich treten zur Trennung von Längs- und Querrissen hier keine hohen Werte auf, da sich diese beiden Fehlertypen in ihrer Form kaum unterscheiden. Die Trennung der Risse gegenüber Poren (Klassenpaare I/III und II/III) hat sich jedoch weiter verbessert. Insbesondere für das Merkmal *CNF* wurden zur Unterscheidung von Querrissen und Poren gute Ergebnisse erzielt.

In den Rangfolgen der Merkmale nach den gemittelten Güte- und Bewertungsmaßen sind gegenüber der Ausgangsklassenkonfiguration *A* kaum Veränderungen eingetreten. Allerdings konnte das Merkmal *RTG* wegen seiner Bedeutung zur Trennung der Klassen I und II sowie II und VI seine Positionen verbessern.

Die Ermittlung der wichtigsten Merkmale anhand der Auswahlverfahren nach Kapitel 4.2.1 erforderte gegenüber der Ausgangsklassenkonfiguration *A* eine andere Vorgehensweise. Hier mußte der Fall 2 (siehe Seite 36) angewendet werden, da die Anzahl der Merkmale zwar größer als die Anzahl der Ausgangsklassen, jedoch kleiner als die Anzahl der Ausgangsklassenpaare ist. Die Tabellen der klassenbezogenen gemittelten Güte- und Bewertungsmaße, die zur

	I/II	I/III	I/IV	I/V	I/VI	II/III	II/IV	II/V	II/VI	III/IV	III/V	III/VI	IV/V	IV/VI	V/VI	Mitl
<i>FFL</i>	0.01	1.12	0.81	0.32	0.23	1.23	0.87	0.29	0.20	0.08	0.73	0.87	0.35	0.47	0.01	0.51
<i>KTL</i>	0.02	1.18	0.81	0.23	0.59	1.05	0.67	0.13	0.45	0.06	0.48	0.16	0.22	0.03	0.10	0.41
<i>NFF</i>	0.00	4.92	2.76	1.21	0.63	6.27	3.64	1.70	0.74	0.34	1.50	1.15	0.40	0.33	0.00	1.71
<i>CNF</i>	0.02	3.06	1.42	0.76	0.25	8.01	3.75	2.08	0.58	0.52	1.25	1.20	0.16	0.32	0.07	1.56
<i>FSP</i>	0.00	0.29	0.12	0.06	0.10	0.30	0.14	0.07	0.12	0.15	0.31	0.19	0.03	0.00	0.02	0.13
<i>FAD</i>	0.37	1.28	0.55	0.34	0.22	0.18	0.00	0.00	0.02	0.18	0.28	0.41	0.02	0.06	0.01	0.26
<i>KON</i>	0.25	0.06	0.22	0.19	0.02	0.56	1.17	1.03	0.45	0.04	0.03	0.02	0.00	0.13	0.11	0.28
<i>HOM</i>	0.13	0.13	0.89	0.22	0.01	0.00	0.35	0.01	0.06	0.26	0.01	0.07	0.21	0.62	0.12	0.21
<i>FLV</i>	0.02	0.04	0.20	0.03	0.09	0.10	0.09	0.00	0.18	0.33	0.11	0.01	0.08	0.53	0.20	0.13
<i>OMT</i>	0.23	0.42	0.18	0.08	0.09	0.01	0.01	0.05	0.06	0.07	0.12	0.18	0.01	0.02	0.00	0.10
<i>GFS</i>	0.00	0.02	0.00	0.07	0.01	0.01	0.00	0.05	0.00	0.02	0.01	0.00	0.07	0.01	0.03	0.02
<i>FLA</i>	0.31	0.14	0.59	0.20	0.50	0.03	0.08	0.00	0.04	0.18	0.01	0.12	0.09	0.01	0.05	0.16
<i>RTG</i>	8.13	0.77	0.67	0.31	0.02	1.72	0.93	3.01	11.83	0.01	0.09	1.08	0.12	0.87	0.50	2.00

Rangfolge nach den gemittelten Gütemaßen:

*RTG, NFF, CNF, FFL, KTL, KON, FAD, HOM, FLA, FSP, FLV, OMT, GFS*

Rangfolge nach Auswahlverfahren Kapitel 4.2.1 Fall 2:

*RTG, NFF, CNF, KTL, FFL, KON*

Bild 5.2-4: Tabelle der Gütemaße *G* für alle Klassenpaare bei 6 Ausgangsklassen (Konfiguration B)

	I/II	I/III	I/IV	I/V	I/VI	II/III	II/IV	II/V	II/VI	III/IV	III/V	III/VI	IV/V	IV/VI	V/VI	Mitl
<i>FFL</i>	0.85	1.92	1.70	0.91	0.92	0.85	0.72	0.54	0.51	0.10	0.45	0.52	0.39	0.40	0.16	0.73
<i>KTL</i>	0.93	1.31	1.24	1.30	1.76	1.09	1.03	0.64	0.85	0.34	0.56	0.37	0.50	0.34	0.38	0.84
<i>NFF</i>	0.45	2.59	1.75	1.45	1.32	2.32	1.76	0.86	0.71	0.43	0.74	0.88	0.49	0.79	0.29	1.12
<i>CNF</i>	0.95	1.92	1.32	1.43	1.42	3.48	1.46	0.95	0.88	0.45	0.69	1.04	0.33	0.72	0.43	1.16
<i>FSP</i>	0.43	0.50	0.49	0.35	0.39	0.38	0.43	0.34	0.35	0.10	0.24	0.20	0.19	0.16	0.24	0.32
<i>FAD</i>	1.55	1.26	1.81	1.21	1.28	0.51	0.66	0.55	0.74	0.36	0.32	0.42	0.36	0.49	0.45	0.80
<i>KON</i>	0.74	0.53	0.72	0.85	0.61	0.62	0.89	0.84	0.51	0.15	0.18	0.26	0.23	0.35	0.32	0.52
<i>HOM</i>	1.43	0.81	1.95	0.91	0.82	0.46	0.99	0.52	0.83	0.42	0.20	0.40	0.40	0.95	0.51	0.77
<i>FLV</i>	0.54	0.52	0.74	0.59	0.83	0.49	0.37	0.42	0.60	0.35	0.26	0.50	0.24	0.37	0.48	0.51
<i>OMT</i>	0.72	0.63	0.75	0.75	1.07	0.25	0.41	0.47	0.56	0.18	0.18	0.29	0.22	0.29	0.32	0.47
<i>GFS</i>	0.10	0.10	0.09	0.10	0.16	0.03	0.04	0.05	0.02	0.06	0.04	0.04	0.05	0.04	0.06	0.06
<i>FLA</i>	1.44	1.07	1.54	1.01	1.85	0.52	0.53	0.47	0.70	0.53	0.29	0.43	0.50	0.41	0.46	0.78
<i>RTG</i>	2.62	1.22	0.39	1.08	0.62	1.02	0.77	1.85	3.14	0.59	0.32	0.65	0.77	1.04	0.65	1.15

Rangfolge nach den gemittelten Bewertungsmaßen:

*CNF, RTG, NFF, KTL, FAD, FLA, HOM, FFL, KON, FLV, OMT, FSP, GFS*

Rangfolge nach Auswahlverfahren Kapitel 4.2.1 Fall 2 :

*RTG, CNF, NFF, HOM, FLA, KTL*

Bild 5.2-5: Tabelle der Bewertungsmaße *B* für alle Klassenpaare bei 6 Ausgangsklassen (Konfiguration B)

Berechnung nach Fall 2 erforderlich sind, zeigen die *Bilder* 5.2-6 und 5.2-7.

$G[i]$	I	II	III	IV	V	VI
<i>FFL</i>	0.50	0.52	0.80	0.52	0.34	0.36
<i>KTL</i>	0.57	0.46	0.58	0.36	0.23	0.26
<i>NNF</i>	1.90	2.47	2.83	1.49	0.96	0.57
<i>CNF</i>	1.10	2.89	2.81	1.24	0.87	0.48
<i>FSP</i>	0.12	0.13	0.25	0.09	0.10	0.09
<i>FAD</i>	0.55	0.12	0.47	0.16	0.13	0.15
<i>KON</i>	0.15	0.69	0.14	0.31	0.27	0.14
<i>HOM</i>	0.27	0.11	0.09	0.47	0.11	0.18
<i>FLV</i>	0.07	0.08	0.12	0.24	0.08	0.20
<i>OMT</i>	0.20	0.07	0.16	0.06	0.05	0.07
<i>GFS</i>	0.02	0.01	0.01	0.02	0.05	0.01
<i>FLA</i>	0.35	0.09	0.10	0.19	0.07	0.14
<i>RTG</i>	1.98	5.12	0.73	0.52	0.81	2.86

Bild 5.2-6 :  
Tabelle der klassenbezogenen gemittelten Gütemaße bei sechs Ausgangsklassen (Konfiguration B)

$B[i]$	I	II	III	IV	V	VI
<i>FFL</i>	1.26	0.69	0.77	0.66	0.49	0.50
<i>KTL</i>	1.31	0.91	0.73	0.69	0.68	0.74
<i>NNF</i>	1.51	1.22	1.39	1.05	0.77	0.80
<i>CNF</i>	1.41	1.54	1.52	0.85	0.77	0.90
<i>FSP</i>	0.43	0.39	0.29	0.27	0.27	0.27
<i>FAD</i>	1.43	0.80	0.58	0.74	0.58	0.68
<i>KON</i>	0.69	0.72	0.35	0.47	0.48	0.41
<i>HOM</i>	1.18	0.85	0.46	0.94	0.51	0.70
<i>FLV</i>	0.65	0.48	0.42	0.49	0.40	0.63
<i>OMT</i>	0.78	0.48	0.31	0.37	0.39	0.51
<i>GFS</i>	0.11	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06
<i>FLA</i>	1.38	0.73	0.57	0.70	0.55	0.77
<i>RTG</i>	1.29	1.88	0.76	0.82	0.93	1.22

Bild 5.2-7 :  
Tabelle der klassenbezogenen gemittelten Bewertungsmaße bei sechs Ausgangsklassen (Konfiguration B)

Die Auswertungen dieser Tabellen sind in den unteren Rangfolgen der *Bilder* 5.2-4 und 5.2-5 wiedergegeben.

Selbstverständlich ist das Merkmal *RTG* wiederum von besonderer Bedeutung. Ebenso wie bei der Ausgangsklassenkonfiguration A zählen jedoch auch hier die geometrischen Beschreibungen *NFF*, *CNF* und *KTL* zu den wichtigsten Merkmalen.

## 5.3 Untersuchung von Merkmalskombinationen

Zur Beurteilung von Merkmalskombinationen ist es erforderlich, die statistischen Abhängigkeiten der Einzelmerkmale untereinander zu überprüfen. Hierzu wurden im Kapitel 4.2 zwei Verfahren angegeben, die es gestatten, unter Berücksichtigung der statistischen Zusammenhänge der Einzelmerkmale, möglichst aussagekräftige Merkmalskombinationen zu erstellen. Das erste Verfahren arbeitet mit dem multiplen Korrelationskoeffizienten und ermöglicht den schrittweisen Aufbau einer Merkmalskombination aus einem bestehenden Merkmalsortiment. Das zweite Verfahren verwendet die Hauptkomponententransformation und ermittelt aus einer vorgegebenen Merkmalskombination die Rangfolge der wichtigsten Einzelmerkmale. Beide Verfahren werden im folgenden auf das gesamte Datenmaterial der Fehlermerkmale aus Kapitel 5.1 angewendet und ausgewertet.

### 5.3.1 Merkmalsauswahl über den multiplen Korrelationskoeffizienten

Die Auswahl der Merkmale erfolgte nach dem in Kapitel 4.2.3 (Seite 37) beschriebenen Prinzip. Zuerst wurden von allen möglichen Merkmalspaaren der 13 Fehlermerkmale (die beiden Merkmale *FAH* und *FFA* bleiben vorerst unberücksichtigt, siehe Kapitel 5.1.3, Seite 45) die Korrelationskoeffizienten bestimmt. Die Ergebnisse sind im *Bild 5.3-1* Seite 54 zusammengefaßt. Es ist festzustellen, daß insgesamt keine sehr hohen Korrelationswerte auftreten. Dies gilt für die Grauwertmerkmale und die kombinierten Grauwert-/Geometriemerkmale sowie insbesondere für die beiden kontextbezogenen Fehler/Schweißnaht-Merkmale *FLA* und *RTG*. Die geometrischen Merkmale hingegen sind stärker korreliert und erreichen beim Merkmalspaar *NFF/CNF* sogar einen Korrelationskoeffizienten von 0.90. Dieser hohe Wert erklärt sich aus der Ähnlichkeit der beiden Merkmale und zeigt an, daß die Unterschiede zwischen den ursprünglichen und den konvexen Fehlerabbildungen den Formfaktor nur unwesentlich beeinflussen.

Die Korrelationskoeffizienten aller Merkmalspaare aus *Bild 5.3-1* werden gemäß Gleichung 4.2-18 (Seite 39) zur Berechnung der Maße  $\bar{G}^*$  bzw.  $\bar{B}^*$  benötigt. Die ebenfalls zur Berechnung von  $\bar{G}^*$  und  $\bar{B}^*$  erforderlichen gemittelten Maße  $\bar{G}$  und  $\bar{B}$  wurden bereits in den beiden vorangegangenen Kapiteln ermittelt. Die Werte für  $\bar{G}$  und  $\bar{B}$  sind den jeweils letzten Spalten der *Bilder* 5.2-2 und 5.2-3 sowie 5.2-4 und 5.2-5 zu entnehmen. Entsprechend

der Merkmalsauswahl nach  $G$  und  $B$  wurde auch hier die Merkmalsauswahl für die beiden Ausgangsklassenkonfigurationen  $A$  und  $B$  durchgeführt. Somit ergeben sich insgesamt vier Rangfolgen von Einzelmerkmalen, die mit den Rangfolgen nach den gemittelten Maßen  $\bar{G}$  und  $\bar{B}$  aus den Kapiteln 5.2.3 und 5.2.4 direkt verglichen werden können.

Die Maße  $\bar{G}^*$  und  $\bar{B}^*$  wurden für alle Einzelmerkmale getrennt berechnet und sind in den *Bildern* 5.3-2 bis 5.3-5 dargestellt. In den Spalten der Tabellen sind die verschiedenen Maße der links aufgeführten Merkmale wiedergegeben, die bei Korrelation mit dem jeweils oben stehenden Merkmal entstanden sind. Die schrittweise Auswahl der Einzelmerkmale erfolgt nun anhand der Maximalwerte, die innerhalb der Spalten auftreten. Dabei werden stets nur die Spalten der bereits ausgewählten Merkmale berücksichtigt. Um den Vorgang der Merkmalsauswahl zu verdeutlichen, wird hier, beispielhaft für alle anderen Maße, die Auswahl über  $\bar{G}^*$  bei vier Ausgangsklassen (Konfiguration A) beschrieben (siehe *Bild* 5.3-2).

Das erste Merkmal wird stets ohne Berücksichtigung von Korrelationen ausschließlich nach dem höchsten Wert für das gemittelte Gütemaß  $\bar{G}$  bzw. Bewertungsmaß  $\bar{B}$  ausgewählt. Im hier vorliegenden Fall ergibt sich nach *Bild* 5.2-2 das Merkmal *NFF*. Alle weiteren Merkmale werden nun unter Verwendung von *Bild* 5.3-2 ausgewählt. Innerhalb der Spalte von *NFF* erbringt das Merkmal *RTG* den höchsten Wert für  $\bar{G}^*$ . *RTG* steht somit an zweiter Stelle in der Rangfolge der wichtigsten Merkmale. Zur Auswahl des dritten Merkmals wird nun der höchste Wert für  $\bar{G}^*$  in den Spalten von *NFF* und *RTG* gesucht. Selbstverständlich bleiben dabei die Werte bereits ausgewählter Merkmale unberücksichtigt. Als drittes Merkmal ergibt sich somit *CNF* mit einem  $\bar{G}^*$  von 1.294. Die Auswahl der weiteren Merkmale erfolgt nach dem gleichen Prinzip. Bei der Suche nach dem Maximalwert für  $\bar{G}^*$  erhöht sich somit die Anzahl der Spalten stets um das zuletzt ausgewählte Merkmal.

Um die Übersicht zu erleichtern, wurden in allen Bildern die zur Auswahl führenden Maße mit den jeweiligen Rangpositionen gekennzeichnet. Außerdem sind die Rangfolgen der Merkmale bei jedem Bild gesondert aufgeführt. Der Vergleich der Rangfolgen mit den jeweils entsprechenden Ergebnissen aus den Kapiteln 5.2.3 und 5.2.4 zeigt, daß bei Berücksichtigung von Korrelationen nur geringfügige Veränderungen eintreten. Der Grund hierfür liegt in den bereits erwähnten niedrigen Korrelationskoeffizienten. Geringe Korrelationswerte erbringen gemäß Gleichung 4.2-18 (Seite 39) nur unwesentliche Veränderungen zu den gemittelten Güte- bzw. Bewertungsmaßen.

Die Auswahl nach dem Gütemaß  $\bar{G}^*$  bei vier Ausgangsklassen führt lediglich zu einer Vertauschung der Positionen bei den beiden Merkmalen *CNF* und *RTG*. Auch die Auswahl nach dem Bewertungsmaß  $\bar{B}^*$  bei vier Ausgangsklassen führt zu einem Positionswechsel dieser beiden

Merkmale. Diese Veränderungen sind auf die starke Korrelation der beiden Merkmale *NFF* und *CNF* zurückzuführen. Beim Bewertungsmaß  $\bar{B}^*$  treten außerdem noch Positionswechsel bei den Merkmalen *FAD* und *FLA* sowie *FLV* und *HOM* auf. Diese Wechsel erklären sich aus den gemittelten Bewertungsmaßen  $\bar{B}$ , die innerhalb dieser Merkmalspaare nahezu identisch sind.

Bei der Ausgangsklassenkonfiguration B, d. h. bei sechs Ausgangsklassen, sind die Unterschiede zwischen den Rangfolgen der Einzelmerkmale noch unbedeutender. Hier treten nur Veränderungen in den hinteren Bereichen der Rangfolgen auf. Bei der Auswahl nach dem Gütemaß  $\bar{G}^*$  vertauschen sich die Positionen der Merkmale *FSP* und *FLV*. Beim Bewertungsmaß  $\bar{B}^*$  hingegen fällt das Merkmal *FAD* von Platz fünf auf Platz sieben zurück. Ansonsten bleibt die Rangfolge der Merkmale erhalten.

Offensichtlich haben die Korrelationen zwischen den Einzelmerkmalen keine gravierende Auswirkung auf die Merkmalsauswahl. Dennoch soll der Einfluß der Korrelationen an einem Beispiel demonstriert werden. Wird eine Merkmalsauswahl, angefangen mit dem Merkmal *NFF*, ausschließlich unter Verwendung der Korrelationskoeffizienten aus *Bild* 5.3-1 durchgeführt, so entsteht folgende Rangfolge:

<i>NFF</i>	<i>GFS</i>	<i>FLA</i>	<i>HOM</i>	<i>RTG</i>	<i>OMT</i>	<i>KON</i>	<i>FSP</i>	<i>FLV</i>	<i>CTL</i>	<i>FAD</i>	<i>FFL</i>	<i>CNF</i>
0.00	0.04	0.07	0.12	0.39	0.42	0.50	0.53	0.73	0.76	0.79	0.90	

Die Merkmalsauswahl wurde so durchgeführt, daß bei jedem Auswahlschritt die noch nicht ausgewählten Merkmale nach maximal auftretenden Korrelationen (siehe *Bild* 5.3-1) mit den bereits ausgewählten Merkmalen ausgesondert wurden. Das zuletzt verbleibende Merkmal wurde sodann als neues Merkmal in die Rangfolge übernommen.

Um den Vorgang der Merkmalsauswahl zu verdeutlichen, werden hier die Auswahlsschritte bis zum Merkmal *FLA* (Position 3) beschrieben. Ausgehend vom Merkmal *NFF* wird zuerst jenes Merkmal gesucht, das die geringste Korrelation mit *NFF* aufweist. Dieses Merkmal ist der gewichtete Flächenschwerpunkt *GFS* mit einem Korrelationskoeffizienten von 0.00. Nun wird jenes Merkmal gesucht, das sowohl mit *NFF* als auch mit *GFS* am wenigsten korreliert ist. Der kleinste Korrelationskoeffizient von 0.01 besteht zwischen dem Merkmal *HOM* und dem Merkmal *NFF*. Das Merkmal *HOM* besitzt jedoch mit dem Merkmal *GFS* eine Korrelation von 0.07. Die geringste Korrelation zu beiden Merkmalen (zu *NFF* und zu *GFS*) besitzt das Merkmal *FLA*. Hier tritt in beiden Fällen nur eine Korrelation von 0.04 auf. Es wird also stets jenes Merkmal gesucht, das zu allen bereits ausgewählten Merkmalen die geringste Korrelation aufweist. Aus diesem Grund wird bei der hier durchgeführten Merkmalsauswahl die Rangfolge der wichtigsten Merkmale dadurch ermittelt, daß die jeweils noch verbleibenden Merkmale nach maximal auftretender Korrelation ausgesondert werden.

	<i>FFL</i>	<i>KTL</i>	<i>NFF</i>	<i>CNF</i>	<i>FSP</i>	<i>FAD</i>	<i>KON</i>	<i>HOM</i>	<i>FLV</i>	<i>OMT</i>	<i>GFS</i>	<i>FLA</i>	<i>RTG</i>
<i>FFL</i>	1	0.63	0.79	0.58	-0.53	0.40	-0.14	-0.03	0.16	0.27	-0.06	0.10	0.04
<i>KTL</i>		1	0.73	0.48	-0.42	0.28	-0.20	-0.05	0.08	0.16	0.08	0.02	-0.07
<i>NFF</i>			1	0.90	-0.50	0.45	-0.17	0.01	0.22	0.24	0.00	0.04	0.02
<i>CNF</i>				1	-0.44	0.44	-0.16	0.06	0.24	0.23	-0.04	0.04	0.02
<i>FSP</i>					1	-0.25	0.05	-0.16	-0.17	-0.19	0.07	-0.13	0.04
<i>FAD</i>						1	-0.02	0.08	0.12	0.76	-0.50	0.05	0.07
<i>KON</i>							1	0.42	0.41	-0.06	0.09	0.03	0.13
<i>HOM</i>								1	0.53	0.03	0.07	0.10	-0.01
<i>FLV</i>									1	0.04	0.02	0.17	-0.02
<i>OMT</i>										1	0.39	0.10	0.08
<i>GFS</i>											1	-0.04	0.12
<i>FLA</i>												1	0.01
<i>RTG</i>													1

Bild 5.3-1: Korrelationskoeffizienten  $r_{nm}$  der Fehlermerkmale

	<i>FFL</i>	<i>KTL</i>	<i>NFF</i>	<i>CNF</i>	<i>FSP</i>	<i>FAD</i>	<i>KON</i>	<i>HOM</i>	<i>FLV</i>	<i>OMT</i>	<i>GFS</i>	<i>FLA</i>	<i>RTG</i>
<i>FFL</i>	0	0.189	0.107	0.214	0.234	0.306	0.439	0.495	0.428	0.372	0.479	0.459	0.490 <sup>3</sup>
<i>KTL</i>	0.141	0	0.103	0.198	0.220	0.274	0.304	0.361	0.350	0.319	0.350	0.372	0.353 <sup>4</sup>
<i>NFF</i>	0.313	0.402	0	0.149	0.745	0.819	1.237	1.475	1.162	1.132	1.490	1.430	1.460
<i>CNF</i>	0.554	0.686	0.132	0	0.739	0.739	1.109	1.241	1.003	1.016	1.267	1.267	1.294 <sup>2</sup>
<i>FSP</i>	0.061	0.075	0.065	0.073	0	0.097	0.123	0.109	0.108	0.105	0.121	0.113	0.125 <sup>7</sup>
<i>FAD</i>	0.084	0.101	0.077	0.078	0.105	0	0.137 <sup>6</sup>	0.129	0.123	0.034	0.070	0.133	0.130
<i>KON</i>	0.189	0.176	0.183	0.185	0.209	0.216	0	0.128	0.130	0.207	0.200	0.213	0.191 <sup>5</sup>
<i>HOM</i>	0.068	0.066	0.069 <sup>9</sup>	0.066	0.059	0.064	0.041	0	0.033	0.068	0.065	0.063	0.069
<i>FLV</i>	0.067	0.074	0.062	0.061	0.066	0.070	0.047	0.038	0	0.077	0.078	0.066	0.079 <sup>8</sup>
<i>OMT</i>	0.036	0.042	0.038	0.038	0.040	0.012	0.047	0.048	0.048 <sup>11</sup>	0	0.030	0.045	0.046
<i>GFS</i>	0.019	0.018	0.020	0.019	0.019	0.010	0.018	0.019	0.020 <sup>12</sup>	0.012	0	0.019	0.018
<i>FLA</i>	0.045	0.049 <sup>10</sup>	0.048	0.048	0.043	0.047	0.048	0.045	0.041	0.045	0.048	0	0.049
<i>RTG</i>	0.585	0.567	0.598 <sup>1</sup>	0.598	0.585	0.567	0.531	0.604	0.598	0.561	0.537	0.604	0

Rangfolge der Merkmale nach  $\bar{G}^*$  bei 4 Ausgangsklassen

*NFF, RTG, CNF, FFL, KTL, KON, FAD, FSP, FLV, HOM, FLA, OMT, GFS*

Bild 5.3-2: Tabelle der Gütemaße  $\bar{G}^*$  bei 4 Ausgangsklassen (Konfiguration A)



	<i>FFL</i>	<i>KTL</i>	<i>NFF</i>	<i>CNF</i>	<i>FSP</i>	<i>FAD</i>	<i>KON</i>	<i>HOM</i>	<i>FLV</i>	<i>OMT</i>	<i>GFS</i>	<i>FLA</i>	<i>RTG</i>
<i>FFL</i>	0	0.174	0.099	0.197	0.221	0.282	0.404	0.456	0.395	0.343	0.442	0.423	0.451 <sup>4</sup>
<i>KTL</i>	0.218	0	0.159	0.307	0.342	0.425	0.472	0.560	0.543	0.496	0.543	0.578	0.549 <sup>3</sup>
<i>NFF</i>	0.183	0.235	0	0.087	0.435	0.478	0.722	0.861	0.679	0.661	0.870	0.835	0.853
<i>CNF</i>	0.349	0.432	0.083	0	0.465	0.465	0.697	0.780	0.631	0.639	0.797	0.797	0.813 <sup>2</sup>
<i>FSP</i>	0.117	0.145	0.125	0.140	0	0.187	0.237	0.210	0.207	0.202	0.232	0.217	0.240 <sup>11</sup>
<i>FAD</i>	0.270	0.324	0.247	0.252	0.337	0	0.441	0.414	0.396	0.108	0.225	0.427 <sup>6</sup>	0.418
<i>KON</i>	0.327	0.304	0.315	0.319	0.361	0.372 <sup>9</sup>	0	0.220	0.224	0.357	0.346	0.369	0.331
<i>HOM</i>	0.398	0.389	0.406 <sup>7</sup>	0.385	0.344	0.377	0.238	0	0.193	0.398	0.381	0.369	0.406
<i>FLV</i>	0.344	0.377	0.320	0.312	0.340	0.361	0.242	0.193	0	0.394	0.402	0.340	0.402 <sup>8</sup>
<i>OMT</i>	0.241	0.277	0.251	0.254	0.267	0.079	0.310	0.320 <sup>10</sup>	0.317	0	0.201	0.297	0.304
<i>GFS</i>	0.038	0.037	0.040 <sup>12</sup>	0.038	0.037	0.020	0.036	0.037	0.039	0.024	0	0.038	0.035
<i>FLA</i>	0.396	0.431	0.422	0.422	0.383	0.418	0.427	0.396	0.365	0.396	0.422	0	0.436 <sup>5</sup>
<i>RTG</i>	0.720	0.697	0.735 <sup>1</sup>	0.735	0.720	0.697	0.652	0.742	0.735	0.690	0.669	0.742	0

Rangfolge der Merkmale nach  $\bar{B}^*$  bei 4 Ausgangsklassen

*NFF, RTG, CNF, KTL, FFL, FLA, FAD, HOM, FLV, KON, OMT, FSP, GFS*

Bild 5.3-3: Tabelle der Bewertungsmaße  $\bar{B}^*$  bei 4 Ausgangsklassen (Konfiguration A)

	<i>FFL</i>	<i>KTL</i>	<i>NFF</i>	<i>CNF</i>	<i>FSP</i>	<i>FAD</i>	<i>KON</i>	<i>HOM</i>	<i>FLV</i>	<i>OMT</i>	<i>GFS</i>	<i>FLA</i>	<i>RTG</i>
<i>FFL</i>	0	0.189	0.107	0.214	0.240	0.306	0.439	0.495	0.428	0.372	0.479	0.459	0.490 <sup>3</sup>
<i>KTL</i>	0.152	0	0.111	0.213	0.238	0.295	0.328	0.389	0.377	0.344	0.377	0.402	0.381 <sup>4</sup>
<i>NFF</i>	0.359	0.462	0	0.171	0.855	0.940	1.419	1.693	1.334	1.300	1.710	1.642	1.676 <sup>1</sup>
<i>CNF</i>	0.655	0.811	0.156	0	0.874	0.874	1.310	1.466	1.186	1.201	1.498	1.498	1.529 <sup>2</sup>
<i>FSP</i>	0.061	0.075	0.065	0.073	0	0.098	0.124	0.109	0.108	0.105	0.121	0.113	0.125 <sup>10</sup>
<i>FAD</i>	0.156	0.187	0.143	0.146	0.195	0	0.255 <sup>6</sup>	0.239	0.229	0.062	0.130	0.246	0.242
<i>KON</i>	0.241	0.224	0.232	0.235	0.266	0.274	0	0.162	0.165	0.263	0.255	0.272	0.244 <sup>5</sup>
<i>HOM</i>	0.204	0.200	0.208 <sup>7</sup>	0.197	0.176	0.193	0.122	0	0.099	0.204	0.195	0.189	0.208
<i>FLV</i>	0.109	0.120	0.101	0.099	0.108	0.114	0.077	0.061	0	0.125	0.127	0.108	0.127 <sup>9</sup>
<i>OMT</i>	0.073	0.084	0.076	0.077	0.081	0.024	0.094	0.097 <sup>11</sup>	0.096	0	0.061	0.091	0.092
<i>GFS</i>	0.019	0.018	0.020	0.019	0.019	0.010	0.018	0.019	0.020 <sup>12</sup>	0.012	0	0.019	0.018
<i>FLA</i>	0.144	0.157	0.154	0.154	0.139	0.152	0.155	0.144	0.133	0.144	0.154	0	0.158 <sup>8</sup>
<i>RTG</i>	1.920	1.860	1.960	1.960	1.920	1.860	1.740	1.980	1.960	1.840	1.760	1.980	0

Rangfolge der Merkmale nach  $\bar{G}^*$  bei 6 Ausgangsklassen

*RTG, NFF, CNF, FFL, KTL, KON, FAD, HOM, FLA, FLV, FSP, OMT, GFS*

Bild 5.3-4: Tabelle der Gütemaße  $\bar{G}^*$  bei 6 Ausgangsklassen (Konfiguration B)

	<i>FFL</i>	<i>KTL</i>	<i>NFF</i>	<i>CNF</i>	<i>FSP</i>	<i>FAD</i>	<i>KON</i>	<i>HOM</i>	<i>FLV</i>	<i>OMT</i>	<i>GFS</i>	<i>FLA</i>	<i>RTG</i>
<i>FFL</i>	0	0.270	0.153	0.307	0.343	0.438	0.628	0.708 <sup>7</sup>	0.613	0.533	0.686	0.657	0.701
<i>KTL</i>	0.311	0	0.227	0.437	0.487	0.605	0.672	0.798	0.773	0.706	0.773	0.823	0.781 <sup>3</sup>
<i>NFF</i>	0.235	0.302	0	0.112	0.560	0.616	0.930	1.109	0.874	0.851	1.120	1.075	1.098 <sup>2</sup>
<i>CNF</i>	0.487	0.603	0.116	0	0.650	0.650	0.974	1.090	0.882	0.893	1.114	1.114	1.137
<i>FSP</i>	0.150	0.186	0.160	0.179	0	0.240	0.304	0.269	0.266	0.260	0.298	0.278	0.307 <sup>11</sup>
<i>FAD</i>	0.480	0.576	0.440	0.448	0.600	0	0.784	0.736	0.704	0.192	0.400	0.760 <sup>6</sup>	0.744
<i>KON</i>	0.447	0.416	0.432	0.437	0.494	0.510 <sup>8</sup>	0	0.302	0.307	0.489	0.473	0.504	0.452
<i>HOM</i>	0.747	0.732	0.762 <sup>5</sup>	0.724	0.647	0.708	0.447	0	0.362	0.747	0.716	0.693	0.762
<i>FLV</i>	0.428	0.469	0.398	0.388	0.423	0.449	0.301	0.240	0	0.490	0.500	0.423	0.500 <sup>9</sup>
<i>OMT</i>	0.343	0.395	0.357	0.362	0.381	0.113	0.442	0.456 <sup>10</sup>	0.451	0	0.287	0.423	0.432
<i>GFS</i>	0.056	0.055	0.060 <sup>12</sup>	0.058	0.056	0.030	0.055	0.056	0.059	0.037	0	0.058	0.053
<i>FLA</i>	0.702	0.764	0.749	0.749	0.679	0.741	0.757	0.702	0.647	0.702	0.749	0	0.772 <sup>4</sup>
<i>RTG</i>	1.104	1.070	1.127	1.127 <sup>1</sup>	1.104	1.070	1.001	1.139	1.127	1.058	1.012	1.139	0

Rangfolge der Merkmale nach  $\bar{B}^*$  bei 6 Ausgangsklassen

*CNF, RTG, NFF, KTL, FLA, HOM, FAD, FFL, KON, FLV, OMT, FSP, GFS*

Bild 5.3-5: Tabelle der Bewertungsmaße  $\bar{B}^*$  bei 6 Ausgangsklassen (Konfiguration B)

Die so ermittelte Rangfolge unterscheidet sich gegenüber den Rangfolgen aus den *Bildern* 5.3-2 und 5.3-3 vor allem durch die Verschiebung der Merkmale *RTG*, *KTL*, *FFL* und *CNF*. Diese Merkmale sind mit den vorangegangenen Merkmalen stark korreliert und haben deshalb an Bedeutung verloren. Das Merkmal *CNF* ist mit dem Merkmal *NFF* besonders stark korreliert und befindet sich deshalb erwartungsgemäß auf dem letzten Platz.

Die Zahlen unterhalb der Merkmale geben die maximal auftretende Korrelation dieses Merkmals mit den jeweils vorangegangenen (bereits ausgewählten) Merkmalen an. Bis zum Merkmal *FLV*, d. h. bis zur Position neun, liegt die Korrelation der Einzelmerkmale unter einem Wert von 0.53. Dieser Wert demonstriert die statistische Unabhängigkeit der hier entwickelten Fehlermerkmale.

### 5.3.2 Merkmalsbeurteilung über die Hauptkomponententransformation

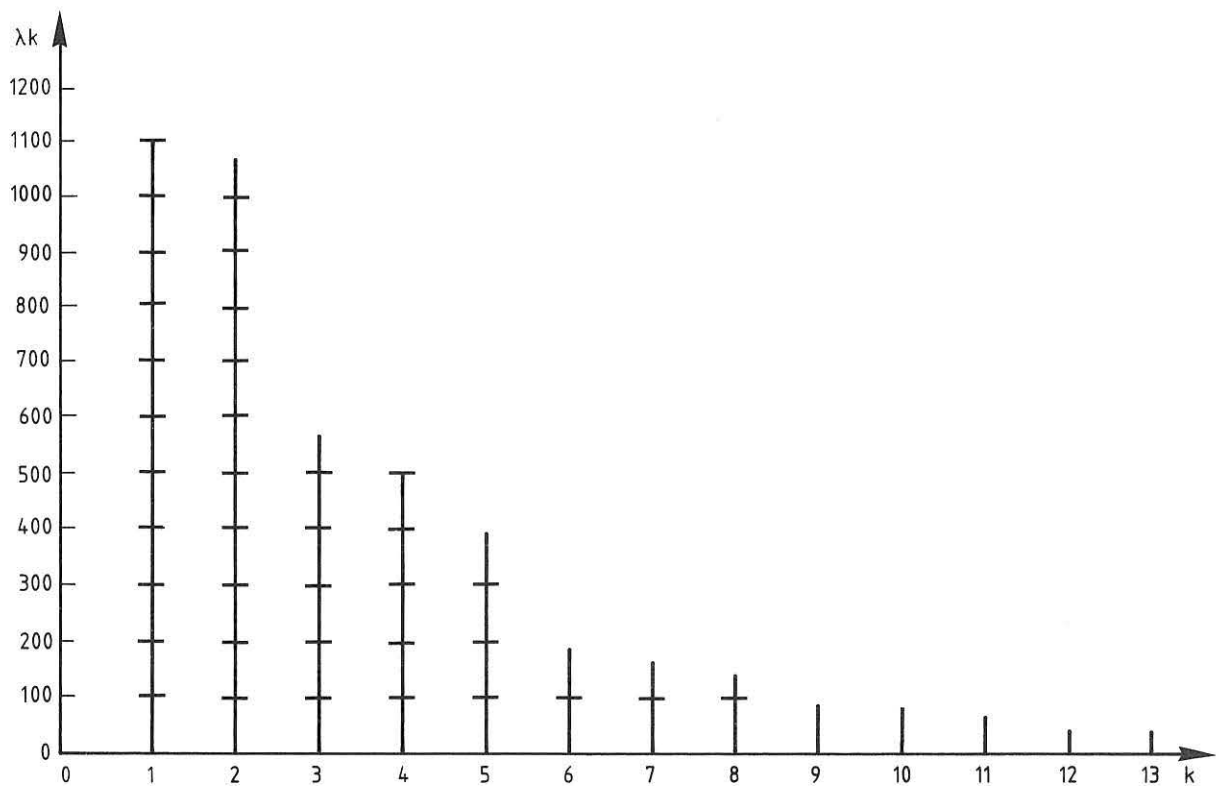
Wie im Kapitel 4.3 beschrieben kann die Hauptkomponententransformation sowohl zur Ermittlung der wichtigsten Einzelmerkmale als auch zur Beurteilung einer gesamten Merkmalskombination verwendet werden. Im hier vorliegenden Fall besteht die Merkmalskombination aus allen 13

Einzelmerkmalen, die bereits in den vorangegangenen Kapiteln unter Verwendung der Güte- und Bewertungsmaße sowie der Korrelationskoeffizienten beurteilt wurden. Im Unterschied zu den bisherigen Untersuchungen werden die Einzelmerkmale nicht getrennt betrachtet, sondern als ein zusammenhängender Datensatz in einem mehrdimensionalen Merkmalsraum ausgewertet. Die Beurteilung erfolgt nach den in Kapitel 4.3.2 und 4.3.3 dargestellten Verfahren.

Zunächst wurde aus dem gesamten Datensatz der Merkmale die Kovarianzmatrix der Einzelmerkmale ermittelt. Das Ergebnis ist im *Bild* 5.3-6 wiedergegeben. Die Matrix zeigt hohe Werte entlang der Hauptdiagonalen und demonstriert somit die ausgeprägten Streuungen der Einzelmerkmale. Dies gilt insbesondere für das Merkmal *RTG*, das wegen der häufig auftretenden Extremwerte zur Trennung der quer- und längsorientierten Fehler (siehe *Bild* 5.2-1) eine besonders hohe Streuung aufweist. Alle anderen Merkmale hingegen zeigen keine außergewöhnlichen Unterschiede in den Werten der Hauptdiagonalen und besitzen somit etwa gleichwertige Streuungen. Die insgesamt hohen Werte der Kovarianzmatrix auch außerhalb der Hauptdiagonalen lassen außerdem auf eine gleichmäßige Verteilung aller Daten im Merkmalsraum schließen. Diese Ausgewogenheit der Einzelmerkmale innerhalb der Merkmalskombination wird auch durch die Auswertung der Eigenwerte nach Gleichung 4.3-4 bestätigt.

	<i>FFL</i>	<i>KTL</i>	<i>NFF</i>	<i>CNF</i>	<i>FSP</i>	<i>FAD</i>	<i>KON</i>	<i>HOM</i>	<i>FLV</i>	<i>OMT</i>	<i>GFS</i>	<i>FLA</i>	<i>RTG</i>
<i>FFL</i>	85.28	108.04	137.35	83.30	-53.90	76.50	-13.92	-4.29	28.06	30.72	-9.10	18.99	12.07
<i>KTL</i>		342.07	255.80	137.18	-85.07	106.97	-39.17	-15.37	28.26	36.48	25.19	6.80	-41.79
<i>NFF</i>			355.72	262.63	-102.12	176.15	-34.37	4.89	76.45	55.73	-1.37	17.31	13.47
<i>CNF</i>				236.91	-73.04	139.57	-26.65	16.17	66.71	43.59	-10.32	11.43	12.73
<i>FSP</i>					118.10	-56.30	5.40	-31.52	-34.08	-24.77	12.07	-28.36	15.59
<i>FAD</i>						431.68	-5.42	28.93	44.11	191.96	-170.48	21.76	51.00
<i>KON</i>							114.87	79.08	80.09	-7.56	16.33	7.24	46.79
<i>HOM</i>								314.88	172.80	7.27	20.54	36.47	-7.49
<i>FLV</i>									341.18	9.54	5.35	64.80	-15.41
<i>OMT</i>										147.50	-77.03	24.66	32.54
<i>GFS</i>											265.83	-13.10	63.77
<i>FLA</i>												417.62	7.75
<i>RTG</i>													1085.97

Bild 5.3-6 : Kovarianzmatrix der Einzelmerkmale



k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\lambda_k$	1102.32	1044.99	556.80	494.70	385.59	168.22	142.75	127.58	79.46	73.08	41.80	34.30	5.96
pke (k)	25.9	50.4	63.5	75.1	84.2	88.1	91.5	94.5	96.3	98.1	99.0	99.9	100

Bild 5.3-7 : Eigenwerte der Kovarianzmatrix

Im Bild 5.3-7 sind die Beträge der Eigenwerte der Kovarianzmatrix in einer Grafik dargestellt. Eine sprunghafte Abnahme der Eigenwerte ist nur bei den Übergängen von  $\lambda_2$  auf  $\lambda_3$  sowie von  $\lambda_5$  auf  $\lambda_6$  zu erkennen. Der Verlauf der Grafik zeigt jedoch deutlich, daß auch die höherwertigen Hauptkomponenten im Merkmalsraum noch eine wesentliche Rolle spielen. So besitzt z. B. der Eigenwert  $\lambda_8$  bezogen auf den Eigenwert  $\lambda_1$  noch einen Wert von über 10%.

Die Auswertung der Hauptkomponenten nach Gleichung 4.3-4 erbringt für die Funktion  $pke(k)$  die prozentualen kumulativen Eigenwerte, die in der unteren Tabelle im Bild 5.3-7 angegeben sind. Mit der zweiten Hauptkomponente werden bereits über 50% der Merkmalsdaten erfaßt. Die Werte der Funktion  $pke(k)$  nehmen jedoch für weiter steigende  $k$  nur langsam zu. Um einen Wert von über 95% zu erzielen, ist es notwendig, mindestens neun Hauptkomponenten zu berücksichtigen. Dieses Ergebnis zeigt, daß der mehrdimensionale Merkmalsraum, der durch die 13 Einzelmerkmale gebildet wird, auch nach der Hauptkomponententransformation nicht auf wenige Dimensionen reduziert werden kann. Die hier verwendeten Einzelmerkmale sind also nur geringfügig redundant und sind deshalb zur Bildung einer Merkmalskombination besonders gut geeignet.

Soll mit Hilfe der Hauptkomponententransformation jedes Einzelmerkmal hinsichtlich seiner Bedeutung für die Merkmalskombination beurteilt werden, ist es notwendig, wie im Kapitel 4.3.2 beschrieben, den ersten Eigenvektor der Kovarianzmatrix zu berechnen. Das Ergebnis ist im Bild 5.3-8 dargestellt. Hinter den 13 Komponenten des Eigenvektors sind die jeweils dazugehörigen Einzelmerkmale angegeben. Die prozentualen Anteile der Einzelmerkmale an der ersten Hauptkomponente, die nach Gleichung 4.3-3 ermittelt wurden, sind in der Spalte für  $EM_m$  hinter den jeweiligen Einzelmerkmalen aufgeführt. Die sich daraus ergebende Rangfolge der Einzelmerkmale ist im unteren Teil des Bildes 5.3-8 wiedergegeben.

Aus den Werten für  $EM_m$  ist zu entnehmen, daß die ersten vier Merkmale *NFF*, *FAD*, *KTL* und *CNF* für die erste Hauptkomponente besondere Bedeutung besitzen. Diese vier Merkmale weisen gegenüber den anderen Merkmalen deutlich höherer Werte für  $EM_m$  auf und haben somit die Ausrichtung der ersten Hauptkomponente maßgeblich beeinflusst. Die Tatsache, daß es sich hierbei um vier geometrische Merkmale handelt zeigt, daß die hier vorgestellten systematischen Untersuchungen über die Bedeutung – d. h. das Gewicht – der Merkmale zur automatischen Fehlertypenunterscheidung sinnvoll sind. Das Ergebnis bestätigt die tägliche Erfahrung jedes Filmbetrachters, der den Fehlertyp am ehesten an der Form des Fehlerbildes erkennt. Diese Aussage stimmt auch mit den Ergebnissen der klassenbedingten Beurteilungen aus den Kapiteln 5.2.3 und 5.2.4 überein. Hier zählte ebenfalls der Formfaktor, insbesondere bei der Ausgangsklassenkonfiguration A, stets zu den wichtigsten Merkmalen.

$EM_m$  [%]

$e_1 =$	0.2097	<i>FFL</i>	4.40
	0.4105	<i>KTL</i>	16.85
	0.5140	<i>NFF</i>	26.42
	0.3783	<i>CNF</i>	14.31
	-0.1854	<i>FSP</i>	3.44
	0.4421	<i>FAD</i>	19.55
	-0.0473	<i>KON</i>	0.22
	0.0695	<i>HOM</i>	0.48
	0.1792	<i>FLV</i>	3.21
	0.1819	<i>OMT</i>	3.31
	-0.1310	<i>GFS</i>	1.72
	0.0846	<i>FLA</i>	0.72
	-0.2317	<i>RTG</i>	5.37

Rangfolge nach  $EM_m$ :

*NFF*, *FAD*, *KTL*, *CNF*, *RTG*, *FFL*, *FSP*, *OMT*, *FLV*, *GFS*, *FLA*, *HOM*, *KON*

Bild 5.3-8:

Prozentuale Anteile der Einzelmerkmale am ersten Eigenvektor der Kovarianzmatrix

Die Anteile der weiteren Merkmale an der ersten Hauptkomponente zeigen, daß neben den noch verbleibenden geometrischen Merkmalen *FFL* und *FSP*, vor allem das kontextbezogene Merkmal *RTG* eine wesentliche Rolle spielt. Die Fehlerrichtung *RTG* nimmt in der Rangfolge die Position 5 ein und steht somit als einziges nichtgeometrisches Merkmal vor der Fehlerfläche *FFL* und dem Flächenschwerpunkt *FSP*. Dieses Ergebnis bestätigt die Resultate der Untersuchungen zur Ausgangsklassenkonfiguration B aus Kapitel 5.2.4 und unterstreicht nochmals die Bedeutung der Fehlerrichtung zur Unterscheidung verschiedener Fehlertypen. Alle anderen Merkmale, insbesondere die Grauwertmerkmale *HOM* und *KON* sowie das kontextbezogene Merkmal *FLA*, sind an der ersten Hauptkomponente nur unwesentlich beteiligt.

## 5.4 Betrachtung der Fehleranhäufungen

Zur Erkennung von Fehleranhäufungen wurden im Kapitel 3.4.2.2 die beiden Merkmale *FAH* und *FFA* vorgestellt. Mit

dem Merkmal *FAH* wird grundsätzlich die Existenz einer Fehleranhäufung nachgewiesen. Das Merkmal *FFA* hingegen erfaßt die Form einer Fehleransammlung und beschreibt somit letztlich den Typ der Fehleranhäufung, z. B. Porennest oder Porenkette. Beide Merkmale werden an einem ausgewählten Datensatz erprobt und mit den Ergebnissen visueller Auswertungen verglichen. Die Fehleranhäufungen, die hier untersucht werden, entstammen dem Datenmaterial, das bereits zur Beurteilung der 13 Einzelmerkmale verwendet wurde. Aus der Aufstellung des Datenmaterials in Kapitel 5.1.3 (Seite 45) geht hervor, daß von den insgesamt 11 Ausgangsklassen, die durch DIN-Ordnungsnummern gekennzeichnet sind, drei Klassen Fehleranhäufungen wiedergeben. Hierzu zählen die DIN-Ordnungsnummern 2013 (Porennest) sowie 3011 und 3021 (Schlackenzeilen).

Um die Aussagekraft der Merkmale zu testen, wurden die Fehleranhäufungen mit den jeweils dazugehörigen Einzelfehlern zu folgender Ausgangsklassenkonfiguration zusammengestellt:

Klasse	Typ der Fehleranhäufung	Anzahl der Datensätze
I	Einzelfehler (2011, 301, 302)	214
II	Fehlernest (2013)	78
III	Fehlerzeile (3011, 3021)	38

In der Klasse I sind alle Poren und Schlacken enthalten, die bei der visuellen Auswertung als Einzelfehler erkannt wurden. Eine weitere Aufteilung der Klasse I in die beiden Fehlertypen Pore und Schlacke ist nicht erforderlich, da die Merkmale *FAH* und *FFA* nicht zur Typenunterscheidung einzelner Fehler, sondern lediglich zur Erkennung und Bestimmung von Fehleranhäufungen eingesetzt werden. In den Klassen II und III erfolgt sodann die Unterscheidung in verschiedene Fehleranhäufungen. In der Klasse II befinden sich ausschließlich Porenester, während die Klasse III Fehlerzeilen aus scharfkantigen und abgerundeten Schlacken beinhaltet. Das zur Verfügung stehende Datenmaterial enthielt leider keine weiteren Fehleranhäufungen, wie z. B. Rissfelder und Porenketten. Da zwischen Fehlerketten und Fehlerzeilen hinsichtlich der Anordnung der Einzelfehler jedoch keine Unterschiede bestehen, wären Porenketten der Klasse III, d. h. den Fehlerketten zuzuordnen. Rissfelder hingegen besitzen eine Einzelfehleranordnung, die einem Fehlernest entspricht und wären deshalb der Klasse II zuzuordnen.

Die Bearbeitung des Datensatzes erfolgt nun in zwei Schritten. Zuerst wird das Merkmal *FAH* eingesetzt, um die insgesamt 330 Fehleranzeigen in Einzelfehler und Fehleranhäufungen zu unterscheiden. Dabei wird jede Fehleranzeige, die einer Fehleranhäufung zugeordnet wird, so gekennzeichnet, daß auch die Zusammengehörigkeit der Anzeigen untereinander in den jeweiligen Anhäufung er-

kennbar wird (siehe *Bild 3.4-17*, Seite 28). Danach werden mit dem Merkmal *FFA* die einzelnen Fehleranhäufungen nacheinander ausgewertet. Aus der geometrischen Anordnung der Anzeigen innerhalb der einzelnen Anhäufungen werden die Typen der Fehleranhäufungen bestimmt.

Beim ersten Verarbeitungsschritt hat das Merkmal *FAH* folgendes Ergebnis erzielt:

Klasse	Typ	Anzahl der Datensätze
I	Einzelfehler	229
II + III	Fehleranhäufung	101

Im Vergleich hierzu wurden bei der visuellen Auswertung 214 Anzeigen als Einzelfehler und 116 Anzeigen als Bestandteile von Fehleranhäufungen erkannt. Der Zuwachs an Einzelfehlern läßt sich dadurch erklären, daß 15 Fehleranzeigen die Bedingungen der Gruppenbildung nach Kapitel 3.4.2.2 nicht erfüllten.

Im zweiten Verarbeitungsschritt wurden die 101 Anzeigen der Fehleranhäufungen unter Verwendung des Merkmals *FFA* folgenden Ausgangsklassen zugeordnet:

Klasse	Typ	Anzahl der Datensätze
II	Fehlernest	69
III	Fehlerzeile	32

Das Ergebnis zeigt, daß von den 15 Fehleranzeigen, die fälschlicherweise als Einzelfehler erkannt wurden, neun Anzeigen aus der Klasse II und sechs Anzeigen aus der Klasse III entstammen. Insgesamt wurden von den 330 Fehlern jedoch 315 Fehler richtig zugeordnet, was einer Erkennungsrate von über 95% entspricht.

## 5.5 Darstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der statistischen Auswertungen haben gezeigt, daß die wichtigsten Informationen zur Unterscheidung verschiedener Fehlertypen in den Geometrien der Fehlerabbildungen enthalten sind. Bei allen Auswahlverfahren sind in den Rangfolgen die vorderen Positionen vornehmlich durch geometrische Merkmale besetzt. Hier sind insbesondere die beiden Formfaktoren *NFF* und *CNF*, die Konturlänge *KTL* und die Fehlerfläche *FFL* zu erwähnen. Diese Merkmale konnten sowohl bei den Einzelmerkmalen als auch bei der Merkmalskombination ihre Aussagekraft demonstrieren.

Im Bereich der Grauwertmerkmale haben sich der Fehlerkontrast *KON* und die Homogenität *HOM* als wichtige

fehlerbeschreibende Kenngrößen herausgestellt. Das Merkmal *KON* nimmt bei allen Auswahlverfahren nach den verschiedenen Gütemaßen stets einen Platz in der ersten Hälfte der Rangfolgen ein. Bei den Beurteilungen nach den Bewertungsmaßen erreicht das Merkmal *HOM* Rangordnungen zwischen vier und neun, und ist deshalb ebenfalls als sehr aussagekräftig einzustufen. Beide Merkmale benötigen zur Berechnung neben dem Binärbild der Fehleranzeigen auch das Grautonbild der Schweißnahtaufnahme und unterstreichen somit die Wichtigkeit der Schwärzungsinformation zur Fehlertypenbestimmung.

Das schlechte Ergebnis von *KON* und *HOM* bei der Hauptkomponententransformation ist darauf zurückzuführen, daß hier keine Ausgangsklassen vorgegeben wurden und sich die Ausrichtung der ersten Hauptkomponente maßgeblich an den vier geometrischen Merkmalen *NFF*, *FAD*, *KTL* und *CNF* orientiert. Die Bedeutung der beiden Merkmale *KON* und *HOM* innerhalb der Merkmalskombination zeigt sich jedoch in der Rangfolge der Einzelmerkmale, die ausschließlich unter Verwendung der Korrelationskoeffizienten erstellt wurde. Hier nehmen die Homogenität den Rang vier und der Fehlerkontrast den Rang sieben ein.

Die beiden kombinierten Grauwert-/Geometriemerkmale, der Ort der maximalen Tiefenausdehnung *OMT* und der gewichtete Flächenschwerpunkt *GFS*, erbrachten von allen hier verwendeten Merkmalen die schlechtesten Ergebnisse. Sie befinden sich bei den Auswahlverfahren nach den Güte- und Bewertungsmaßen meist im hinteren Bereich der Rangfolgen und konnten auch bei der Hauptkomponententransformation nur unbedeutende Anteile am ersten Eigenvektor der Kovarianzmatrix erzielen. Die Fehlereigenschaften, die durch diese beiden Merkmale beschrieben werden, sind spezielle ortsabhängige Schwärzungsinformationen innerhalb einer Fehlerabbildung und erscheinen für eine Fehlertypenunterscheidung ungeeignet.

Als wesentlich nützlicher hingegen haben sich die beiden kontextbezogenen Merkmale, die Fehlerlage *FLA* und die Fehlerrichtung *RTG*, erwiesen. Das Merkmal *RTG* gehört grundsätzlich zu den wichtigsten Merkmalen und wurde insbesondere bei den Beurteilungen zur Ausgangsklassenkonfiguration B (sechs Ausgangsklassen) mehrmals vor allen geometrischen Merkmalen eingestuft. Die Information über die Orientierung eines Fehlers, bezogen auf den Schweißnahtverlauf, muß deshalb für die Fehlertypenerkennung als außerordentlich wichtig angesehen werden.

Um eine Übersicht über die Leistungsfähigkeit der Einzelmerkmale zur Trennung verschiedener Fehlertypen zu erhalten, wurden die Ergebnisse der Beurteilungen aus Kapitel 5.2.4 noch einmal im *Bild 5.5-1* zusammengefaßt. Das Bild gibt Auskunft darüber, welche der 13 Einzelmerkmale zur Unterscheidung bestimmter Fehlertypen besonders gut geeignet sind. Hierzu wurden die sechs Fehlertypen der Ausgangsklassenkonfiguration B im Bild so

angeordnet, daß jedem Fehlertyp auf der linken Seite die jeweils fünf anderen Fehlertypen

	FFL	KTL	NFF	CNF	FSP	FAD	KON	HOM	FLU	OMT	GFS	FLA	RTG	
Längsrip	x	x	x	x			x		x			x	x	Querrisp
	x	x	x	x			x					x	x	Pore
	x	x	x	x			x		x			x		Schlauchpore
	x	x	x	x			x					x	x	Schlacke
	x	x	x	x			x				x	x		Bindefehler, ung. Durchschw.
Querrisp	x	x	x	x				x				x	x	Längsrip
	x	x	x	x				x				x		Pore
	x	x	x	x				x				x		Schlauchpore
	x	x	x	x				x				x		Schlacke
	x	x	x	x				x				x		Bindefehler, ung. Durchschw.
Pore	x	x	x	x			x					x	x	Längsrip
	x	x	x	x			x					x		Querrisp
	x	x	x	x			x					x		Schlauchpore
	x	x	x	x			x					x		Schlacke
	x	x	x	x			x					x		Bindefehler, ung. Durchschw.
Schlauchpore	x	x	x	x			x		x			x		Längsrip
	x	x	x	x			x					x		Querrisp
	x	x	x	x			x					x		Pore
	x	x	x	x			x					x		Schlacke
	x	x	x	x			x					x		Bindefehler, ung. Durchschw.
Schlacke	x	x	x	x			x					x	x	Längsrip
	x	x	x	x			x					x		Querrisp
	x	x	x	x			x					x		Pore
	x	x	x	x			x					x		Schlauchpore
	x	x	x	x			x					x		Bindefehler, ung. Durchschw.
Bindefehler ung. Durchschw.	x	x	x	x			x				x	x		Längsrip
	x	x	x	x			x					x		Querrisp
	x	x	x	x			x					x		Pore
	x	x	x	x			x					x		Schlauchpore
	x	x	x	x			x					x		Schlacke

Bild 5.5-1 :

Fehlertypenunterscheidung der 13 Einzelmerkmale

Markierungen zeigen ein Gütemaß oder ein Bewertungsmaß  $\geq 1$  an

auf der rechten Seite gegenüberstehen. Somit können für alle 13 Einzelmerkmale, die am oberen Rand aufgeführt sind, die verschiedenen Kombinationen der Fehlertypen getrennt betrachtet werden.

Die Markierungen innerhalb der Merkmalspalten zeigen an, welche Fehlertypenpaare von welchem Merkmal besonders gut getrennt werden. Eine Markierung wurde nur dann eingetragen, wenn das Merkmal für diese Fehlertypenkombination beim Gütemaß oder beim Bewertungsmaß einen Wert über 1 erzielte.

Das *Bild 5.5-1* bestätigt die Bedeutung der geometrischen Merkmale *FFL*, *KTL*, *NFF* und *CNF* und bringt die Wichtigkeit des Merkmals *RTG* zum Ausdruck. *RTG* ist das einzige Merkmal, das zur Unterscheidung von Querrissen und Bindefehlern bzw. ungenügenden Durchschweißungen eine Markierung erhalten hat. Als besonders schwierig hat sich die Trennung folgender Fehlertypenpaare herausgestellt:

Schlauchpore / Pore

Schlauchpore / Schlacke

Schlauchpore / Bindefehler, ung. Durchschweißung

Schlacke / Bindefehler, ung. Durchschweißung

Für diese Fehlertypenpaare konnten mit den hier entwickelten Merkmalen keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden.

## 6. Zusammenfassung

Zur Fehlertypenbestimmung bei der rechnergestützten Bildauswertung von Schweißnaht-radiographien wurden 15 Einzelmerkmale erstellt, die mit unterschiedlichen statistischen Verfahren hinsichtlich ihrer Aussagekraft beurteilt wurden. Die Merkmale beschreiben geometrische und densitometrische Eigenschaften der Fehlerabbildungen und wurden in objektbezogene und kontextbezogene Merkmale unterteilt. Objektbezogene Merkmale werden ausschließlich an einzelnen isolierten Fehlerabbildungen ermittelt, wogegen kontextbezogene Merkmale stets zusätzliche Informationen aus dem Bildinhalt der Schweißnahtaufnahme, z. B. über den Schweißnahtverlauf und die Positionen anderer in der Schweißnaht enthaltener Fehler, benötigen.

Die objektbezogenen Merkmale, die mit 11 Einzelmerkmalen an den hier durchgeführten Untersuchungen zahlenmäßig am stärksten vertreten sind, liefern Aussagen über die Fehlerform, den Fehlerkontrast und über fehlerspezifische Eigenschaften, die sich aus der lokalen Verteilung der Grauwerte innerhalb der Fehlerabbildung ergeben. Es wurden neben den realen Fehlerbildern auch die konvexen Darstellungen der Fehlerabbildungen verwendet. Aus den unterschiedlichen Verläufen der realen und konvexen Konturen konnten wichtige Merkmale, insbesondere zur Beschreibung der Fehlerform gewonnen werden. Für die objektbezogenen Merkmale, die sich auf die Schwärzungen im Durchstrahlungsbild beziehen, war es erforderlich, die Einflüsse unterschiedlicher radiographischer Aufnahmeparameter zu berücksichtigen. Durch die Einführung des mittleren Fehlerkontrasts konnte die Abhängigkeit der Merkmale von der jeweils vorliegenden Grundschwärzung der Durchstrahlungsaufnahme beseitigt werden.

Die kontextbezogenen Merkmale wurden in Fehler/Schweißnaht und Fehler/Fehler Merkmale unterteilt. Die Fehler/Schweißnaht Merkmale beschreiben die Lage und die Richtungsorientierung einer Fehlerabbildung innerhalb der Schweißnaht und benötigen deshalb Informationen über den Verlauf der Naht im Durchstrahlungsbild. Hierzu wurde im Rahmen der Arbeit ein Verfahren entwickelt, das für unbeschlossene Schweißnähte den Nahtbereich automatisch detektiert und markiert. Die Fehler/Fehler Merkmale wurden zur Erkennung und Beschreibung von Fehleranhäufungen eingesetzt. Aus der Häufigkeit einzelner Fehleranzeigen und dem Abstand der Fehleranzeigen zueinander wurde die Existenz einer Fehleranhäufung nachgewiesen. Anschließend wurde über den Fehlertyp der Einzelanzeigen und die Anordnung der Fehler untereinander die Art der Fehleranhäufung bestimmt.

Die Auswertung der Merkmale wurde mit verschiedenen statistischen Verfahren durchgeführt. Zur Beurteilung der Einzelmerkmale wurden das Gütemaß und das Bewertungsmaß verwendet. Beide Maße beschreiben die Abstände klassenbedingter Verteilungsdichten im Merkmalsraum und geben somit Auskunft über die Eigenschaften der Merkmale zur Trennung vorgegebener Ausgangsklassen. Bei der Verwendung mehrerer Einzelmerkmale innerhalb einer Merkmalskombination mußte außerdem darauf geachtet werden, daß die statistischen Abhängigkeiten der Merkmale untereinander möglichst gering sind. Aus diesem Grund wurde bei der Merkmalsauswahl zur Erstellung von Merkmalskombinationen neben dem Güte- bzw. Bewertungsmaß auch die Korrelation der Merkmale berücksichtigt. Die Beurteilung von Merkmalskombinationen erfolgte im mehrdimensionalen Merkmalsraum anhand der Hauptkomponentenanalyse. Das Zusammenwirken aller Einzelmerkmale wurde durch die Auswertung der Hauptkomponenten quantitativ beschrieben. Zusätzlich wurde durch die erste Hauptkomponente der Stellenwert jedes einzelnen Merkmals innerhalb der Merkmalskombination ermittelt.

Die praktische Erprobung der Merkmale wurde an 509 Abbildungen realer Schweißnahtfehler durchgeführt. Die Merkmalsdaten wurden zusammen mit den Ergebnissen einer visuellen Fehlertypenklassifizierung in einer Datenbank gespeichert und mit allen hier aufgeführten statistischen Verfahren ausgewertet. Die zur Trennung der Fehlertypen wichtigsten Einzelmerkmale wurden aus der Beschreibung der Fehlerform und der Richtungsorientierung der Fehlerabbildung gewonnen. Den klassenbedingten Verteilungsdichten der Merkmale war jedoch zu entnehmen, daß eine Trennung mehrerer Fehlertypen nicht durch einzelne Merkmale allein, sondern nur durch kombinierte Verwendung mehrerer Merkmale zu erreichen ist.

Die hier durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, daß für eine automatische Fehlertypenbestimmung an Schweißnahtaufnahmen sehr aussagekräftige Merkmale erforderlich sind. Die hohen Anforderungen, die dabei an die digitale Bildverarbeitung gestellt werden, sind mit den heutigen Methoden der Objekterkennung und -beschreibung nur unzureichend zu erfüllen. Die Einführung technischer Erkennungssysteme in der radiographischen Schweißnahtprüfung wird entscheidend von der Entwicklung neuer Verfahren zur Fehlertypenbestimmung abhängen.

## 7. Liste der Abkürzungen, Formelzeichen und Bilder

### Abkürzungen und Formelzeichen

$n$	Laufindex	$MAXFK$	Maximaler Fehlerkontrast
$F_p$	Fläche eines Pixels	$KON$	Merkmal "Fehlerkontrast"
$FL$	Fläche einer Fehlerabbildung	$LGW$	Wert des Laplace-Operators
$FLC$	Fläche einer konvexen Fehlerdarstellung	$LGW_f$	Wert des Laplace-Operators eines Bildpunktes innerhalb einer Fehlerabbildung
$FFL$	Merkmal "Fehlerfläche"	$HOM$	Merkmal "Homogenität"
$m$	Laufindex	$k$	Laufindex
$K_p$	Kantenlänge eines Pixels	$LGW_k$	Wert des Laplace-Operators eines Konturpunktes
$KL$	Konturlänge einer Fehlerabbildung	$FLV$	Merkmal "Flankenverlauf"
$KLC$	Konturlänge einer konvexen Fehlerdarstellung	$x_T; y_T$	Koordinaten der maximalen Tiefenausdehnung eines Fehlers
$KTL$	Merkmal "Konturlänge"	$\overline{ST}$	Abstand zwischen der maximalen Tiefenausdehnung und dem Flächenschwerpunkt
$FF$	Formfaktor	$OMT$	Merkmal "Ort der maximalen Tiefenausdehnung"
$R$	Radius eines Kreises	$x_{gs}; y_{gs}$	Koordinaten des gewichteten Flächenschwerpunktes
$NFF$	Merkmal "Normierter Formfaktor"	$GFS$	Merkmal "Gewichteter Flächenschwerpunkt"
$CNF$	Merkmal "Convexer normierter Formfaktor"	$SW_l$	Schwellwert für linken Nahtrand
$x_n; y_n$	Koordinaten der Bildpunkte innerhalb einer Fehlerabbildung	$SW_r$	Schwellwert für rechten Nahtrand
$x_S; y_S$	Koordinaten des Flächenschwerpunktes	$GW_{max}$	Maximaler Grauwert
$x_R; y_R$	Koordinaten des rechten unteren Eckpunktes eines umschreibenden Rechtecks	$GW_{lmin}$	Minimaler Grauwert links der Naht
$\overline{SM}$	Abstand zwischen dem Flächenschwerpunkt einer Fehlerabbildung und dem rechten unteren Eckpunkt des umschreibenden Rechtecks	$GW_{rmin}$	Minimaler Grauwert rechts der Naht
$FSP$	Merkmal "Flächenschwerpunkt"	$\overline{MS}$	Abstand der Schweißnahtmitte zum Flächenschwerpunkt einer Fehlerabbildung
$x_k; y_k$	Koordinaten der Konturpunkte	$\overline{MR}$	Abstand der Schweißnahtmitte zum Schweißnahttrand
$DMIN$	Minimaler Abstand zwischen Flächenschwerpunkt und Kontur einer Fehlerabbildung	$FLA$	Merkmal "Fehlerlage"
$DMAX$	Maximaler Abstand zwischen Flächenschwerpunkt und Kontur einer Fehlerabbildung	$S$	Flächenschwerpunkt
$FAD$	Merkmal "Flächenausdehnung"	$RTG$	Merkmal "Fehlerrichtung"
$u$	Laufindex	$F_{ik}$	Fehler der Nummer $k$ vom Typ $i$ in einer Fehleranhäufung
$f$	Laufindex	$FAH$	Merkmal "Fehleranhäufung"
$GW$	Grauwert eines Bildpunktes	$XFA$	Ausdehnung einer Fehleranhäufung in $x$ -Richtung
$GW_u$	Grauwerte der Bildpunkte in der Fehlerumgebung	$YFA$	Ausdehnung einer Fehleranhäufung in $y$ -Richtung
$GW_f$	Grauwerte der Bildpunkte in der Fehlerabbildung	$FFA$	Merkmal "Form der Fehleranhäufung" Fehlerklasse
$GW_{fmin}$	Minimaler Grauwert innerhalb einer Fehlerabbildung	$c$	Merkmalsvariable
$MFK$	Mittlerer Fehlerkontrast		



$w(c)$	Verteilungsdichte	c) Subtraktionsbild
$\mu$	Mittelwert	d) Binärbild
$s$	Streuung	<i>Bild 3.4-1:</i> Fehlerabbildungen und umschreibende Rechtecke gemeinsam dargestellt
$G$	Gütemaß	<i>Bild 3.4-2:</i> Binäre Darstellungen einer Fehlerabbildung
$i$	Laufindex	a) ursprüngliche Fehlerform
$j$	Laufindex	b) konvexe Fehlerform
$\bar{G}$	Gemittelttes Gütemaß	<i>Bild 3.4-3:</i> Ermittlung der konvexen Kontur
$b$	Battacharyya-Koeffizient	<i>Bild 3.4-4:</i> Objektbeispiele zum Konturmerkmal <i>KTL</i> und zum Flächenmerkmal <i>FFL</i>
$B$	Bewertungsmaß	<i>Bild 3.4-5:</i> Normierter Formfaktor für Schweißnahtfehler unterschiedlicher Geometrie
$\bar{B}$	Gemittelttes Bewertungsmaß	<i>Bild 3.4-6:</i> Fläche einer Fehlerabbildung im umschreibenden Rechteck
$\underline{c}$	Merkmalsvektor	<i>Bild 3.4-7:</i> Kurvenverläufe der Merkmale Flächenausdehnung und Formfaktor für ellipsenförmige Objekte
$\underline{j}_c$	j-ter Merkmalsvektor aus einer Stichprobe	<i>Bild 3.4-8:</i> Ermittlung des Fehlerkontrasts aus der Grautondarstellung einer Fehlerabbildung
$E\{ \}$	Erwartungswert	<i>Bild 3.4-9:</i> Berechnung des Laplace-Operators aus einer 3 x 3 Matrix
$K$	Kovarianzmatrix	<i>Bild 3.4-10:</i> Laplace-Operation an der Grautondarstellung einer Fehlerabbildung
$r$	Korrelationskoeffizient	<i>Bild 3.4-11:</i> Markierung des Schweißnahtverlaufs
$\bar{G}^*$	Bewertetes gemittelttes Gütemaß	<i>Bild 3.4-12:</i> Künstlich erstelltes Profil eines typischen Grauwertverlaufs senkrecht zum Schweißnahtverlauf
det	Determinante	<i>Bild 3.4-13:</i> Binärbild mit Fehlerabbildungen und eingezeichneten Schweißnahtmarkierungen
$I$	Einheitsmatrix	<i>Bild 3.4-14:</i> Ermittlung der Lage einer Fehlerabbildung unter Verwendung des Flächenschwerpunkts S
$\underline{e}$	Eigenvektor, Eigenwert	<i>Bild 3.4-15:</i> Ermittlung der Fehlerrichtung über den maximalen Radius <i>DMAX</i>
$( )^T$	Transponiert	<i>Bild 3.4-16:</i> Schweißnahtbereiche mit unterschiedlichen Fehleranhäufungen
$pke$	Prozentuale kummulative Eigenwerte	<i>Bild 3.4-17:</i> Verfahren der Gruppenbildung zur Bestimmung von Fehleranhäufungen
$c_n$	Normierter Merkmalswert	<i>Bild 3.4-18:</i> Tabelle der Einzelmerkmale

## Bilder

<i>Bild 1:</i>	Durchstrahlungsaufnahmen einer Schweißnaht	
<i>Bild 2.1-1:</i>	Ablauf einer automatischen Fehlerklassifizierung	<i>Bild 3.4-15:</i> Ermittlung der Fehlerrichtung über den maximalen Radius <i>DMAX</i>
<i>Bild 2.2-1:</i>	Prinzip der digitalen Bildverarbeitung	<i>Bild 3.4-16:</i> Schweißnahtbereiche mit unterschiedlichen Fehleranhäufungen
<i>Bild 2.2-2:</i>	Grauwertprofil der Abtastung einer Stufenkeilaufnahme im Schwärzungsbereich 0.04 D bis 2.7 D	<i>Bild 3.4-17:</i> Verfahren der Gruppenbildung zur Bestimmung von Fehleranhäufungen
<i>Bild 2.2-3:</i>	Grauwertprofil der Abtastung einer Stufenkeilaufnahme mit Schwärzungen größer 3.05 D	<i>Bild 3.4-18:</i> Tabelle der Einzelmerkmale
<i>Bild 2.3-1:</i>	Ablauf der automatischen Fehlerdetektion	<i>Bild 4.1-1:</i> Verteilungsdichte zweier Klassen im eindimensionalen Merkmalsraum
<i>Bild 2.3-2:</i>	Bildbeispiele zum Ablauf einer automatischen Fehlerdetektion	<i>Bild 4.1-2:</i> Beispiele für verschiedene Verteilungsdichten bei einem Zwei-Klassen-Problem
a) Digitalisiertes Röntgenbild		<i>Bild 4.2-1:</i> Verteilungsdichten zweier Klassen im zweidimensionalen Merkmalsraum
b) Hintergrundmodell		<i>Bild 4.2-2:</i> Punktdiagramm zweier Klassen im zweidimensionalen Merkmalsraum

- Bild 4.2-3:* Matrix der Gütemaße  $G$  für alle Klassenpaare
- Bild 4.2-4:* Matrix der klassenbezogenen gemittelten Gütemaße
- Bild 4.3-1:* Drehung des Koordinatensystems bei der Hauptkomponententransformation
- a) ursprüngliches Koordinatensystem
- b) gedrehtes Koordinatensystem
- Bild 5.1-1:* Bildpaar zur Kennnummer L02501 060 035
- Bild 5.2-1:* Klassenbedingte Verteilungsdichten aller Merkmale für Ausgangsklassenkonfiguration A
- Bild 5.2-2:* Tabelle der Gütemaße  $G$  für alle Klassenpaare bei 4 Ausgangsklassen (Konfiguration A)
- Bild 5.2-3:* Tabelle der Bewertungsmaße  $B$  für alle Klassenpaare bei 4 Ausgangsklassen (Konfiguration A)
- Bild 5.2-4:* Tabelle der Gütemaße  $G$  für alle Klassenpaare bei 6 Ausgangsklassen (Konfiguration B)
- Bild 5.2-5:* Tabelle der Bewertungsmaße  $B$  für alle Klassenpaare bei 6 Ausgangsklassen (Konfiguration B)
- Bild 5.2-6:* Tabelle der klassenbezogenen gemittelten Gütemaße bei 6 Ausgangsklassen (Konfiguration B)
- Bild 5.2-7:* Tabelle der klassenbezogenen gemittelten Bewertungsmaße bei 6 Ausgangsklassen (Konfiguration B)
- Bild 5.3-1:* Korrelationskoeffizienten  $r_{mm}$  der Fehlermerkmale
- Bild 5.3-2:* Tabelle der Gütemaße  $\bar{G}^*$  bei 4 Ausgangsklassen
- Bild 5.3-3:* Tabelle der Bewertungsmaße  $\bar{B}^*$  bei 4 Ausgangsklassen
- Bild 5.3-4:* Tabelle der Gütemaße  $\bar{G}^*$  bei 6 Ausgangsklassen
- Bild 5.3-5:* Tabelle der Bewertungsmaße  $\bar{B}^*$  bei 6 Ausgangsklassen
- Bild 5.3-6:* Kovarianzmatrix der Einzelmerkmale
- Bild 5.3-7:* Eigenwerte der Kovarianzmatrix
- Bild 5.3-8:* Prozentuale Anteile der Einzelmerkmale am ersten Eigenvektor der Kovarianzmatrix
- Bild 5.5-1:* Fehlertypenunterscheidung der 13 Einzelmerkmale

## 8. Literaturverzeichnis

- /1/ Kazmierczak, H. (ed.): *Erfassung und maschinelle Verarbeitung von Bilddaten*. Springer Verlag Wien, 1980
- /2/ Jain, A.K.: *Fundamentals of Digital Image Processing*. Prentice-Hall Inc., 1989
- /3/ Haberäcker, P.: *Digitale Bildverarbeitung*. Hanser Verlag 1991
- /4/ Purschke, M.: *Objektive Gußteilprüfung durch digitale Bildverarbeitung*. DGZfP-Querschnittseminar Bildverarbeitung, Berlin 1992
- /5/ Meyer, E.H.: Rechnergestützte Auswertung von Prüfbefunden. *Ingenieur-Werkstoffe* 2, 1990, S. 40-44
- /6/ Heinrich, W.: *Automatische Röntgenserienprüfung von Gußteilen*. Dissertation, TU Berlin, Institut für Allgemeine Elektrotechnik, 1988
- /7/ Rose, P.: *Rechnergestützte Bildanalyse in der Materialprüfung*. Amts- und Mitteilungsblatt der BAM, Band 13, Nr. 4, 1983
- /8/ Gonzalez, R.C.; Wintz, P.: *Digital Image Processing*. Addison-Wesley Publishing Company, 1977
- /9/ Niemann, H.: *Methoden der Mustererkennung*. Akademische Verlagsgesellschaft, 1974
- /10/ Jähne, B.: *Digitale Bildverarbeitung*. Springer Verlag, 1991
- /11/ Koeller, T.; Basler, G.; Schaefer, M.; Drewes, P.: *Objektive Röntgen-Durchleuchtungsprüfung mit dem Bildauswertungssystem "SABA"*. Berichtsband DGZfP-Jahrestagung, Trier, 1990, S. 115-123
- /12/ Zamperoni, P.: *Methoden der digitalen Bildverarbeitung*. Vieweg Verlag, 1991
- /13/ Schwarz, H.: *Neue Anwendungsmöglichkeiten der Bildanalyse in Forschung und Routine*. Gerätetechnologie 12, 1984
- /14/ Voss, K.; Süße, H.: *Praktische Bildverarbeitung*. Hanser Verlag, 1991
- /15/ Gonzalez, R.C.; Woods, R.E.: *Digital Image Processing*. Addison-Wesley Publishing, 1992
- /16/ Schmidt, P.; Roye, W.: *Elektronische Bilderzeugung und Verarbeitung in automatischen Röntgenprüfsystemen*. DGZfP-Jahrestagung, Lindau, 1987

- /17/ Klatte, R.: *Computergestützte Röntgenprüfung zur objektiven Qualitätssicherung von Werkstücken*. Dissertation, TU Berlin, Institut für Allgemeine Elektrotechnik, 1985
- /18/ Chang, S.M.; Fu, K.S.: *Pictorial Information Systems*. Springer Verlag, 1980
- /19/ Pavlidis, T.: *Algorithmen zur Grafik und Bildverarbeitung*. Verlag Heinz Heise, Hannover, 1990
- /20/ Rosenfeld, A.: *Digital Picture Analysis*. Springer Verlag, 1976
- /21/ Segelitz, A.: *Anwendung der Bildverarbeitung bei der Durchstrahlungsprüfung von Gußteilen*. Diplomarbeit, TU Magdeburg, 1990
- /22/ Purschke, M.: *Verbesserung der Detailerkennbarkeit in Röntgendurchleuchtungsbildern durch digitale Bildrestaurierung*. Dissertation, TU Berlin, Institut für Allgemeine Elektrotechnik, 1989
- /23/ Castleman, K.R.: *Digital Image Processing*. Prentice Hall New Jersey, 1979
- /24/ Korn, A.: *Formmerkmale zur automatischen Detektion von Objekten in natürlichen Szenen*. FhG-Berichte 1/2, 1979, S. 8-11
- /25/ Gonzalez, R.C.; Thomason, M.G.: *Syntactic Pattern Recognition*. Addison Wesley Publishing Company, 1978
- /26/ Steele, J.H.: *Die Anwendung von Extremwert-Methoden für die Charakterisierung von Einschlußpopulationen*. Praktische Metallographie 17, Nr. 9, 1980
- /27/ Fu, K.S.: *Digital Pattern Recognition*. Springer Verlag, 1980
- /28/ Hall, E.L.: *Computer Image Processing and Recognition*. Academic Press, 1979
- /29/ Link, R.; Nuding, W., Sauerwein, K.: *Radiometrie als automatisierbares Verfahren in der Durchstrahlungsprüfung*. DGZfP-Jahrestagung, Essen, 1984
- /30/ Azizi, S.A.: *Entwurf und Realisierung digitaler Filter*. Oldenbourg-Verlag, 1990
- /31/ Lindley, C.A.: *Practical Image Processing in C*. John Wiley & Sons Inc., 1991
- /32/ Pratt, W.K.: *Digital Image Processing*. John Wiley & Sons Inc., 1991
- /33/ Jain, A.K.: *Real-Time Objekt Measurement and Classification*. Computer and Systems Sciences Vol.42, Springer Verlag, 1988
- /34/ Strecker, H.; Boerner, H.: *Automatische Röntgenprüfung von Gußteilen*. DGZfP-Querschnittseminar Bildverarbeitung, Berlin, 1992
- /35/ Daum, W.; Rose, P.; Heidt, H.: *Automatische Erkennung von Schweißnahtfehlern in der Durchstrahlungsprüfung*. Materialprüfung 28/6, 1986, S.177-180
- /36/ Eckelt, B.; Meyendorf, N.; Morgner, W.; Richter, U.: *Use of Automatic Image Processing for Monitoring of Welding Processes and Weld Inspection*. Proceedings 12th WCNDT, Amsterdam, 1989, S. 37-41
- /37/ Kato, Y. (ed): *Development of the Automatic Weld Defect Identification System for Radiographic Testing*. Kawasaki Heavy Industries LTD, July 1990
- /38/ Schlußbericht zum Forschungsvorhaben "Digitale Bildverarbeitung und automatische Bildauswertung in der Durchstrahlungsprüfung" der Europäischen Gemeinschaft für Kohle und Stahl. Vertrag Nr. P 1206/7210.GF.101, 1986
- /39/ Schlußbericht zum Forschungsvorhaben "Optimierung der radiographischen Prüftechnik für die automatische Bewertung von Echtzeitbildern in der Stahlindustrie" der Europäischen Gemeinschaft für Kohle und Stahl. Vertrag Nr. P 7210.GB.107, 1988
- /40/ Rose, P.; Wessel, H.: *Anwendungsbeispiele digitaler Bildverarbeitung in der zerstörungsfreien Materialprüfung*. Vision & Voice Jahrbuch, 1993
- /41/ Eckelt, B.: *A Parallel Algorithm for Background-Subtraction on X-Ray Images of Welding Seams*. Computer Analysis of Images and Patterns (CAIP), Leipzig, 1989, S. 102-104
- /42/ Rose, P.; Raabe, P.; Daum, W.; Szameit, A.: *Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen*. BAM-Forschungsbericht Nr.114, 1985, 244 Seiten
- /43/ Pohle, R.; Hilbig, A.; Meyendorf, N.: *Algorithmen für die automatische Fehlererkennung in der radioskopischen Schweißnahtprüfung*. DGZfP-Querschnittseminar Bildverarbeitung, Berlin, 1992
- /44/ Rose, P.; Builtjes, J.H.: *Ermittlung optimaler Merkmale zur Klassifizierung radiographisch erfaßter Schweißnahtfehler*. Berichtsband DGZfP-Jahrestagung, Trier, 1990, S. 370-376
- /45/ Daum, W.: *Untersuchung verschiedener Segmentierungsverfahren an Hand ausgewählter Radiografien aus der Schweißnahtprüfung*. Diplomarbeit, BAM, TU Berlin, 1984

- /46/ Rose, P.: *Digitale Bildverarbeitung in der zerstörungsfreien Materialprüfung – Verfahren und Einsatzmöglichkeiten*. Bild & Ton, Band 44, Heft 2, 1991, S. 57-64
- /47/ Rose, P.; Builtjes, J.H.; Daum, W.; Heidt, H.: *Eine digitale Bild-Datenbank zur Katalogisierung von Schweißnahtfehlern*. DGZfP-Jahrestagung, Lindau, 1987
- /48/ Goutte, R.; Odet, C.; Tuncer, T.; Bodson, F.; Varcin, E.: *Application of Image Processing Methods to Industrial Radiography*. 7th Int. Conference on NDE, Grenoble, 1985
- /49/ Inoue, K.; Kobayashi, M.: *Automatic Recognition of Weld Defects in Radiographic Test*. Transactions of JWRI, Vol.11, No.2, 1982
- /50/ Rose, P.; Daum, W.; Builtjes, J.H.: *Automatic Evaluation of Weld Radiographs by Digital Image Processing*. BINDT-Symposium, Newbury, 1988
- /51/ Grunenberg, U.: *Untersuchungen über die Zuverlässigkeit eines automatischen Auswertesystems für die radiographische Schweißnahtprüfung*. Studienarbeit, TU Magdeburg, 1993
- /52/ Coen, G.; Niehues, F.; Keck, R.: *Quantitative Radiographie, ein Weg zur objektiven Bewertung von Fehlstellen*. DGZfP-Jahrestagung, Münster, 1986
- /53/ Lin, W.; Dinghua, C.; Qinghong, X.: *Study on Automatic Detection and Identification of Defects in Weld by Microcomputer*. Int. Conference on Quality and Reliability in Welding, Hangshou, Sep. 1984
- /54/ DIN 54 111, Teil 1 *Prüfung metallischer Werkstoffe mit Röntgen- und Gammastrahlen*. Deutsche Norm, Mai 1988
- /55/ Becker, E.: *Grobstrukturprüfung mittels Röntgenstrahlung und Gammastrahlung*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1983
- /56/ Halmshaw, R.: *Industrial Radiology*. Applied Science Publishers, 1982
- /57/ Becker, G.L. (ed): *Radiographic NDT*. Du Pont NDT Systems, 1990
- /58/ Betz, U.; Schnitger, D.: *Durchstrahlungsprüfung 1*. DGZfP, Unterlagen für Unterricht und Kursus, Ausgabe 1977
- /59/ DIN 8524 *Fehler an Schmelzschweißverbindungen aus metallischen Werkstoffen*. Deutsche Norm, November 1971
- /60/ Clauß, G.; Ebner, H.: *Grundlagen der Statistik*. Verlag Harri Deutsch, Zürich, 1975
- /61/ Stange, K.: *Bayes-Verfahren*. Springer Verlag, 1977
- /62/ Fisz, M.: *Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik*. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1989
- /63/ Kleiter, G.D.: *Bayes-Statistik, Grundlagen und Anwendungen*. Walter de Gruyter, 1981

# **A N L A G E   A**

Tabelle der Einzelmerkmale

Zusammenstellung der Ausgangsklassen für  
Konfiguration A und Konfiguration B

OBJEKTBEZOGENE MERKMALE		
Geometrische Merkmale	<i>FFL:</i> <i>KTL:</i> <i>NFF:</i> <i>CNF:</i> <i>FSP:</i> <i>FAD:</i>	Fehlerfläche Konturlänge Normierter Formfaktor Convexer norm. Formfaktor Flächenschwerpunkt Flächenausdehnung
Grauwertmerkmale	<i>KON:</i> <i>HOM:</i> <i>FLV:</i>	Fehlerkontrast Homogenität Flankenverlauf
Kombinierte Grauwert-/ Geometrie-Merkmale	<i>OMT:</i> <i>GFS:</i>	Ort der maximalen Tiefen- ausdehnung Gewichteter Flächenschwer- punkt
KONTEXTBEZOGENE MERKMALE		
Fehler/Schweißnaht- Merkmale	<i>FLA:</i> <i>RTG:</i>	Fehlerlage Fehlerrichtung
Fehler/Fehler-Merkmale	<i>FAH:</i> <i>FFA:</i>	Fehleranhäufung Form der Fehleranhäufung

Tabelle der Einzelmerkmale

Ausgangsklassenkonfiguration A

Symbol (Bild 5.2-1)	Klasse	
○	I	Riß
△	II	Pore
✕	III	Schlacke
▼	IV	Bindefehler und ungenügende Durchschweißung

Ausgangsklassenkonfiguration B

Klasse	
I	Längsriß
II	Querriß
III	Pore
IV	Schlauchpore
V	Schlacke
VI	Bindefehler und ungenügende Durchschweißung

# **ANLAGE B**

Kurzzeichen für wichtige Schweißnahtfehler

(Auszug aus DIN 8524)

**Kurzzeichen für wichtige Schweißnahtfehler (Auszug aus DIN 8524)**

Fehlerhauptgruppe <sup>1)</sup>	Fehlerbezeichnung	in Deutschland übliche Abkürzung <sup>2)</sup>	internationales Kurzzeichen	Ordnungsnummer nach DIN 8524
Riß	Längsriß	R	E	100
	Querriß	LR	Ea	101
	Endkraterriß	QR	Eb	102
		–	Ec	104
Hohlraum	Gaseinschluß	P	A	201
	Pore	P	Aa	2011
	Porennest	PN	–	2013
	Porenkette	PK	–	2014
	Schlauchpore	P	Ab	2016
	Lunker	L	K	202
Einschluß	Schlacke (abgerundet)	S	Ba	301
	Schlackenzeile (abgerundet)	SZ	–	3011
	Schlacke (scharfkantig)	S	G	302
	Schlackenzeile (scharfkantig)	SZ	–	3021
	Oxidhaut	–	J	303
	Fremdmetalleinschluß	–	H	304
Bindefehler und ungenügende Durchschweißung	Bindefehler	BF	C	401
	ungenügende Durchschweißung	WF	D	402
Formfehler	Kerbe (allg.)	K	–	501
	Einbrandkerbe	EK	F	5011
	Tropfenbildung	Tr	–	504
	Kantenversatz	Rv	–	507
	Wurzelrückfall	W	–	515

1) Reihenfolge gemäß DIN 8524

2) Anhängelbuchstaben: w = wurzelseitig, e = einzeln



# Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/1968

**Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)**  
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/1970 (vergriffen)

G. Andreas  
**Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern**

Nr. 3/1970

J. Ziebs  
**Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile**

Nr. 4/1970 (vergriffen)

A. Burmester  
**Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit - Grundlagen und Vergütungsverfahren**

Nr. 5/1971

N. Steiner  
**Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken**

Nr. 6/1971

P. Schneider  
**Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen**

Nr. 7/1971

H.-J. Petrowitz  
**Chromatographie und chemische Konstitution - Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie**

Nr. 8/1971

H. Veith  
**Zum Spannungs-Drehungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung**

Nr. 9/1971

K.-H. Möller  
**Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen**

Nr. 10/1972

D. Aurich, E. Martin  
**Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode**

Nr. 11/1972

H.-J. Krause  
**Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden**

Nr. 12/1972

H. Feuerberg  
**Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren**

Nr. 13/1972

K.-H. Habig, K. Kirschke, W.-W. Maennig, H. Tischer  
**Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und  $2 \cdot 10^{-7}$  Torr**

Nr. 14/1972

E. Fischer  
**Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz**

Nr. 15/1972

H. Pohl  
**Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse**

Nr. 16/1972

E. Knublauch  
**Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadenfeuer**

Nr. 17/1972

P. Reimers  
**Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen**

Nr. 18/1973

W. Struck  
**Das Spröbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**

Nr. 19/1973

K. Kaffanke, H. Czichos  
**Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen**

Nr. 20/1973

R. Rudolph  
**Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden**

Nr. 21/1973

D. Klaffke, W. Maennig  
**Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung**

Nr. 22/1973

R. Rudolph, E. Knublauch  
**Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen**

Nr. 23/1973

W. Ruske  
**Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin. Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen**

Nr. 24/1973

J. Stanke, E. Klement, R. Rudolph  
**Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung**

Nr. 25/1973

E. Knublauch  
**Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen**

Nr. 26/1974

P. Jost, P. Reimers, P. Weise  
**Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM - Eigenschaften und erste Anwendungen**

Nr. 27/1974

H. Wüstenberg  
**Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall**

Nr. 28/1974

H. Heinrich  
**Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern**

Nr. 29/1974

P. Schneider  
**Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem Idealisotropen porösen Material mit starrem Skelet für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall**

Nr. 30/1974 (vergriffen)

H. Czichos, G. Salomon  
**The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology**

Nr. 31/1975

G. Fuhrmann  
**Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung**

Nr. 32/1975

R. Rudolph, B. Böttcher  
**Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen**

Nr. 33/1975

A. Wagner, G. Kieper, R. Rudolph  
**Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens**

Nr. 34/1976 (vergriffen)

H.-J. Deppe  
**Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoff**

Nr. 35/1976

E. Limberger  
**Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper - Vorschlag für ein Prüfverfahren -**

Nr. 36/1976 (vergriffen)

J. Hundt  
**Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles**

Nr. 37/1976

W. Struck  
**Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen - Vorschlag für ein Prüfverfahren -**

Nr. 38/1976

K.-H. Habig  
**Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionitriertem Stahl 42 CrMo 4**

Nr. 39/1976

K. Kirschke, G. Kempf  
**Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit Nicht-Newtonischem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Schwerbeanspruchung**

Nr. 40/1976

H. Hantsche  
**Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren**

Nr. 41/1976

B. Böttcher  
**Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten**

Nr. 42/1976

S. Dielten  
**Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft**

Nr. 43/1976

W. Struck  
**Das Spröbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**

Nr. 44/1976

W. Matthees  
**Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms "Stab-Werk"**

Nr. 45/1976  
W. Paatsch  
**Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten**

Nr. 46/1977 (vergriffen)  
G. Schickert, H. Winkler  
**Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung**  
**Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses**

Nr. 47/1977  
A. Plank  
**Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen**

Nr. 48/1977  
U. Holzöhner  
**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn**

Nr. 49/1977  
G. Wittig  
**Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung**

Nr. 50/1978 (vergriffen)  
N. Czaika, N. Mayer, C. Amberg, G. Magiers, G. Andrae, W. Markowski  
**Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und Überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern**

Nr. 51/1978  
J. Sickfeld  
**Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen**

Nr. 52/1978  
A. Tomov  
**Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung**

Nr. 53/1978  
R.-G. Rohrmann, R. Rudolphi  
**Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge**

Nr. 54/1978  
H. Sander  
**Magnetisches Verhalten dünner Eisen-schichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung**

Nr. 55/1978  
D. Klaffke  
**Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristalle polykristalliner 99,999 %-A1-Proben bei Biegewechselbeanspruchung**

Nr. 56/1979  
W. Brünner, C. Langlie  
**Stabilität von Sandwichbauteilen**

Nr. 57/1979  
M. Stadthaus  
**Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung**  
**Investigations on Inspection-Media for Magnetic Particle-Testing**

Nr. 58/1979  
W. Struck  
**Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau**

Nr. 59/1979  
G. Plauk  
**Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der**

**Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl**

Nr. 60/1979  
H. Spreckelmeyer, R. Helms, J. Ziebs  
**Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken**

Nr. 61/1979  
K. Richter  
**Beschreibung von Problemen der höheren Farbmetrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems**

Nr. 62/1979  
W. Gerisch, G. Becker  
**Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle**

Nr. 63/1979  
E. Behrend, J. Ludwig  
**Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase**

Nr. 64/1980  
W. Rücker  
**Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung**

Nr. 65/1980  
P. Schmidt, D. Aurich, R. Helms, H. Veith, J. Ziebs

**Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte**

Nr. 66/1980  
M. Hattwig  
**Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung**

Nr. 67/1980  
W. Matthees  
**Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung**

Nr. 68/1980  
D. Petersohn  
**Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik. Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisions-Goniometers**

Nr. 69/1980  
F. Buchhardt, P. Brandl  
**Untersuchungen zur Integrität den Liners von Reaktorsicherheitschillen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise**

Nr. 70/1980 (vergriffen)  
G. Schickert  
**Schwellenwerte beim Betondruckversuch**

Nr. 71/1980  
W. Matthees, G. Magiera  
**Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen**

Nr. 72/1980  
R. Rudolphi  
**Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen**

Nr. 73/1980  
P. Wegener  
**Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen**

Nr. 74/1980  
R. Rudolphi, R. Müller  
**ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz**

Nr. 75/1980  
H.-J. Heinrich  
**Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen**

Nr. 76/1980  
D. Klaffke, W.-W. Maennig  
**Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop**

Nr. 77/1981  
M. Gierloff, M. Mautzsch  
**Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen**

Nr. 78/1981  
W. Rücker  
**Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund**

Nr. 79/1981  
V. Neumann  
**Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflussten Kalttribneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch**

Nr. 80/1981  
A. Plank, W. Struck, M. Tzschätzsch  
**Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten**

Nr. 81/1981  
J. Schmidt  
**Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik**

Nr. 82/1982  
R. Helms, H.-J. Kühn, S. Ledworuski  
**Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches**  
**Assezzement of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test**

Nr. 83/1982  
H. Czichos, P. Feinle  
**Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen**  
**- Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen -**

Nr. 84/1982  
R. Müller, R. Rudolphi  
**Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)**

Nr. 85/ISBN 3-88314-231 -X/1982  
H. Czichos  
**Technische Materialforschung und -prüfung - Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm "Basic Technological Research" Materials Research and Testing - Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme "Basic Technological Research" -**

Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/1982  
K. Niesel, P. Schimmelwitz  
**Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale**

Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/1982  
B. Isecke, W. Stichel  
**Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren**

- Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/1983  
A. Erhard  
**Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall**
- Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/1983  
D. Conrad, S. Dietlen  
**Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid**
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/1983  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
**Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**
- Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/1983  
M. Weber  
**Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz**
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/1983  
L. Auersch  
**Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden**
- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/1983  
P. Studt  
**Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen**
- Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/1983  
Xian-Guan Dong  
**Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen**
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/1983  
M. Römer  
**Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten**
- Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/1983  
H. Eifler  
**Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken**
- Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/1983  
G. Fuhrmann, W. Schwarz  
**Typische Bruchflächenausbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung**
- Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/1983  
E. Schnabel  
**Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschenwaren**  
**- Stretch- und Erholungsvermögen -**
- Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/1983  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
**Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**
- Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/1984  
G. Klamrowski, P. Neustupny  
**Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand**
- Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/1984  
P. Reimers, J. Goebbels, H. Heidt, P. Weise, K. Wilding  
**Röntgen- und Gammastrahlen-Computer-Tomographie**
- Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/1984  
G. Magiers  
**Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens auf Druckspannungsmessung in Beton**
- Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/1984  
D. Schnitger  
**Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien**
- Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/1984  
M. Gierloff  
**Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen**
- Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/1984  
B. Schulz-Forberg  
**Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen**
- Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/1984  
J. Lehnert  
**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last**
- Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/1984  
W. Stichel, J. Ehreke  
**Korrosion von Stahlradiatoren**
- Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/1984  
L. Auersch  
**Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen - Ergebnisse von Modellrechnungen**
- Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/1985  
M. Omar  
**Zur Wirkung der Schrumpfbegrenzung auf den Schweißspannungszustand und das Spröbruchverhalten von unterpulverschweißten Blechen aus St E 460 N**
- Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/1985  
H. Walde, B. Kropp  
**Wasserstoff als Energieträger**
- Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/1985  
K. Ziegler  
**Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Analex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte**
- Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/1985  
W. Lützwow  
**Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen**
- Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/1985  
R. Helms, H. Henke, G. Oelrich, T. Saito  
**Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungskorrosion von Offshore-Konstruktionen**
- Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/1985  
P. Rose, P. Raabe, W. Daum, A. Szameit  
**Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen**
- Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/1985  
K. Richter  
**Farbempfindungsmerkmal Elementarblau und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld**
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/1985  
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi, A. Wagner  
**Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik**
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/1985  
H. Czichos, G. Sievers  
**Materials Technologies and Techno-Economic Development**  
**A Study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)**
- Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/1985  
H. Treumann, H. Andre, E. Blossfeld, N. Pfeil, M.-M. Zindler  
**Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung - Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen**
- Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/1985  
J. Herter, K. Brandes, E. Limberger  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
**Versuche an Stahlbetonplatten, Teil 1**  
**Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**  
**Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part 1**
- Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/1986  
A. Hecht  
**Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung**
- Nr. 121/ISBN 3-88314-530-0/1986  
P. Feinle, K.-H. Habig  
**Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen; Einflüsse von Stahlzusammensetzung und Wärmebehandlung**
- Nr. 122/ISBN 3-88314-521-1/1986  
J. Mischke  
**Entsorgung kerntechnischer Anlagen**  
**Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Forberg, K. E. Wieser und B. Droste**
- Nr. 123/ISBN 3-88314-531-9/1986  
D. Rennoch  
**Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase**
- Nr. 124/ISBN 3-88314-538-6/1986  
H.-M. Thomas  
**Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung**
- Nr. 125/ISBN 3-88314-540-8/1986 (vergriffen)  
B. Droste, U. Probst  
**Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolation von Flüssiggas-Lagertanks**
- Nr. 126/ISBN 3-88314-547-5/1986  
W. Stichel  
**Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen**
- Nr. 127/ISBN 3-88314-564-5/1986 (vergriffen)  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
**Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**  
**Versuche an Stahlbetonbalken, Teil 1**  
**Tests on Reinforced Concrete Beams, Part 1**
- Nr. 128/ISBN 3-88314-568-8/1986 (vergriffen)  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
**Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**  
**Versuche an Stahlbetonbalken, Teil 11**  
**Tests on Reinforced Concrete Beams, Part 11**
- Nr. 129/ISBN 3-88314-569-6/1986 (vergriffen)  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
**Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load**  
**Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit**  
**Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates**

- Nr. 130/ISBN 3-88314-570-X/1986  
W. Struck  
**Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material**
- Nr. 131/ISBN 3-88314-585-8/1986  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load  
**Versuche an Stahlbetonplatten, Teil 11**  
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part 11
- Nr. 132/ISBN 3-88314-595-5/1987  
Chr. Herold, F.-U. Vogdt  
**Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen**
- Nr. 133/ISBN 3-88314-609-9/1987 (vergriffen)  
M. Woydt, K.-H. Habig  
**Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe**
- Nr. 134/ISBN 3-88314-615-3/1987  
G. Andreas, G. Niessen  
**Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen**
- Nr. 135/ISBN 3-88314-618-8/1987  
J. Ludwig, W.-D. Mischke, A. Ulrich  
**Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen**
- Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/1987  
H.-J. Deppe, K. Schmidt  
**Untersuchung zur Beurteilung von Brett-schichtverleimungen für den Holzbau**
- Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/1987  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiete der Komponentensicherheit**
- Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/1987  
M. Dogurike, F. Buchhardt  
**Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben**
- Nr. 139/ISBN 3-88314-658-7/1987  
J. Olschewski, S.-P. Scholz  
**Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle**
- Nr. 140/ISBN 3-88314-643-9/1987  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
- Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/1987  
F. Buchhardt, W. Matthees, G. Magiera, F. Mathiak  
**Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdbebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken**
- Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/1987  
H. Treumann, G. Krüger, N. Pfeil, S. von Zahn-Ullmann  
**Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefährzahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen**
- Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/1987  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively
- Loaded Reinforced Concrete Members**  
Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung  
Experimental and numerical Investigations concerning Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under Impact Load
- Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/1987  
F. Buchhardt, G. Magiera, W. Matthees, M. Weber, J. Altes  
**Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR- Reaktorgebäudes**
- Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/1987  
U. Holzöhner  
**Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden**
- Nr. 146/ISBN 3-88314 714-1/1987  
W. Schon, M. Mallon  
**Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks**
- Nr. 147/ISBN 3-88314-720-6/1987  
H.-D. Kleinschrodt  
**Lösung dynamischer Biege- und Torsionsprobleme von Stabsystemen aus dünnwandigen elastischen Stäben mit offenem Querschnitt mittels frequenzabhängiger Ansatzfunktionen**
- Nr. 148/ISBN 3-88314-774-5/1988  
W. Müller  
**Theoretische Untersuchung von Variationsprinzipien für elastoplastisches Materialverhalten sowie Entwicklung und numerische Erprobung von Finite-Element-Verfahren für den ebenen Spannungszustand**
- Nr. 149/ISBN 3-88314-775-3/1988  
U. Holzöhner  
**Bestimmung baugrunderdynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben**
- Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/1988  
M. Weber  
**VG3D Zeichenprogramm für vektorgraphische Darstellung dreidimensionaler Strukturen**
- Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/1988  
L. Auersch-Saworski  
**Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen**
- Nr. 152/ISBN 3-88314-796-6/1988  
G. Plauk, G. Kretschmarin, R.-G. Rohrmann  
**Untersuchung des baulichen Zustandes und der Tragfähigkeit vorgespannter Riegel von Verkehrszeichenbrücken der Berliner Stadtautobahn**
- Nr. 153/ISBN 3-88314-797-4/1988  
H. Sander, W.-W. Maennig  
**Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mechanischer Wechselbeanspruchung**
- Nr. 154/ISBN 3-88314-822-9/1988  
K. Breitzkreutz, P.-J. Uttech, K. Haedecke  
**Druckgesinterte Stähle als zertifiziertes Referenzmaterial für die Spektrometrie**
- Nr. 155/ISBN 3-88314-825-3/1988  
L. Auersch  
**Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messungen am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental**
- Nr. 156/ISBN 3-88314-887-3/1989  
G. Klamrowski, P. Neustupny, H.-J. Deppe, K. Schmidt, J. Hundt  
**Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Faserzementen**
- Nr. 157/ISBN 3-88314-888-1/1989  
E. Limberger, K. Brandes  
**Versuche zum Verhalten von Stahlbetonbalken mit Übergreifungsstößen der Zugbewehrung unter stoßartiger Belastung**
- Nr. 158/ISBN 3-88314-889-X/1989  
R. Wäsche, K.-H. Habig  
**Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung - Literaturübersicht**
- Nr. 159/ISBN 3-88314-890-3/1989  
R. Müller, R. Rudolphi  
**Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im Querschnitt von Hausschornsteinen nach DIN 18160, Teil 6**
- Nr. 160/ISBN 3-88314-917-9/1989  
W. Matthees  
**Entwicklung eines Makroelementes durch Kondensation am Beispiel der Lastfälle Flugzeugabwurf und Erdbeben bei Boden-Bauwerk-Wechselwirkung mit biegeweichen Fundamenten**
- Nr. 161/ISBN 3-88314-920-9/1989  
G. Mellmann, M. Maultzsch  
**Untersuchung zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Flachglas für bauliche Anlagen**
- Nr. 162/ISBN 3-88314-921-7/1989  
W. Brünner  
**Untersuchungen zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben**
- Nr. 163/ISBN 3-88314-922-5/1989  
W. Brünner, G. Mellmann, W. Struck  
**Biegefestigkeit und Tragfähigkeit von Scheiben aus Flachglas für bauliche Anlagen**
- Nr. 164/ISBN 3-88314-934-9/1989  
R. Helms, B. Jaenicke, H. Wolter, C.-P. Bork  
**Zur Schwingfestigkeit großer geschweißter Stahlträger**
- Nr. 165/ISBN 3-88314-935-7/1989  
P. Gobel, L. Meckel, W. Schiller  
**Untersuchung zur Erarbeitung von Kennwerten bei Einrichtungsmaterialien (Holzwerkstoffen, Möbeln und Textilien) hinsichtlich der Formaldehyd-Emission - Teil B: Textilien**
- Nr. 166/ISBN 3-88314-936-5/1989  
K. Breitzkreutz  
**Modelle für Stereologische Analysen**
- Nr. 167/ISBN 3-88314-937-3/1989  
A. Mitakidis, W. Rücker  
**Erschütterungsausbreitung im elastischen Halbraum bei transienten Belastungsvorgängen**
- Nr. 168/ISBN 3-88314-958-6/1990  
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi  
**Numerische Untersuchung geometriebedingter Wärmebrücken (Winkel und Ecken) unter Einsatz hochauflösender Farbgraphik bei Berücksichtigung der Tauwasserproblematik und des Mindestluftwechsels**
- Nr. 169/ISBN 3-88314-959-4/1990  
Chr. Kohl, W. Rucker  
**Integration der Untergrunddynamik in das Programmsystem MEDYNA, dargestellt am Beispiel des Intercity Experimental (ICE)**
- Nr. 170/ISBN 3-88314-960-8/1990  
P. Studt, W. Kerner, Tin Win  
**Untersuchung der mikrobiologischen Schädigung wassergemischter Kühlschmierstoffe mit dem Ziel der Verbesserung der Arbeitshygiene, der Minderung der Geruchsbelastung und der Menge zu entsorgender Emulsionen**
- Nr. 171/ISBN 3-88314-997-7/1990  
F. Buchhardt  
**Ein Operator zur Koppelung beliebig benachbarter dynamischer Systeme am Beispiel der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung**

- Nr. 172/ISBN 3-88314-998-5/1990  
J. Vielhaber, G. Plauk  
**Grenztragfähigkeit großer Verbundprofilstützen**
- Nr. 173/ISBN 3-88314-999-3/1990  
B. Droste, J. Ludwig, B. Schulz-Forberg  
**Höherwertige Transporttechnik und ihre Konsequenzen für die Beförderung gefährlicher Güter**
- Nr. 174/ISBN 3-88429-021-8/1990  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte**
- Nr. 175/ISBN 3-88429-022-6/1990  
W. Brocks, D. Klingbeil, J. Olschewski  
**Lösung der HRR-Feld-Gleichungen der elastisch-plastischen Bruchmechanik**
- Nr. 176/ISBN 3-88429-035-6/1990  
W. Matthees, G. Magiera  
**Iterative Dekonvolution der seismischen Basiserregung für den Zeitraum**
- Nr. 177/ISBN 3-89429-090-0/1991  
G. Schickert, M. Krause, H. Wiggenhauser  
**Studie zur Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren bei Ingenieurbauwerken**
- Nr. 178/ISBN 3-89429-429-9/1991  
G. Andreae, J. Knapp, G. Niessen  
**Entwicklung und Untersuchung eines kapazitiven Hochtemperatur-Dehnungsaufnehmers für Einsatztemperaturen bis ca. 1000 °C**
- Nr. 179/ISBN 3-89429-100-1/1991  
H. Eifler  
**Die Drehfähigkeit plastischer Gelenke in Stahlbeton-Plattenbalken, bewehrt mit naturhartem Betonstahl BSt 500 S im Bereich negativer Biegemomente**
- Nr. 180/ISBN 3-89429-101-X/1991  
E. Klement, G. Wieser  
**Zur numerischen Übertragbarkeit von Prüfungsergebnissen an Hausschornsteinen auf Schornsteine mit anderen lichten Querschnitten**
- Nr. 181/ISBN 3-89429-105-2/1991  
H. Czichos, R. Helms, J. Lexow  
**Industrial and Materials Technologies Research and Development Trends and Needs**
- Nr. 182/ISBN 3-89429-145-1/1992  
M. Weber  
**Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten im Bereich geometriebedingter Wärmebrücken**
- Nr. 183/ISBN 3-89429-163-X/1992  
F. Buchhardt  
**Zur Dekonvolution im Zeitbereich**
- Nr. 184/ISBN 3-89429-164-8/1992  
M. Maultzsch, W. Stichel, E.-M. Vater  
**Feldversuche zur Einwirkung von Auftaumitteln auf Verkehrsbauwerke (im Rahmen des Großversuchs "Umweltfreundlicheres Streusalz")**
- Nr. 185/ISBN 3-89429-165-6/1992  
Renate Müller  
**Ein numerisches Verfahren zur simultanen Bestimmung thermischer Stoffeigenschaften oder Größen aus Versuchen Anwendung auf das Heißdraht-Parallelverfahren und auf Versuche an Hausschornsteinen**
- Nr. 186/ISBN 3-89429-211-3/1992  
B. Löffelbein, M. Woydt, K.-H. Habig  
**Reibungs- und Verschleißuntersuchungen an Gleitpaarungen aus Ingenieurkeramischen Werkstoffen in wässrigen Lösungen**
- Nr. 187/ISBN 3-89429-216-4/1992  
Th. Schneider, E. Santner  
**Mikrobiologie: Stand der Forschung und Anwendungsmöglichkeiten. Literaturübersicht**
- Nr. 188/ISBN 3-89429-243-1/1992  
K. Mallwitz  
**Verfahren zur Vorausermittlung der Setzung von Fundamenten auf geständerten Strecken infolge zyklischer Beanspruchung**
- Nr. 189/ISBN 3-89429-244-X/1992  
W. Matthees, G. Magiera  
**Impedanzeigenschaften von Finiten Elementen Modellen bei Integration im Zeitraum**
- Nr. 190/ISBN 3-89429-245-8/1992  
G. Zachariev  
**Untersuchung des Versagens thermoplastischer Kunststoffe im Kurzzeit-Zugversuch und Retardations-Zugversuch**
- Nr. 191/ISBN 3-89429-246-6/1992  
H.-M. Bock, S. Erbay, J. With  
**Kritische Stahitemperatur als charakteristischer Kennwert für die Feuerwiderstandsdauer von Bauwerkssystemen aus Stahl**
- Nr. 192/ISBN 3-89429-329-2/1993  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte; Lokales Rißwachstum, Ermittlung des Rißwiderstandsverhaltens aus der Kerbschlagarbeit**
- Nr. 193/3-89429-291-1/1993  
W. Gerisch, Th. Fritz, S. Steinborn  
**Statistical Consulting in the Frame of VAMAS. The Role of the Technical Working Arfa/Advisory Group. Statistical Techniques for Interlaboratory Studies and Related Projects (VAMAS Report No. 13)**
- Nr. 194/ISBN 3-89429-330-6/1993  
U. Krause  
**Ein Beitrag zur mathematischen Modellierung des Ablaufs von Explosionen**
- Nr. 195/ISBN 3-89429-331-4/1993  
U. Schmidtchen, G. Würsig  
**Lagerung und Seetransport großer Mengen flüssigen Wasserstoffs am Beispiel des "Euro-Québec Hydro-Deuterium Pilot Projekts. Überblick über die in Deutschland anzuwendenden Gesetze, Verordnungen und technischen Regeln**
- Nr. 196/ISBN 3-89429-362-4/1993  
D. Lietze  
**Untersuchungen über das Anlaufen von Detonationen im Innern geschlossener Systeme**
- Nr. 197/ISBN 3-89429-400-0/1993  
A. Skopp  
**Tribologisches Verhalten von Siliziumnitridwerkstoffen bei Festkörpergleitreibung zwischen 22 °C und 1000 °C**
- Nr. 198/ISBN 3-89429-421-3/1994  
St. Meretz  
**Ein Beitrag zur Mikromechanik der Interphase in polymeren Faserverbundwerkstoffen**
- Nr. 199/ISBN 3-89429-422-1/1994  
W. F. Rücker, S. Said  
**Erschütterungsübertragung zwischen U-Bahntunneln und dicht benachbarten Gebäuden**
- Nr. 200/ISBN 3-89429-423-X/1994  
D. Arndt, K. Borchardt, P. Croy, E. Geyer, J. Henschen, C. Maierhofer, M. Niedack-Nad, M. Rudolph, D. Schaurich, F. Weise, H. Wiggenhauser  
**Anwendung und Kombination zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Bestimmung der Mauerwerksfeuchte im Deutschen Dom**
- Nr. 201/ISBN 3-89429-475-2/1994  
U. Holzlhöner, H. August, T. Meggyes, M. Brune  
**Deponieabdichtungssysteme; Statusbericht**
- Nr. 202/ISBN 3-89429-481-7/1994  
J. Schmidt  
**Über eine Verteilungsfunktion mit Parametern für Median, Spannweite, Schiefe und Wölbung; Konzept und Anwendung**
- Nr. 203/ISBN 3-89429-483-3/1994  
B. Schulz-Forberg, J. Ludwig  
**Sicherheitsniveau von Transporttanks für Gefahrgut**
- Nr. 204/ISBN 3-89429-484-1/1994  
W. Struck, E. Limberger  
**Der Glaskugelsack als Prüfkörper für Beanspruchungen durch weichen Stoß - eine erweiterte Modellvorstellung**
- Nr. 205/ISBN 3-89429-516-3/1995  
P. Rose  
**Bestimmung charakteristischer Fehlermerkmale zur rechnergestützten Bildauswertung von Schweißnahradiographien**





**Bundesanstalt für  
Materialforschung und -prüfung (BAM)**

**Federal Institute for  
Material Research and Testing**

**Institut Fédéral pour la  
Recherche et l'Essai des Matériaux**

Unter den Eichen 87  
D-12205 Berlin  
☒ D-12200 Berlin

Telefon (0 30) 81 04-0  
Telefax (0 30) 8 11 20 29  
Telex 1 83 261 bamb d

- *Berichte*
- *Gutachten*
- *Zulassungen*
- *Zertifikate*
- *Tagungspapiere*
- *Prüfungszeugnisse*
- *Prüfstellenanerkennungen*

