

# **Forschungsbericht 114**

Bundesanstalt für  
Materialprüfung (BAM)  
Berlin

## **Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen**

von Dipl.-Ing. Peter Rose, Dipl.-Ing. Peter Raabe,  
Dipl.-Ing. Werner Daum, Andreas Szameit

238 Seiten, 137 Abbildungen,

Herausgegeben von der  
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)  
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45  
Telefon (030) 8104-1 Telex 183 261 bamb d Telefax (030) 8 112 029

Copyright © 1985 by Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:  
Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10, 2850 Bremerhaven 1  
Telefon (0471) 46093-95

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
1. Zusammenfassung	5
2. Übergeordnete Zielsetzung und Einzelzielsetzung	7
3. Theoretische Grundlagen	9
3.1 Digitale Bildverarbeitung	9
3.1.1 Prinzip der digitalen Bildverarbeitung	9
3.1.2 Kontrastanhebung	10
3.1.3 Schwellwertoperationen	15
3.1.4 Filterung	19
3.1.4.1 Ortsfilterung	19
3.1.4.2 Frequenzfilterung	23
3.1.5 Gradientenverfahren	30
3.1.6 Bildkombinationen	34
3.1.7 Mehrfilmtechnik	35
3.2 Mehrwinkel-Radiometrie	42
3.3 Funkenerosion	48
3.4 Optische Bildverarbeitung	50
3.4.1 Das radiographische Abbildungssystem	50
3.4.2 Die Linse als optischer Rechner	51
3.4.3 Eingriffsmöglichkeiten	52
3.4.3.1 Hoch-, Tief- und Bandpaß	52
3.4.3.2 Addition und Subtraktion von Bildern	54
3.4.3.3 Differenzieren	55
3.4.3.4 Holographische Filter	55
4. Versuchseinrichtungen	58
4.1 Digitale Bildverarbeitung	58
4.1.1 Aufbau des Bildeinzugsystems	59
4.1.2 Aufbau des Rechnersystems	62
4.1.3 Untersuchung des Video-Kamerasystems	64
4.1.3.1 Vorbetrachtung	64
4.1.3.2 Grundlagen der Bildaufnahme bei Einsatz eines Video-Kamerasystems	65
4.1.3.3 Untersuchung systembedingter Kameraeigenschaften	68

4.1.3.4	Systembedingte Kamerafehler und Störeinflüsse	77
4.1.3.5	Diskussion der Systemuntersuchungen	96
4.1.4	Comtal-Bildverarbeitungssystem	97
4.1.4.1	Konzeption	97
4.1.4.2	Aufbau des Comtal-Bildverarbeitungssystems	98
4.1.4.3	Bildverarbeitungsroutinen	102
4.2	Mehrwinkel-Radiometrie	109
4.2.1	Strahlungsdetektor	109
4.2.1.1	Problemanalyse	109
4.2.1.2	Szintillationszähler	110
4.2.1.3	Fotomultiplier	115
4.2.1.4	Zusammenstellung der technischen Daten	118
4.2.2	Signalerfassung	118
4.2.3	Signalverarbeitung	122
4.2.3.1	Koinzidenzverfahren	122
4.2.3.2	Korrelationsverfahren	126
4.2.3.3	Ausgleich durch eine Regressionsgerade	130
4.2.3.4	Ausgleich durch eine kubische Splinefunktion	132
4.2.4	Software	138
4.2.4.1	Problemanalyse	138
4.2.4.2	Leistungen des Programmsystems	138
4.2.4.3	Programmbeschreibung	139
4.3	Funkenerosion	149
4.4	Optische Bildverarbeitung	152
5.	Ablauf	153
5.1	Digitale Bildverarbeitung	153
5.2	Mehrwinkel-Radiometrie	153
5.3	Funkenerosion	154
5.4	Optische Bildverarbeitung	154

	Seite
6. Ergebnisse	155
6.1 Digitale Bildverarbeitung	155
6.1.1 Möglichkeiten der Bildaufbereitung in der Radiographie	155
6.1.2 Probleme bei der Bearbeitung von Schweißnahtaufnahmen	158
6.1.3 Antishading und Wanddickenausgleich	162
6.1.4 Verbesserung der Bildqualität durch Rauschunterdrückung	165
6.1.4.1 Einsatz verschiedener Filtermethoden	165
6.1.4.2 Mehrfilmtechnik	172
6.1.5 Fehlerhervorhebung	181
6.1.5.1 Kontrastanhebung interessierender Bildbereiche	181
6.1.5.2 Kantenanhebung	185
6.1.5.3 Pseudocolortechnik	188
6.1.6 Fehlersegmentierung	190
6.1.6.1 Unterdrückung des Bildhintergrundes und Beseitigung von fehlerähnlichen Störgrößen	190
6.1.6.2 Eliminierung bestimmter Schweißnahtfehler mit Schwellwertoperationen	201
6.1.7 Spezielle Probleme bei der Prüfung austenitischer Werkstücke	203
6.2 Mehrwinkel-Radiometrie	214
6.2.1 Abschätzung und Messung der Tiefenauflösung	214
6.2.2 Abschätzung und Messung der lateralen Auflösung	219
6.2.3 Praktische Anwendung der Stereo-Radiometrie	221
6.3 Funkenerosion	229
6.4 Optische Bildverarbeitung	230
7. Diskussion	232
8. Literatur	235

## 1. Zusammenfassung

Für eine Verbesserung radiografischer Durchstrahlungsprüfungen an Reaktorkomponenten wurden verschiedene Lösungswege erarbeitet:

- Durch digitale Verarbeitung von Durchstrahlungsaufnahmen wurden Auswertbarkeit und Fehlererkennbarkeit für den Auswerter verbessert. Zugleich konnten Störsignale im Bild aufgrund von Körnigkeit, Formanzeigen und Strukturanzeigen (mottling) weitgehend unterdrückt werden. Damit konnten die Sicherheit und Objektivität der Auswertung erhöht werden.
- Die optische Bildverarbeitung erwies sich aus technischen und wirtschaftlichen Gründen für die gestellten Aufgaben als derzeit nicht realisierbar.
- Mit der Mehrwinkel-Radiometrie ist es gelungen, berührungslos und automatisch die Tiefenlage von Fehlern zu bestimmen. Das Verfahren ist speziell auf alle durchstrahlbaren Objektgeometrien übertragbar, wenn ein geeigneter Manipulator zur Verfügung steht.

Die genannten Verfahrensentwicklungen wurden durch die Herstellung von Testfehlern mittels Funkenerosion und durch verschiedene praktische Erprobungen ergänzt.

## 1. Summary

The report describes the investigations about the improvement of radiographic testing procedures for the inspection of reactor components. The research includes the following methods:

- Digital image processing of X-ray films for a better visual inspection. Enhancement of X-ray images by noise-reduction and background-suppression especially for the mottling effect in radiographs of austenitic specimens.  
The assurance and objectiveness of the inspection was increased by the employment of image processing systems.
- The optical processing of X-ray films was not successful. Experiments demonstrate the technical and economical problems of today's available standards.
- Radiometric sampling technique could be used as an excellent method for flaw detection and determination of the flaw position. For practical applications however problem specified manipulators would be necessary.

The procedures have been tested on real welding seams and on artificial flaws generated by an electrical discharge machine.

## 2. Übergeordnete Zielsetzung und Einzelzielsetzung

Alle zerstörungsfreien Methoden zur Suche nach flächenhaften Fehlern haben den gemeinsamen Nachteil, daß ihr Nachweis von ihrer Orientierung zur Richtung des Energieflusses abhängt. Die konventionelle Radiographie unterscheidet sich jedoch von der Ultraschallprüfung ganz erheblich dadurch, daß bei Anwendung von Röntgen- und Gammastrahlen diese Abhängigkeit besonders groß ist. Bei den üblichen Aufnahmetechniken können bereits Abweichungen von  $5-10^\circ$  von dem idealen Winkel von  $90^\circ$  zwischen Fehlerflächennormale und Einstrahlrichtung entweder zum Verschütten der Information über den Fehler zwischen anderen im Film enthaltenen Informationen oder schlechthin zum Herabsinken des Fehlersignals unter die Registriergrenze des Filmes führen. Im Rahmen des Vorhabens sollen daher zwei Zielsetzungen verfolgt werden.

- a) Für konventionelle radiographische Filmaufnahmen sollen Auswerteverfahren erprobt werden, mit denen die in der Aufnahme prinzipiell vorhandenen, aber durch verschiedene Störeinflüsse verschütteten Informationen dem Auswerter möglichst vollständig zugänglich gemacht werden können. Soweit es sich bei den störenden Einflüssen um stochastische Erscheinungen (Rauschen) handelt, werden Korrelationstechniken, bei sonstigen Einflüssen optische und digitale Filter-, Additions-, Subtraktions-, Differenzierungs- und Mittelungsmethoden zum Mildern der nachteiligen Folgen für die Bildauswertung herangezogen.
- b) Für bisher bekannt gewordene radiometrische Abtastverfahren soll in einer Vorstudie geklärt werden, ob durch Weiterentwicklung eine Erfolgsaussicht besteht, sie mittels Variation des Einstrahlwinkels in weiten Grenzen als Such- und Nachweisverfahren so einzusetzen, daß die Auffindung dieser Fehler mit maximalem Strahlenkontrast unabhängig von ihrer Orientierung möglich wird. Der maximale Strahlenkontrast wird dabei nicht nur durch Einstrahlung senkrecht zur Flächennormalen erreicht, sondern auch durch Reduktion der



Streustrahlung um eine Größenordnung mittels Verwendung kollimierter Strahlenbündel; insbesondere die in der Medizin bekannt gewordene Computertomographie ist dabei hintergründiges Ziel.

Am Ende der Arbeiten soll eine Aussage über die Möglichkeit bereitstehen, mit Hilfe der oben genannten Techniken die Leistungsfähigkeit der relativ preisgünstigen konventionellen Radiographie zu erhöhen und die Anwendungsmöglichkeiten der Radiometrie auch in der Reaktorsicherheitstechnik dort zu erweitern, wo die bisherige Technik der Durchstrahlungsprüfverfahren unbefriedigende Ergebnisse lieferte.

### 3. Theoretische Grundlagen

#### 3.1 Digitale Bildverarbeitung

Ein grundsätzliches Problem bei der Auswertung von Durchstrahlungsaufnahmen besteht in der Trennung der zur Fehlererkennung relevanten Information vom übrigen Bildinhalt. In vielen Fällen sind Materialfehler mit nur sehr geringen Schwärzungsunterschieden abgebildet oder durch bereits vorhandene Strukturen verdeckt. Zur sichereren Beurteilung der Fehler wäre daher eine nachträgliche Aufbereitung interessierender Bildbereiche von großem Nutzen. Die digitale Bildverarbeitung stellt hier eine Reihe von Verfahren zur Verfügung, die es erlauben, Röntgenbilder nach unterschiedlichen Kriterien zu bearbeiten. Die visuelle Auswertung kann somit durch Anwendung von Rechenanlagen und Durchführung geeigneter Rechenoperationen problemangepaßt unterstützt werden. Verschiedene Methoden der Bildverbesserung sowie das Prinzip der digitalen Bildverarbeitung werden im folgenden dargestellt.

##### 3.1.1 Prinzip der digitalen Bildverarbeitung

Durchstrahlungsaufnahmen lassen sich mit Hilfe opto-elektronischer Vorrichtungen abtasten und als digitales Signal in einer Rechenanlage speichern. Gemäß der geometrischen Auflösung und der Apertur des Abtastsystems wird die Bildvorlage als diskrete Helligkeitsfunktion beschrieben und in Form einer Bildmatrix im Rechner abgelegt. Jedem Bildpunkt werden dabei 8 Bit zugeordnet, so daß das digitalisierte Bild in seiner Helligkeitsauflösung mit maximal 256 Graustufen dargestellt werden kann. Die Ortskoordinaten eines Bildpunktes sind durch seine Lage in der Bildmatrix bestimmt.

Durch die Anzahl der Zeilen und Spalten der Bildmatrix ist die geometrische Auflösung des Digitalbildes festgelegt. Eine in der Praxis gebräuchliche Matrixgröße ist 512 x 512,

d.h., das digitale Bild besteht aus  $\frac{1}{4}$  Million Bildpunkten. Zur Bearbeitung eines Bildes muß jeder Punkt aus der Matrix gelesen werden, gemäß der geforderten Verarbeitung berechnet werden und dann in die Matrix zurückgeschrieben werden. Hier wird deutlich, daß bei einer rechnergestützten Bildverbesserung große Datenmengen verarbeitet werden müssen. Das Problem der Speicherplatz- und Rechenzeitoptimierung muß sowohl bei der Programmierung der Verarbeitungsschritte als auch bei der Auswahl der Hardware Berücksichtigung finden. Der Aufbau der in diesem Vorhaben verwendeten Bildverarbeitungsanlage wird in Kapitel 4 ausführlich beschrieben.

Um die im Röntgenfilm bestehenden Abbildungsverhältnisse dem menschlichen Wahrnehmungsvermögen optimal anzupassen, müssen je nach Bildinhalt unterschiedliche Verarbeitungen durchgeführt werden. Bei der Verbesserung stark verrauschter Aufnahmen werden vornehmlich Tiefpaßfilterungen Anwendung finden, während bei Strukturuntersuchungen kantenanhebende Verfahren im Vordergrund stehen. Die Aufbereitung einer Durchstrahlungsaufnahme verlangt also eine problemorientierte Vorgehensweise und muß entsprechend der Zielsetzung der Bildverbesserung ausgelegt werden. Es ist daher unmöglich, ein generelles Konzept für eine Bildaufbereitung von Röntgenaufnahmen anzugeben. Im folgenden werden deshalb einige grundlegende Methoden zur Bildverbesserung beschrieben, die jedoch für den speziellen Anwendungsfall beliebig modifiziert bzw. kombiniert werden können.

### 3.1.2 Kontrastanhebung

Um die volle Dichte- bzw. Schwärzungsauflösung eines Röntgenfilmes auszunutzen, können kontrastoptimierende Verfahren auf das vorliegende Bildmaterial angesetzt werden. Diese Verfahren basieren vorwiegend auf einer Grauwerttransformation, wobei bestimmte im Bild vorkommende Grauwertbereiche nach einer vorgegebenen Transformationskurve in neue Grauwertbe-

reiche überführt werden. Die einfachste Form dieser Verarbeitung ist die lineare Spreizung. Ist  $g$  der Grauwert eines Bildpunktes in der abgetasteten Bildvorlage und  $G$  der Grauwert dieses Bildpunktes im transformierten Bild, so ergibt sich bei einer maximalen Helligkeitsauflösung von 256 Graustufen (Grauwerte von 0 bis 255) folgende Transformationsgleichung:

$$G = \frac{g - g_{\min}}{g_{\max} - g_{\min}} \cdot 255 \quad (3.1.2-1)$$

$G$  = transformierter Grauwert

$g$  = ursprünglicher Grauwert im Bild

$g_{\min}$  = minimaler im Bild vorkommender Grauwert

$g_{\max}$  = maximaler im Bild vorkommender Grauwert

Da bei der Abtastung von Durchstrahlungsaufnahmen nur selten eine Digitalisierung in 256 Graustufen erreicht wird (geringe Dynamik der opto-elektronischen Wandler), liefert die lineare Spreizung bereits eine erhebliche Bildverbesserung. Für eine Beurteilung der im Röntgenbild dargestellten Materialfehler ist die Schwärzungsverteilung im Fehler selbst und in seiner unmittelbaren Umgebung von großer Bedeutung. Die Grauwerttransformation ist deshalb besonders wirksam, wenn sie nur auf kleine interessierende Bildbereiche angewendet wird. In diesem Fall werden nur die im gewählten Bildausschnitt vorkommenden Grauwerte zur Transformation herangezogen und bestimmen somit die Steilheit der Transformationskurve.

Anstelle der linearen Spreizung kann die Transformation auch nach beliebigen Funktionen durchgeführt werden. Bei einem logarithmischen Verlauf der Kennlinie werden z. B. speziell dunkle Grauwertbereiche im Kontrast angehoben. Zur Erzeugung optimaler Kontraste über den gesamten Grauwertbereich kann die Transformationskurve auch aus der Bildfunktion selbst bestimmt werden. Hierzu wird die Häufigkeitsverteilung der im Bild vorkommenden Grauwerte berechnet und als kumulative

Funktion aufgetragen. Eine derart erstellte Kennlinie besitzt große Steilheiten bei häufig auftretenden Grauwerten und ist dadurch dem zu transformierenden Bildinhalt optimal angepaßt.

Die Abbildungen 3.1.2-1 und 3.1.2-2 verdeutlichen noch einmal das Prinzip der bildangepaßten Kontrastanhebung. In Bild 3.1.2-1 ist das Histogramm, d.h. die Häufigkeitsverteilung der Grauwerte eines Bildes dargestellt. Die dazugehörige kumulative Häufigkeitsfunktion zeigt das Bild 3.1.2-2. Diese Funktion weist zwei Bereiche mit hoher Steilheit auf, die sich auf die beiden im Histogramm ausgeprägten Maxima zurückführen lassen. Wird eine Transformation nach der kumulativen Häufigkeitsfunktion durchgeführt, so werden gerade jene Grauwerte besonders gespreizt, die am häufigsten im Bild enthalten sind. Dadurch entsteht eine Grauwerttransformation, die für den jeweils vorliegenden Bildinhalt einen maximalen Kontrast erzeugt.

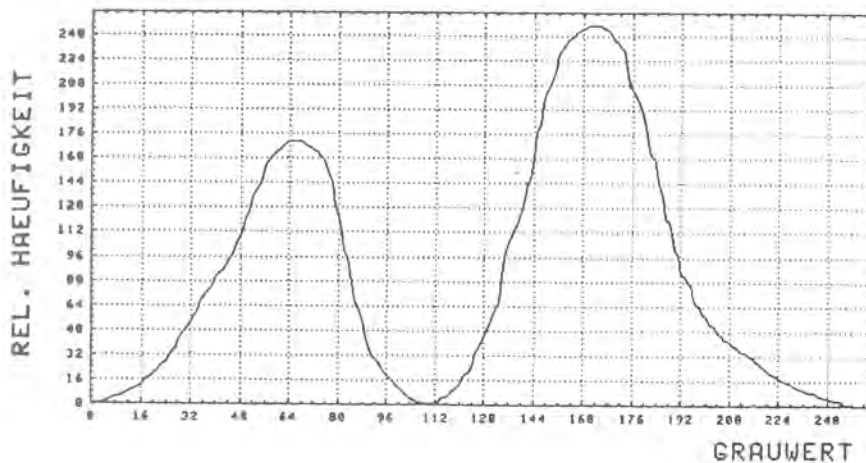


Bild 3.1.2-1: Histogramm eines Bildes

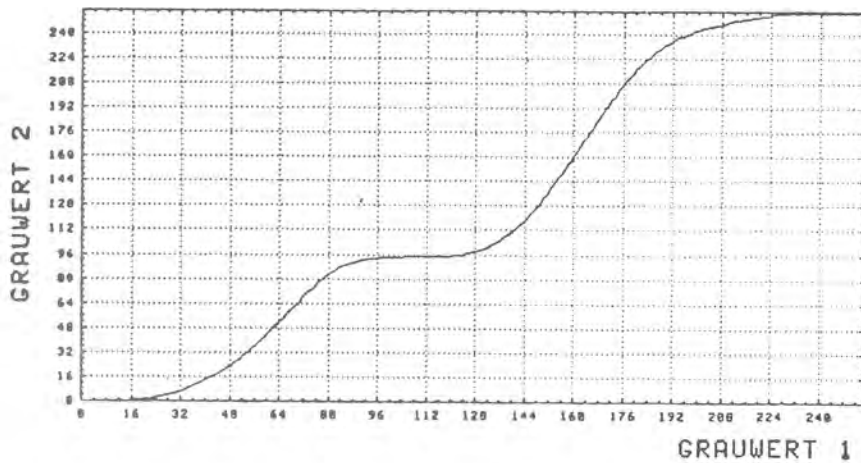


Bild 3.1.2-2: Kumulative Häufigkeitsfunktion

Mathematisch läßt sich diese Transformationsart folgendermaßen beschreiben. Der Grauwert  $x$  sei eine Zufallsvariable mit der kumulativen Wahrscheinlichkeitsfunktion  $F_x$ . Die Transformationsfunktion  $T(x)$  wird dann folgendermaßen bestimmt:

$T(x) = k$ , dann und nur dann, wenn

$$\text{lub} \left\{ w \mid F_x(w) = \frac{k-1}{K} \right\} \leq x < \text{lub} \left\{ w \mid F_x(w) = \frac{k}{K} \right\} \quad (3.1.2-2)$$

mit  $k = 1, 2, \dots, K$

Hierbei bedeutet lub die kleinste untere Schranke (least upper bound), die für  $w$  gefunden werden kann.

Programmiertechnisch können die Bereichsgrenzen für  $x$  aus einer Rekursionsformel errechnet werden. Liegt die Anzahl der Grauwerte  $K$  im transformierten Bild fest und ist die kumulative Wahrscheinlichkeitsfunktion  $F_x$  bekannt, so gilt:

$$F_x(W_k) = F_x(W_{k-1}) + \frac{1 - F_x(W_{k-1})}{K - k + 1} \quad (3.1.2-3)$$

Die Gleichung (3.1.2-2) kann durch

$$W_{k-1} \leq x < W_k \quad (3.1.2-4)$$

ersetzt werden.

### 3.1.3 Schwellwertoperationen

Schwellwertoperationen in der digitalen Bildverarbeitung verfolgen das Ziel, "wesentliche Bildmerkmale" aus der Bildebene in geeigneter Weise hervorzuheben. Anzahl und Ausdehnung der hervorzuhebenden Merkmale sowie ihre Positionierung in der Bildebene können beliebig sein. Wichtige Voraussetzung für dieses Verfahren ist allerdings eine minimale Grauwertabstufung zwischen den zu trennenden Merkmalsbereichen.

In der Regel benötigt man vor Schwellwertoperationen eine Vorinformation über die Grauwertverteilungen des Digitalbildes, deren Analyse zur Festlegung geeigneter Schwellwerte in einer Transformations-Funktion führen.

Der einfachste Anwendungsfall besteht in der Aufteilung des Graustufenbereiches in zwei konstante Grauwerte. Dabei wird ein Schwellwert als Trennungsindikator in die Transformations-Funktion eingefügt. Gleichung 3.1.3-1 beschreibt den mathematischen Zusammenhang und Bild 3.1.3-1 zeigt die dazugehörige Transformations-Funktion. Das Ergebnis einer Schwellwertoperation mit einem Schwellwert wird als Binärbild bezeichnet.

$$g(x,y) = \begin{cases} K1 & \text{für } f(x,y) < T \\ K2 & \text{für } f(x,y) \geq T \end{cases} \quad (3.1.3-1)$$

$g(x,y)$ : Bildfunktion des transformierten Bildes

$f(x,y)$ : Bildfunktion des Ursprungsbildes

$K1, K2$ : konstante Grauwerte ( $0 \leq K \leq 255$ )

$T$ : Schwellwert ( $0 < T < 255$ )



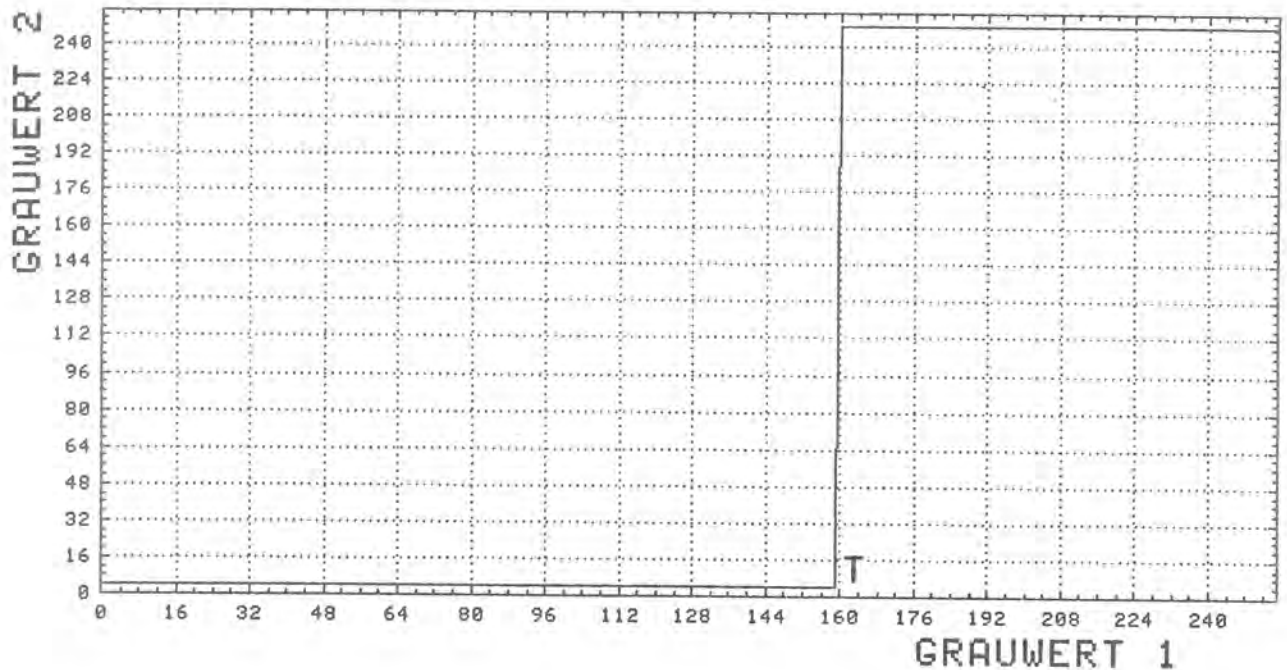


Bild 3.1.3-1: Transformationsfunktion zur Erstellung eines Binärbildes

Ein häufiger Anwendungsfall besteht in der Festlegung eines Grauwertfensters über zwei Schwellwerte ( $T_1, T_2$ ). Dabei wird den Grauwertbereichen unterhalb  $T_1$  und oberhalb  $T_2$  über die Transformationsfunktion der gleiche konstante Grauwert zugeordnet, während dem Grauwertintervall zwischen  $T_1$  und  $T_2$  ein zweiter konstanter Grauwert zugewiesen wird. Gleichung 3.1.3-2 und Bild 3.1.3-2 veranschaulichen diesen Zusammenhang.

$$g(x,y) = \begin{cases} K_1 & \text{für } f(x,y) < T_1 \\ K_2 & \text{für } T_1 \leq f(x,y) \leq T_2 \\ K_1 & \text{für } f(x,y) > T_2 \end{cases} \quad (3.1.3-2)$$

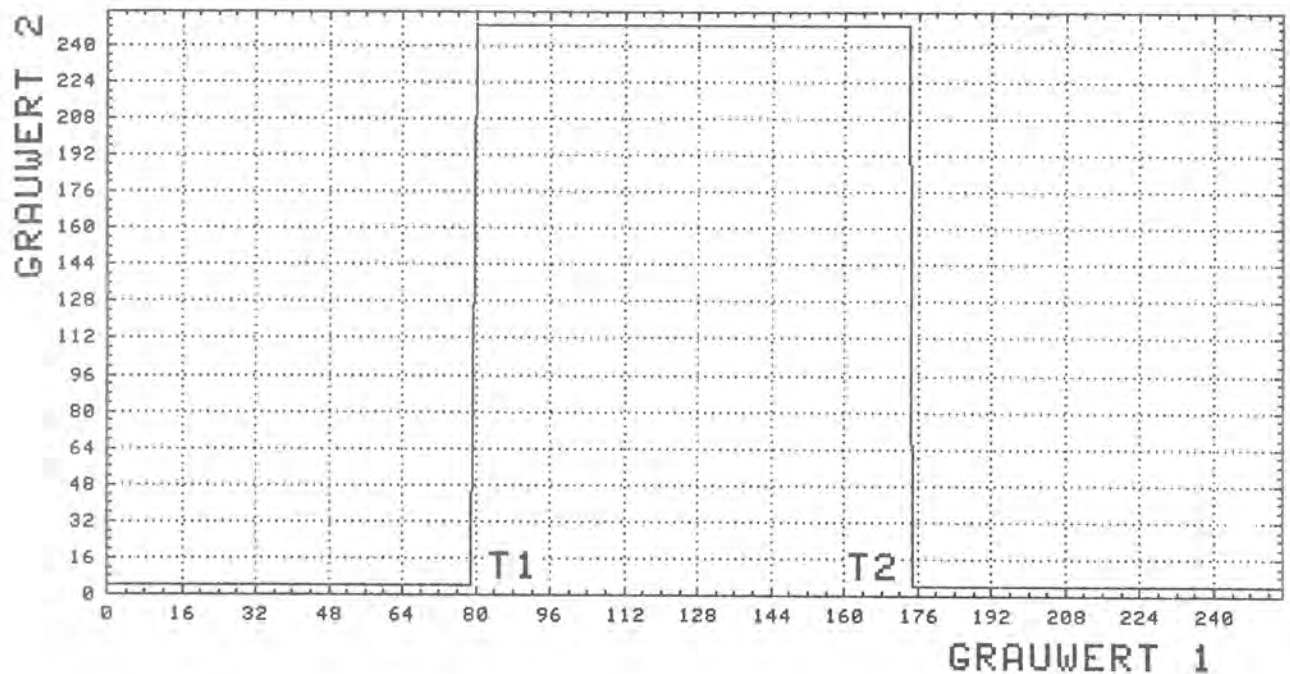


Bild 3.1.3-2: Transformationsfunktion zur Abstufung eines Grauwertintervalles

Ein weiterführendes Verfahren auf der Basis der Schwellwertoperation ist die sogenannte Äquidensitendarstellung. Hierbei wird über eine treppenförmig abgestufte Transformationsfunktion (Gleichung 3.1.3-3) die Grauwertverteilung eines Digitalbildes in eine vorgegebene Anzahl separater Grauwertklassen mit konstanten Werten umgerechnet. Diese Operation erlaubt u.U. eine Klasseneinteilung von Merkmalen oder Objekten über die Grauwertverteilung.

$$g(x,y) = \begin{cases} K1 & \text{für } f(x,y) < T1 \\ K2 & \text{für } T1 \leq f(x,y) < T2 \\ \vdots & \vdots \\ KN & \text{für } f(x,y) > TN \end{cases} \quad (3.1.3-2)$$

K1 bis KN: konstante Grauwerte  
T1 bis TN: Schwellwerte

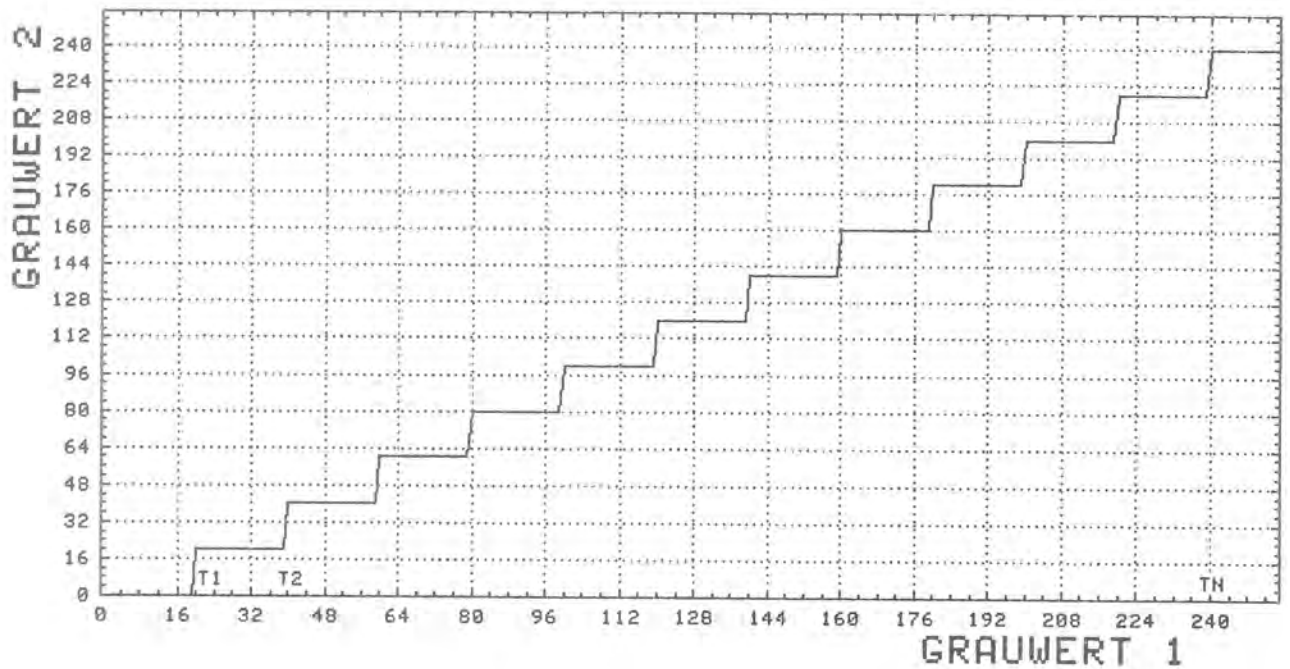


Bild 3.1.3-3: Transformationsfunktion zur Äquidensitendarstellung

### 3.1.4 Filterung

Die Ortsfrequenz ist eine charakteristische Größe der Bildfunktion. Sie beschreibt die Anzahl der Grauwertwechsel pro Längeneinheit und ist somit ein Maß für die Feinheit einer im Bild befindlichen Struktur. Häufig sind in einer Schweißnahtaufnahme verschiedene Bildbereiche unterschiedlicher Ortsfrequenz gut sichtbar. Das Gebiet außerhalb einer Schweißnaht besitzt vorwiegend niedrige Ortsfrequenzen, da hier relativ große Flächen mit geringen Helligkeitsunterschieden vorhanden sind. Dagegen sind in der Schweißnaht selbst hohe Frequenzanteile enthalten, speziell in Bereichen, wo die abgebildeten Materialfehler häufige Schwärzungsunterschiede hervorrufen. Die Filterung erlaubt eine Aufteilung des Bildes in hohe und niedrige Frequenzkomponenten. Eine Tiefpaßfilterung wird vornehmlich zur Rauschunterdrückung und zur Eliminierung feiner Texturen verwendet. Die Hochpaßfilterung bewirkt eine Hervorhebung kleiner Bilddetails durch Markierung sprunghafter Grauwertänderungen.

#### 3.1.4.1 Ortsfilterung

Zur Durchführung der Filterung wird der einzelne Bildpunkt innerhalb einer fest definierten Umgebung lokal bewertet. Dies geschieht durch eine zweidimensionale Faltung der Bildmatrix mit einer Filtermatrix. Sind  $g(x,y)$  die Punkte des zu bearbeitenden Bildes und  $f(n,m)$  die Elemente der Filtermatrix, so berechnen sich die Punkte des gefilterten Bildes  $\bar{g}(x,y)$  nach folgender Gleichung:

$$\bar{g}(x,y) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M f(n,m) \cdot g(x+n, y+m) \quad (3.1.4.1-1)$$

Hierbei ist N die Anzahl der Zeilen und M die Anzahl der Spalten der Filtermatrix. Je nach Wahl der Koeffizienten  $f(n,m)$  können nun verschiedene Filterfunktionen realisiert

werden. In der Abbildung 3.1.4.1-1 sind Matrizen für eine Tiefpaß- und eine Hochpaßfilterung mit einer 3 x 3 Filterfläche angegeben. Durch freie Wahl der Filterkoeffizienten und der Flächengröße können beliebige Filter für verschiedene Anwendungen erstellt werden. So ist es möglich, bestimmte Linienstrukturen wie z. B. senkrechte, waagerechte und schräge Geradenstücke und Kreisbögen verschiedener Ausprägung besonders hervorzuheben.

0.11	0.11	0.11
0.11	0.11	0.11
0.11	0.11	0.11

Tiefpaß

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

Hochpaß

Bild 3.1.4.1-1: Filtermatrizen

Bei der Tiefpaßfilterung wird durch die Gleichheit der Filterkoeffizienten eine Mittelung aller innerhalb der Filterfläche befindlichen Bildpunkte durchgeführt. Dies führt bei der Verschiebung der Filtermaske zu einer Glättung der Bildfunktion, wodurch auftretende Rauschanteile unterdrückt werden und im Bild vorhandene Kanten verebnet werden. Es ist offensichtlich, daß eine derart erzeugte Rauschunterdrückung gleichzeitig einen Verlust an Detailerkennbarkeit zur Folge hat.

Neben der Tiefpaßfilterung kann auch eine Medianfilterung zur Rauschunterdrückung eingesetzt werden. Das Medianfilter berechnet aus allen innerhalb der Filterfläche befindlichen Bildpunkten den Medianwert und setzt diesen Wert als neuen Bildpunkt in das gefilterte Bild ein. Dies führt bei Verschiebung der Filtermaske ebenfalls zu einer Glättung der Bildfunktion, ohne jedoch die im Bild vorhandenen Kanten zu verändern. Die Unterschiede zwischen einer Tiefpaßfilterung und einer Medianfilterung werden in den Abbildungen 3.1.4.1-2 und 3.1.4.1-3 noch einmal verdeutlicht.

10	53	121
50	72	205
64	61	84

BEISPIEL EINES VON DER FILTER-  
MASKE UEBERDECKTEN BILDAUS-  
SCHNITTS

TIEFPASS-FILTER:

BERECHNUNG DES MITTELWERTES ALLER IN DER FILTER-  
MATRIX BEFINDLICHEN BILDPUNKTE

$$10+53+121+50+72+205+64+61+84 = 720$$

$$720 : 9 = 80$$

MEDIAN-FILTER:

ERMITTLUNG DES MEDIANWERTES ALLER IN DER FILTER-  
MATRIX BEFINDLICHEN BILDPUNKTE

10,50,53,61,64,72,84,121,205



MEDIANWERT = 64

Bild 3.1.4.1-2: Berechnung einer Tiefpaßfilterung und einer  
Medianfilterung

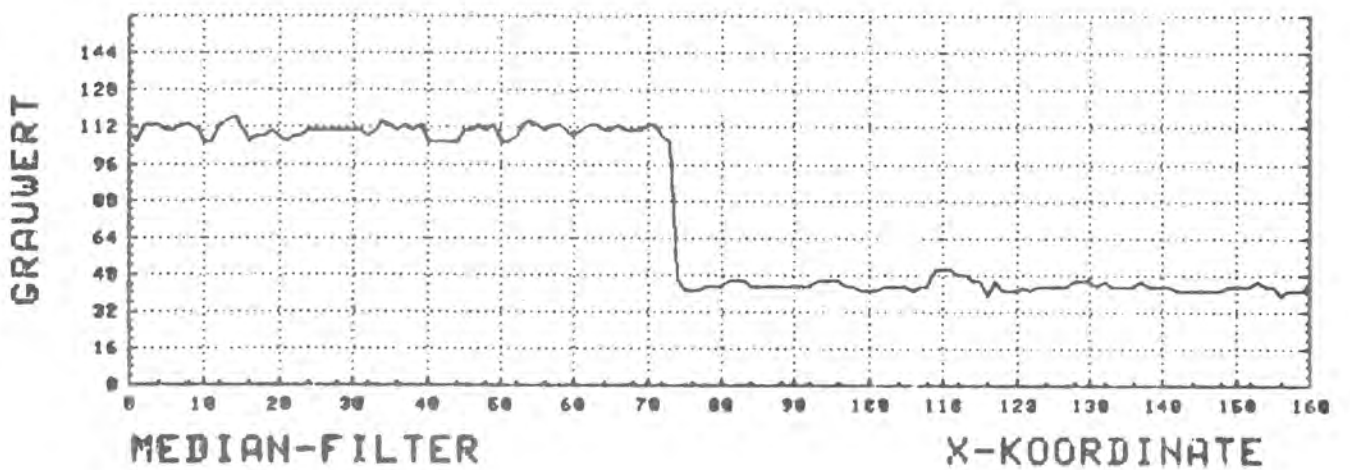
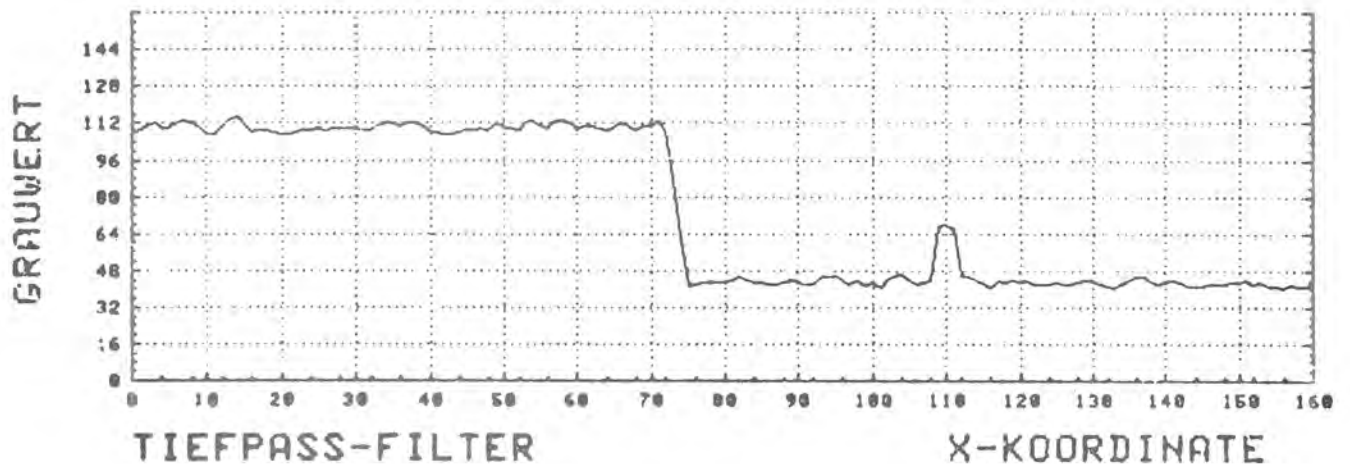
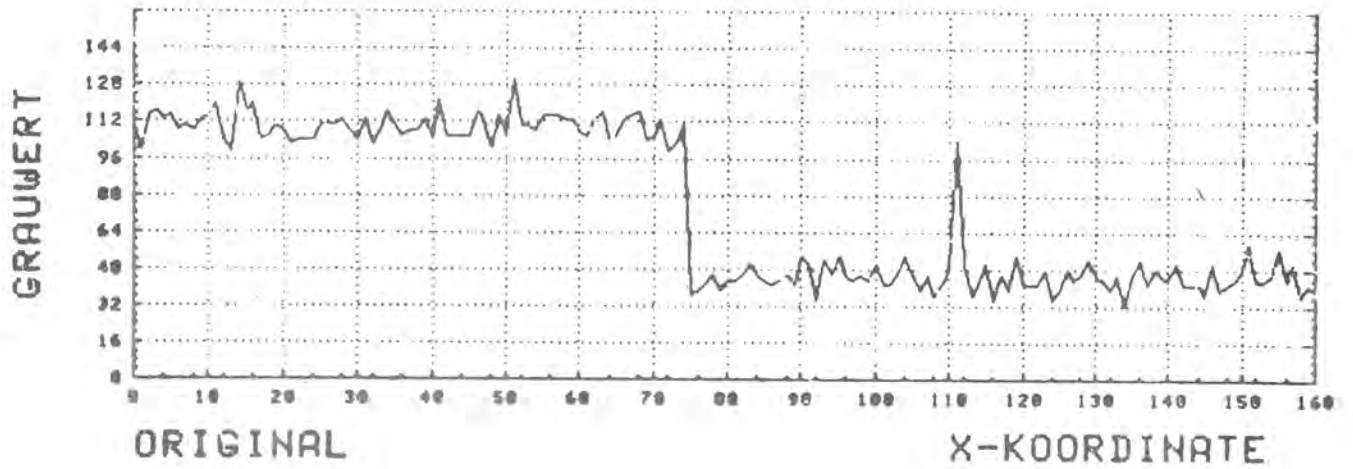


Bild 3.1.4.1-3: Signalverlauf nach einer Tiefpaß- und einer Medianfilterung

In Abb. 3.1.4.1-2 sind die Grauwerte einer Bildfunktion in einer  $3 \times 3$  Matrix dargestellt. Der zu filternde Bildpunkt ist das zentrale Element dieser Matrix mit dem Grauwert 72. Bei der Tiefpaßfilterung wird das arithmetische Mittel aller neun Bildpunkte berechnet und als Grauwert für den gefilterten Bildpunkt eingetragen. Im vorliegenden Fall wird daher der Grauwert 72 durch die Filterung in einen Grauwert 80 überführt. Bei der Medianfilterung hingegen werden die neun Bildpunkte ihrer Größe nach sortiert, wobei sich der Medianwert aus der mittleren Position der Reihe ergibt. Im hier gewählten Beispiel wird bei der Medianfilterung der Grauwert 72 durch den Grauwert 64 ersetzt.

Die unterschiedliche Wirkungsweise der Tiefpaßfilterung und der Medianfilterung sind in Abb. 3.1.4.1-3 an einem Zeilenprofil dargestellt. Das obere Profil zeigt die unbearbeitete verrauschte Bildfunktion, in der sich eine steil verlaufende Kante und ein einzelner Peak befinden. Durch die Tiefpaßfilterung, die im mittleren Profil abgebildet ist, konnte das Rauschen in der Bildfunktion stark vermindert werden. Allerdings verflacht der Kantenverlauf und der Peak bei der x-Koordinate 110 wurde nur mäßig unterdrückt. Das Ergebnis der Medianfilterung im unteren Profil zeigt ebenfalls eine Verminderung des Rauschens, wobei die Steilheit der Kante jedoch erhalten bleibt. Dagegen wurde der einzelne Peak gegenüber der Tiefpaßfilterung vollkommen unterdrückt. Das Medianfilter eignet sich deshalb besonders für Verarbeitungen, in denen punktweise auftretende Störungen beseitigt werden sollen, ohne den Kantenverlauf großflächiger Objekte zu verändern.

#### 3.1.4.2 Frequenzfilterung

Eine weitere Möglichkeit zur Filterung ergibt sich durch Transformation des Bildes in den Frequenzbereich. In Digitalbildern liegt die Bildfunktion nicht als kontinuierliche



Größe vor, sondern ist nur in Form von Abtastwerten vorhanden. Demzufolge kann die Transformation eines Bildausschnittes nur diskret durchgeführt werden. Ist N die Anzahl der betrachteten Bildelemente (Pixel) in x-Richtung und M die Anzahl derjenigen in y-Richtung, so ist die Fouriertransformierte  $F(u,v)$  des zweidimensionalen Signals  $S(x,y)$  gegeben durch die Gleichung (3.1.4.2-1).

$$F(u,v) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} S(x,y) \cdot e^{-j2\pi \left( \frac{x \cdot u}{N} + \frac{y \cdot v}{M} \right)} \quad (3.1.4.2-1)$$

Die Rücktransformation erfolgt nach Gleichung (3.1.4.2-2).

$$S(x,y) = \frac{1}{NM} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{M-1} F(u,v) \cdot e^{-j2\pi \left( \frac{u \cdot x}{N} + \frac{v \cdot y}{M} \right)} \quad (3.1.4.2-2)$$

Bei der diskreten Fouriertransformation können aus  $N \cdot M$  Abtastwerten der Ortsfunktion auch nur  $N \cdot M$  ungleiche Werte für die Frequenzfunktion gefunden werden. Wird zusätzlich berücksichtigt, daß die Werte für  $F(u,v)$  komplex sind und daß das Spektrum für negative Frequenzen konjugiert komplex sein muß, so ergeben sich letztlich nur  $\frac{N \cdot M}{2}$  unabhängig voneinander darstellbare Frequenzkomponenten.

Wie aus Gleichung (3.1.4.2-1) hervorgeht, ist die Fouriertransformierte  $F(u,v)$  eine komplexe Größe. Aus ihr lassen sich das Amplituden- und das Phasenspektrum der Ortsfunktion  $S(x,y)$  berechnen. Wird  $F(u,v)$  in Real- und Imaginärteil unterteilt, so ergibt sich für das Amplitudenspektrum

$$AMP = \sqrt{(\operatorname{Re} \{ F(u,v) \})^2 + (\operatorname{Im} \{ F(u,v) \})^2} \quad (3.1.4.2-3)$$

und für das Phasenspektrum

$$PHS = \arctan \left( \frac{\text{Im} \{F(u,v)\}}{\text{Re} \{F(u,v)\}} \right) \quad (3.1.4.2-4)$$

Um eine Aussage über die spektrale Leistung zu erhalten, kann aus dem Quadrat des Amplitudenspektrums leicht das Powerspektrum gewonnen werden.

$$POW = (AMP)^2 = |F(u,v)|^2 \quad (3.1.4.2-5)$$

Wird eine zweidimensionale Fouriertransformation nach Gleichung (3.1.4.2-1) durchgeführt und das Spektrum nach Gleichung (3.1.4.2-5) dargestellt, so befinden sich jene Werte, die den Leistungsanteil niedriger Frequenzen beschreiben, in den Ecken der Frequenzbereichsebene. Für eine bessere visuelle Interpretation des Spektrums ist jedoch eine Darstellung, in der sich die niedrigen Frequenzkomponenten in der Mitte der Frequenzbereichsebene konzentrieren, günstiger.

Es wird deshalb eine Multiplikation der Ortsfunktion  $S(x,y)$  mit  $(-1)^{x+y}$  vorgeschlagen. Mit der Beziehung

$$(-1)^{x+y} = e^{j\pi(x+y)} \quad (3.1.4.2-6)$$

und der Gleichung (3.1.4.2-1) läßt sich der neue Frequenzbereich  $G(u,v)$  folgendermaßen beschreiben:

$$G(u,v) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} S(x,y) \cdot e^{j\pi(x+y)} \cdot e^{-j2\pi\left(\frac{x}{N}u + \frac{y}{M}v\right)}$$

$$G(u,v) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} S(x,y) \cdot e^{-j2\pi\left(\frac{x}{N}\left(u - \frac{N}{2}\right) + \frac{y}{M}\left(v - \frac{M}{2}\right)\right)}$$

$$G(u,v) = F\left(u - \frac{N}{2}, v - \frac{M}{2}\right) \quad (3.1.4.2-7)$$

$G(u,v)$  entspricht also einer Verschiebung des Frequenzbereichs  $F(u,v)$  in Richtung der  $u$ -Achse um den Betrag  $N/2$  und in Richtung der  $v$ -Achse um den Betrag  $M/2$ . Damit werden auch die Spektralwerte niedriger Frequenzen in die Mitte des darzustellenden Frequenzbereiches verschoben. Bild 3.1.4.2-1 zeigt die Aufteilung eines solchen Frequenzbereiches.

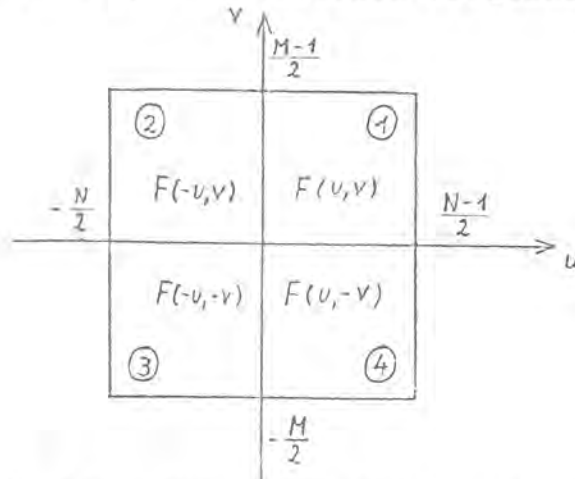


Bild 3.1.4.2-1: Spektrum einer zweidimensionalen Fouriertransformation

Da die negativen Frequenzen ihren zugehörigen positiven Frequenzen genau konjugiert komplex sind, müssen gemäß Bild 3.1.4.2-1 die jeweils gegenüberliegenden Quadranten 1 und 3, bzw. 2 und 4 konjugiert komplexe Wertepaare enthalten. Für das Powerspektrum ergibt sich durch die Betragsbildung von  $F(u,v)$  eine um den Ursprung punktsymmetrische Anordnung. D.h., daß die Quadranten 1 und 3 bzw. 2 und 4 die gleiche Information beinhalten. Somit genügt es, zur Auswertung des Powerspektrums nur jeweils zwei benachbarte Quadranten zu berücksichtigen.

Zur Berechnung des Spektrums wird die zweidimensionale Transformation in zwei eindimensionale Transformationen zerlegt, indem das Bild zeilen- und spaltenweise getrennt verarbeitet wird. Das Ergebnis einer Frequenztransformation zeigt die Abbildung 3.1.4.2-2. Im linken Bild ist der Ortsbereich dargestellt und im rechten Bild das dazugehörige Leistungsspektrum. Der Ortsbereich zeigt einen Bildausschnitt

einer Schweißnahtaufnahme mit einem Querriß. Der Frequenzbereich ist das nach Gleichung (3.1.4.2-5) berechnete Leistungsspektrum und beschreibt somit die im linken Bild enthaltenen Ortsfrequenzen. Die Helligkeit eines Punktes im Spektrum ist ein Maß für die Amplitude des jeweiligen Frequenzkoeffizienten.

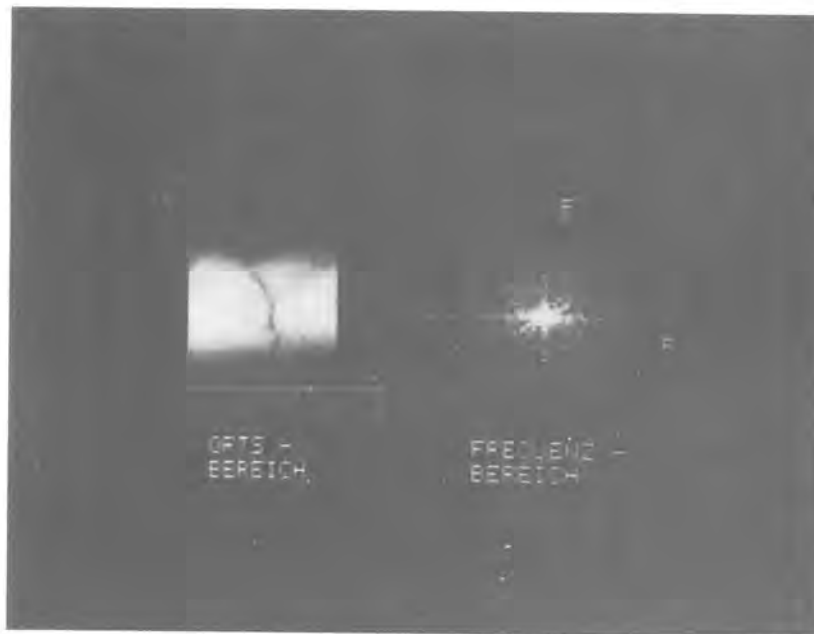


Bild 3.1.4.2-2: Frequenztransformation einer Schweißnahtaufnahme

Zur Durchführung einer Filterung im Frequenzbereich wird das Spektrum mit einer Filterfunktion bewertet und danach in den Ortsbereich zurücktransformiert. Da die Spektren derart aufgebaut sind, daß sich die Koeffizienten für niedrige Frequenzen im Spektrumsinneren und die Koeffizienten für die hohen Frequenzanteile im Spektrumsäußeren befinden, ergibt sich z. B. für eine Tiefpaßfilterung eine Filterfunktion, wie sie in Bild 3.1.4.2-3 dargestellt ist. Eine Bewertung des Spektrums nach dieser Funktion bedeutet eine Absenkung der Koeffizienten in den äußeren Bereichen, also eine Unterdrückung der hohen Frequenzanteile. Für eine Hochpaßfilterung

müßte die Filterfunktion umgekehrt verlaufen, d.h. in der Mitte niedrige Werte aufweisen und zum Rand hin ansteigen.

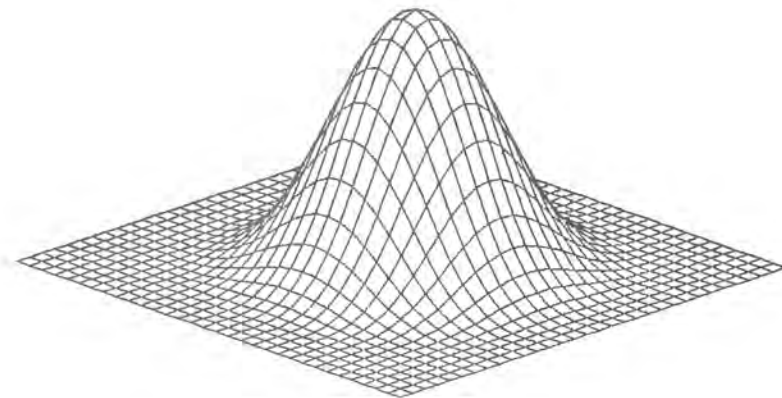


Bild 3.1.4.2-3: Filterfunktion zur Tiefpaßfilterung

Im Bild 3.1.4.2-4 sind Hochpaßfilterungen mit drei unterschiedlichen Filterfunktionen dargestellt. Die zugehörigen Spektren zeigen deutlich, daß die großflächigen Fehler innerhalb der Schweißnaht durch die Koeffizienten um den Spektrumsmittelpunkt beschrieben werden. Bei der Hochpaßfilterung im rechten Bild sind die tiefen Frequenzanteile so stark gedämpft, daß alle großflächigen Fehler im Ortsbereich unterdrückt wurden. Derartige Filterfunktionen eignen sich somit auch zur Beseitigung unerwünschter Bildstrukturen (z. B. Schweißnahtraupe), die die Erkennung wirklicher Materialfehler beeinträchtigen können.

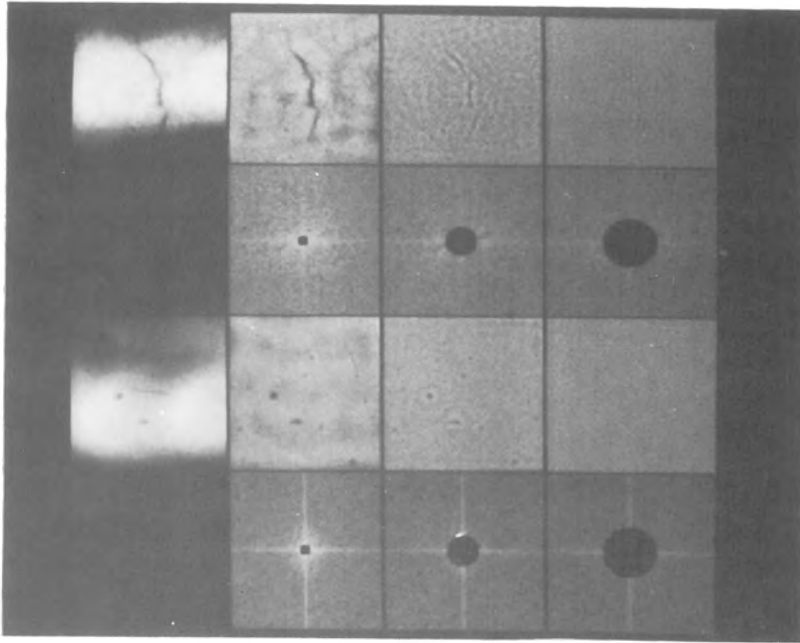


Bild 3.1.4.2-4: Verschiedene Hochpaßfilterungen im Frequenzbereich

### 3.1.5 Gradientenverfahren

Die Darstellung von Linienstrukturen oder Konturen zwischen Übergangsstellen benachbarter homogener Bildbereiche in Digitalbildern setzt spezielle Verarbeitungsalgorithmen voraus, die allgemein als Gradientenverfahren bezeichnet werden. Differentiationsmethoden eignen sich in besonderer Weise für die oben genannten Anwendungsfälle, da sie speziell die Detektion von Unstetigkeitsstellen in der Bildebene ermöglichen.

Gradienten sind Kantenoperatoren, die in weitgehenden Gebieten der digitalen Bildverarbeitung Anwendung gefunden haben. Für eine Bildfunktion  $f(x,y)$  ist der Gradientenoperator allgemein definiert als:

$$\nabla f(x,y) = \frac{\partial f}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial f}{\partial y} \vec{e}_y \quad (3.1.5-1)$$

mit  $\vec{e}_x$  = Einheitsvektor in positiver x-Richtung  
 $\vec{e}_y$  = Einheitsvektor in positiver y-Richtung

Für den Betrag des Vektors ergibt sich dann:

$$|\nabla f(x,y)| = \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.1.5-2)$$

Für die Richtung des Vektors gilt:

$$\Phi = \tan^{-1} \frac{\left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)}{\left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)} \quad (3.1.5-3)$$

Die meisten Kantenoperatoren beruhen auf diskreten Näherungsformeln in verschiedensten Variationen von Gleichung 3.1.5-1. Diese Approximationen produzieren einen hohen Wert an Stellen abrupter Grauwertänderungen und einen niedrigen Wert an Stellen mit geringer Grauwertänderung. Einige ausgewählte Kantenoperatoren sollen im folgenden kurz erläutert und ihre Wirkungsweise bei der Extraktion von Schweißnahtfehlerkanten analysiert werden.

#### a) Roberts-Operator

Dieser Gradientenoperator basiert auf einer 2 x 2 Nachbarschaft und ergibt sich nach folgender Beziehung:

$$g(x,y) = \left[ [f(x,y) - f(x+1,y+1)]^2 + [f(x+1,y) - f(x,y+1)]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.1.5-4)$$

oder

$$g(x,y) = |f(x,y) - f(x+1,y+1)| + |f(x+1,y) - f(x,y+1)| \quad (3.1.5-5)$$

mit  $f(x,y)$  = Originalbildfunktion

$g(x,y)$  = Gradientenfunktion von  $f(x,y)$

Der Operator verlangt eine deutliche Grauwertänderung zwischen zwei benachbarten Bildpunkten, so daß nur sehr scharfe Kanten mit hohem Kontrast zwischen den die Kante bildenden Flächen erkannt werden. Bei flachen, rampenförmigen Kantenverläufen versagt diese Gradientenapproximation. Da die Berechnung nur auf einer kleinen Nachbarschaft beruht, ist der Roberts-Operator stark rauschempfindlich.

Die meisten anderen Gradientenoperatoren benutzen eine 3 x 3 Nachbarschaft. Sie haben alle die allgemeine Form



$$g(x,y) = \sum_K \sum_l h(k,l) \cdot f(x+k,y+l) \quad (3.1.5-6)$$

wobei  $h(k,l)$  eine Gewichtsfunktion darstellt. Die einzelnen Operatoren unterscheiden sich nur in dem Aufbau der Gewichtsfunktion.

### b) Sobel-Operator

Dieses Gradientenverfahren liefert als Ergebnis verhältnismäßig große Kantenwerte und damit klar erkennbare Linienstrukturen. Dagegen liegt die Rauschempfindlichkeit im mittleren Bereich, was vorteilhaft für Digitalbilder mit hohen Rauschanteilen ist.

Bei Betrachtung eines Bildbereiches von 3 x 3 Bildpunktelementen (Pixel) ergibt sich die Berechnung des Sobel-Operators aus Gleichung 3.1.5-7.

	<u>i</u>		
	a	b	c
<u>j</u>	d	e	f
	g	h	i

3 x 3 Bildbereich

$$g(i, j) = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (3.1.5-7)$$

$$\text{mit } \Delta x = (a + 2 \cdot b + c) - (g + 2 \cdot h + i)$$

$$\Delta y = (a + 2 \cdot d + g) - (c + 2 \cdot f + i)$$

Etwas nachteilig wirkt sich die Verbreiterung der Kanten aus, wie aus der Skizze (Bild 3.1.5-1) entnommen werden kann.

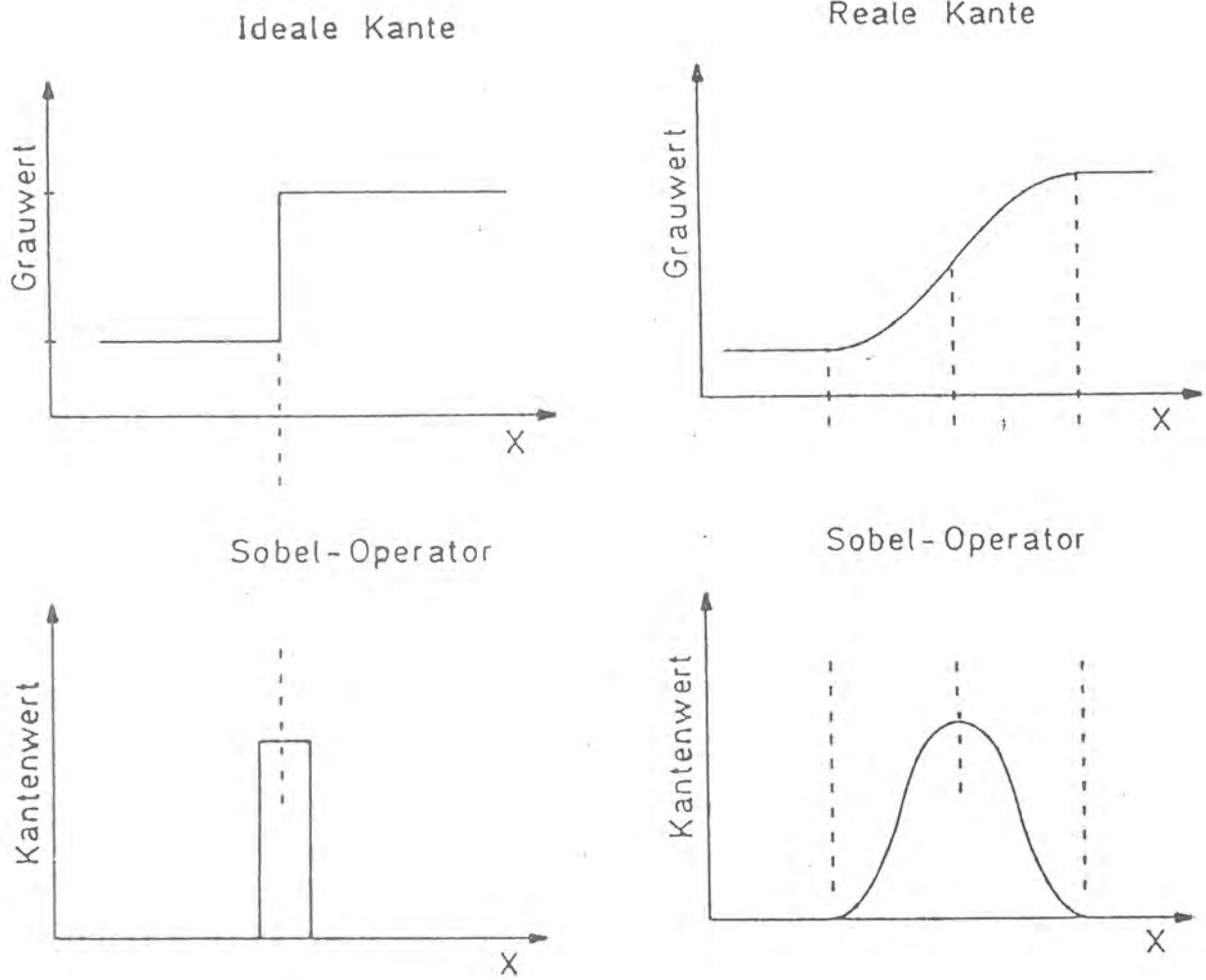


Bild 3.1.5-1: Wirkung des Sobel-Operators auf Kantenstrukturen

### 3.1.6 Bildkombinationen

Bildkombinationen gestatten die Überlagerung und Zusammenfassung von zwei oder mehr Digitalbildern bzw. von definierten Teilbereichen aus Digitalbildern. Die wichtigsten Kombinationen ergeben sich aus den vier Grundrechenarten Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division.

Es werden jeweils die codierten Funktionswerte an gleichen Bildpositionen der Digitalbilder über die vorgegebene mathematische Beziehung verknüpft. Typische Anwendungsfälle sind z.B. die additive Überlagerung von N abgetasteten Digitalbildern mit abschließender Mittelwertberechnung zur Unterdrückung von Rauscheinflüssen, oder die Erstellung von pseudoplastischen Digitalbildern, bei der die Differenz von zwei positionsverschobenen Bildmatrizen desselben Bildinhaltes berechnet wird.

Neben der gleichgewichteten Bildkombination gibt es die Möglichkeit, Digitalbilder mit unterschiedlichen Wichtungsfaktoren zu beaufschlagen, so daß bei der Bildkombination eine unterschiedliche Einflußnahme der einzelnen Digitalbilder erreicht wird.

Gleichung 3.1.6-1 beschreibt die allgemeine Beziehung für Bildkombinationen.

$$g(x,y) = K_1 \cdot f_1(x,y) \left\{ \begin{array}{c} - \\ + \\ \cdot \\ / \end{array} \right\} K_2 \cdot f_2(x,y) [+ ] K_3 \quad (3.1.6.-1)$$

- $f_1(x,y)$  = Bildfunktion des 1. Digitalbildes
- $f_2(x,y)$  = Bildfunktion des 2. Digitalbildes
- $g(x,y)$  = Digitalbild als Resultat der Bildkombination
- $K_1$  = Wichtungsfaktor 1
- $K_2$  = Wichtungsfaktor 2
- $K_3$  = Offset-Konstante

### 3.1.7 Mehrfilmtechnik

Das Signal/Rauschverhältnis S/N und der Kontrast sind entscheidende Größen für die Detailerkennbarkeit auf Röntgenfilmen. Im Interesse einer verbesserten Detailerkennbarkeit sind möglichst große Werte dieser Größen anzustreben. Hierzu gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Ausschließlich radiographisch, indem man die Belichtungswerte so wählt, daß man in erster Linie im Bereich des maximalen Gradienten  $\gamma$  der Schwärzungskurve des verwendeten Filmes arbeitet.
2. Verbesserung des S/N-Verhältnisses unter Einsatz der digitalen Bildverarbeitung, durch die Überlagerung von n gleichartigen digitalisierten Radiographien eines Objektes.

Es gilt allgemein, daß das Schwankungsquadrat einer Summe von statistisch unabhängigen Variablen gleich der Summe der einzelnen Schwankungsquadrate ist.

Die Schwärzungsschwankungen auf n gleichartigen Radiographien sind ebenfalls statistisch unabhängig und darüber hinaus gleich groß. Es gilt daher für das gesamte Schwankungsquadrat  $\sigma^2$  der deckungsgleich übereinandergelegten Radiographien:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2$$

$\sigma$  = Schwankung nach Überlagerung

$\sigma_i$  = Schwankung des Einzelfilmes

(3.1.7-1)

Bei der einfachen Überlagerung einer Anzahl von Radiographien ohne nachfolgende Mittelwertbildung kommt es zusätzlich zu einer Addition vorhandener Schwärzungsunterschiede (Signale)  $\Delta D_i$ .

$$\Delta D = \sum_{i=1}^n \Delta D_i$$

D = Gesamt-Schwärzungsdifferenz  
D<sub>i</sub> = Schwärzungsdifferenz des Einzelfilmes (3.1.7-2)

Bei nicht zu großen Schwärzungsdifferenzen sind die Schwankungsquadrate auf beiden Seiten der Schwärzungsstufe annähernd gleich groß, so daß ein Signal/Rauschverhältnis definiert werden kann.

$$\frac{S_i}{N_i} = \frac{\Delta D_i}{\sigma_i} \quad (3.1.7-3)$$

Für ein Paket von n überlagerten Filmen mit der jeweiligen Einzelschwärzung D<sub>i</sub> gilt:

$$\frac{S}{N} = \frac{\Delta D}{\sigma} = \frac{n \cdot \Delta D_i}{\sqrt{n} \cdot \sigma_i} = \sqrt{n} \cdot \frac{S_i}{N_i} \quad (3.1.7-4)$$

Das Signal/Rauschverhältnis übertrifft das der Einzelaufnahme um den Faktor  $\sqrt{n}$ .

Die optische Überlagerung von Röntgenfilmen findet auf Grund technischer Schwierigkeiten keine Anwendung. Wenige Filmüberlagerungen führen bereits zu einer Gesamtschwärzung, die eine visuelle Auswertung ausschließen.

Die Überlagerung digitalisierter Röntgenfilme im Rechner ist unabhängig von der Anzahl der Einzelfilme. Die maximale Schwärzung der Einzelfilme sollte bei Filmabtastung mittels Videokamera Schwärzungswerte von ca. S = 3 nicht überschreiten.

Die prinzipielle Aufnahmeanordnung einer Mehrfilmaufnahme geht aus Bild 3.1.7-1 hervor. Im Gegensatz zur herkömmlichen

Durchstrahlungsaufnahme mit nur einem Röntgenfilm findet in der Mehrfilmtechnik eine gleichzeitige Belichtung aller  $n$  Röntgenfilme innerhalb des Filmpaketes statt. Jeder Einzel-film enthält somit die gleichen Informationsanteile, die sich als Folge der Durchstrahlung des Prüfobjektes ergeben. Die Schwärzungsschwankungen (optisches Rauschen) sind dagegen statistisch unabhängig auf den  $n$  Radiographien verteilt. Die Wirkung dieser Schwankungsgrößen gilt es bei der Film-überlagerung zu eliminieren.

### Aufnahmeanordnung von radiographischen Mehrfilmaufnahmen

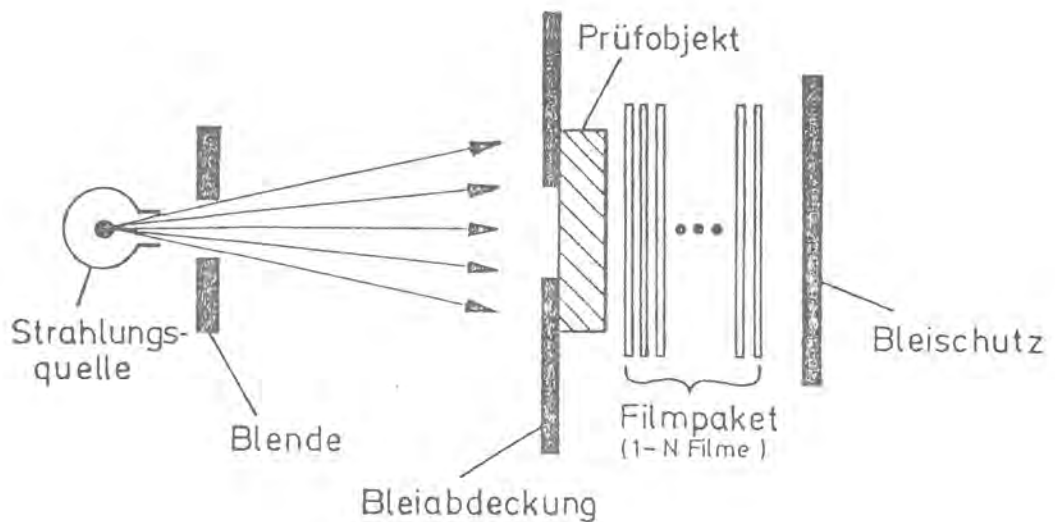


Bild 3.1.7-1: Aufnahmeanordnung von radiographischen Mehrfilmaufnahmen

Das Prinzip der Filmabtastung und der Verarbeitung lässt sich aus Bild 3.1.7-2 entnehmen. Die n Radiographien eines Filmpaketes werden seriell von einer Videokamera abgetastet und digitalisiert. Vor der Zwischenspeicherung der n Digitalbilder erfolgt eine geometrische Positionsanpassung, eine wichtige Voraussetzung zur optimalen Überlagerung. Nach Zwischenspeicherung und Positionierung aller Digitalbilder im Rechner erfolgt die Addition, deren Ergebnis, ein digitales Überlagerungsbild, in einen Ergebnisspeicher des Rechners eingeschrieben wird. Vor einer Bildausgabe des digitalen Überlagerungsbildes auf einen Monitor oder einer Hardcopy-Einheit wird in der Regel eine rechnerische Begrenzung der Grauwerte auf 256 Graustufen (8 Bit) durchgeführt. Weiterführende Bildverarbeitungsverfahren im Rechner auf der Basis des Überlagerungsbildes können je nach Zielvorgabe zur Anwendung kommen.

SERIELLER BILDEINZUG

DIGITALE BILDVERARBEITUNG

BILDDARSTELLUNG

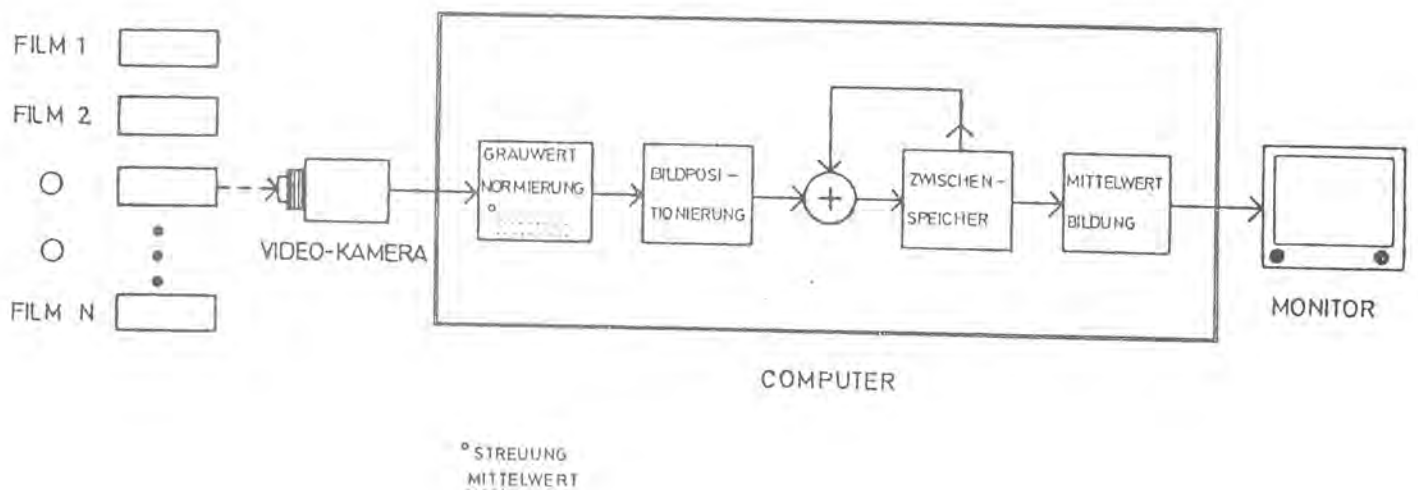


Bild 3.1.7-2: Prinzipschaltbild der Verarbeitung von Mehrfilmaufnahmen

Aufnahme und rechnerische Bearbeitung von Mehrfilmaufnahmen vollzieht sich, wie schon vorher beschrieben, in mehreren Verarbeitungsschritten. Die Verarbeitungs-Routinen sind in erster Linie Fortran-Programme, die schrittweise im Rechner zur Anwendung kommen.

Zur Unterdrückung von elektrischen Rauscheinflüssen im Kamerabereich wird jede Radiographie mehrfach abgetastet und aufintegriert. Aus Literaturangaben und auch auf Grund eigener Untersuchungen sollte zur Erzielung guter Bildqualitäten jede Radiographie mindestens 25 Mal abgetastet werden.

Nach der Abtastung der einzelnen Röntgenfilme muß eine geometrische Positionierung der Digitalbilder im Rechner erfolgen. Das erste Digitalbild wird in einen 256 K-Byte Speicher eingeschrieben und zwischengespeichert. Es bildet die Vergleichsmatrix für die geometrische Positionierung der nachfolgenden digitalisierten Radiographien gleichen Inhalts. Zur optimalen geometrischen Anpassung von zwei Digitalbildern wird der mittlere quadratische Fehler  $\bar{e}^2$  der Bildmatrizen oder aber von zwei Submatrizen (Bildausschnitten) berechnet, während das zweite Digitalbild einer Positionsverschiebung in kleinen Intervallen in x- und y-Richtung unterzogen wird. Bei optimaler Überlagerung errechnet sich ein Fehlerminimum ( $\bar{e}^2 = \bar{e}^2_{\min}$ ).

$$\bar{e}^2 = \frac{1}{M^2} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} [f_K(x,y) - f_{K+1}(x,y)]^2 \quad (3.1.7-5)$$

$f_K(x,y)$ : Bildmatrix 1  
 $f_{K+1}(x,y)$ : Bildmatrix 2  
 $M^2$ : Anzahl der Bildpunkte

In gleicher Weise erfolgt die Positionierung der weiteren digitalisierten Radiographien eines Filmpaketes. Ein Beispiel für die Positionsanpassung von 2 Radiographien wird in Bild 3.1.7-3 demonstriert. Die Bildausschnitte 1 und



2 sowie 4 und 5 sind Bestandteil einer Radiographie und werden dem Bildausschnitt einer zweiten Radiographie (Position 3) überlagert. Die jeweiligen Überlagerungsbilder ergaben einen mehr oder weniger guten visuellen Positionsvergleich. Wesentlich exakter fällt dagegen die Berechnung eines Fehlerminimums aus.



Bild 3.1.7-3: Darstellung der schrittweisen Bildpositionierung bei gleichzeitiger Berechnung der quadratischen Fehler der Differenzbilder.

Nach Abschluß der Positionierung und Zwischenspeicherung der  $n$  Digitalbilder wird eine Addition der  $n$  Bildmatrizen im Rechner durchgeführt. Das resultierende digitale Überlagerungsbild verfügt in der Regel über einen größeren Grauwertbereich als 256 Graustufen (8 Bit). Um die Gesamtinformation zu erhalten, wird es in einem 512 K-Byte Ergebnisspeicher abgelegt. Gleichung 3.1.7-6 beschreibt den Additionsvorgang.

$$g_n(x,y) = \sum_{K=1}^n f_K(x,y) \quad \begin{array}{l} f_K(x,y): \text{ Einzelbild} \\ g_n(x,y): \text{ Überlagerungsbild} \end{array} \quad (3.1.7-6)$$

Vor einer Darstellung des Überlagerungsbildes auf einem Monitor muß eine Grauwertanpassung durchgeführt werden, die eine Informations-Reduzierung pro Bildpunkt auf 8 Bit vorsieht.

Für die Umrechnung stehen drei Verfahren zur Verfügung:

Es wird auf der Grundlage des Überlagerungsbildes der arithmetische Mittelwert nach Gleichung 3.1.7-7 berechnet:

$$g(x,y) = \frac{1}{n} g_n(x,y) \quad (3.1.7-7)$$

Durch eine gezielte Grauwertkompression, bei der die Variationsbreite des Überlagerungsbildes durch eine lineare Grauwerttransformation in den Grauwertbereich 0 = schwarz bis 255 = weiß umgerechnet wird (Glg. 3.1.7-8).

$$g(x,y) = \frac{g_n(x,y) - g_n(x,y)_{\min}}{g_n(x,y)_{\max} - g_n(x,y)_{\min}} \cdot 255 \quad (3.1.7-8)$$

Die dritte Möglichkeit besteht in der Selektion eines Grauwertfensters mit 256 Graustufen (8 Bit) aus dem Überlagerungsbild. Diese Methode führt zu einer unverfälschten Darstellung des ausgewählten Graustufenintervalls, während allen Werten unterhalb des Grauwertintervalls der Wert 0 = schwarz und oberhalb der Wert 255 = weiß zugeordnet wird.

$$g(x,y) = \underbrace{g_n(x,y) - C}_U \quad (3.1.7-9)$$
$$g(x,y) = \begin{cases} 0 & \text{für } U < 0 \\ 255 & \text{für } U > 255 \end{cases}$$

Nach der Umrechnung des Überlagerungsbildes steht somit ein Digitalbild mit maximal 256 Graustufen zur Verfügung, das in einem 256 K-Byte Ergebnisspeicher eingeschrieben wird.

### 3.2 Mehrwinkel-Radiometrie

Die konventionelle Radiographie liefert Schattenbilder des durchstrahlten Prüfobjektes. Räumlich verteilte Materialfehler und Dichteunterschiede werden in einer Bildebene übereinander projiziert. Damit enthält der Röntgenfilm (Bildebene) keine Informationen über die Tiefenlage eines Materialfehlers. Um zu einer Tiefeninformation zu gelangen, gibt es die Möglichkeit der Stereo-Radiographie. Bei dieser Aufnahmetechnik wertet man zwei Filmaufnahmen aus, die aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen werden. Auf Grund der relativen Verschiebung der Fehlerabbildung und bei Kenntnis der Aufnahmegeometrie läßt sich die Tiefenlage des Fehlers im Prüfobjekt ermitteln.

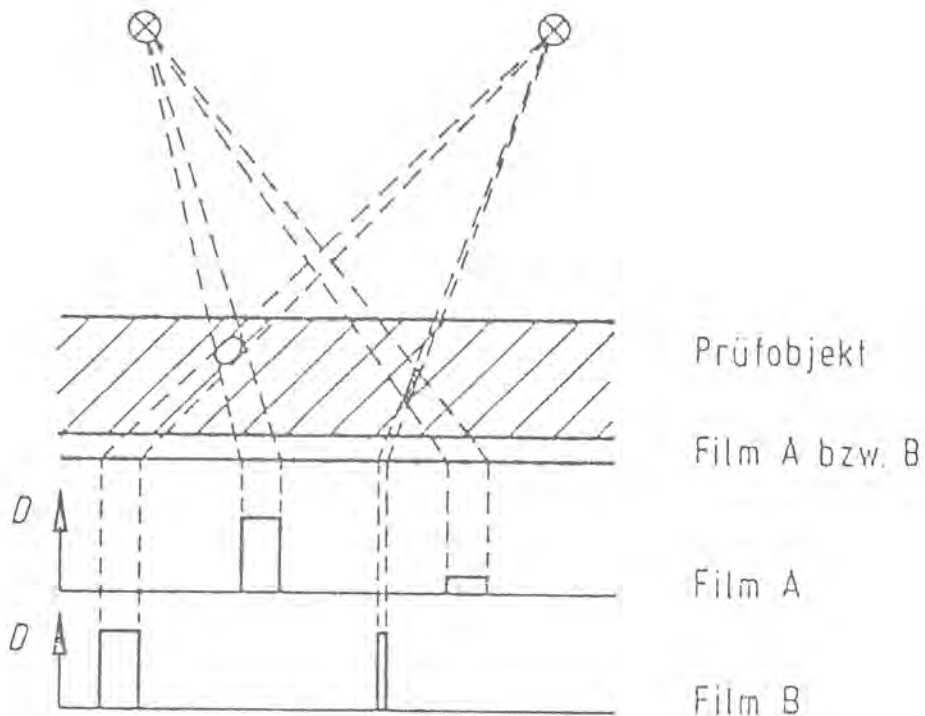


Bild 3.2-1: Prinzip der Stereo-Radiographie

Der Nachteil der konventionellen Radiographie liegt darin, daß die Kontrastempfindlichkeit und damit auch die Dickenauflösung unter anderem durch die Streustrah-

lung begrenzt wird. Diese nimmt mit der durchstrahlten Werkstoffdicke zu. Die Kontrastempfindlichkeit bzw. Dickenauflösung ist gegeben durch folgende Beziehung:

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{2,3}{\gamma} \frac{\Delta S}{d} \frac{1+k}{\mu} \quad (3.2-1)$$

- $k = J_s/J_p$       Streustrahlenverhältnis; abhängig von der Materialdicke
- $\Delta S$             kleinster noch erkennbarer Schwärzungsunterschied
- $\mu$                 effektiver linearer Schwächungskoeffizient [ $\text{cm}^{-1}$ ] für ein schmales Strahlenbündel
- $\gamma$                 Steigung der Schwärzungskurve im Bereich  $S \dots \Delta S$
- $d$                 Dicke des Prüfobjektes in cm

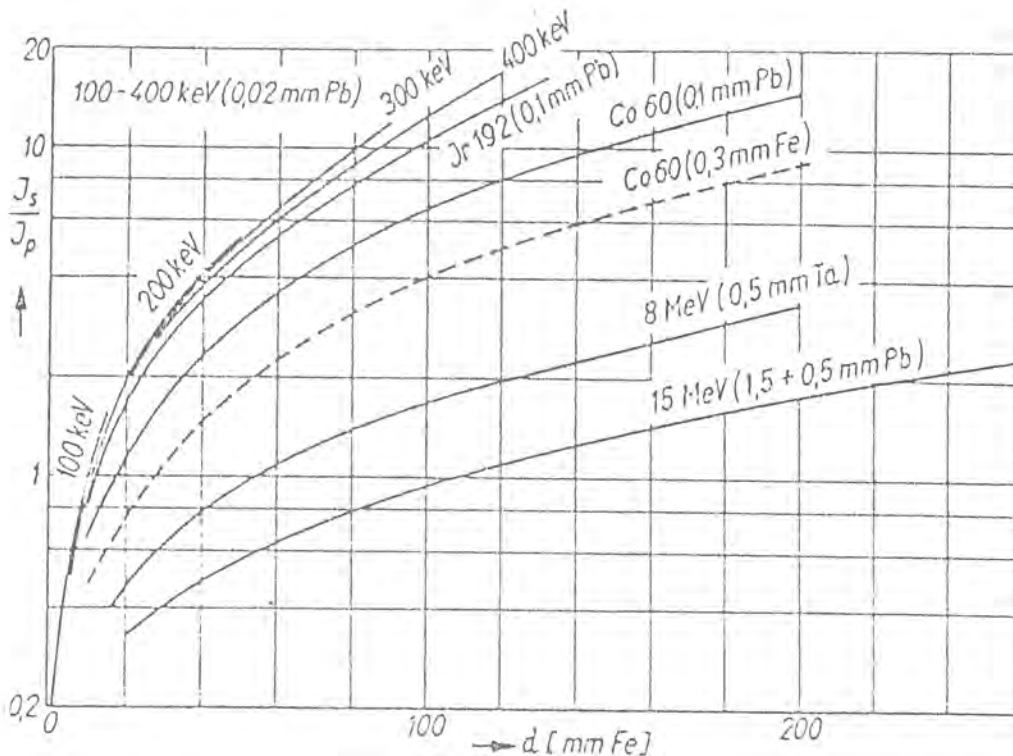


Bild 3.2-2: Streustrahlenverhältnis  $k$  in Abhängigkeit von der Materialdicke  $d$  für Fe

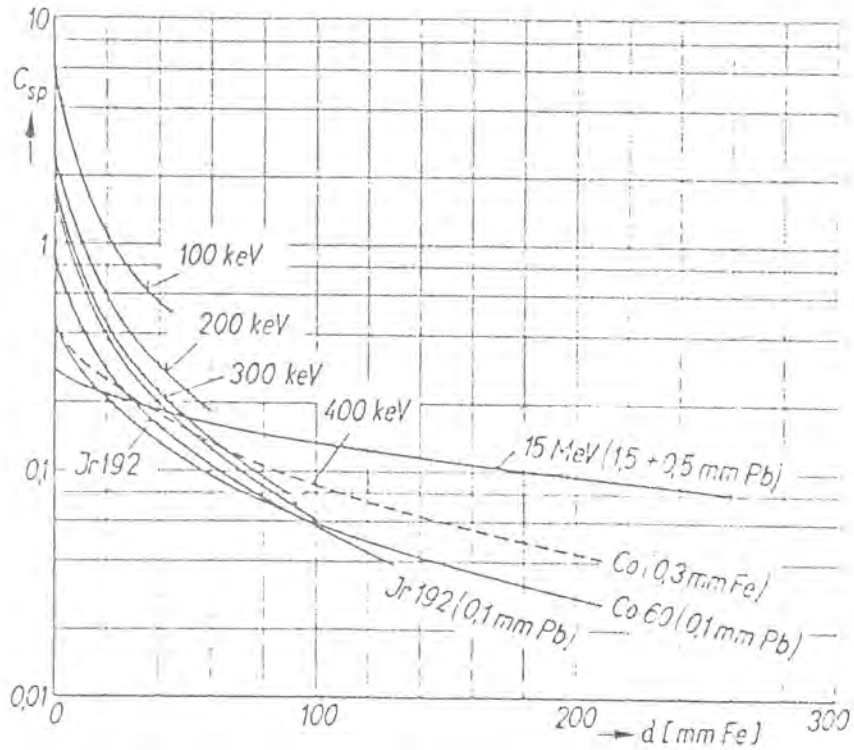


Bild 3.2-3: Spezifischer Kontrast  $C$  in Abhängigkeit von der Materialdicke  $d$  für Fe

Eine erhebliche Verkleinerung des Streustrahlenverhältnisses und damit eine Verbesserung des Kontrastes ist durch Abtasten des Prüfobjektes mit einem kollimierten Röntgenstrahl zu erreichen.

Bei dieser Art der Durchstrahlungsprüfung durchdringt ein dünner, aus dem Strahlenkegel der Röntgenröhre ausgeblendeter Strahl das Prüfobjekt, tritt durch einen zweiten Kollimator (Detektorblende) und trifft auf einen Strahlungsdetektor. Dieser wandelt die auftreffende Strahlungsintensität in ein elektrisches Signal um. Damit bietet sich die Möglichkeit einer direkten Auswertung und automatischen Fehlererkennung.

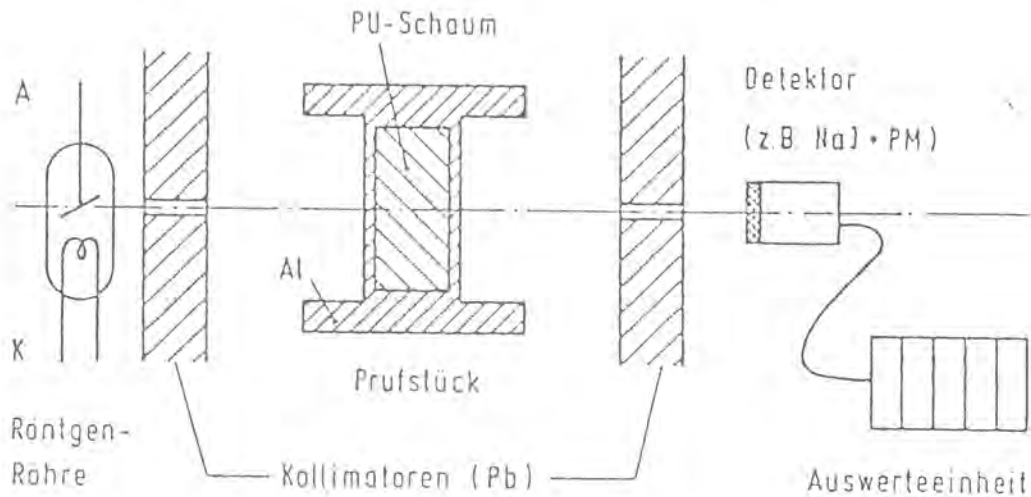


Bild 3.2-4: Meßanordnung zur Radiometrie

Die radiometrische Tiefenbestimmung verbindet die Vorteile des besseren Kontrastes und der Automatisierbarkeit der Radiometrie mit einem einfachen geometrischen Aufbau der Stereo-Radiographie.

Der prinzipielle Aufbau besteht aus einer Strahlenquelle, aus deren Strahlenkegel zwei dünne Röntgenstrahlen mit einem Öffnungswinkel  $2 \cdot \alpha$  ausgeblendet werden. Die beiden Strahlen transmittieren durch das zu prüfende Material, treten durch eine zweite Blende und treffen auf die Strahlungsdetektoren.

Das Prüfobjekt bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit  $v$  durch die beiden Röntgenstrahlen. Ein Materialfehler, der sich zum Zeitpunkt  $t_1$  zwischen Strahlenquelle und Detektor A in einem unbekanntem Abstand  $y$  zur Strahlenquellenebene befindet, wird zum Zeitpunkt  $t_2$  den Strahl zwischen Strahler und Detektor B kreuzen. Nach Bestimmung der zeitlichen Verschiebung  $t = t_2 - t_1$  kann der Abstand mittels einfacher Berechnung ermittelt werden.

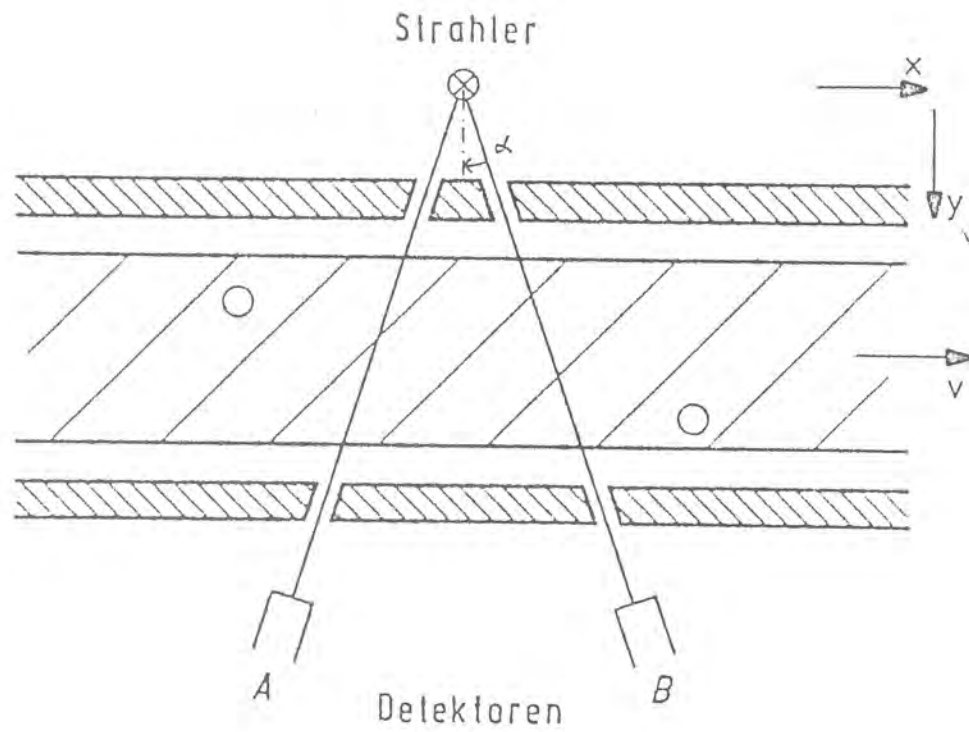


Bild 3.2-5: Prinzip der Mehrwinkel-Radiometrie

$$\tan \alpha = \frac{v \cdot \Delta t}{2y}$$

$$\approx y = \frac{v}{2 \tan \alpha} \cdot \Delta t = \frac{\Delta x}{2 \tan \alpha} \quad (3.2-2)$$

$$\text{mit } v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \text{const.}$$

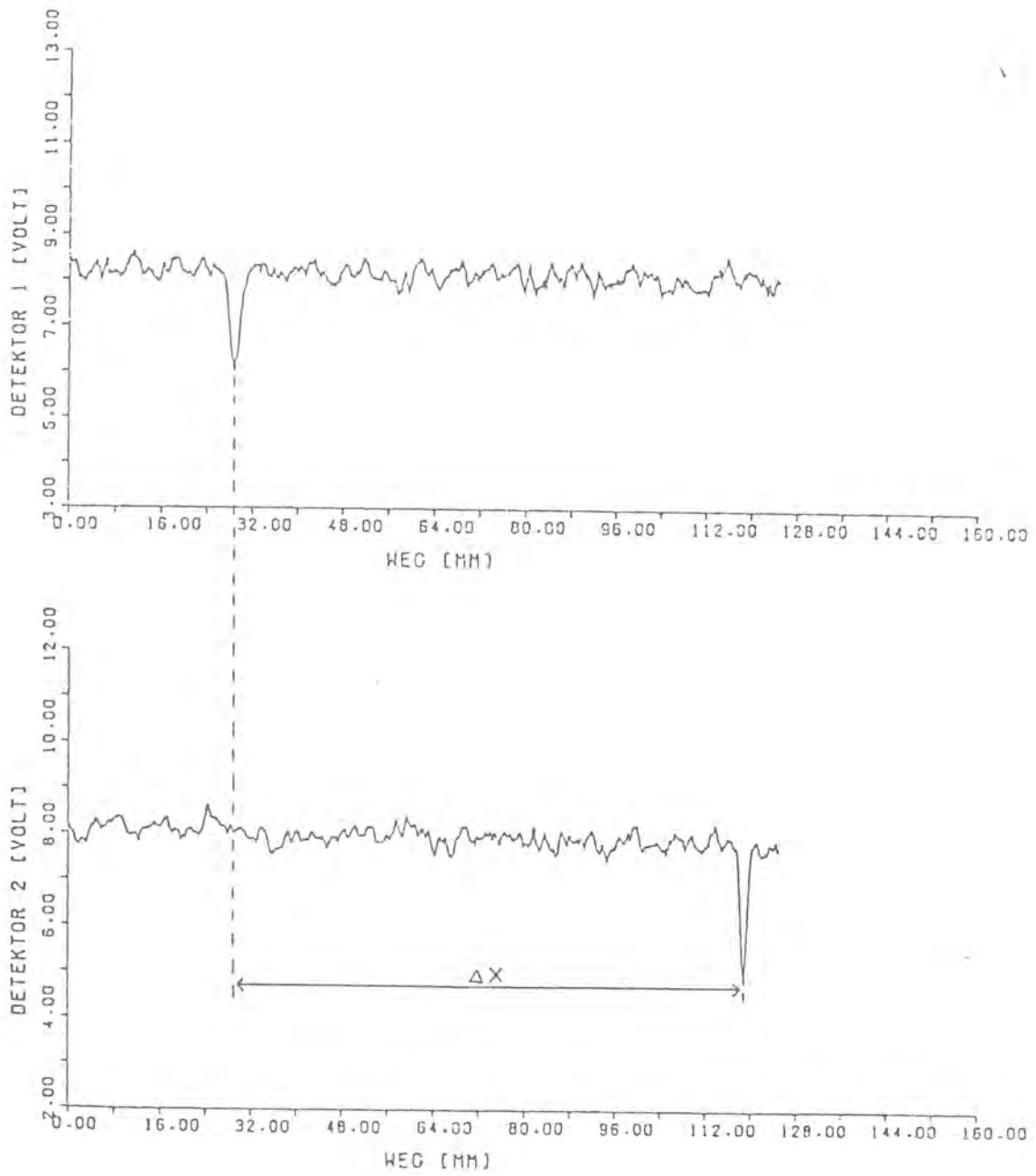


Bild 3.2-6: Signalverlauf bei Mehrwinkel-Radiometrie



### 3.3. Funkenerosion

In der zerstörungsfreien Prüfung werden zur Erprobung und zur Kontrolle von Verfahren und Prüfeinrichtungen künstliche Fehler benötigt, deren Form und Abmessungen mit natürlichen möglichst vergleichbar sind und die definiert angefertigt werden können. Mit mechanisch abtragenden Verfahren sind im allgemeinen jedoch nicht so feine Fehler herstellbar. Die Anwendung der Funkenerosion bietet hier die Möglichkeit, in die Bereiche der Eigenschaften natürlicher Materialtrennungen vorzudringen.

Für die Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit radiografischer Verfahren bzw. zur Abschätzung der Fehlererkennbarkeit werden Testfehler unterschiedlicher Breite und Tiefe benötigt. Daneben sollten die Fehler an der Oberfläche des Testkörpers frei platzierbar sein, um z.B. auch eng nebeneinander liegende Fehler zu generieren oder die Innenseite von Rohren bearbeiten zu können.

Die Funkenerosion als materialabtragendes Verfahren ist weitgehend bekannt. Vielfältige Anwendungen findet es beispielsweise im Werkzeug- oder Formenbau, wo sowohl sehr harte Materialien bearbeitet werden müssen, als auch komplizierte Profile benötigt werden, die konventionellen spanabhebenden Verfahren also versagen. Weitere Einsatzgebiete sind dort vorhanden, wo feine Strukturen zu fertigen sind.

Die Werkstückelektrode (WSE) und die Werkzeugelektrode (WZE) befinden sich mit den Teilen, an denen Material abgetragen werden soll, in einer dielektrischen Flüssigkeit. Beide sind mit den Ausgangsklemmen eines elektrischen Generators verbunden. Ist der Abstand zwischen WZE und WSE hinreichend klein, so daß die Durchschlagspannung überschritten wird, dann bildet sich zwischen beiden eine elektrische Entladung aus. Diese bewirkt, daß von beiden Elektroden örtlich Material erodiert wird. Bei diesem Vorgang überlagern sich elektrische und thermodynamische Vorgänge in komplizierter Weise. Während der Entladung steht eine Spannung von etwa 20V zwischen beiden Elektroden an. Der

Strom muß also vom Generator in seiner Größe und in seinem zeitlichen Verlauf gesteuert werden.

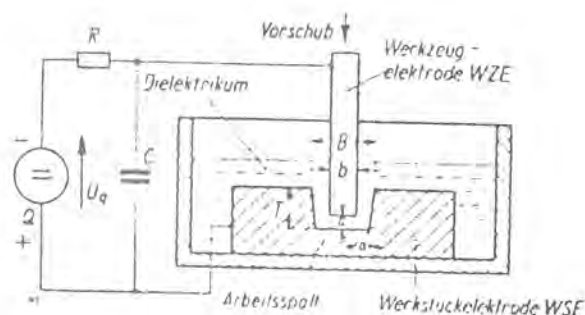


Bild 3.3-1: Prinzip der Funkenerosion

Der Kondensator C wird über den Widerstand R aufgeladen. Wird die Durchschlagsspannung erreicht, so zündet der Funke, und der Kondensator C wird über die Entladestrecke entleert. Er gibt hierbei einen wesentlichen Teil seiner gespeicherten Energie an die Funkenstrecke ab. Die nächste Entladung folgt, wenn der Kondensator wieder aufgeladen ist. Sie tritt an dem Ort auf, an dem die höchste elektrische Feldstärke herrscht.

Das Verhältnis der an beiden Elektroden abgetragenen Materialmengen wird weitgehend von den verwendeten Werkstoffen und von den Entladungsbedingungen bestimmt. Abhängig von den Bedingungen im Entladungskreis außerhalb der Funkenstrecke stellt sich zwischen WSE und WZE ein Abstand ein, der mit Arbeitsspalt  $a$  bezeichnet wird. Der maximale Arbeitsspalt, vorgegeben durch die Generatorspannung  $U_g$ , die Funkenenergie und die Spannungsfestigkeit der dielektrischen Flüssigkeit, ist nur in Richtung des Werkzeugvorschubes durch eine genügend hohe Vorschubgeschwindigkeit zu unterschreiten. Es läßt sich also kein Schlitz herstellen, dessen Breite kleiner als die Dicke der WZE zuzüglich dem zweifachen Wert des maximalen Arbeitsspalt es ist.

### 3.4 Optische Bildverarbeitung

#### 3.4.1 Das radiographische Abbildungssystem

Das radiographische Abbildungssystem, bestehend aus der Strahlenquelle, den Strahlen, den Filtern und der Folien-Film-Einheit kann als Übertragungskanal für Informationen über die Transparenzverteilung des Objekts angesehen werden. Die Information kommt nicht unverändert auf dem Film an, vielmehr wird das zweidimensionale Transparenzprofil  $f(x, y)$  (für Röntgenstrahlen) des Objekts mit der Punktverwaschungsfunktion  $h(x, y)$ , dem Punktbild, gefaltet (lineare Superposition der Bild- und Signalelemente vorausgesetzt). Die Bildverteilung  $g(x, y)$  ergibt sich nach Korrektur der Nichtlinearität des Films zu

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x', y') \cdot h(x-x', y-y') dx' dy' \quad (3.4.1-1)$$
$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y)$$

Sowohl die Transparenz - wie auch die Bildverteilung können als lineare Überlagerung sinusförmiger Transparenz- bzw. Grauwertprofile aufgefaßt, d. h. in Fourierkomponenten zerlegt werden.

$$f(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} F(u, v) e^{-2\pi i(xu + yv)} du dv$$
$$g(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} G(u, v) e^{-2\pi i(xu + yv)} du dv$$

$u, v$  = Ortsfrequenzen in Linien/mm

Die Fouriertransformierten  $G(u, v)$  und  $F(u, v)$  stehen nach dem auf die Beziehung (3.4.1-1) angewendeten Faltungstheorem somit in folgendem Zusammenhang:

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot H(u, v) \quad (3.4.1-2)$$

wobei  $H(u, v)$  die Fouriertransformierte der Punktbildfunk-

tion oder die Modulationsübertragungsfunktion des Systems darstellt.

$$H(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) e^{-2\pi i(xu + yv)} dx dy$$

Die Beziehung (3.4.1-2) zeigt, wie durch das Abbildungssystem die Modulation der Eingangssignale  $F(u, v)$  nach Maßgabe der Übertragungsfunktion  $H(u, v)$  verändert (verschlechtert) ausgegeben wird. Ursache hierfür sind in der Radiographie die endliche Größe des Punktbildes (Punktverwaschungsfunktion) infolge der bekannten Unschärfen.

Die Beziehung (3.4.1-2) läßt aber gleichzeitig erkennen, daß durch nachgeschaltete weitere Abbildungssysteme mit geeigneter Übertragungsfunktion  $K(u, v)$  Eingriffe in das Frequenzspektrum der Radiographie vorgenommen werden können, die innerhalb des Bildes Akzentverschiebungen mit dem Ziel besserer Detailerkennbarkeit bewirken.

$$G^*(u, v) = K(u, v) \cdot G(u, v)$$

Handelt es sich bei  $K(u, v)$  um die inverse Funktion zu  $H(u, v)$ , so ist eine inverse Filterung bzw. Entfaltung der Radiographie möglich

$$F^l(u, v) = H^{-1}(u, v) \cdot H(u, v) \cdot F(u, v)$$

die allerdings schon allein wegen des Rauschens unvollkommen bleiben wird.

### 3.4.2 Die Linse als optischer Rechner

Der optischen Bildverarbeitung liegt die aus der Beugungstheorie folgende Tatsache zugrunde, daß die Lichtamplitudenverteilung in der hinteren Brennebene einer sphärischen Linse der Fouriertransformierten  $F(u, v)$  der Durchlaß-Amplituden-Verteilung (Transparenz-Verteilung)  $f(x_1, y_1)$  entspricht, kohärentes Licht vorausgesetzt.

$$F(u, v) = C \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x_1, y_1) e^{-2\pi i(x_1 u + y_1 v)} dx_1 dy_1 \quad (3.4.2-1)$$

Hierbei ist C eine Konstante.

u und v sind Ortsfrequenzen in Linien pro mm, die mit den Abstandskoordinaten  $x_2$ ,  $y_2$  der Brennebene durch

$$x_2 = u\lambda f_1 \quad \text{und} \quad y_2 = v\lambda f_1 \quad (3.4.2-2)$$

verknüpft sind.

$\lambda$  ist die Wellenlänge des verwendeten (Laser)-Lichts und  $f_1$  die Brennweite der Linse (Bild 3.4.2-1).

Dieses kohärente optische System stellt einen optischen Rechner dar. Durch Eingriffe in das Frequenzspektrum in der Brennebene sind Bildmanipulationen möglich, wenn die veränderte Lichtamplitudenverteilung in der Brennebene durch eine zweite Linse wieder in den Orts- bzw. Bildraum zurücktransformiert, d.h. zum veränderten Bild gefügt wird.

### 3.4.3 Eingriffsmöglichkeiten

Im folgenden werden zunächst einige Operationen beschrieben, die mit der optischen Bildverarbeitung prinzipiell möglich sind, ohne auf die in der Radiographie sich ergebenden Einschränkungen einzugehen.

#### 3.4.3.1 Hoch-, Tief- und Bandpaß

Das Aussperren bestimmter Frequenzbereiche, d.h. die Hoch-, Tief- und Bandpaßfilterung, gestaltet sich sehr einfach: Da die in der Transparenzverteilung der Bildvorlage enthaltenen sinusförmigen Teilgitter das kohärente Licht in von der Gitterfrequenz und -orientierung abhängige Richtungen beugen, werden die gebeugten Wellen durch eine Linse auf Punkte in

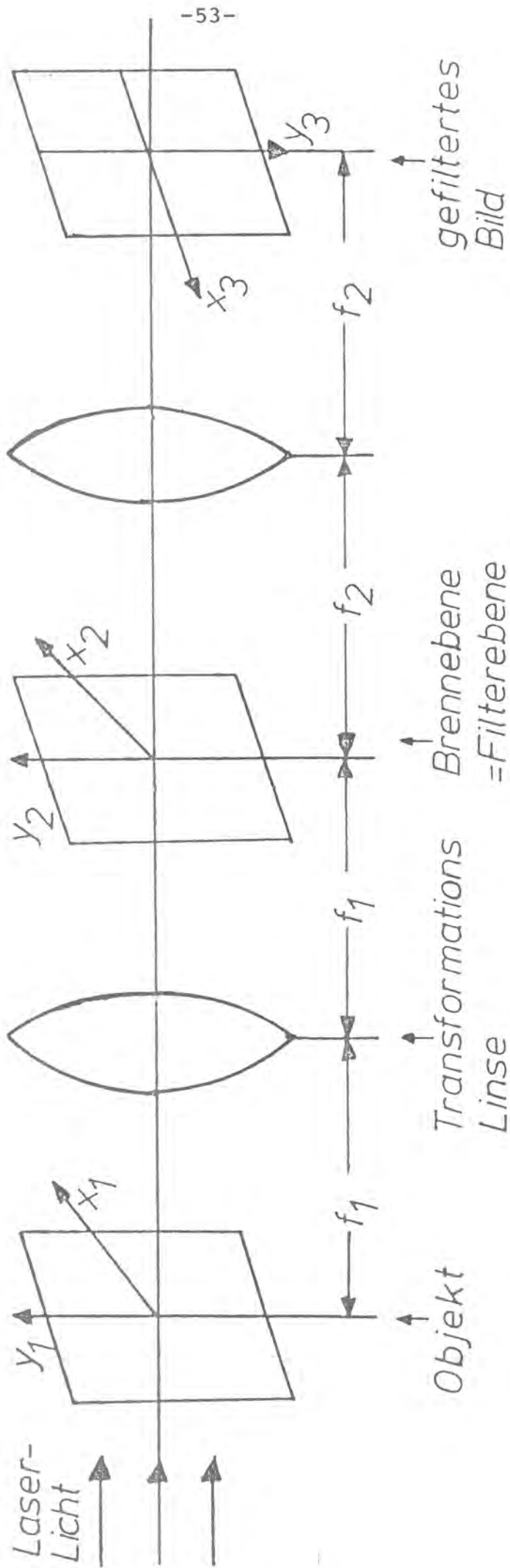


Bild 3.4.2-1: Optisches System zur Bildverarbeitung

der Brennebene fokussiert, deren Abstand von der optischen Achse dem Beugungswinkel und damit der Gitterfrequenz entspricht, bei einer Orientierung senkrecht zu den Gitterlinien. Der Abstand der zugeordneten Frequenz von der optischen Achse errechnet sich nach den angegebenen Beziehungen in Kapitel 3.4.2. Für das Aussondern bestimmter Ortsfrequenzen müssen lediglich geeignet geformte und orientierte, lichtundurchlässige Objekte an die Stellen in der Brennebene gebracht werden, die den Ortsfrequenzen zugeordnet sind. Eine kreisförmige Scheibe mit der optischen Achse im Mittelpunkt wirkt als Hochpaß, im zurücktransformierten Bild werden die Kanten betont. Eine Lochblende schneidet die höheren Ortsfrequenzen ab und wirkt deshalb als Tiefpaßfilter, das die Kontraste einebnet und das Rauschen mildert. Lochblende und Kreisscheibe kombiniert ergeben ein Bandpaßfilter. Durch die rotationssymmetrische Form der Blenden werden isotrop arbeitende Filter vorgegeben. Eine anisotrope Filterung wird mit sektorartigen Filtern erreicht, deren Sperrbereich senkrecht zu der die Beugung verursachenden Struktur (Gitterlinien) stehen muß.

#### 3.4.3.2 Addition und Subtraktion von Bildern

Zwei oberhalb bzw. unterhalb der optischen Achse befindliche, sich nicht überlappende Bildvorlagen können durch ein in die Brennebene der Transformationslinse eingebrachtes Filter mit sinusförmiger Transparenz addiert oder subtrahiert werden. Je nachdem, ob bei dieser Multiplikation im Frequenzraum die maximale Durchlässigkeit des Gitters auf der optischen Achse liegt oder um  $\pi/2$  verschoben, geschieht durch den entsprechenden Wert des Phasenfaktors eine Addition ( $\varnothing = 0$ ) bzw. Subtraktion ( $\varnothing = \pi/2$ ) der mit Hilfe einer zweiten Linse in den Ortsraum rücktransformierten Bilder.

### 3.4.3.3 Differenzieren

Entsprechend ist die Differentiation einer Bildvorlage durch das Einbringen von zwei sinusförmigen Transparenzen leicht unterschiedlicher Frequenzen und mit den erforderlichen Phasen  $\varnothing = 0$  bzw.  $\pi/2$  in die Frequenzebene möglich. Da einer Multiplikation im Frequenzraum eine Faltung im Ortsraum entspricht, läßt sich die Differentiation der Bildvorlage,  $f(x,y)$  als Faltung von  $f(x,y)$  mit zwei leicht gegeneinander verschobenen  $\delta$ -Funktionen darstellen:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left( \frac{1}{\varepsilon} \right) \left\{ f(x,y) * h_1(x,y) \right\}$$

$$h_1(x,y) = \delta [x + (a + \varepsilon), y] - \delta [x + a, y]$$

Durch das Zusammensetzen von geeigneten sinusförmigen Gittern können auch die Operationen

$$\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y}; \quad \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}; \quad \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}$$

erzeugt werden. Allerdings ist die Realisierung solcher Gitter nicht trivial.

### 3.4.3.4 Holographische Filter

Eine sinngemäße Weiterführung der Frequenzfilter sind die inversen Filter. Wenn statt der einfachen Blenden derart angepaßte Filter in die Frequenzebene eingefügt werden, daß das Filter einen das Bild bei der Aufnahme verschlechternden Einfluß wieder aufhebt  $[H(u,v)^{-1} \cdot H(u,v)]$ , entstehen nach der Rücktransformation entfaltete Reproduktionen. Derartige Filter können im selben optischen Rechner erzeugt werden wie der Entfaltungsvorgang. Die bei der ursprünglichen Aufnahme wirksame Verwaschungsfunktion  $h(x,y)$  (z. B. ein Brennfleck-



bild bei einer Radiographie) wird durch die Transformationslinse in die Lichtamplitudenverteilung  $H(u,v)$  gewandelt und von einem Film als Betragsquadrat registriert

$$T(u,v) = (|H(u,v)|^2)^{-\gamma/2}$$

Der Gradient  $\gamma$  des Films kann durch den Entwicklungsprozeß auf  $\gamma = 1$  festgelegt werden, so daß sich als Transmission des Films ergibt:

$$T(u,v) = \frac{1}{|H(u,v)|} \quad (3.4.3.4-1)$$

Diese Art der inversen Filter (inverse Transmissions-Amplituden-Filter) sind jedoch nur im Fall geringen Rauschens erfolgreich. Bei stärkerem Rauschpegel muß ein Wiener-Filter verwendet werden, das außer der Übertragungsfunktion auch die Wienerspektren des Signals und des Rauschens berücksichtigt.

Sowohl das Filter nach Gleichung (3.4.3.4-1) als auch das Wiener-Filter ignorieren die Phase. Amplitude und Phase werden jedoch von den holographischen Filtern (van der Lugt-Filter) einbezogen. Beim holographischen Filter wird durch eine im festen Winkel in die Frequenzebene der Transformationslinse eingestrahlte ebene Referenzwelle  $R(u,v)$  die Lichtverteilung  $H(u,v)$ , aber auch  $H^*(u,v)$  dem Betrag und der Phase nach auf einem Film gespeichert:

$$\begin{aligned} |R(u,v) + H(u,v)|^2 &= |R(u,v)|^2 + |H(u,v)|^2 \\ &+ R^*(u,v) H(u,v) + R(u,v) H^*(u,v) \end{aligned} \quad (3.4.3.4-2)$$

Das vierte Glied von (3.4.3.4-2) enthält die Übertragungsfunktion  $H^*(u,v)$ . Indem dieses Filter mit  $|H(u,v)|^{-2}$  multipliziert wird, entsteht

$$\frac{H^*(u,v)}{|H(u,v)|^2} = \frac{1}{H(u,v)} \quad (3.4.3.4-3)$$

als ein inverses Filter, das außer dem Betrag von  $H(u,v)$  auch die Phaseninformation enthält.

Das Filter  $|H(u,v)|^{-2}$  ergibt sich aus  $(|H(u,v)|^2)^{-\gamma/2}$  für  $\gamma = 2$  und (3.4.3.4-3) kann durch das abgestimmte Belichten eines Films in der Frequenzebene zunächst mit  $H^*(u,v)$  (d.h. holographisch) und danach mit  $|H(u,v)|^{-2}$  (ohne Referenzwelle) erzeugt werden.

Die Möglichkeiten des van der Lugt-Filters beschränken sich nicht nur auf die inverse Filterung, sondern umfassen auch die Korrelation und damit optische Mustererkennung. Hierzu ist lediglich das von einem Merkmalsbild  $m(x,y)$  erzeugte holographische Filter  $M(u,v)$  in der Frequenzebene mit der Bildvorlagen-Verteilung  $N(u,v)$  zu kombinieren. Nach Rücktransformation in den Ortsraum mit Hilfe einer zweiten Linse liegt dann die Korrelation  $m*n$  vor. Die Übereinstimmung zwischen einem Detail der Bildvorlage und dem Merkmal wird mit einem hell leuchtenden, am Ort des Details liegenden Korrelationspunkt angegeben, wobei Korrelationsgrad und Helligkeit einander entsprechen.

## 4. Versuchseinrichtungen

### 4.1 Digitale Bildverarbeitung

Die Verarbeitung von Radiographien aus der zerstörungsfreien Materialprüfung unter Einsatz der digitalen Bildverarbeitung stellt eine Reihe von Forderungen an den Aufbau und die Qualität eines Bildverarbeitungssystems. Grundsätzlich kann man das notwendige Gesamtsystem in zwei Bereiche gliedern, deren Aufbau durch die Aufgabenbereiche Bildeinzug und Bildverarbeitung vorgegeben sind.

Für den Bildeinzug, d.h. der Abtastung und Digitalisierung der Röntgenbilder, müssen Geräte zur Verfügung stehen, die eine Bildabtastung mit ausreichender Bildqualität und vertretbaren Abtastzeiten gestatten. Neben den qualitativ guten, aber sehr kostenintensiven Trommelscannern bieten sich vor allem hochauflösende Videokameras zur Filmabtastung an (siehe Kapitel 4.4). Bei dem Einsatz von Leuchtquellen zur Aufhellung der Radiographien bleibt man auf das Angebot von handelsüblichen Filmbetrachtungsgeräten angewiesen. Diese sind in erster Linie der Lichtempfindlichkeit des menschlichen Auges angepaßt. Eine bessere Anpassung der Filmbetrachtungsgeräte an die spektrale Lichtempfindlichkeit der Videokameras würde sicherlich noch Verbesserungen hinsichtlich der Schwärzungsauflösung zur Folge haben.

Für die digitale Bildverarbeitung muß das Rechnersystem so ausgelegt sein, daß die Verarbeitung von großen Datenmengen in akzeptierbaren Rechenzeiten durchgeführt werden kann, d.h. für digitale Bildverarbeitungsroutinen sollte ein möglichst schneller Rechnertyp eingesetzt werden. Ein weiterer Aspekt sind ausreichende Speicherkapazitäten zum Ablegen der Digitalbilder sowohl auf Magnetplatten für schnellen Speicherzugriff auf Bilddateien, als auch die Möglichkeit zur Speicherung von Digitalbildern auf Magnetbändern. Magnetbänder haben zwar den Nachteil von langen Zugriffszeiten, eignen sich aber auf Grund ihrer geringen Anschaffungskosten ideal als Massenspeicher zur Langzeitspeicherung (Bibliotheken, Ergebnisspeicher).

Neben dem Rechner als Zentraleinheit der Bildverarbeitung benötigt man in der Regel auch einen externen elektronischen Digital-Bildspeicher zur Darstellung von Digitalbildern auf einem Monitor. Zur Bilddarstellung wird ein Digitalbild aus dem Rechner abgerufen, in einen elektronischen Bildspeicher eingeschrieben und anschließend auf einem Monitor sichtbar dargestellt. Der Monitor und der Digital-Bildspeicher stellen somit das Bindeglied zwischen dem Rechner und dem menschlichen Betrachter. Nach Möglichkeit sollte die Speicherkapazität des Digital-Bildspeichers über einen Umfang von 256 K-Byte verfügen, so daß Bildmatrizen (Digitalbilder) mit einer Auflösung von 512 x 512 Bildelementen (Pixel) auf einem Monitor dargestellt werden können.

Ein weiterer Gerätetyp zur Bildausgabe bildet die sogenannte Hardcopy-Einheit. Hardcopy-Einheiten werden in verschiedenen Konzeptionen auf dem Markt angeboten. Es handelt sich hierbei um Geräte, die automatisch ein Papierbild in schwarz/weiß bzw. farbig auf der Grundlage eines Monitorbildes erstellen. Häufig wird hier ein Verfahren angewandt, das ein verkleinertes, planes Monitorbild mittels eines integrierten Kamerasystems auf handelsübliche Kleinbildfilme abfotografiert. Eine weitere Möglichkeit der Papierbild-Ausgabe kann u.U. über schnelle Plotter durchgeführt werden. Eine ausreichende Bildqualität wird bei diesem Verfahren wegen einer unzureichenden Grauwertaauflösung meistens nicht erreicht.

#### 4.1.1 Aufbau des Bildeinzugssystems

Das Bildeinzugssystem setzt sich aus den drei Komponenten Filmbetrachtungsgerät, Videokamera und Kontrollmonitor zusammen. Bild 4.1.1-1 zeigt das Blockschaltbild des Bildeinzugssystems, in das zusätzlich noch ein Rechner eingefügt wurde.

Zur Durchleuchtung der Röntgenfilme steht ein besonderes Filmbetrachtungsgerät zur Verfügung. Die Mattscheibe, die

gleichzeitig als Filmauflage-Fläche dient, ist den üblichen Filmformaten angepaßt. Filme bis zu einer Größe von 100 mm x 480 mm lassen sich mit dem eingesetzten Gerät auswerten. Als Leuchtquelle dienen Halogenlampen, mit denen Film-Schwärzungen bis ca.  $S = 4,0$  durch den menschlichen Betrachter auswertbar sind.

Für die Filmabtastung wird eine hochauflösende Videokamera (Typ Vidicon) eingesetzt. Ihre Aufgabe besteht in der Umwandlung von Leuchtdichteinformationen (Filmschwärzungen) in elektrische Signale. Die Codierung der elektrischen Impulsfolgen in Digitalsignale erfolgt entweder unmittelbar in der Video-Kamera oder aber im Eingangsbereich des Rechners. Beide Möglichkeiten finden in der Praxis Anwendung. Um eine Kontrolle der Videoaufnahme zu ermöglichen, kann das Videobild der abgetasteten Radiographie zeitgleich auf einem Monitor überprüft werden. So lassen sich Korrekturen bei der Auswahl des Bildausschnittes, der Einstellung der Bildschärfe und der Bildhelligkeit durchführen, bevor das Digitalbild vom Rechner übernommen wird. Bild 4.1.1-2 gibt eine Übersicht über den Aufbau des Bildeinzugssystems.

## Prinzip der digitalen Bildverarbeitung

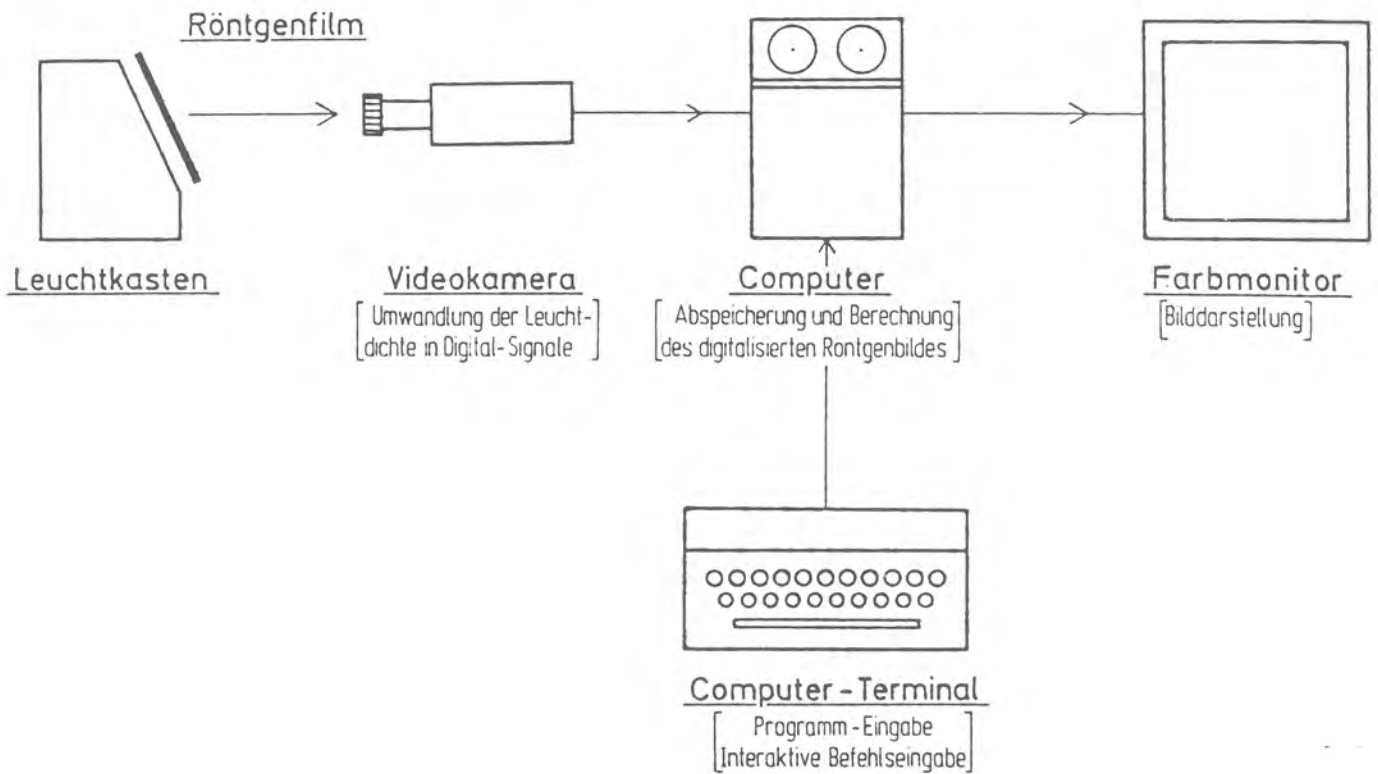


Bild 4.1.1-1: Blockschaltbild des Bildeinzugsystems



Bild 4.1.1-2: Bildeinzugsystem mit Videokamera, Kamerastativ, Filmbetrachtungsgerät und Kontroll-Monitor

#### 4.1.2 Aufbau des Rechnersystems

Der Aufbau des Rechnersystems geht aus dem Blockschaltbild 4.1.2-1 hervor. Die Zentraleinheit bildet ein schneller Prozeßrechner der Firma Hewlett Packard. Er verfügt über ein Festplattensystem von 10 M-Byte sowie über ein auswechselbares Plattensystem mit ebenfalls 10 M-Byte Speicherbereich. Ein zusätzliches externes Plattenlaufwerk zur Aufnahme von Plattentürmen mit jeweils 120 M-Byte ist direkt mit dem Prozeßrechner gekoppelt. Als letztes Speichermedium steht eine Magnetband-Station zur Verfügung. Sie dient in erster Linie der Langzeitspeicherung von Digital-Bildern. Zur Zeit besteht die Möglichkeit, über drei Systemkonsolen mit dem Rechner zu kommunizieren. Eine direkte Kopplung mit der

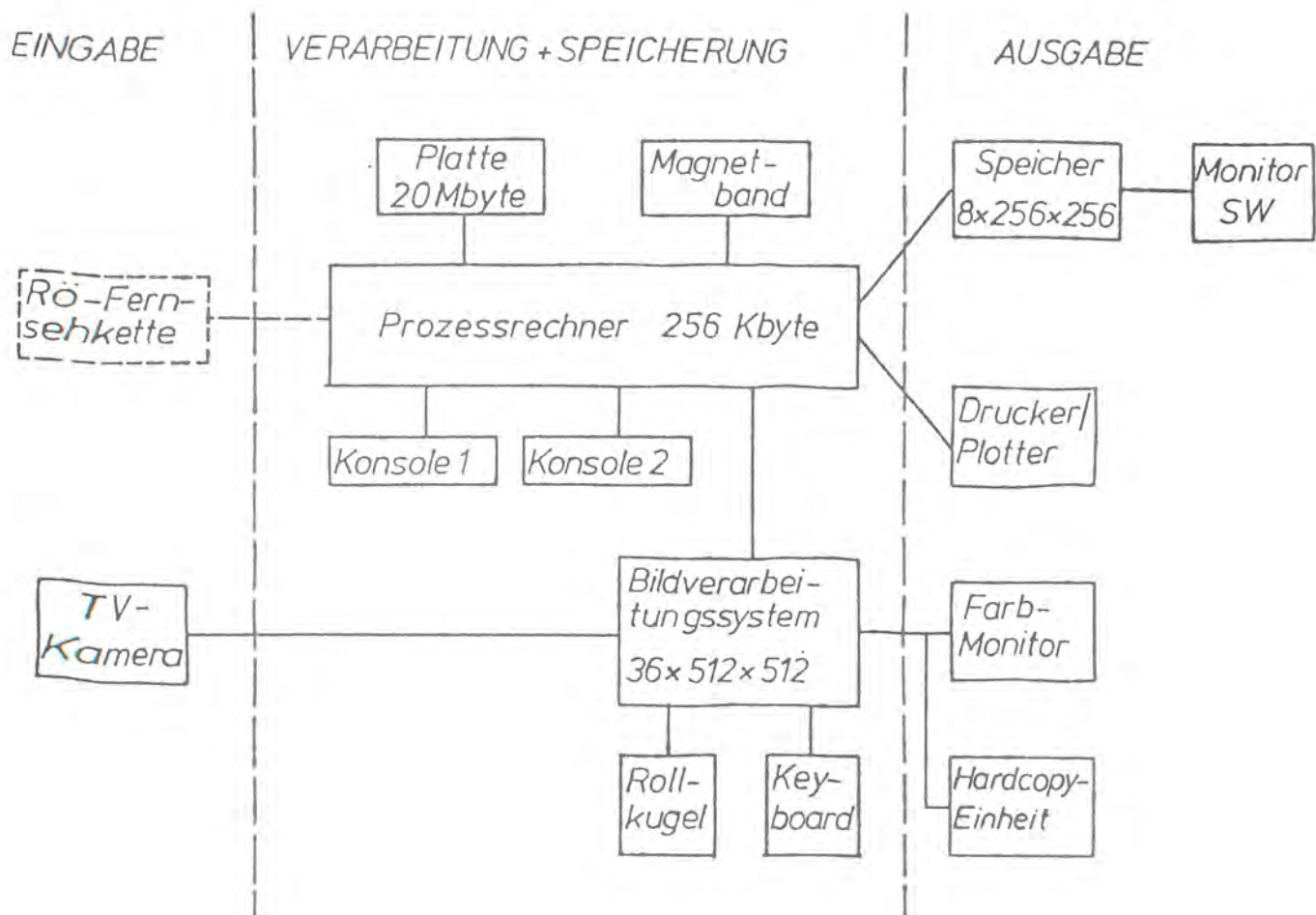


Bild 4.1.2-1: Blockschaltbild der Bildverarbeitungs-Anlage

Möglichkeit eines schnellen Bilddateien-Transfers besteht zwischen dem Prozeßrechner und einem schnellen Bildverarbeitungssystem der Firma Comtal, auf das in Kapitel 4.5 näher eingegangen wird. Zur Bildausgabe von s/w-Bildern ist der Monitor über einen Digital-Bildspeicher (256 K-Byte) mit dem Rechner verbunden. Außerdem besteht die Möglichkeit der Ausgabe von Programmen oder s/w-Bildern (10 Graustufen) durch einen angeschlossenen Plotter. Für die Zukunft ist ein automatischer Einzug von Durchstrahlungsaufnahmen über eine Röntgen-Fernsehkette vorgesehen. Die Filmabtastung erfolgt z.Z. mit einer Video-Kamera. Die aufgenommenen Digitalbilder werden dann in einem der vier 256 K-Byte Digitalpeicher des Bildverarbeitungssystems abgelegt. Zur Eingabe von Verarbeitungsroutinen in das Bildverarbeitungssystem dienen ein Keyboard (Tastenfeld) sowie eine Rollkugel. Eine weitere Möglichkeit der Fernsehbilddausgabe besteht über einen Farbmonitor. Zur Erstellung von Papierbildern auf der Basis des Monitorbildes ist eine Hardcopy-Einheit an den Video-Ausgang des Bildverarbeitungssystems angeschlossen.



Bild 4.1.2-2: Rechenanlage mit Prozeßrechner, Bildverarbeitungssystem, Plattenturm-Laufwerk und Bandmaschine



### 4.1.3 Untersuchung des Video-Kamerasystems

#### 4.1.3.1 Vorbetrachtung

Die rechnergestützte Verarbeitung von Röntgenfilmen, wie sie in der zerstörungsfreien Materialprüfung z. B. als Schweißnahtaufnahmen vorliegen, erfordert ein geeignetes Bildeinzugs-system. Dieses System muß in der Lage sein, Leuchtdichteunterschiede zu erkennen und in elektrische Signalformen umzuwandeln. Erst elektrische Signale können vom Rechner aufgenommen und verarbeitet werden.

Aus Kostengründen bietet sich der Einsatz von hochauflösenden Videokameras an, die zudem einen sehr schnellen Bildeinzug ermöglichen. Die Aufnahme eines Filmes (Filmausschnittes) liegt in der Größenordnung von 40 ms.

Die Abtastung von Röntgenfilmen mit Hilfe der Videotechnik beruht auf der kontinuierlichen Aufnahme und Umwandlung der Leuchtdichte- bzw. Schwärzungsverteilung in zugeordnete elektrische Signale.

Kamerasysteme dieser Art weisen auf Grund ihrer elektronischen und optomechanischen Gerätekomponenten eine Reihe von Fehlerquellen auf, die eine Systemuntersuchung speziell im Bereich des Bildeinzugs erfordern.

Die Qualität des Video-Bildes wird eingeschränkt durch Rauscheinflüsse und Empfindlichkeitsschwankungen (Shading), die unregelmäßig über der Aufnahmefläche verteilt sein können.

Große Aufmerksamkeit gilt der Aufnahmeempfindlichkeit des Kamerasystems. Sie bestimmt weitgehend den Grenzbereich der Filmschwärzung, die eine Filmabtastung von Radiographien mit ausreichendem Kontrast gewährleisten. Dabei sind zusätzlich die Lichtstärke des Kameraobjektivs und die zur Verfügung stehende Leuchtstärke des Filmbetrachtungsgerätes von Bedeutung.

Die geometrische Auflösung der Video-Kamera wird von der Größe der abgetasteten Filmfläche und dem Einschwingverhalten der elektronischen Schaltungen geprägt. Dabei ist von entscheidender Bedeutung, wie exakt ein Schwärzungsunterschied in eine Amplitudenänderung im Kamera-Ausgangssignal umgesetzt werden kann.

#### 4.1.3.2 Grundlagen der Bildaufnahme bei Einsatz eines Video-Kamerasystems

##### Physikalische Grundlagen der Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie:

Licht setzt sich aus einer Unzahl kleiner Lichtblitze zusammen. Jeder Lichtblitz besteht aus einem einzelnen Wellenzug einer senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung schwingenden elektromagnetischen Schwingung, die als Lichtquant bezeichnet wird.

Die Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie erfolgt nach zwei physikalischen Abläufen.

Beim sogenannten äußeren Photoeffekt werden durch Lichteinwirkung auf Metalle (Cs, W, Pt) Elektronen aus ihren Verbindungen gelöst, wobei die vom Metall absorbierte Lichtmenge in kinetische Energie umgewandelt wird. Die Energiezuordnung geht aus Gleichung 4.4.2.1-1 hervor.

$$h \cdot f = W_A + \frac{m}{2} \cdot v^2 = e \cdot U_A + \frac{m}{2} \cdot v^2 \quad (4.1.3.2-1)$$

$h$  = Planck'sche Konstante  
 $f$  = Frequenz der Strahlung  
 $W_A$  = Austrittsarbeit  
 $U_A$  = Austrittspotential

$\frac{m}{2} \cdot v^2$  = kinetische Energie (Elektronen)

( $W_A$  für: Cs = 1,9 eV, W = 4,5 eV)

Für Photoemission gilt die Voraussetzung:

$$h \cdot f = e \cdot U_A \quad (4.1.3.2-2)$$

Beim inneren Photoeffekt wird infolge von Lichteinwirkung die Leitfähigkeit von Halbleitern CdS, CdSe, PbO verändert. Die notwendige Leistung zur Erzeugung freier Elektronen geht aus Gleichung 4.1.3.2-3 hervor.

$$h \cdot f = \Delta W = e \cdot \Delta U \quad (4.1.3.2-3)$$

( $\Delta W$  für: CdS = 2,5 eV, CdSe = 1,7 eV, PbO = 2,0 eV)

#### Aufbau und Wirkungsweise einer Videokamera am Beispiel einer Vidicon-Kameraröhre:

Das Vidicon ist eine Halbleiter-Bildröhre, die nach dem inneren Photoeffekt arbeitet.

Die Aufnahmeröhre besteht aus einem ca. 150 mm langen Glaszylinder mit einem Durchmesser von 25 mm, der von Ablenk-, Korrektur- und Fokussierspulen eingeschlossen wird, Bild 4.1.3.2-1. An der lichtzugewandten Stirnseite dient der Glaszylinder als Einfassung einer Plattenkombination aus einer lichtdurchlässigen Signalplatte (SnO) und einem Photohalbleiter ( $Sb_2S_3$ ) als Speicherplatte.

Ein Strahlersystem im Innern des Zylinders erzeugt einen Elektronenstrahl, der durch die Ablenkspulen gesteuert die Speicherplatte negativ auflädt. Signalplatte und Speicherplatte sind ihrer Wirkung nach mit einem Feld kleiner Plattenkondensatoren vergleichbar. Durch den Aufbau der Speicherplatte bedingt entsteht eine Kombination von kleinen Kapazitätspunkten, denen jeweils ein lichtempfindlicher Widerstand  $R_L$  parallelgeschaltet ist.

Durch Lichteinwirkung wird dieser Widerstand zunehmend niederohmiger, so daß der zugehörige, auf negativem Potential befindliche Kapazitätspunkt mehr oder weniger schnell in einem konstanten Zeitintervall entladen wird. Das dadurch in der Aufnahmeröhre entstehende Ladungsbild des Objektivs wird durch den Elektronenstrahl zeilenweise abgetastet. Bei der erneuten Aufladung der Speicherplatte durch den Elektronenstrahl fließen daher verschieden große Ausgleichsströme über den Ausgangswiderstand  $R_A$ , wobei eine der Helligkeitsverteilung proportionale Signalspannung entsteht, Bild 4.1.3.2-2.

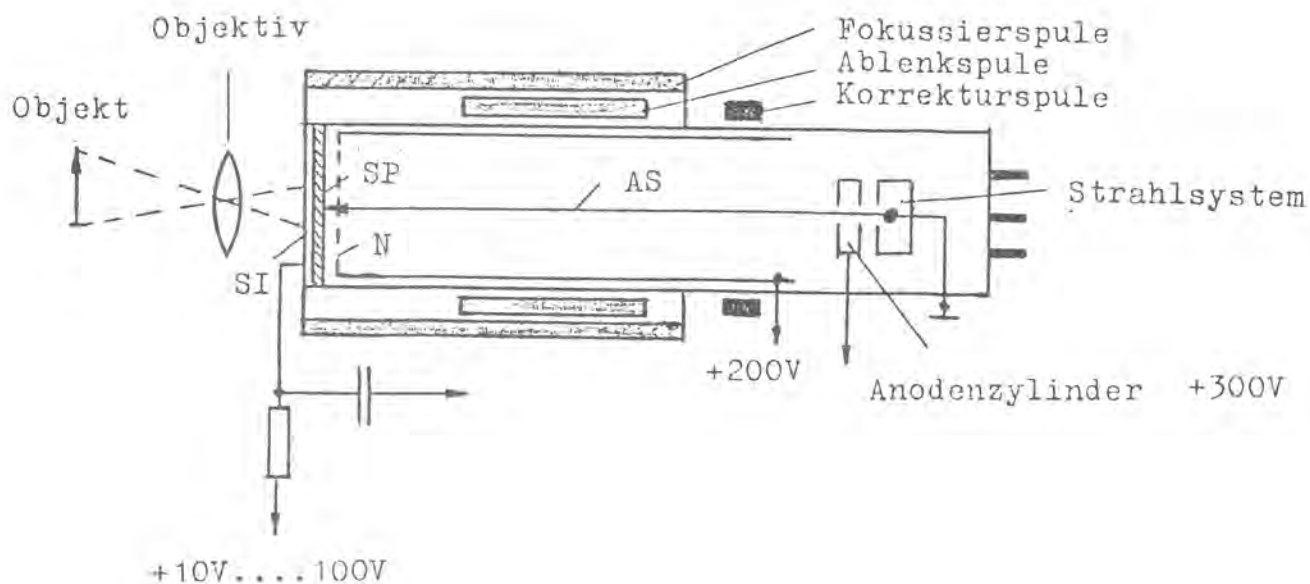
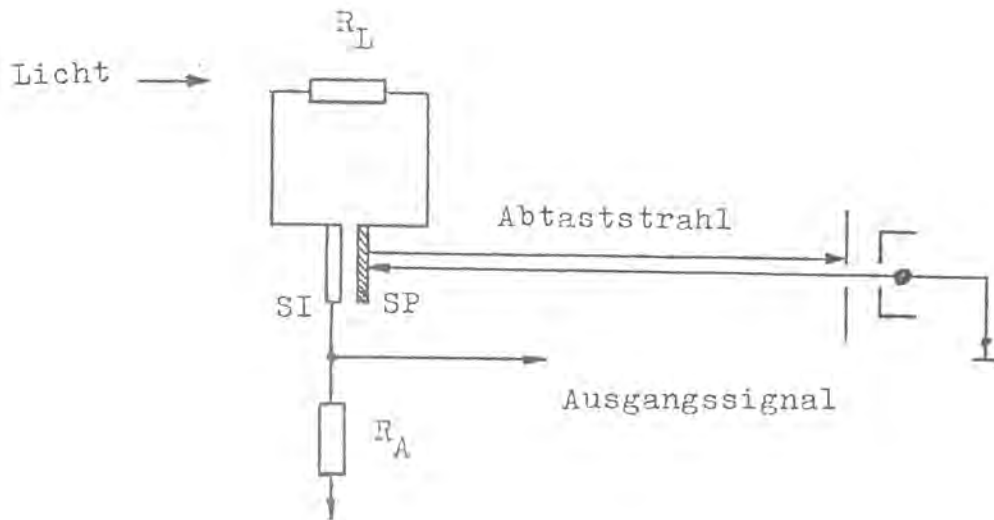


Bild 4.1.3.2-1; Aufbau einer Vidicon-Kameraröhre



AS=Abtaststrahl  
N =Netz  
SI=Signalplatte  
SP=Speicherplatte

Bild 4.1.3.2-2: Wirkungsweise der Leuchtdichteumwandlung in elektrische Signale

#### 4.1.3.3 Untersuchung systembedingter Kameraeigenschaften

##### Erfassung der Leuchtdichteempfindlichkeit des Kamerasystems:

Die Untersuchung der Schwärzungsauflösung von Radiographien mittels einer Video-Kamera wird von einer Vielzahl von Einzelfaktoren beeinflusst. Sie ist abhängig von der jeweiligen Leuchtstärke am Filmbetrachtungsgerät, vom Abstand Filmebene und Kamera-Objektiv, von der Lichtstärke des Objektivs und nicht zuletzt von der Leuchtdichteempfindlichkeit des Kamera-Targets.

Der durchgeführte Versuch beschränkt sich auf einen typischen Anwendungsfall, wobei der abgetastete Röntgenfilmabschnitt eine quadratische Filmfläche von 30 x 30 mm erfaßt.

Die Blendenzahl des Objektivs stand auf  $B = 3.5$ , was der maximalen Lichtstärke des eingesetzten Objektivs entspricht. Am Filmbetrachtungsgerät (Typ Wilnos,  $L_{\max} = 30\,000\text{ cd/m}^2$ ,  $S_{\max} = 4.0$ , Leuchtfläche =  $85 \times 450\text{ mm}$ ) wurde die maximale Leuchtstärke eingestellt.

Als Filmgrundlage diente eine Radiographie eines Stufenkeiles mit gestaffelten Schwärzungswerten (Meßwerte) von  $S = (0,04 - 0,18 - 0,32 - 0,47 - 0,62 - 0,77 - 0,92 - 1,07 - 1,22 - 1,35 - 1,51 - 1,66 - 1,80 - 1,93 - 2,08 - 2,24 - 2,40 - 2,55 - 2,7)$ . Im Vordergrund der Untersuchung stand die Frage, bis zu welchen Schwärzungswerten das vorhandene Abtast-System unter Berücksichtigung der genannten Parameter eingesetzt werden kann. Ferner sollte Aufschluß über das Empfindlichkeitsverhalten der Video-Kamera in Abhängigkeit der Filmschwärzungen erzielt werden.

Bild 4.1.3.3-1 zeigt die Radiographie eines Graukeiles mit abgestuften Schwärzungswerten, die als Filmvorlage von der Video-Kamera abgetastet wurde.



Bild 4.1.3.3-1: Stufenkeil (AGFA),  $25 \times 125\text{ mm}$ ,  $S_{\min} = 0,04$ ,  $S_{\max} = 2,7$

Zur Bestimmung der Grenzempfindlichkeit wurde eine Filmfläche von 30 x 30 mm abgetastet. Bild 4.1.3.3-2 zeigt einen Graukeil-Bereich von  $S = 3,05$  bis  $S_{\max} = 4,40$ . Die Schwärzungsabstufung erfolgt in Sprüngen von  $\Delta S = 0,15$ .

In Bild 4.1.3.3-3 wird das Zeilenprofil des Graukeilbereiches aus Bild 4.1.3.3-2 dargestellt. Unter den vorher genannten Aufnahmeparametern ist eine Filmabtastung bis zu Schwärzungen von  $S_{\max} = 3,7$  möglich. Darüberhinaus ist eine Profilabstufung kaum noch nachweisbar.



Bild 4.1.3.3-2: Stufenkeil ( $F = 30 \times 30$  mm) mit Schwärzungsbereich von  $S_{\min} = 3,05$  bis  $S_{\max} = 4,40$ .

Eine weitere wichtige Kameraeigenschaft ist das Verhalten der Aufnahmeempfindlichkeit über einen größeren Schwärzungsbereich. Dabei geht es um die Frage, ob eine lineare Schwärzungsabstufung in einer Radiographie eine lineare Grauwertzuordnung im Digitalbild zur Folge hat.

Für diese Untersuchung wurde der Stufenkeil aus Bild 4.1.3.3-1 mit den bekannten Schwärzungswerten mit der Video-Kamera (Vidicon) abgetastet und aus dem resultierenden Digitalbild ein Zeilenprofil errechnet und ausgeplottet. Für die Abtastung wurde eine mittlere Leuchtstärke am Filmbetrachtungsgerät eingestellt.

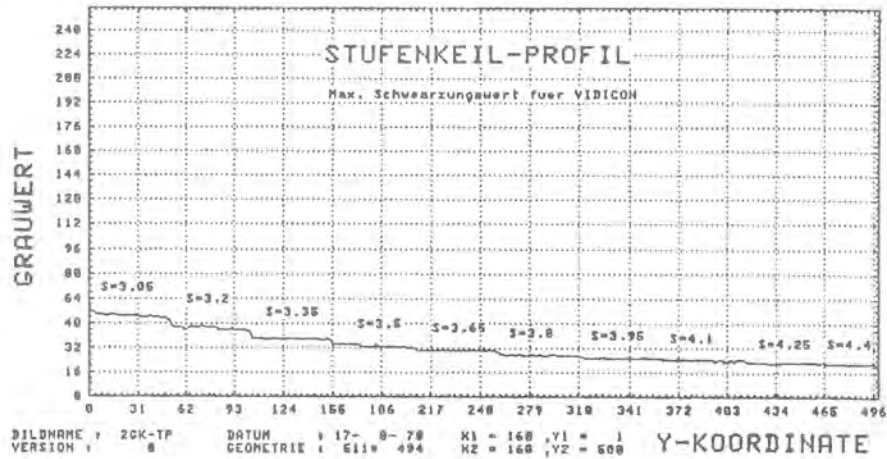


Bild 4.1.3.3-3: Stufenkeil-Profil mit Grenzbereich der Vidicon-Leuchtdichteempfindlichkeit.

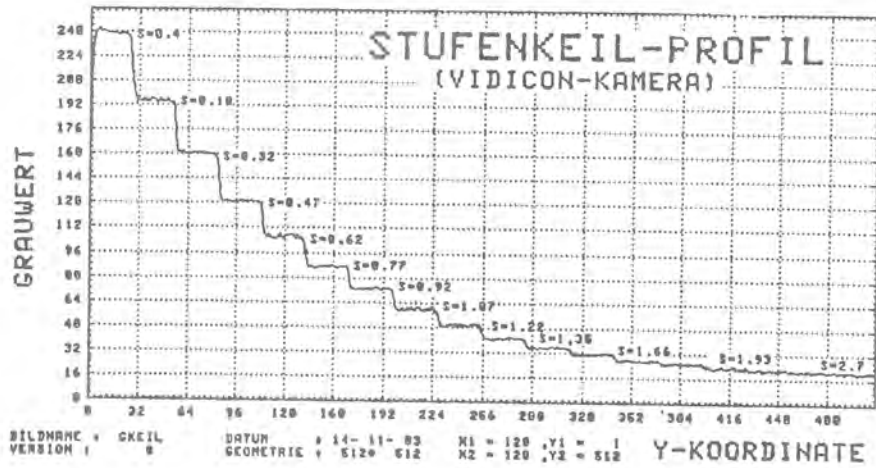


Bild 4.1.3.3-4: Nichtlineare Aufnahmekennlinie der Vidicon-Kamera.



### Untersuchung der geometrischen Auflösung:

Die geometrische Auflösung von Röntgenfilmen bei Abtastung durch ein Video-Kamera-System wird wesentlich durch die Qualität der Kamera-Röhre und durch das Einschwingverhalten der Elektronik bestimmt, d.h. ob einer Schwärzungsdifferenz im Film ein präzises elektrisches Signal folgt, oder ob durch Verwaschungseffekte eine Signalverfälschung entsteht, die letztlich ihren Niederschlag im Digitalbild findet. Betrachtungen im Elektronik-Bereich würden den Rahmen der Untersuchungen überschreiten.

Es soll hier anhand von drei Aufnahmen bei Variation der abzutastenden Bildaufnahme-Fläche eine Qualitätsaussage gefunden werden, die es dem Anwender erlaubt, eine Entscheidung zu fällen, welche Filmfläche geeignet erscheint, um Objekte definierter Größe mit ausreichender Sicherheit zu erfassen. Da jede abgetastete Filmfläche im Digitalbild eine räumliche Quantisierung in  $512 \times 512$  Bildpunkten erfährt, läßt sich theoretisch die Auflösungsgrenze über die Filmfläche berechnen.

Bei einer abzutastenden Filmfläche von  $10 \times 10$  mm könnte theoretisch eine Objektauflösung von ca.  $20 \mu\text{m}$  erreicht werden. Geht man von einer typischen Abtastfläche von  $30 \times 30$  mm aus, so ergibt sich immer noch eine Objektauflösung von ca.  $0,06$  mm. In der Praxis dürften allerdings auf Grund der vorher genannten Einschränkungen diese Werte kaum erreicht werden.

Die Abbildungen 4.1.3.3-5 bis 4.1.3.3-7 zeigen die Digitalbilder eines synthetischen Bildmusters bei Abtastung einer Filmfläche von  $60 \times 60$  mm,  $30 \times 30$  mm,  $6 \times 6$  mm. Das kleinste Bildmuster setzt sich aus  $0,5 \times 0,5$  mm-Quadraten zusammen. Die kleinste Filmfläche ist in dem nächstgrößeren Bildmuster enthalten, um eine optische Vergleichsmöglichkeit zu erreichen. Ein Maßstab im Millimeterbereich verdeutlicht, welche Strukturen nach Filmabtastung und nachfolgender Digitalisierung der Radiographie im Digitalbild enthalten sind.

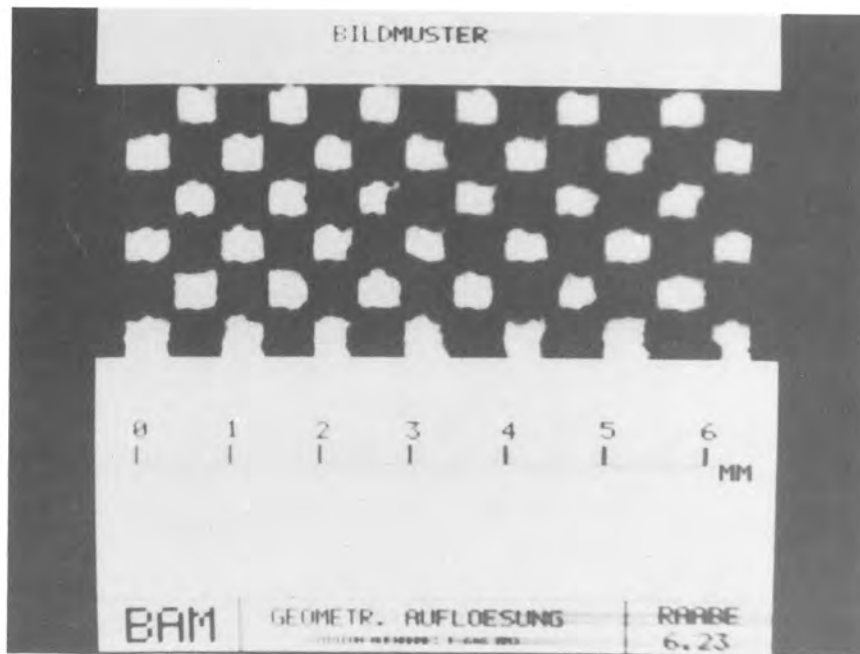


Bild 4.1.3.3-5: Abtastung einer Bildmusterfläche von 6 x 6 mm Größe. Das sichtbare Bildmuster besteht aus Quadraten von ca. 0,5 mm Kantenlänge.

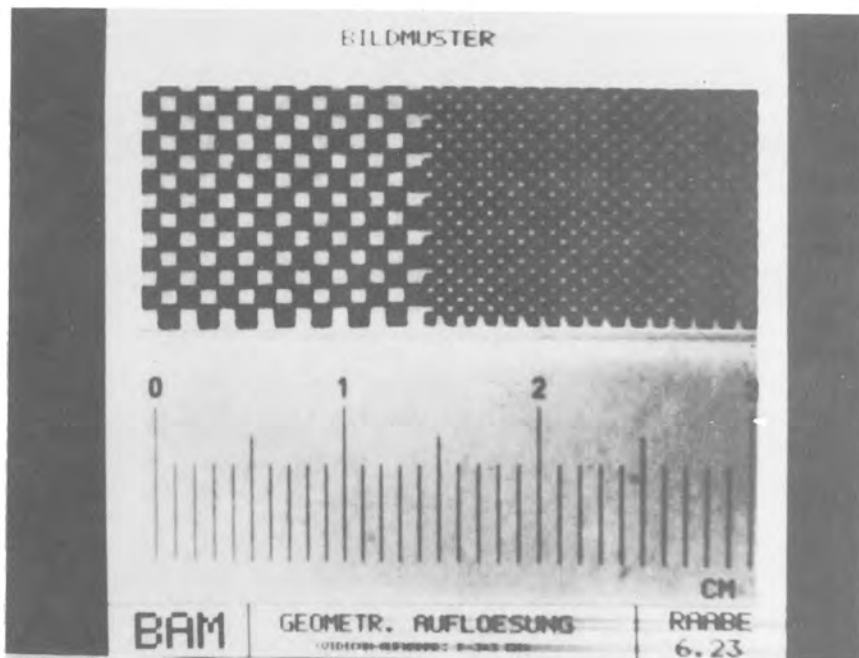


Bild 4.1.3.3-6: Abtastung einer Bildmusterfläche von 30 x 30 mm Größe. Die Quadrate der sichtbaren Bildmuster betragen ca. 0,5 mm und 1 mm Kantenlänge.

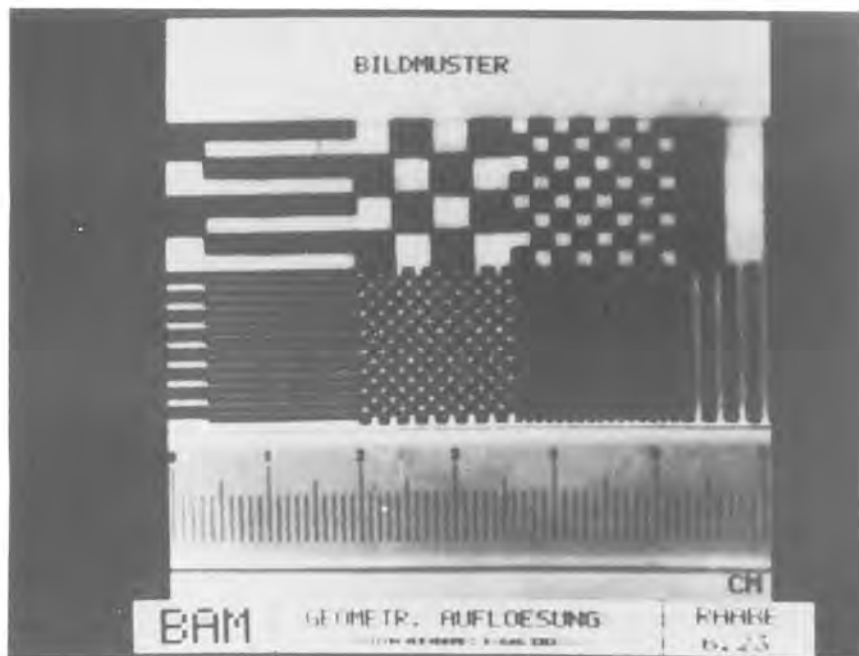


Bild 4.1.3.3-7: Aufnahme einer Bildmusterfläche von 60 x 60 mm Größe.

Betrachtungen zur Tiefenschärfebestimmung:

Bei der Auswertung von Körnigkeitsstrukturen auf Röntgenfilmen besteht Interesse an einer Aussage, welche Tiefenschichten der Kornstruktur von der Videokamera abgetastet werden. Sollte der Tiefenschärfe-Bereich das ganze Volumen einer Filmschicht einschließen, so hätte dies zur Folge, daß das resultierende Digitalbild die Überlagerung der Kornstrukturen aus den oberen und unteren Bereichen der Filmschicht darstellt.

Für den Versuch zur Bestimmung der Tiefenschärfe wurde ein Filmausschnitt von 5 x 5 mm und einer Schwärzung von  $S = 0,15$  abgetastet. Auf die Ober- und Unterseite des Filmes wurden jeweils die gleich großen Ziffern 3 aufgetragen. Durch Variation der Blendenzahl am Objektiv der Videokamera wird automatisch die Tiefenschärfe verändert, d.h. der Bereich, in dem ein Objekt eine scharfzeichnende Abbildung auf dem Target der Video-Röhre erfährt.

Die Abbildungen 4.1.3.3-8 und 4.1.3.3-9 geben einen Vergleich eines Filmausschnittes, der mit den Objektiv-Blendenwerten  $B = 3,5$  und  $B = 8,0$  der Videokamera (Vidicon) aufgenommen wurde. Den Abbildungen zufolge werden bei beiden Blendenstufen die Ziffern mit vergleichbarer Qualität im Digitalbild



Bild 4.1.3.3-8: Bildaufnahme zur Tiefenschärfebestimmung mit Blendenzahl  $B = 3,5$ .

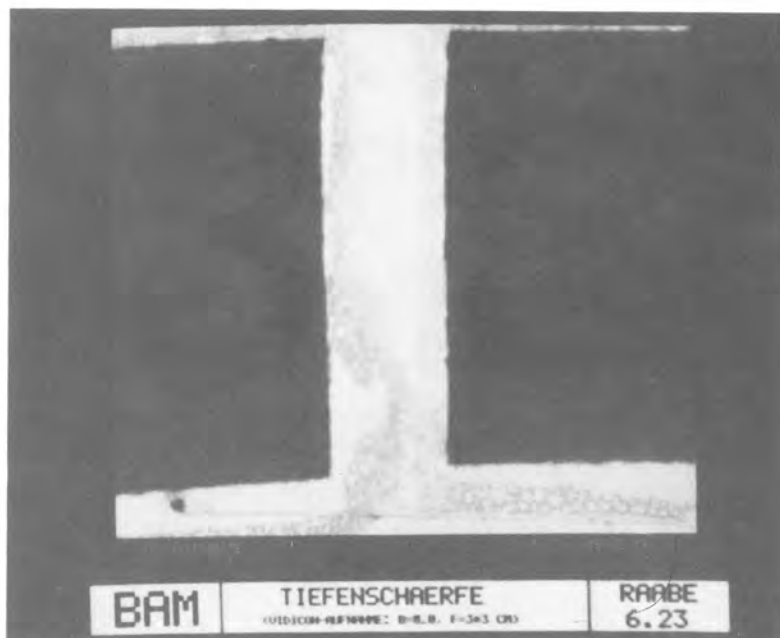


Bild 4.1.3.3-9: Bildaufnahme zur Tiefenschärfebestimmung mit Blendenzahl  $B = 8,0$ .

dargestellt. Daraus kann gefolgert werden, daß die volumenhafte Verteilung des Filmkornes mit gleichen Bildschärfereigenschaften im Digitalbild vorliegt.

#### Konstanz der Aufnahmeempfindlichkeit der Videokamera:

Wird eine Videokamera im Dauereinsatz betrieben, so ist vorstellbar, daß sich die Kameraeigenschaften auf Grund von Wärmeeffekten und anderen Einflüssen verändern. So u.U. auch die Leuchtdichteempfindlichkeit. Damit wird die Reproduzierbarkeit einer Filmvorlage, die nach einem Zeitintervall  $\Delta t$  erneut abgetastet wird, nur angenähert gewährleistet.

Für den Versuch wurde ein homogener Röntgenfilm mit der Schwärzung  $S = 1,4$  als Testgrundlage ausgewählt. In Zeitabständen von  $\Delta t = 10$  min erfolgte die Filmabtastung mit der Videokamera und die Zwischenspeicherung des Digitalbildes im Rechner. Um Rauscheinflüsse auszuschalten, wurde jedes Bild 50 Mal aufintegriert. In den Aufnahmepausen blieb die Kamera weiterhin im aufnahmebereiten Zustand.

Zur Ermittlung etwaiger Abweichungen wurde nach jedem Bild-einzug der arithmetische Mittelwert berechnet und als Funktion der Zeit in einer Graphik (Bild 4.1.3.3-10) dargestellt. Trotz konstanter Parameter wie Raumhelligkeit, Leuchtstärke des Filmbetrachtungsgerätes, Filmvorlage, kommt es zu einer eindeutigen Verschiebung des Mittelwertes zu höheren Absolutwerten. Dieses Kameraverhalten wirkt sich vor allem im Dauerbetrieb aus und sollte bei Serienuntersuchungen nicht unberücksichtigt bleiben.

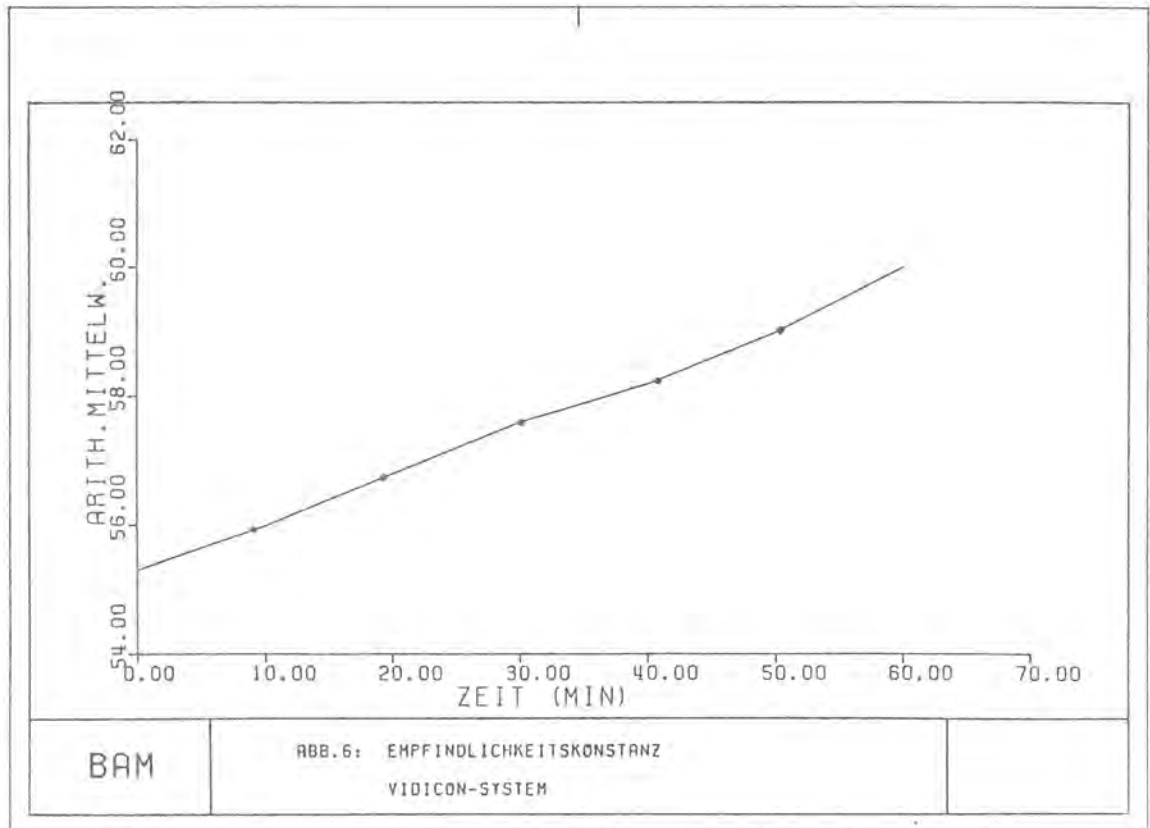


Bild 4.1.3.3-10: Untersuchung der Konstanz der Aufnahmeempfindlichkeit des Vidicon

#### 4.1.3.4 Systembedingte Kamerafehler und Störeinflüsse

##### Charakteristische Fehlerquellen eines Bildeinzugssystems:

Beim Bildeinzug mit einer Videokamera treten systembedingte Fehler und Störungen auf. Es handelt sich hier u.a. um Grauwertverfälschungen des Digitalbildes, die durch Empfindlichkeitsschwankungen des Kamerasystems hervorgerufen werden. Die Ursache sind Inhomogenitäten im Linsensystem des Objektivs, aber auch Unstetigkeiten beim Aufbau der Videokamera. Unter dem Sammelbegriff Shading sind derartige Fehlereinflüsse zusammengefaßt.

Eine weitere Störgröße stellt das Rauschen dar, das eine Vielzahl von unterschiedlichen Rauschursachen erfaßt (weißes Rauschen, Widerstandsrauschen, Röhrenrauschen u.a.). Bei dem weißen Rauschen handelt es sich um eine statistische Schwankungserscheinung der Zahl der an der Stromleitung beteiligten Elektrizitätsträger, deren Amplituden über den gesamten Frequenzbereich konstant sind. Beim Widerstandsrauschen (thermisches Rauschen) ist die Rauschleistung proportional der Temperatur. Die Rauschleistung wird nach Gleichung 4.1.3.4-1 ermittelt.

$$P_r = 4 \cdot K \cdot T \cdot \Delta f \quad (4.1.3.4-1)$$

$P_r$  = Rauschleistung

$K$  = Boltzmannsche Konstante

$T$  = Temperatur in Kelvin

$\Delta f$  = Bandbreite

Röhrenrauschen resultiert aus Schwankungen des Elektronenaustritts aus der Kathodenoberfläche infolge Strukturveränderungen der Kathode. Auf dem Monitor stellt sich Rauschen als unruhiger körniger Bilduntergrund dar, wodurch vor allem die Detailerkennbarkeit stark beeinträchtigt wird. - Ein Beispiel für Shadingeinflüsse gibt Abbildung 4.1.3.4-1. Es zeigt das Digitalbild eines Röntgenfilmausschnitts (30 x 30 mm) mit der konstanten Schwärzung  $S = 1,4$ . Zur besseren optischen Darstellung wurde der Kontrast des Digitalbildes durch eine lineare Grauwerttransformation etwas angehoben.

Die Abbildung 4.1.3.4-3 gibt einen qualitativen Vergleich zwischen einer stark verrauschten Video-Aufnahme ohne rechnergestützte Rauschunterdrückung und derselben Aufnahme nach Einsatz von Rauschunterdrückungsmaßnahmen.

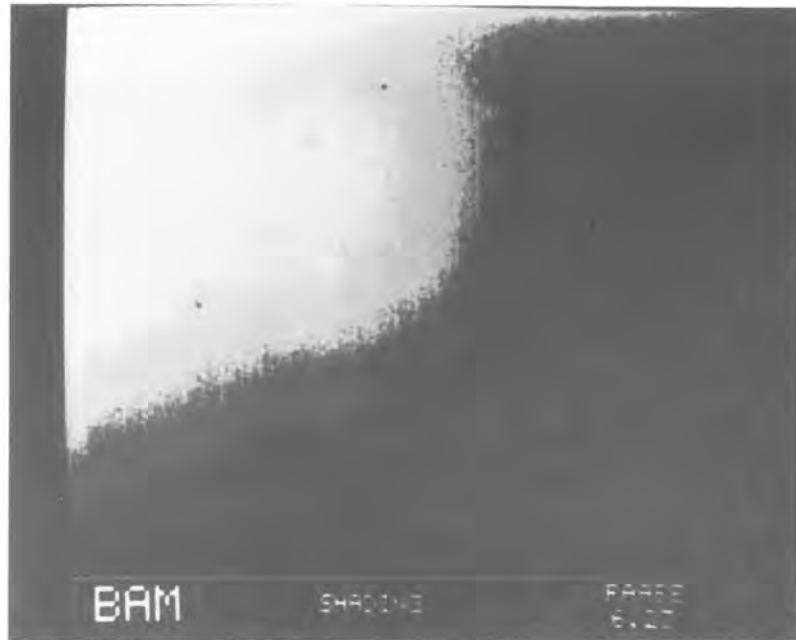


Bild 4.1.3.4-1: Shading-Einfluß bei Abtastung eines homogenen Röntgenfilmbereiches mit konstanter Filmschwärzung

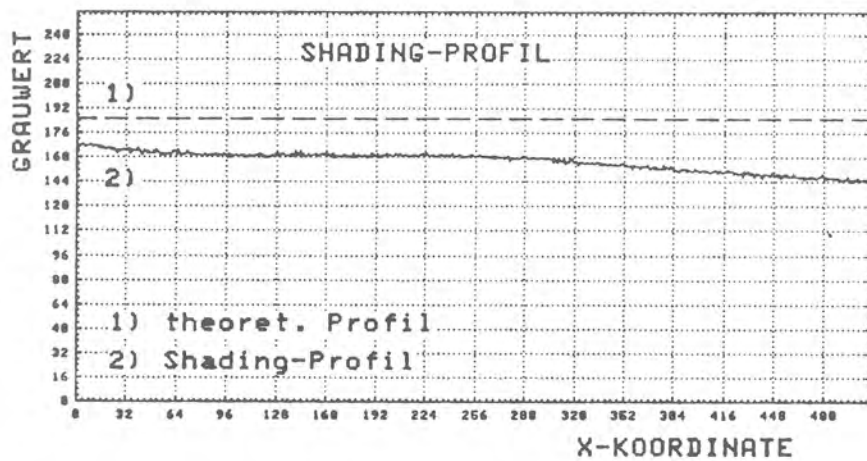


Bild 4.1.3.4-2: Zeilenprofil aus Bild 4.4.4.1-1 mit Shading-Einfluß, Zeilenprofil ohne Shading (teoretischer Verlauf).



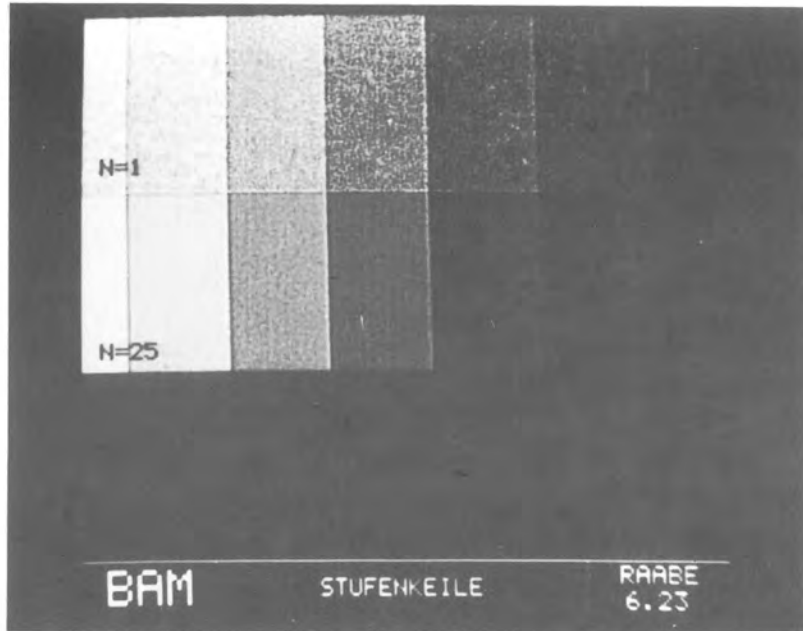


Bild 4.1.3.4-3: Qualitativer Vergleich von Rauscheinfluß und Rauschverminderung in einem Digitalbild

Messung der Empfindlichkeitsschwankungen über der  
Bildaufnahme­fläche der Videokamera (Shading):

Ein gleichmäßig ausgeleuchteter Röntgenfilm mit konstanter Schwärzung ergibt nach Abtastung und Digitalisierung ein Graubild mit meßbaren Grauwertschwankungen, deren Ursache Fehler im Aufnahmesystem sind. Die Versuchsgrundlage bildete ein Röntgenfilm konstanter Schwärzung  $S = 1,4$ . Da die Kameraempfindlichkeit von der Leuchtstärke abhängt, wurde jeweils ein Film im unteren, mittleren und oberen Helligkeitsbereich aufgenommen. Die wertmäßige Bestimmung der Empfindlichkeitsabweichungen erfolgte durch die Berechnung der Zeilen- und Spaltenprofile des Digitalbildes.

Für die Auswertung wurden die Bildzeilen 1, 256, 512, sowie die Spalten 1, 256, 512 und die beiden Hauptdiagonalen ausgewählt.

Das Diagramm in Abbildung 4.1.3.4-4 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchungen. Die Ordinate stellt die Absolutbeträge des Bereiches der Grauwertschwankungen (Shading) des Digitalbildes dar, während auf der Abszisse die mittlere Grauwertlage der zugehörigen Digitalbilder aufgetragen wurde.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen deutlich, daß die Absolutbeträge der Grauwertschwankungen im Digitalbild mit zunehmender Grundhelligkeit der Filmvorlage ansteigen. Dieser Sachverhalt muß beim Einsatz von Kompensationsverfahren zur Shading-Korrektur berücksichtigt werden.

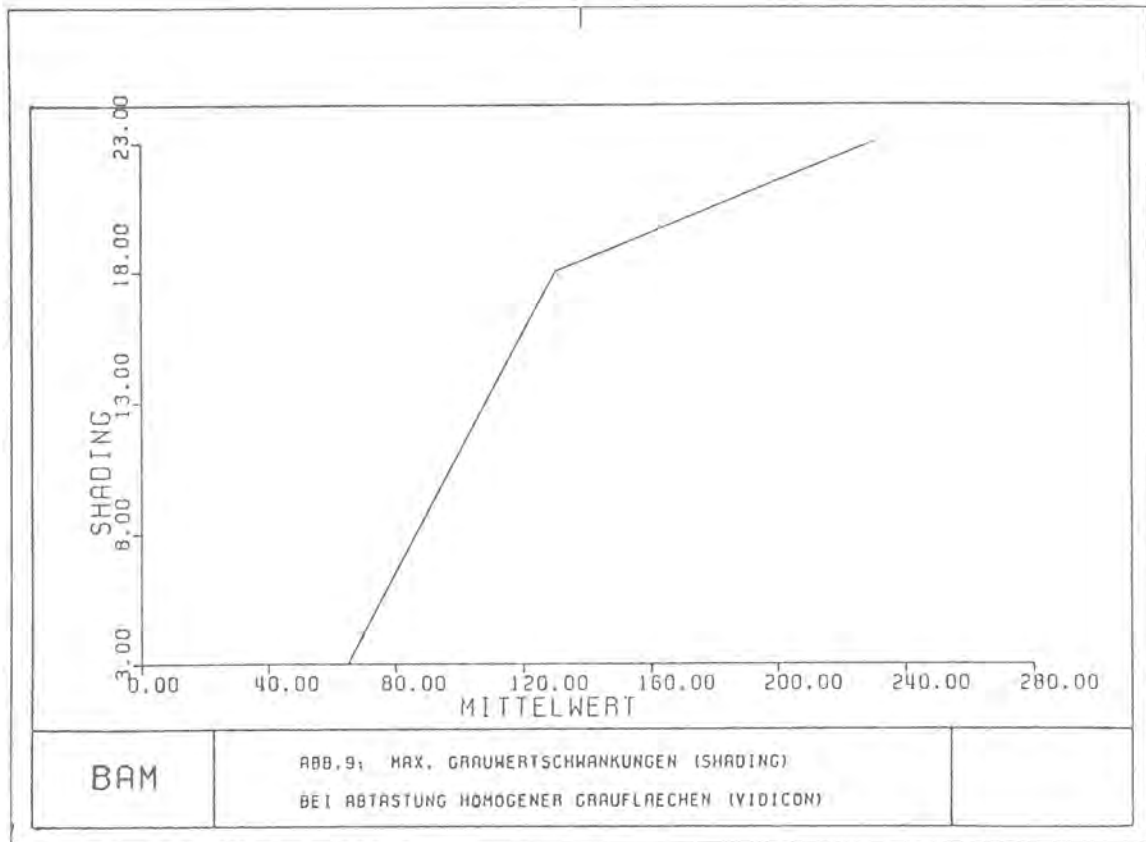


Bild 4.1.3.4-4: Shading-Einfluß bei Abtastung von Filmflächen unterschiedlicher Grundhelligkeit.

#### Rechnergestützte Verfahren zur Shading-Korrektur:

Da eine Fehlerkorrektur im Kamerabereich kaum realisierbar ist, wird ein rechnergestütztes Verfahren vorgestellt, das unmittelbar nach dem Bildeinzug eine Korrekturrechnung zur Shading-Kompensation durchführt. Dabei wird von der Überlegung ausgegangen, die Shadinganteile einer digitalisierten Radiographie durch eine Korrekturfläche zu kompensieren, die durch ein gegengerichtetes Shadingverhalten gekennzeichnet wird.

Die Korrekturrechnung vollzieht sich in mehreren Schritten. Als erstes wird im Rechner der arithmetische Mittelwert des

Originals (Radiographie) berechnet. Als Korrekturfläche wird ein homogener Röntgenfilm mit konstanter Schwärzung aufgenommen, wobei durch geeignete Wahl der Blendenzahl am Kameraobjektiv oder durch Veränderung der Grundhelligkeit am Filmbetrachtungsgerät ein Digitalbild (digitales Korrekturbild) im Rechner abgespeichert wird, das lediglich Grauwertschwankungen auf Grund von Fehlern im Kamerasystem beinhaltet und deren arithmetischer Mittelwert dem des Originals entspricht.

Durch eine sich anschließende Tiefpaßfilterung der Korrekturfläche werden eventuell vorhandene hochfrequente Rauschanteile herausgefiltert, so daß nur noch die niederfrequenten Shadinganteile in der Korrekturfläche verbleiben. Die allgemeine Form der Ortsfilterung geht aus Gleichung 4.1.3.4-1 hervor.

$$g(x,y) = f(x,y) * (h(x,y)) \quad (4.1.3.4-2)$$

$f(x,y)$ : Bildfunktion

$h(x,y)$ : Filterfunktion

$g(x,y)$ : Funktion des gefilterten Bildes

Um die Grauwerte der abgetasteten Filmvorlage nicht zu verfälschen, werden rechnerisch die Grauwerte der Korrekturfläche um einen konstanten Wert reduziert. Dieser Offsetwert entspricht dem Grauwert-Minimum der tiefpaßgefilterten Korrekturfläche.

Das korrigierte Digitalbild ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Originalbild (Radiographie) und der digitalen Korrekturfläche.

Korrigiertes Digitalbild = Originalbild - Korrekturfläche

Die Abbildung 4.1.3.4-5 verdeutlicht in dreidimensionaler Darstellung den Ablauf der Shading-Korrektur. X und Y bilden die Koordinaten für die Bildfläche, während die Z-Komponente die Absolutbeträge der Grauwerte darstellt.

In den Abbildungen 4.1.3.4-6A bis -6C sind die Zeilenprofile der Zeilen 1, 256 und 512 der Abbildung 4.1.3.4-5 vor bzw. nach der Durchführung einer Shading-Korrektur aufgetragen. Es ist eine deutliche Verbesserung der Profilverläufe nach der Korrekturmaßnahme zu erkennen.

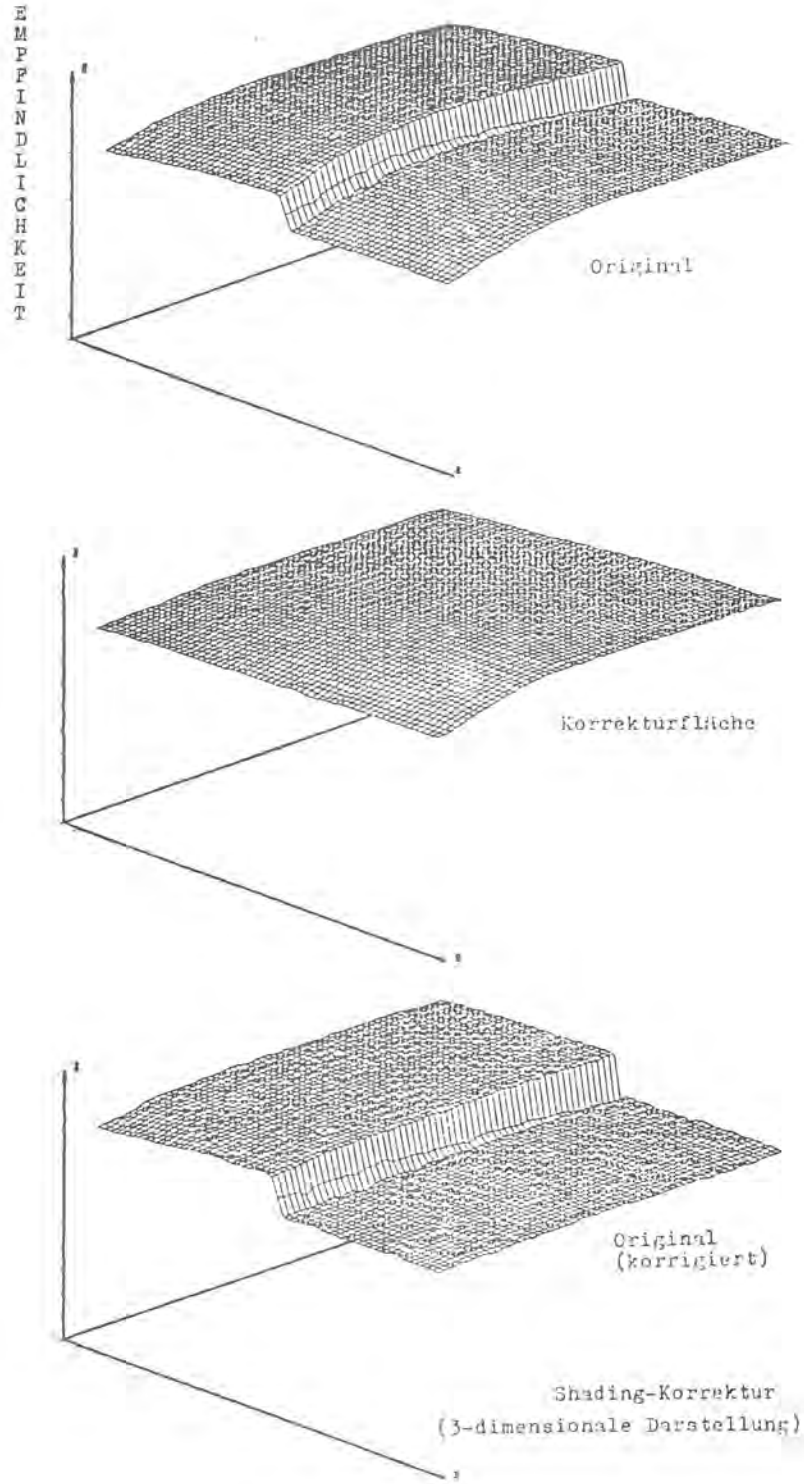


Abb. 4.1.3.4-5: Shadingausgleich 3-dimensionale Darstellung

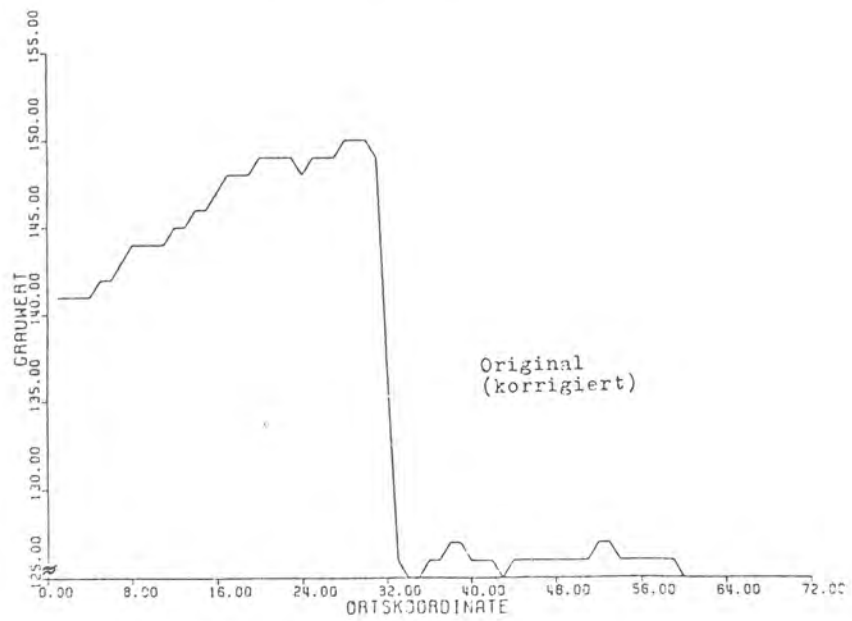
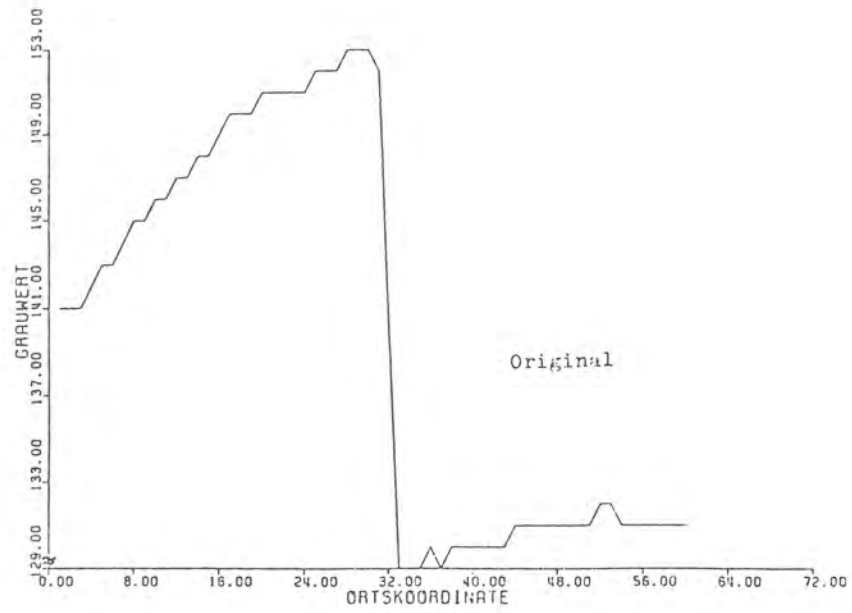


Bild 4.1.3.4-6A: Shadingausgleich Zeile 1

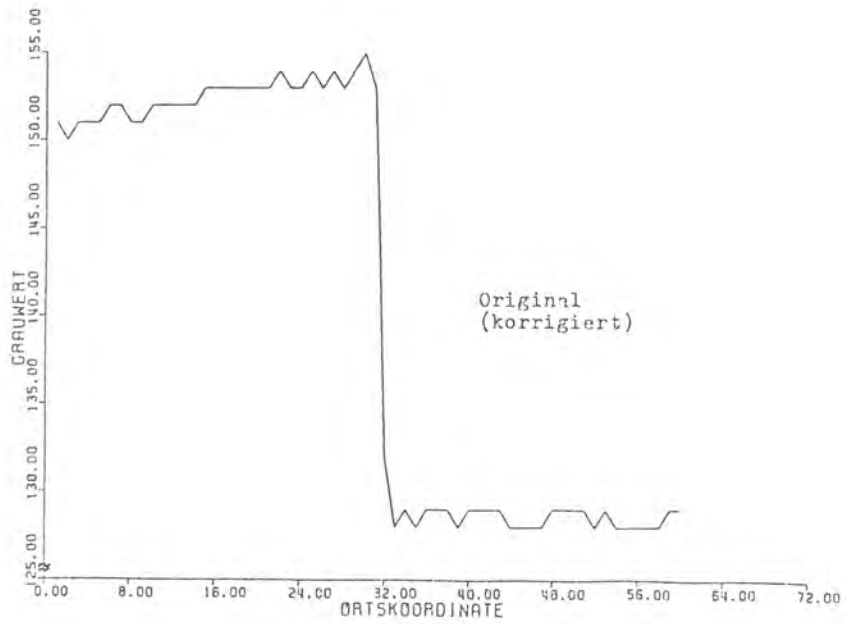
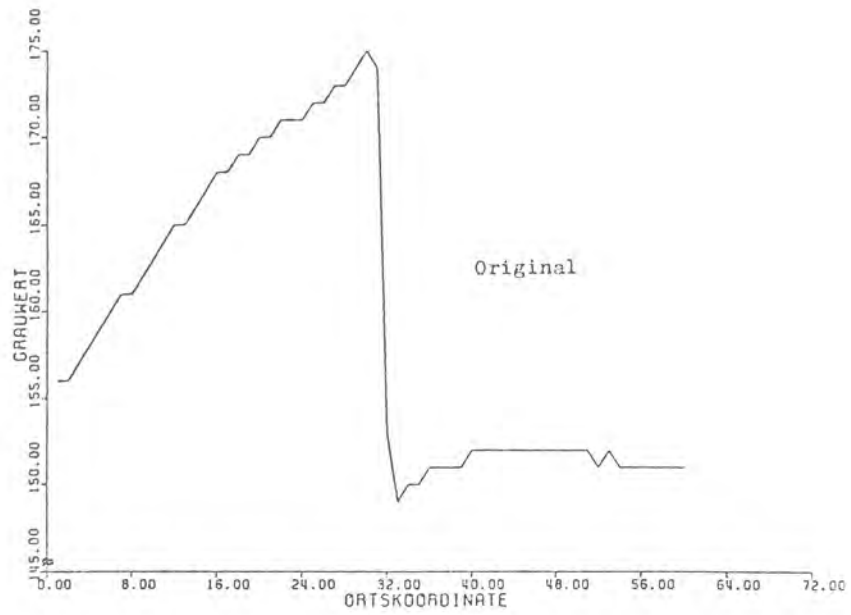


Bild 4.1.3.4-6B: Shadingausgleich Zeile 256



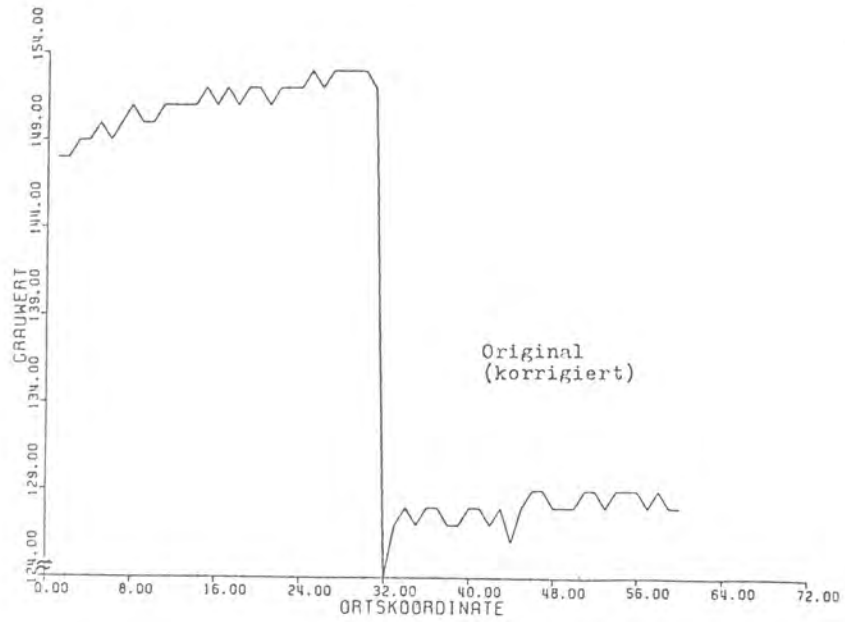
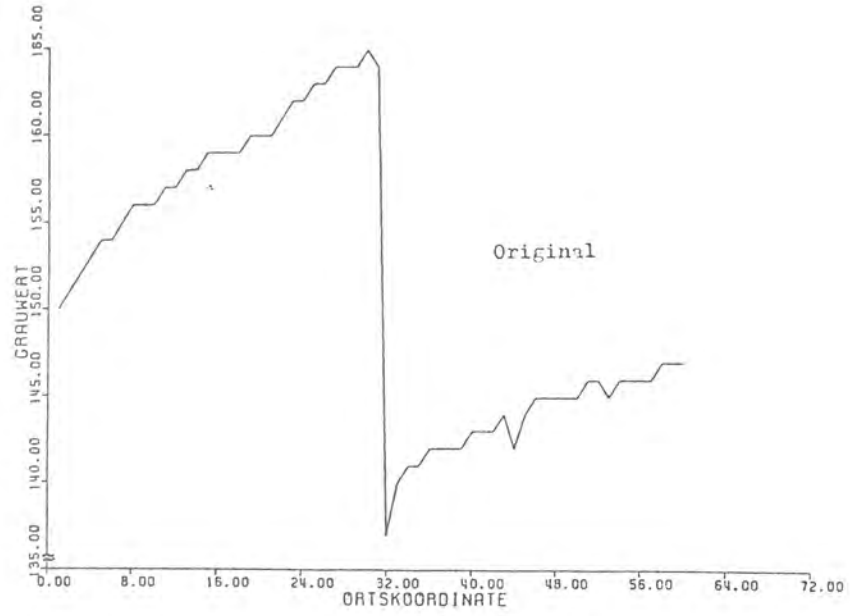


Bild 4.1.3.4-6C: Shadingausgleich Zeile 512

Untersuchung von Rauscheinflüssen und Maßnahmen zur Rauschunterdrückung:

Bei Video-Aufnahmen von Röntgenfilmen führt Rauschen zu einer erheblichen Verminderung der Bildqualität. Ein wirkungsvolles Verfahren zur Rauschunterdrückung wird durch die Berechnung des arithmetischen Mittelwertes aus der Überlagerung gleichartiger Aufnahmen einer Radiographie erreicht.

Schwierigkeiten ergaben sich allerdings bei der rechnerischen Auswertung. Die Summation einer großen Anzahl von Bildern, deren Informationsumfang pro Bild bei 256 K-Byte liegt, erfordert einen großen Bedarf an Speicherplatz und eine hohe Rechenzeit.

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein schnelles Bild-Integrationsprogramm entwickelt, das automatisch den Bildeinzug und die Berechnung des Mittelwertes ausführt. (Der Zeitbedarf pro Integrationsschritt liegt bei ca. 1,5 s).

Die Testvorlage für die Versuchsreihe bildete ein Röntgenfilm mit einer konstanten Schwärzung. Mit dem Bild-Integrationsprogramm wurden Serien mit jeweils  $J = 1, 10, 20, 30, 40$  und  $50$  Aufnahmen ausgewertet.

Die Berechnung des Mittelwertes aus einer Serie von  $J$  Bildern geht aus Gleichung 4.1.3.4-3 hervor.

$$g(x,y) = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^J f_i(x,y) \quad (4.1.3.4-3)$$

$f(x,y)$  = Bildfunktion eines Digitalbildes

$g(x,y)$  = Bildfunktion nach der Bildintegration

Die anschließende Berechnung des arithmetischen Mittelwertes und der Standardabweichung gibt Aufschluß über die Rauschentwicklung nach den unterschiedlichen Bildintegrationen. Gleichung 4.1.3.4-4 beschreibt die Berechnung des arithmetischen Mittelwertes einer zweidimensionalen Bildfunktion, Gleichung 4.1.3.4-5 die Berechnung der Standardabweichung.

$$\bar{x} = \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} g(x,y) \quad (4.1.3.4-4)$$

$$s = \left( \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} (g(x,y) - \bar{x})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.1.3.4-5)$$

In Abbildung 4.1.3.4-7 werden 2 Digitalbilder (3-dimensional) bei einmaliger Filmabtastung bzw. als Ergebnis von 25 aufintegrierten Bildern gegenübergestellt. Es ist eine deutliche Verbesserung im Rauschverhalten der unteren Bildfläche zu erkennen.

Bei der Berechnung des kleinsten quadratischen Fehlers und des Signal-Rauschverhältnisses wird davon ausgegangen, daß das Rauschen mit steigender Bildintegrationszahl abnimmt. Bestandteile der Berechnung sind immer die integrierten Bilder zweier aufeinanderfolgender Bildaufnahmeserien. Gleichung 4.1.3.4-6 beschreibt die Berechnung des mittleren quadratischen Fehlers und Gleichung 4.1.3.4-7 die Berechnung des Signal-Rauschverhältnisses.

$$e_{\text{rms}} = (\bar{e}^2)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} (g(x,y) - f(x,y))^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.1.3.4-6)$$

$$S/N = \left( \frac{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} g^2(x,y)}{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} (g(x,y) - f(x,y))^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.1.3.4-7)$$

In Abbildung 4.1.3.4-8 wird die Entwicklung des Signal-Rauschverhältnisses beim Vergleich zweier benachbarter Integrationsergebnisse als Funktion der Anzahl der Integrationen dargestellt. Der Funktionsverlauf zeigt deutliche Steigerungswerte bis ca. 30 Integrationen und flacht darüberhinaus deutlich ab. Die Erfahrungen bei der Bildabtastung haben gezeigt, daß bei 25 aufintegrierten Filmaufnahmen bereits qualitativ gute Digitalbilder entstehen. Ähnliche Zahlenwerte sind auch in der Fachliteratur nachzulesen.

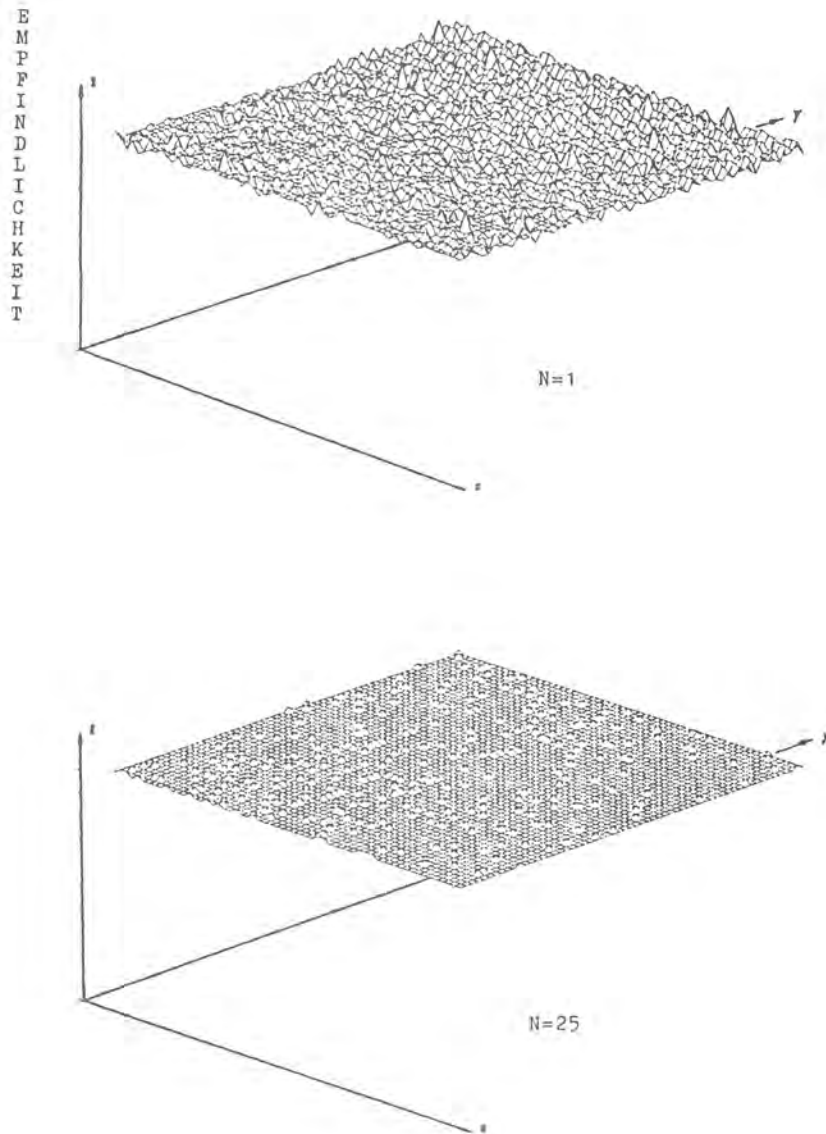


Bild 4.1.3.4-7: Rauschverbesserung durch Bildintegration  
(3-dimensionale Darstellung)

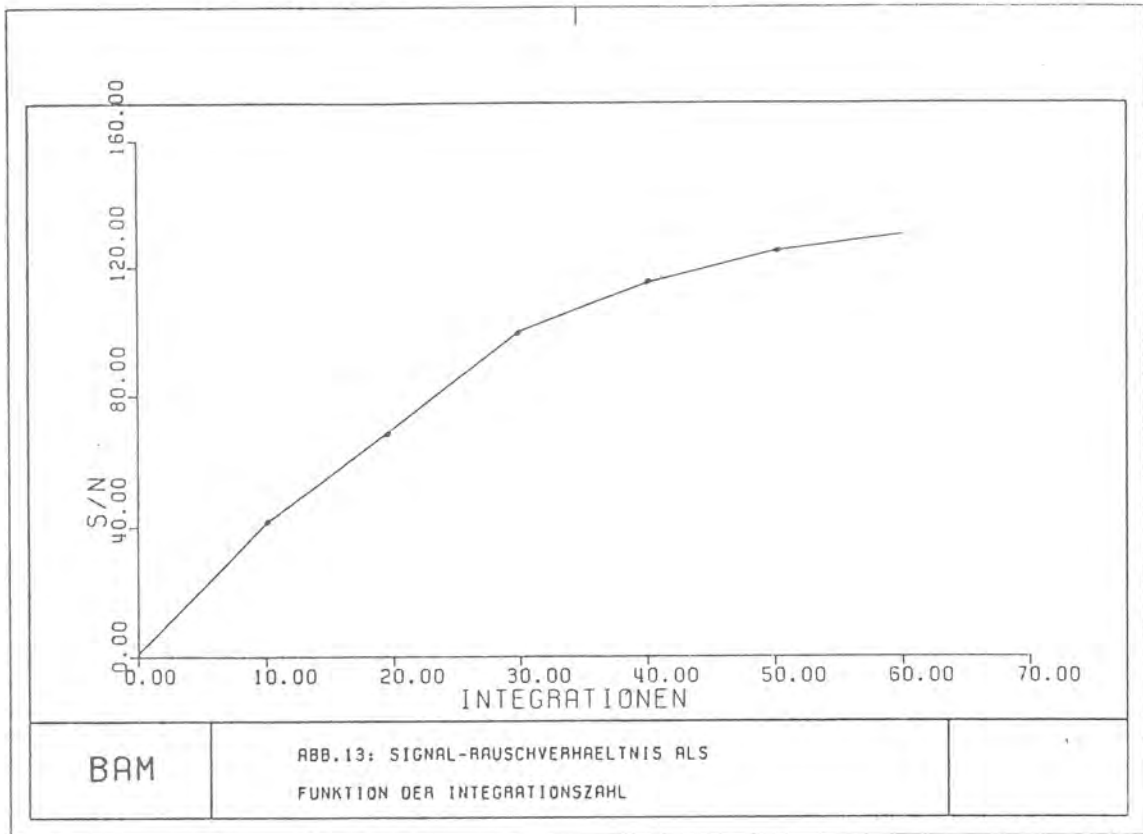


Bild 4.1.3.4-8: Signal-Rauschverhältnis bei steigender Integrationszahl

Etwas anschaulicher wird der Effekt der Rauschunterdrückung noch einmal bei der Filmabtastung eines Stufenkeiles. Abbildung 4.1.3.4-9 vergleicht einen Stufenkeilausschnitt bei einmaliger Filmabtastung mit dem Integrationsbild aus 25 Einzelaufnahmen. Die Abbildungen 4.1.3.4-10A und 4.1.3.4-10B zeigen die zugehörigen Zeilenprofile für  $N = 1$  und  $N = 25$  Aufnahmen.

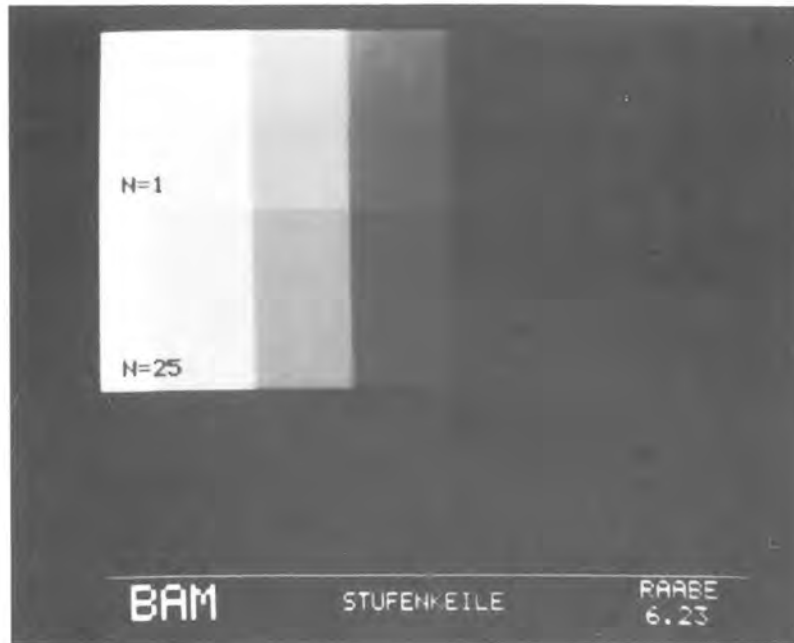


Bild 4.1.3.4-9: Einzelaufnahme Stufenkeil

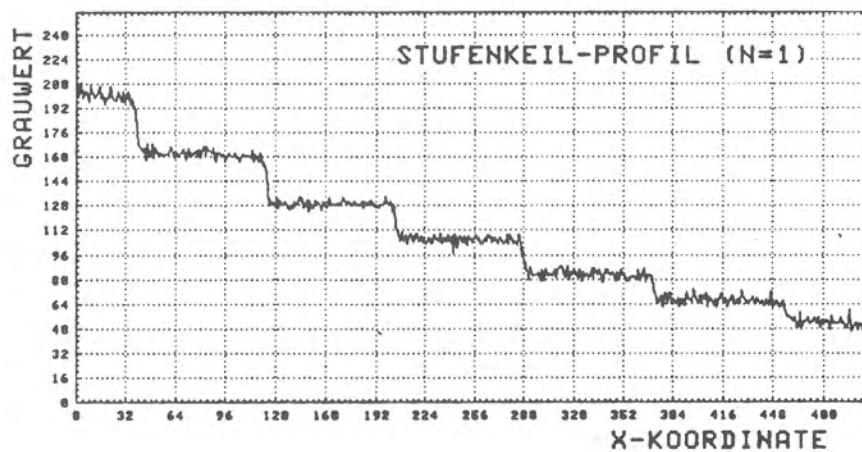


Bild 4.1.3.4-10A: Zeilenprofil (N = 1)

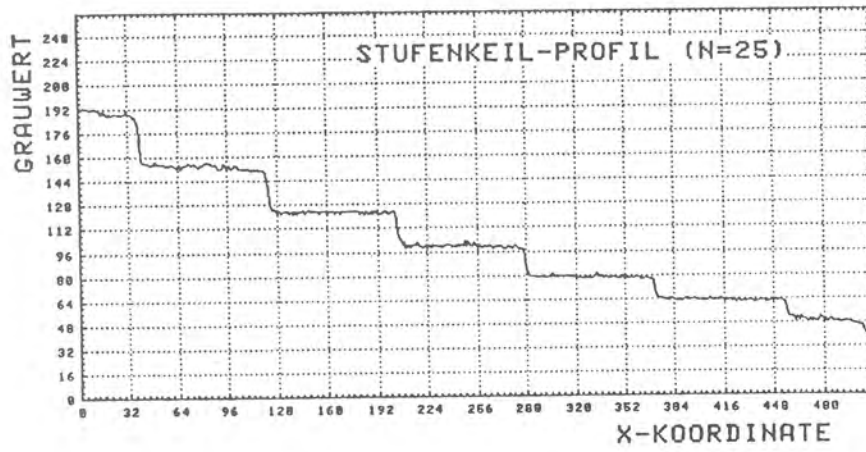


Bild 4.1.3.4-10B: Zeilenprofil (N = 25)

Geometrische Verzerrungen:

Geometrieverzerrungen, die nur qualitativ untersucht wurden, zeigten vernachlässigbare Bildveränderungen, die in der Verarbeitung von Röntgenbildern aus der zerstörungsfreien Materialprüfung zu keiner Beeinträchtigung der Fehlererkennbarkeit führten.

Die Video-Aufnahme eines Millimeter-Rasters in Bild 4.1.3.4-11 wurde zur Kontrolle mit einem im Rechner künstlich erzeugten Raster überlagert. Der Vergleich der Linienzüge sowohl in X-Richtung als auch in Y-Richtung zeigt eindeutig einen parallelen Verlauf.

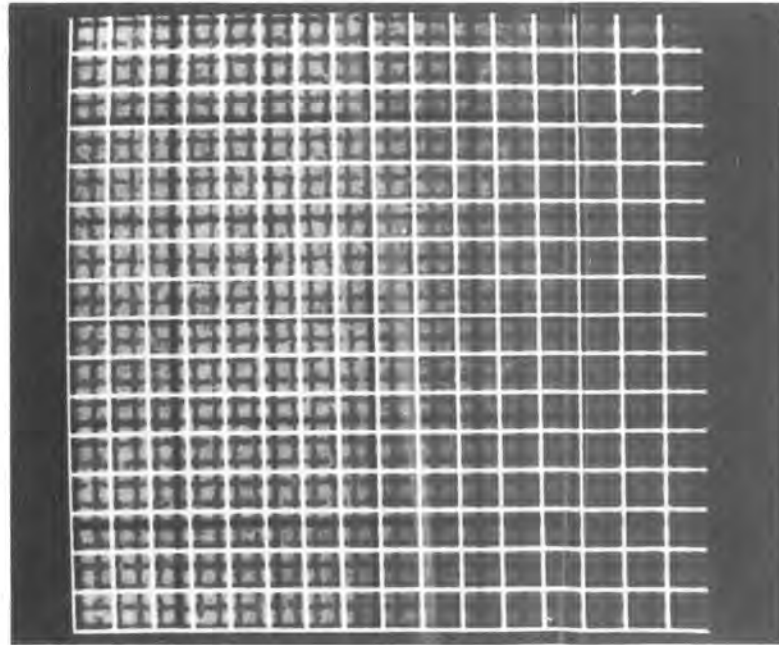


Bild 4.1.3.4-11: Videoaufnahme eines Millimeter-Rasters und Überlagerung einer künstlichen Gitterstruktur zur Erkennung von Geometrieverzerrungen



#### 4.1.3.5 Diskussion der Systemuntersuchungen

Die Untersuchungen ergaben, daß ein Video-System zur Röntgenbilddigitalisierung eine Alternative zu anderen Bildaufnahmeverfahren darstellt. Die großen Vorteile sind einfache Bedienung, große Freiheit bei der Wahl des Einsatzortes, schneller Bildeinzug und geringer Platzbedarf. Es wird heute bereits der Trend zu immer kompakteren und leistungsstärkeren Videosystemen sichtbar. Diese positiven Aspekte laufen parallel zu einem immer günstigeren Preis-Leistungsverhältnis. Die Nachteile liegen in systembedingten Fehlerquellen wie Shading und Rauschen. Sie erfordern für eine gute Bildqualität eine entsprechend aufwendige Fehlerkorrektur.

#### 4.1.4 COMTAL-Bildverarbeitungssystem

##### 4.1.4.1 Konzeption eines schnellen Bildverarbeitungssystems

Ein Bildverarbeitungssystem zur schnellen Verarbeitung von Digitalbildern, dessen Verarbeitungsroutinen auf einer speziellen Hardware-Konzeption beruhen, zeichnet sich in erster Linie durch eine hohe Arbeitsgeschwindigkeit aus. So werden zahlreiche Bildverarbeitungs-Routinen zur Verarbeitung von 256 K-Byte Digitalbildern in weniger als 30 ms ausgeführt, d.h. es besteht die Möglichkeit der ON-LINE-Verarbeitung von Digitalbildern. Grundlage dieser Systeme sind zahlreiche Standardmikroprogramme, die vom Hersteller in Maschinensprache geschrieben und im Rechner fest implementiert werden. Im Gegensatz zu höheren Programmiersprachen (FORTRAN, BASIC u.a.) besteht die Maschinensprache aus Befehls-Bitmustern, die der Computer direkt decodieren und ausführen kann, während Programme in anderen Sprachen erst in den sogenannten Maschinen-Code übersetzt werden müssen. Für den Benutzer stellt das eine Vereinfachung bei der Realisierung von Bildverarbeitungsproblemen dar, da er auf die Benutzer-Programme zurückgreifen kann und somit ohne aufwendige Programmentwicklungen bzw. ohne Kenntnisse von Programmiersprachen in einem begrenzten Rahmen Bildverarbeitung durchzuführen vermag. Die einzigen Voraussetzungen sind Kenntnisse über Befehlseingaben, die in benutzerfreundlichen Befehlsstrings über eine alphanumerische Tastatur dem Rechner eingegeben werden und damit die internen Programmabläufe in gezielter Folge aktivieren. Nachteilig wirkt sich aus, daß abgesehen von Parametervariationen keine externe Einflußnahme auf die Mikroprogramme möglich ist. Kreative Programmentwicklung für spezielle Problemfälle kann an derartigen Systemen in der Regel nicht durchgeführt werden. Dafür werden Rechenanlagen benötigt, die für eine freie Programmierung in einer der herkömmlichen Programmiersprachen ausgelegt sind. Freie Programmierung bei gleichzeitiger Ausnutzung schneller Standardroutinen in Bildverarbeitungs-Systemen, wie z. B. COMTAL, setzt eine System-Kopplung zwischen einem frei programmierbaren Rechner

(Host-Computer) und einem Bildverarbeitungssystem voraus, bei dem ein schneller Datentransfer zwischen den Massenspeichern beider System-Komponenten gewährleistet wird.

Einem Host-Computer sind neben einem relativ kleinen elektronischen Speicherbereich weitere Massenspeicher auf elektromechanischer Basis (Magnetplattenspeicher) zugeordnet. Sie haben den Vorteil hoher Speicherkapazitäten ( $> 10^7$  Byte) und können ihre Daten permanent speichern. Der Nachteil besteht in der niedrigen Schreib-Lese-Geschwindigkeit der Daten, die eine schnelle Bildverarbeitung ausschließen.

Ein Bildverarbeitungs-System verfügt dagegen über große elektronische Massenspeicher (RAM), deren READ-WRITE Zyklen bei mehreren Megahertz liegen. Sie bilden die Basis für die hohen Verarbeitungsgeschwindigkeiten. Der Nachteil dieser Speicher liegt in den z.Z. noch relativ hohen Kosten und dem Umstand, daß RAM-Speicher ihre Daten bei fehlender Spannungsversorgung verlieren.

#### 4.1.4.2 Aufbau des COMTAL-Bildverarbeitungssystems

Das COMTAL-System stellt ein unabhängiges Bildverarbeitungssystem dar, das dem Benutzer eine Anzahl von interaktiven Verarbeitungs- und Steuerroutinen zur Verfügung stellt. Das System liefert Graubilder, Pseudocolor-Bilder und reine Farbbilder mit hoher räumlicher Auflösung über den vollen Grauwertbereich.

Kernstück des Systems ist ein Mikroprozessor vom Typ LSI-11, dem spezielle Elektronik-Schaltungen für Bildverarbeitungsprozesse zugeordnet sind. Dazu kommt ein ausbaufähiger elektronischer Speicherbereich auf der Basis von 16 K RAM (Random Access Memory). Die interaktive Befehlseingabe erfolgt über eine System-Konsole mit einem alphanumerischen Tastenfeld, das durch eine Rollkugel oder einem Daten-Tablett erweitert werden kann.

Die Datenaufnahme kann auf mehreren Wegen erfolgen. Für diesen Fall stehen Standard-Interfaceschaltungen zur Datenaufnahme von Magnetbandmaschinen oder externen Rechenanlagen zur Verfügung. Der direkte Bildeinzug über eine Videokamera ist ebenfalls vorgesehen, er erfordert eine Schreibrate von ca. 10 M-Byte/s.

Die hohe räumliche Auflösung der Digitalbilder wird durch darstellbare Bildmatrizen von 512 x 512 bzw. 1024 x 1024 Bildpunkten auf hochauflösenden Monitoren erreicht.

Abbildung 4.1.4.2-1 zeigt das Blockschaltbild des COMTAL-Systems mit den wichtigsten Systemkomponenten, den Bus-Strukturen und den Interface-Schaltungen für Peripherie-Geräte.

Der Daten- und Befehlsaustausch zwischen den Funktionsgruppen des COMTAL-Systems wird auf zugeordneten Busleitungen abgewickelt. Die Zentraleinheit LSI-11 (CPU) empfängt ihre Befehle von der Systemkonsole oder von externen Geräten über das Standard-Interface. Der LSI-11 steht eine Kombination von RAM und ROM Speicherbausteinen für Steuerungs- und Verarbeitungsabläufe zur Verfügung.

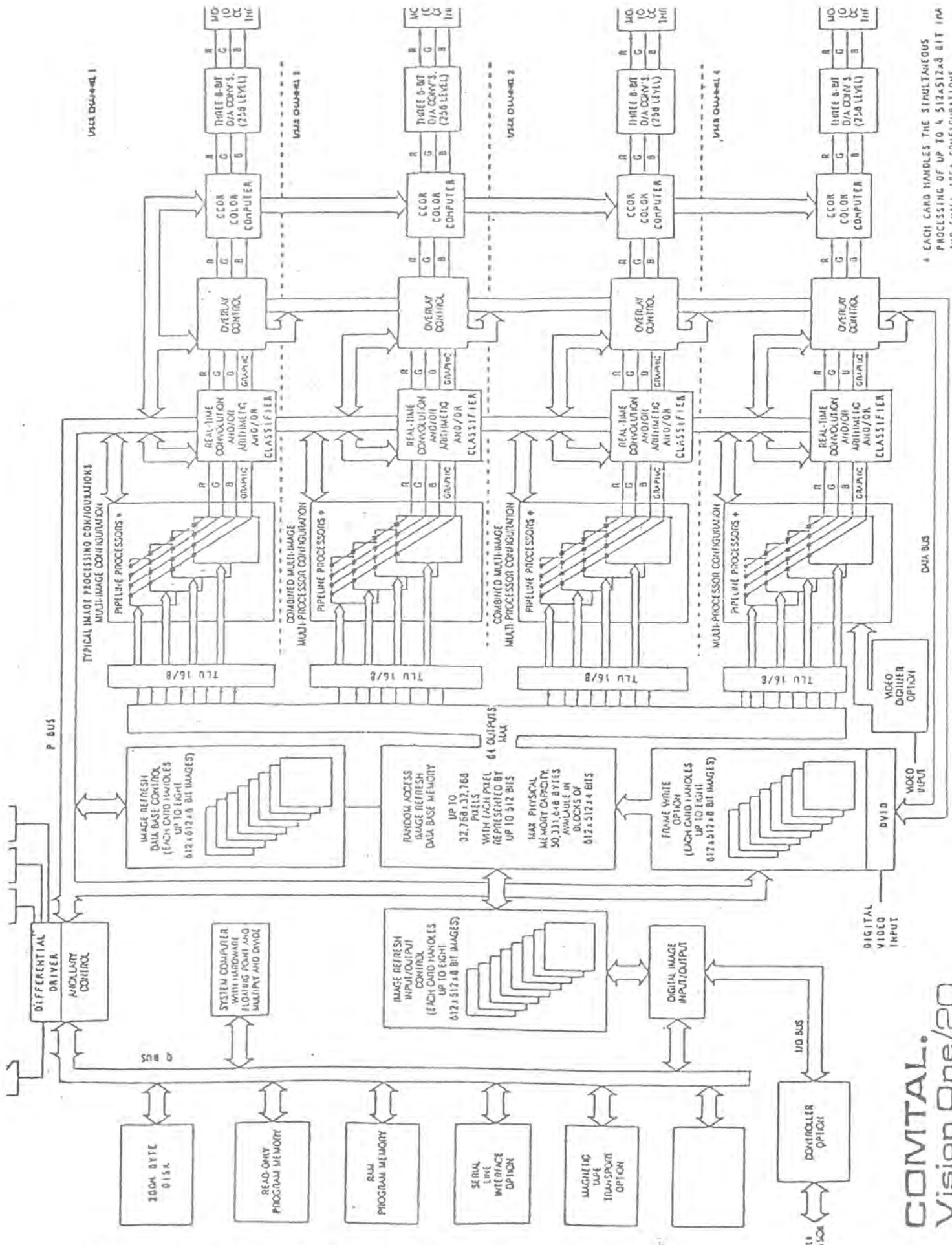
Bild- und Graphikdaten werden in elektronischen Bildspeichern mit 9 Bit-Codierung je Bildelement abgespeichert, wobei 8 Bit die Information von 256 Graustufen beinhalten und 1 Bit für Graphikinformationen zur Verfügung stehen. In der Grundausstattung umfaßt das COMTAL-System elektronische Speicher zur Aufnahme von vier Bildmatrizen mit jeweils 512 x 512 Bildelementen (8 Bit) sowie vier Graphikspeicher zur Aufnahme von jeweils 512 x 512 Binärelementen (1 Bit). Das COMTAL-System ist in seiner maximalen Ausbaustufe auf 64 Bildspeicher der Größe 512 x 512 erweiterbar.

Die hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit wird vor allem durch sogenannte Pipeline-Prozessoren erreicht. Es handelt sich dabei um Funktionsspeicher zur Aufnahme von jeweils 256 x 256 Wertzuständen, die eine festdrahtete Verbindung zu jedem Bildspeicher bzw. Graphikspeicher besitzen. Die Eingabe

der Funktionswerte erfolgt interaktiv vom Systembenutzer. Sie sind frei programmierbar und ermöglichen so eine zielgerichtete Verarbeitung eines Digitalbildes.

Eine weitere Systemoption steht mit dem sogenannten "IMAGE COMBINE" zur Verfügung. Hiermit ergibt sich die Möglichkeit, mehrere Digitalbilder gleichzeitig aus den Bildspeichern zu lesen, sie in geeigneter Weise zu verknüpfen (Addition, Subtraktion, Multiplikation, Division) und das Ergebnis in einen weiteren Digitalpeicher einzuschreiben. Der Zeitbedarf für diesen Prozeß erfordert 30 ms.

Unter der "REAL-TIME-CONVOLUTION" wird ein schneller Faltungsprozeß der Bildfunktion des Digitalbildes mit einer Faltungsfunktion verstanden. Die Faltungsfunktion kann durch die interaktive Eingabe von neun Funktionswerten eindeutig festgelegt werden. Damit ergibt sich die Möglichkeit, ein breites Spektrum von Filterungen im Ortsbereich durchzuführen (Tiefpaß, Hochpaß).



\* EACH CARD HANDLES THE SIMULTANEOUS PROCESSING OF UP TO 4 512x512x8 BIT IMA AND SMALL AREA CONFIGURATIONS

Bild 4.1.4.2-1: Blockschaltbild des COMTAL-Bildverarbeitungssystems

#### 4.1.4.3 Bildverarbeitungsrouinen

Das COMTAL-System verfügt über eine Reihe von Bildverarbeitungsrouinen, die als Mikroprogramme fest implementiert sind und die je nach Zielsetzung des Benutzers durch interaktive Befehlseingaben aktiviert werden können. Die einsetzbaren Verfahren können einzeln oder z.T. auch kombiniert auf Digitalbilder angewandt werden, wobei der große Vorteil in der Verarbeitung und gleichzeitigen Ergebnis-Darstellung zu sehen ist. Die meisten Verarbeitungsrouinen benötigen einen Zeitrahmen von 30 ms, d.h. der Darstellungszeit eines Digitalbildes mit 512 x 512 Bildelementen und 8 Bit-Codierung auf einem Monitor. Für systematische Verarbeitungsabläufe, die eine Reihe von Arbeitsschritten erfordern, lassen sich sogenannte Makro-Programme im COMTAL-System schreiben. Es handelt sich dabei um eine Folge von Befehlsstrings, die zeilenweise unter einer Macro-Adresse über die System-Tastatur eingeschrieben und zwischengespeichert werden. Bei Eingabe einer definierten Macro-Adresse wird der Befehlspeicher aufgerufen und in vorgegebener Reihenfolge automatisch abgearbeitet.

Auf die wichtigsten Bildverarbeitungs-Rouinen soll im folgenden Abschnitt näher eingegangen werden. Die interaktiv einzugebenden Befehlsstrings werden der Kurzbeschreibung vorangestellt. In vielen Fällen reicht die Eingabe eines Buchstabens zur Symbolisierung eines Befehlsbegriffes aus, z. B. D = Display Image.

#### Display Image N

Dieser Befehl veranlaßt das COMTAL-System zur Darstellung einer Bildmatrix von 512 x 512 Bildelementen auf dem System-Monitor. N steht dabei für eine Ziffer, die die Adressierung eines speziellen Bildspeichers (N) gestattet.

### Display Function Memory N

Hiermit wird der Funktionsspeicher, der einem Bildspeicher zugeordnet ist, auf dem Monitor dargestellt. Er enthält 256 Funktionswerte, wobei jedem Funktionswert Grauwerte im Bereich 0 bis 255 zugeordnet sein können. Für ein Schwarzweißbild enthält der Funktionsspeicher 256 Punkte auf der Abszisse für die Eingangswerte und 256 Punkte auf der Ordinate für die Ausgangswerte. Somit ergibt sich eine darstellbare Funktionsebene von 256 x 256 Punkten, siehe Abbildung 4.1.4.3-1.

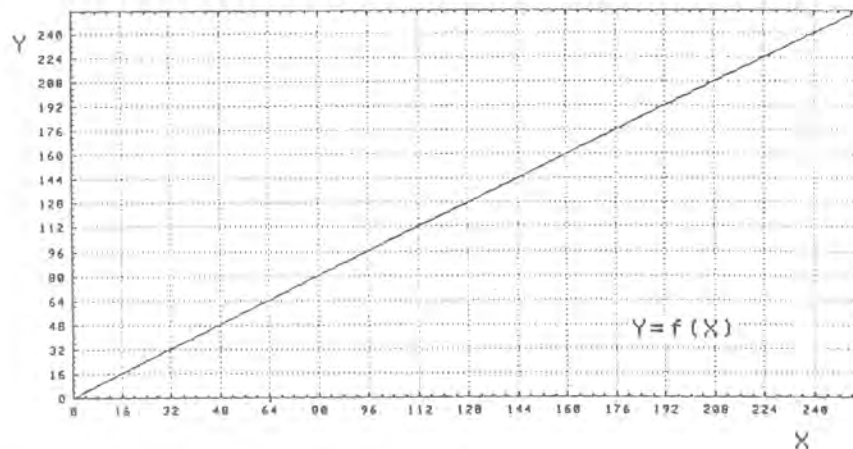


Bild 4.1.4.3-1: Funktions-Speicher mit linearer Funktion  $y = x$

### Display Zoom Image By Factor 1 / 2 / 4

Diese Eingabe ermöglicht eine Bildvergrößerung um den Faktor 2 bzw. Faktor 4 des aktuell auf dem Monitor dargestellten Digitalbildes. Durch die virtuelle Bildflächenvergrößerung erscheint nur ein Teil der Bildmatrix auf dem Leuchtschirm, so daß in der Regel ein weiterer Befehl zur Darstellung eines speziellen Matrixbereiches eingegeben werden muß.



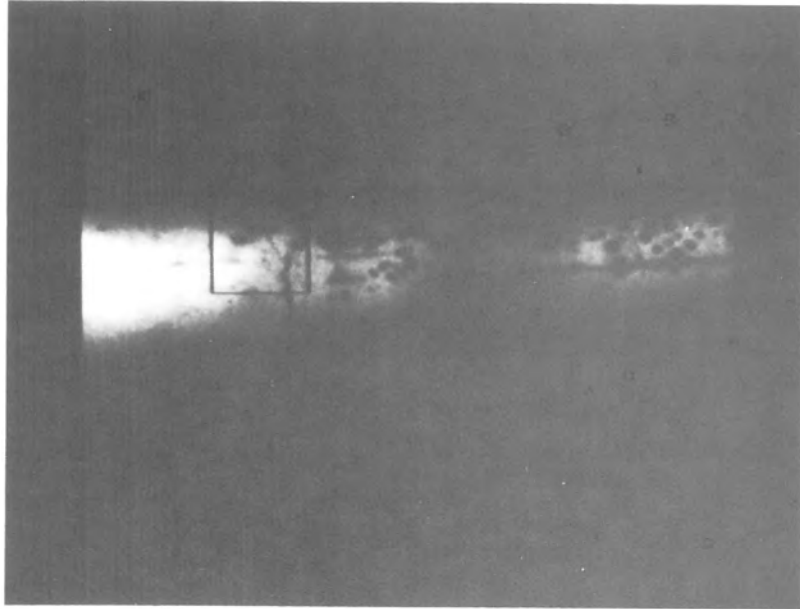


Bild 4.1.4.3-2: Originalbild mit gekennzeichnetem Bildausschnitt

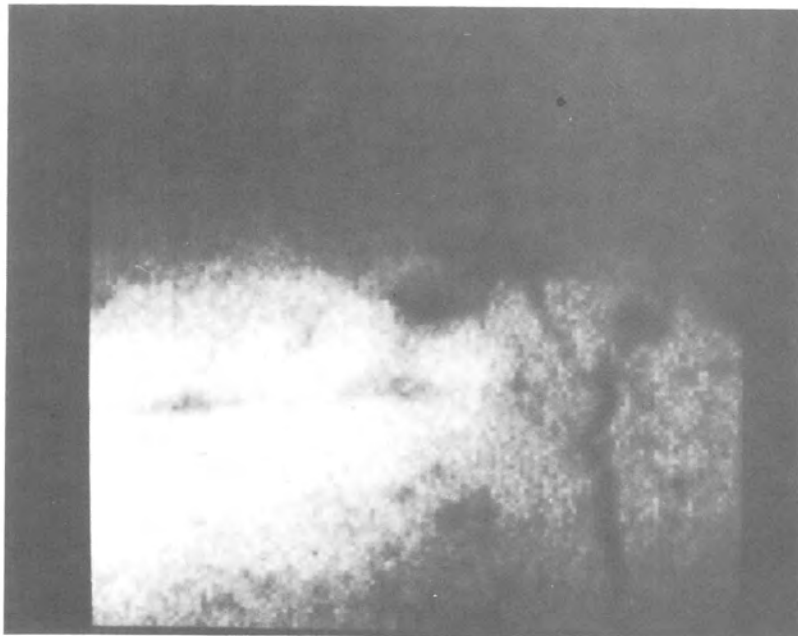


Bild 4.1.4.3-3: Bildvergrößerung

### Roam Image

Roam Image wird häufig kombiniert mit einer Bildvergrößerung. Durch Betätigung einer Rollkugel läßt sich damit ein 512 x 512 Bildelemente umfassendes Fenster über einen virtuellen Bildbereich mit 1024 x 1024 Bildpunkten verschieben. Es kann damit eine optimale Positionierung wesentlicher Bildinhalte im Zentrum des Monitors erreicht werden.

### Define Corners Image N

Dieser Befehl ermöglicht die Festlegung eines bestimmten Bildbereiches einer Bilddatei durch die Eingabe von vier Koordinatenpunkten. Es ist die Grundlage für eine gesonderte Bildverarbeitung eines vom Benutzer definierten Bildausschnittes ohne Veränderung der Eigenschaften des verbleibenden Bildbereiches.

Ein Beispiel wird in den Abbildungen 4.1.4.3-4A und 4.1.4.3-4B gegeben. Ein definierter Bildausschnitt in Bild 4.1.4.3-4A wird im Kontrast verändert ohne die umliegenden Bildbereiche zu beeinflussen. Das Ergebnis der Verarbeitung kann sofort auf einem Monitor dargestellt werden, bzw. wird in einen weiteren Bildspeicher abgelegt (Bild 4.1.4.3-4B).

Neben der Festlegung von Bildbereichen über Koordinateneingaben lassen sich beliebig geformte Bildausschnitte durch Einzeichnen einer geschlossenen Kontur in der Bildebene markieren und gesondert weiterverarbeiten.

### Dump Image

Unter Zuhilfenahme einer Rollkugel wird bei diesem Befehl ein Lichtpunkt (Target) über ein aktuell dargestelltes Digitalbild bewegt, um Informationen über die Koordinatenposition ( $x,y$ ) und den korrespondierenden Grauwert zu erhalten. Für jeden angesteuerten Koordinatenpunkt wird im unteren Monitorbereich eine Informationszeile aus  $x$ -Positionen,  $y$ -Positionen und Grauwert des markierten Bildelementes dargestellt.

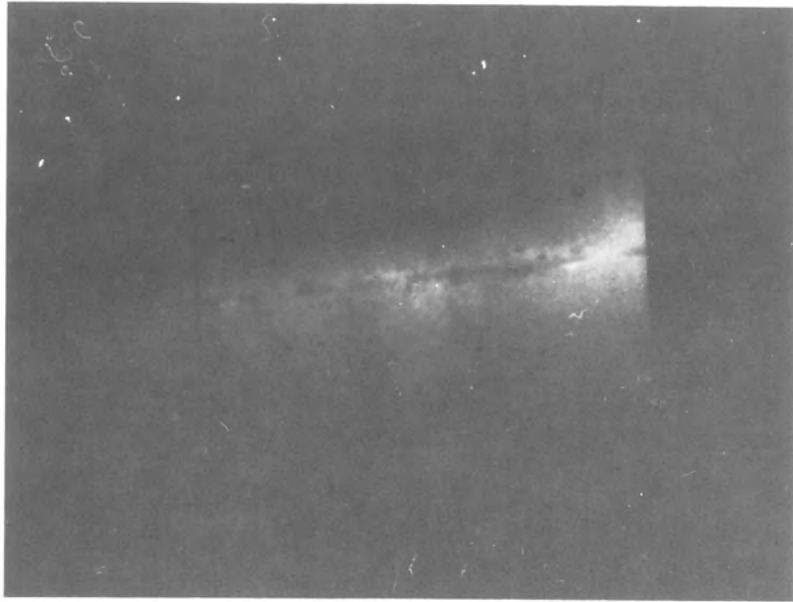


Bild 4.1.4.3-4A: Definition eines Bildausschnittes im Schweißnahtbereich

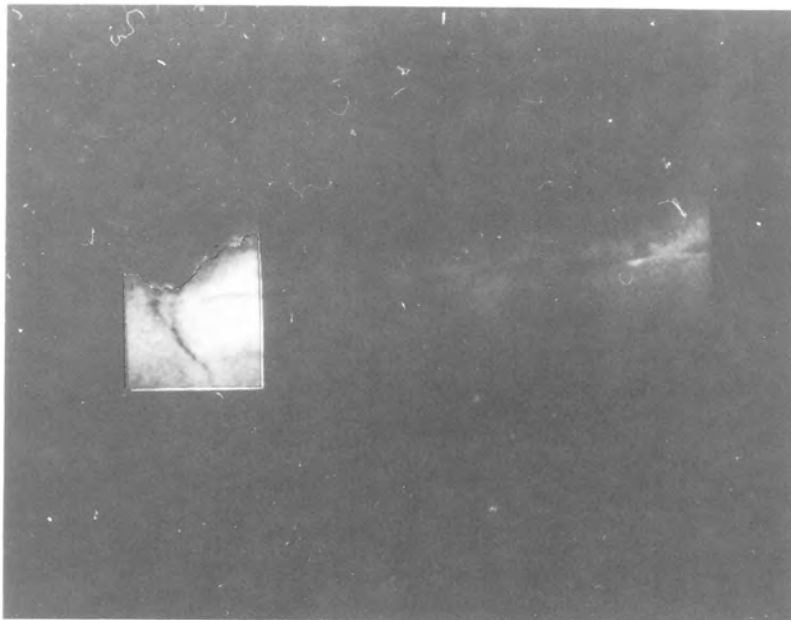


Bild 4.1.4.3-4B: Kontrasterhöhung eines isolierten Bildbereiches

### Function Memory = Histogramm of Image

Mit dieser Eingabe läßt sich auf einfache und schnelle Weise die Häufigkeitsverteilung der Grauwerte eines auf dem Monitor dargestellten Digitalbildes berechnen. Das Ergebnis wird automatisch in einen adressierten Funktionsspeicher eingeschrieben und kann jederzeit als Funktionsverlauf auf dem Monitor dargestellt werden. Die Abszisse beinhaltet die 256 möglichen Graustufen von 0 bis 255, während auf der Ordinate die normierte Häufigkeit aufgetragen wird.

### Equalize Function Memory

Mit diesem Befehl wird eine normierte Integrationskurve aus den Funktionswerten des Funktionsspeichers berechnet. Wird die Integrationskurve auf der Basis eines Histogramms berechnet und als nichtlineare Transformationsfunktion zur Kontraststeigerung eines Digitalbildes eingesetzt, so stellen sich in vielen Problemfällen gute Ergebnisse im Bereich der Kontrastverbesserung ein.

### Add Function Memory

Mit diesem Ausdruck wird ein aktuell auf dem Monitor dargestelltes Bild in Abhängigkeit der Funktion des Funktionsspeichers in 30 ms grauwerttransformiert. Ein ideales Verfahren zur On-Line-Verarbeitung von Digitalbildern. Der Funktionsverlauf im Funktionsspeicher kann direkt mit Hilfe der Rollkugel in die Funktionsebene eingezeichnet werden. Eine andere Möglichkeit besteht durch die Eingabe einer Funktionsgleichung über die Systemtastatur.

### Graphic = Profile of Image

Nach Auswahl einer bestimmten Koordinatenposition mit dem Target können Zeilen- oder Spaltenprofile aus einem Digitalbild in einen Graphik-Speicher eingeschrieben werden.

### Graphic = Image Level

Diese Anweisung erlaubt eine Schwellwertoperation, die Bildbereiche markiert, deren Grauwerte unter oder über einer definierten Grauwertschwelle innerhalb eines Digitalbildes liegen.

### Add Convolver

Diese Option erlaubt die Filterung eines Digitalbildes von 512 x 512 Bildpunkten in ca. 30 ms. Die Filtermaske (3 x 3 Werte) kann vom Benutzer beliebig über interaktive Werteingabe an der Systemkonsole programmiert werden, so daß sich Filter sowohl mit Hochpaßcharakter als auch mit Tiefpaßcharakter erstellen lassen.

### Add Combine

Dieser Befehl gestattet die Überlagerung von Bildmatrizen, wobei die Möglichkeit einer unterschiedlichen Gewichtung der Funktionswerte der zu überlagernden Bildfunktionen vorgegeben werden kann. Ein typisches Verfahren ist die Erstellung eines pseudoplastischen Digitalbildes durch die Subtraktion von zwei Bildmatrizen.

## 4.2 Mehrwinkel-Radiometrie

### 4.2.1 Strahlungsdetektor

#### 4.2.1.1 Problemanalyse

In der Radiometrie werden folgende Strahlungsquellen je nach Prüfaufgabe eingesetzt:

- Röntgenröhre 30 - 420 kV
- Radionuklid Ir 192, Co 60

Der Strahlungsdetektor hat die Aufgabe, die durch das Prüfobjekt transmittierte Strahlung in ein elektrisches Signal umzuwandeln. Für den Einsatz in der Radiometrie sollte der Detektor folgende Eigenschaften besitzen:

- hohe Nachweiswahrscheinlichkeit im gesamten auftretenden Energiebereich
- hoher Wirkungsgrad bei der Umwandlung der absorbierten Strahlungsquanten in ein elektrisches Signal
- gutes zeitliches Auflösungsvermögen
- hohes Signal/Rausch-Verhältnis
- kostengünstig
- kleine Abmessungen und einfache Handhabung

Als Strahlungsdetektoren werden heute überwiegend Halbleiterdetektoren und Szintillationszähler eingesetzt.

Der Einsatz eines Halbleiterdetektors ist auf Grund der schlechteren Nachweiswahrscheinlichkeit (siehe Bild 4.2.1.1-1), der höheren Anschaffungskosten und des Kühlaufwandes zur Unterdrückung des Rauschens nicht sinnvoll. Deshalb wurde als Detektortyp ein Szintillationszähler ausgewählt.

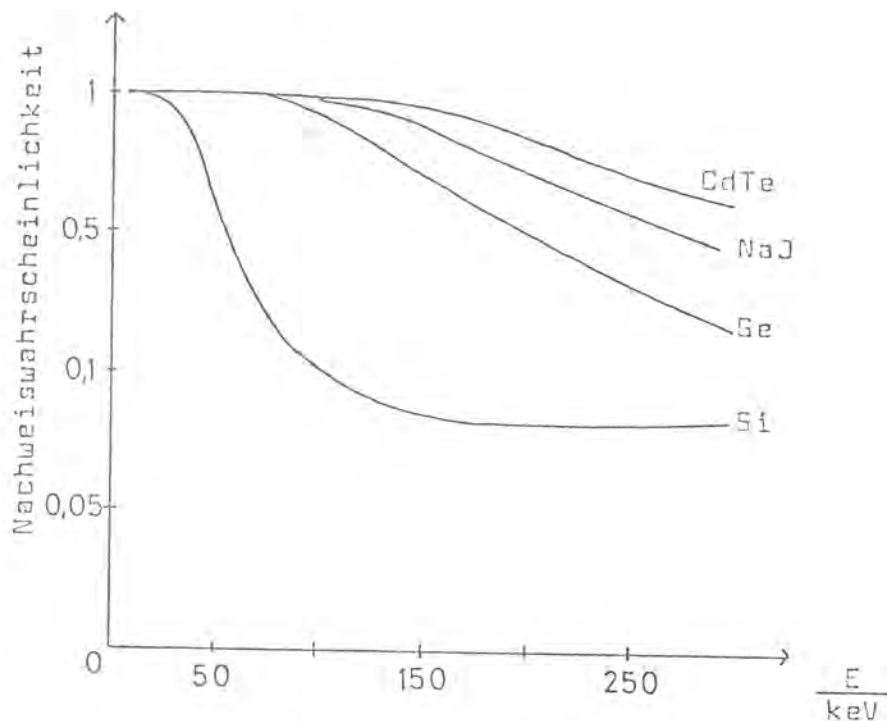


Bild 4.2.1.1-1: Vergleich der  $\gamma$ -Nachweiswahrscheinlichkeit einiger Detektormaterialien (Detektordicke = 1 cm)

#### 4.2.1.2 Szintillationszähler

Ein Szintillationszähler besteht aus zwei Teilen:

- Szintillator
- Sekundärelektronenvervielfacher (Fotomultiplier)

Der Szintillator hat die Aufgabe, bei Auftreffen von Röntgen- und Gammastrahlung Lumineszenzlicht zu erzeugen. Aufgabe des Fotomultipliers ist es, das Lumineszenzlicht in ein elektrisches Signal umzuwandeln und zu verstärken.

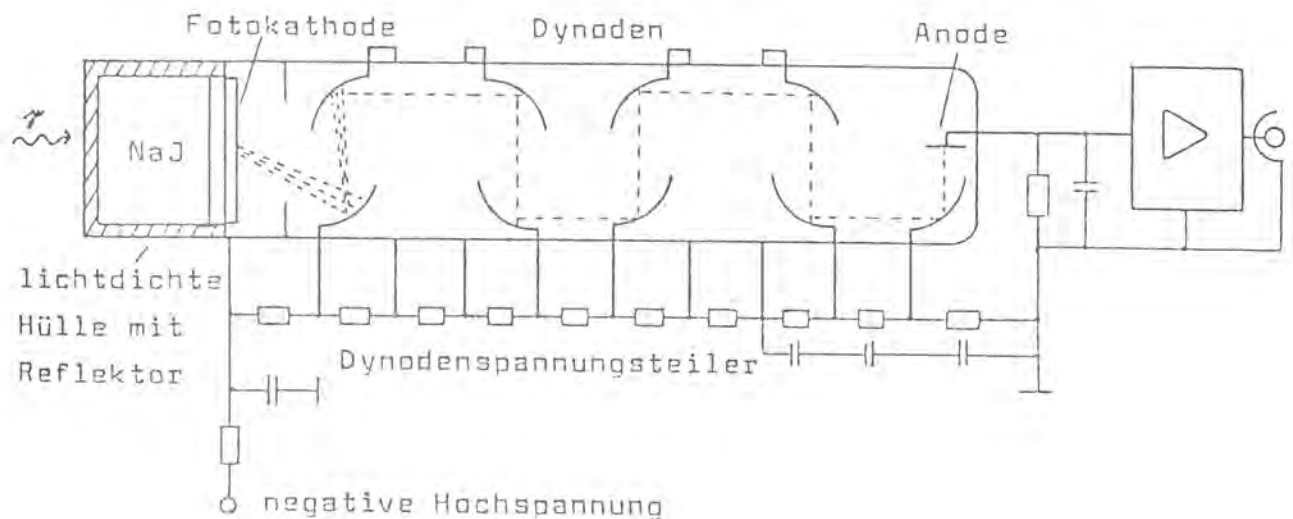


Bild 4.2.1.2-1: Aufbau eines Szintillationszählers

Vorteile eines Szintillationszählers:

- hohe Ansprechwahrscheinlichkeit
- Proportionalität zwischen absorbierten Teilchenenergie im Szintillator und Ladungsmenge an der Anode
- hohes zeitliches Auflösungsvermögen durch kurze Abklingzeiten
- kompakter Aufbau

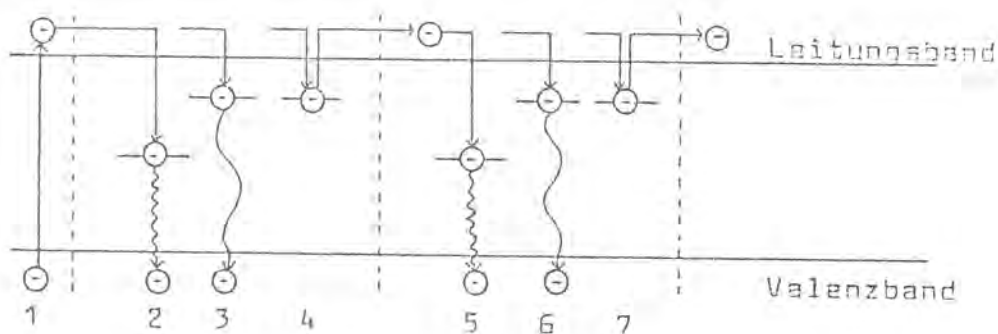
Als Szintillationsmaterial werden anorganische Einkristalle, organische Flüssigkeiten, organisches Plastikmaterial und Edelgase benutzt.

Natriumjodid ist ein anorganischer Einkristall, dem kleine Mengen an Aktivatoren (z. B. Thallium) als künstliche Verunreinigungen in das Kristallgitter eingebaut werden. Der Szintillationsmechanismus lässt sich mit Hilfe des Bändermodells von Kristallen erklären:

Durch Absorption der einfallenden Röntgen- oder Gammastrahlung (über Foto-, Compton- oder Paarbildungsprozess) können Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband angehoben werden. Der Übergang des angehobenen Elektrons direkt vom



Leitungsband zurück in das Valenzband ist nicht wahrscheinlich, sondern verläuft über die Aktivator-Niveaus. Daneben gibt es eine strahlungslose Energieabgabe an das Kristallgitter. Außerdem können die Störstellen Elektronen einfangen. Diese werden nach einer gewissen Zeit an das Leitungsband zurückgegeben, von wo sie unter Benutzung eines Aktivator-niveaus und unter Aussendung einer verzögerten Lumineszenzstrahlung in das Valenzband zurückkehren.



- 1) Anregung: Anheben eines Elektrons ins Leitungsband
- 2) Elektron fällt in Aktivator-Niveau. Übergang in den Grundzustand innerhalb von  $10^{-8}$ s durch Photonenstrahlung
- 3) Strahlenlose Energieabgabe an das Kristallgitter
- 4) Störstelle wirkt als Elektronen-Einfang. Nach gewisser Zeit wiederum Anhebung ins Leitungsband,
- 5) von dort Energieabgabe als verzögerte Strahlung

Bild 4.2.1.2-2: Szintillationsmechanismus

Um eine Abschätzung der Nachweiswahrscheinlichkeit von Strahlungsquanten zu erhalten, kann man davon ausgehen, daß immer dann ein einfallendes Strahlungsquant nachgewiesen wird, wenn dieses durch irgendeinen der Wechselwirkungsprozesse ein Elektron in das Leitungsband angehoben hat. Für den Szintillator gilt wie für alle anderen Medien das Absorptionsgesetz:

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

Für die austretende Intensität gilt:

$$\Delta I = I_0 - I$$

Damit ergibt sich für den prozentualen Anteil von Strahlungsquanten, die an einem Wechselwirkungsprozeß beteiligt sind:

$$\frac{\Delta I}{I} = 1 - e^{-\mu d} \quad (4.2.1.2-1)$$

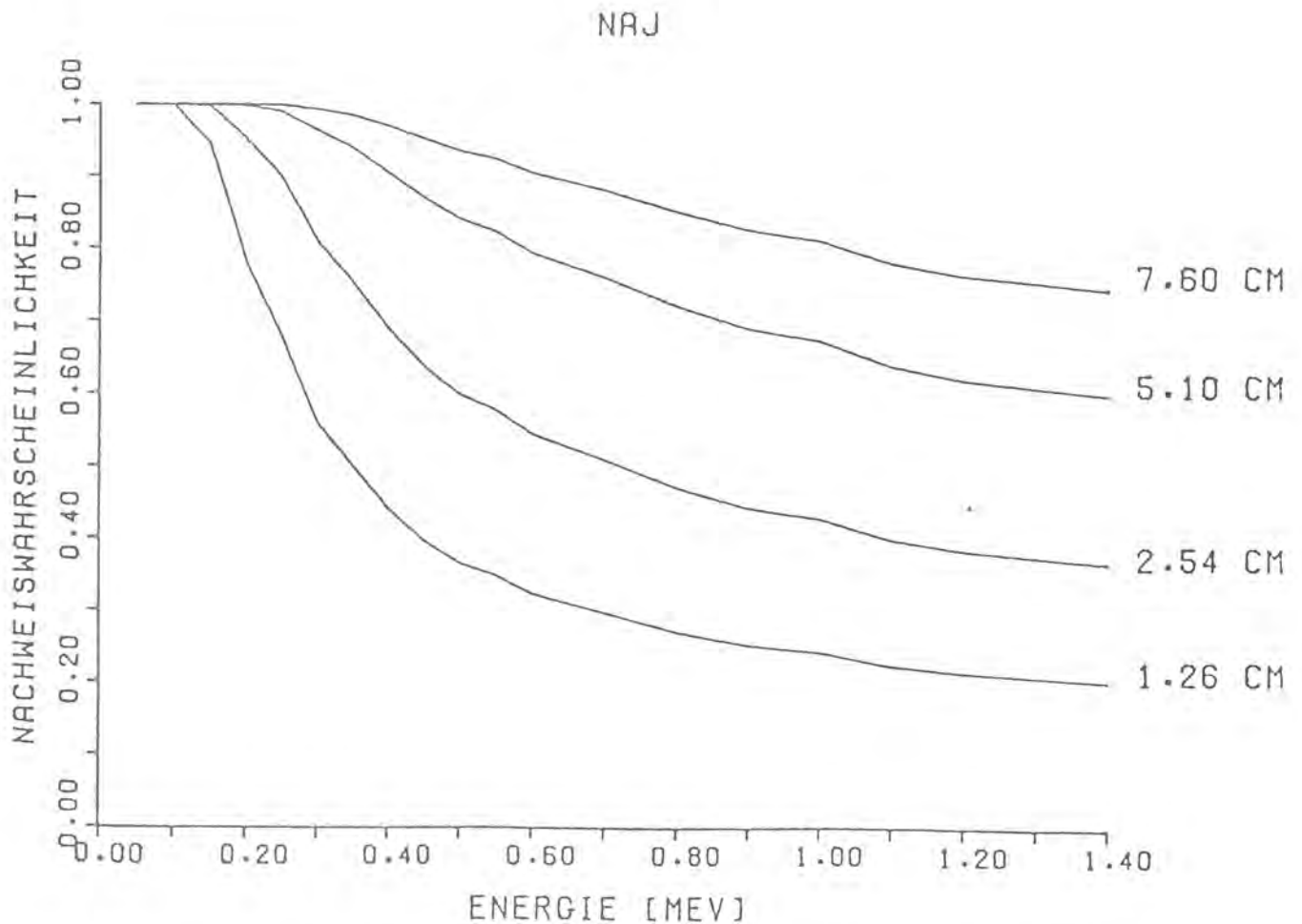


Bild 4.2.1.2-3: Nachweiswahrscheinlichkeit von Strahlungsquanten bei Natriumjodid

Bild 4.2.1.2-3 zeigt den Verlauf der Nachweiswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Energie. Als Parameter ist die Szintillatordicke angegeben.

Im Bändermodell kann man erkennen, daß nicht alle erzeugten Sekundärelektronen Lumineszenzlicht erzeugen. Ein großer Teil der Anregungsenergie wird in Wärme umgewandelt. Der Rest, der als physikalische Ausbeute oder auch als Lichtausbeute bezeichnet wird, erzeugt die Lumineszenzstrahlung. Für Natriumjodid beträgt die Lichtausbeute 10 %. Im Vergleich mit der Lichtausbeute von anderen Szintillatoren gehört die von NaJ mit zu den höchsten Werten.

Material	Lichtausbeute in %
NaJ(ti)	10
CsJ(Na)	8,5
Plastik	3
Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	0,8

Für eine optimale Anpassung zwischen Fotokathode des Fotomultipliers und Szintillator ist es wichtig, den Verlauf und das Maximum des emittierten Spektrums zu kennen. Für NaJ ergibt sich folgende Kurve:

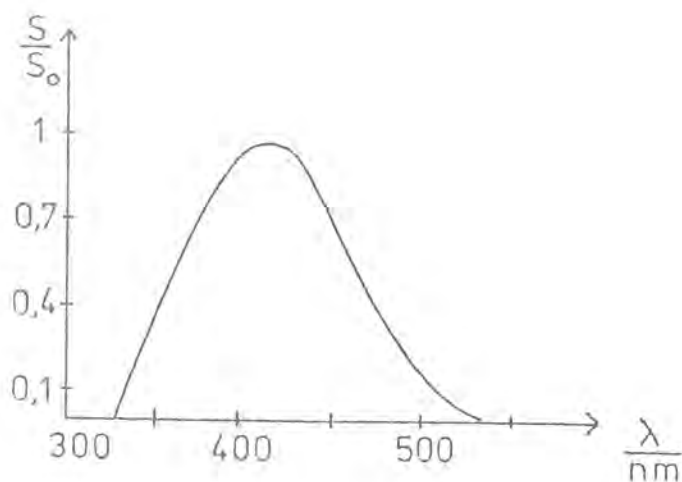


Bild 4.2.1.2-4: Emissionsspektrum für NaJ

Da in der Radiometrie im allgemeinen die mittlere Strahlungsintensität gemessen wird, spielt das zeitliche Auflösungsvermögen eine untergeordnete Rolle. Dieses ist bestimmt durch die Dauer der Szintillation. Für Natriumjodid beträgt die Abklingzeit  $0,23 \mu\text{s}$ . Damit gehört NaJ mit zu den Szintillatoren mit der längsten Abklingzeit.

Natriumjodid ist bis heute eines der meist verwendeten Szintillatormaterialien. Hauptanwendungsgebiet ist die Registrierung von Röntgen- und Gammastrahlung im Energiebereich von 50 keV bis 5 MeV. Der Einkristall wird überwiegend in zylindrischer Bauart gefertigt und steht dem Anwender in vielen Standardabmessungen zur Verfügung.

#### 4.2.1.3 Fotomultiplier

Der Szintillator steht im allgemeinen in direkter Berührung mit dem Fotomultiplier. Das Multiplier-System befindet sich in einem evakuierten Glaskolben, wobei die Fotokathode als halbdurchlässige Schicht auf der Innenseite des Eintrittsfensters aufgetragen ist. Nach der Fotokathode folgt ein Fokussiersystem, das durch ein anschließendes Beschleunigungssystem die Elektroden von der Kathode auf die erste Dynode leitet. Das Material der Fotokathode muß so gewählt werden, daß es eine hohe Elektronenausbeute für das auftreffende Szintillatorlicht gibt (siehe Bild 4.2.1.3-1). Die Elektronen von der Fotokathode werden im Dynodensystem beschleunigt und dabei durch Sekundäremission vervielfacht. Für die geometrische Anordnung der Dynoden existieren viele Möglichkeiten.

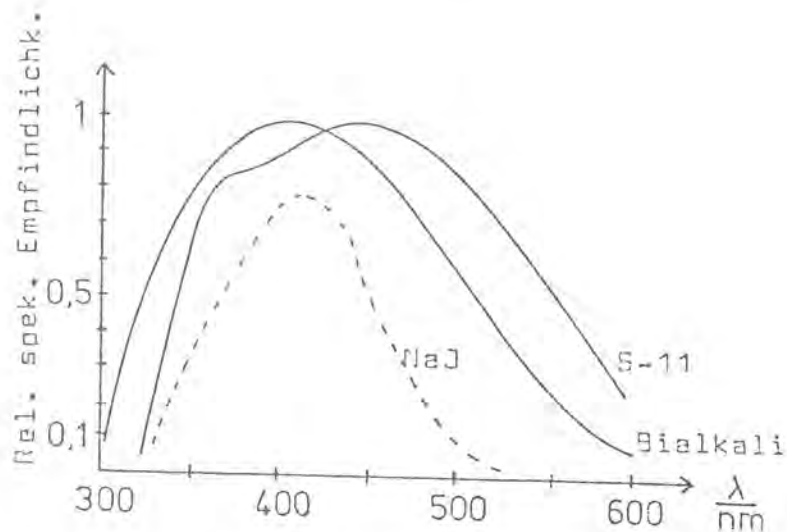


Bild 4.2.1.3-1: Empfindlichkeitskurve der Fotokathode mit unterschiedlichen Beschichtungen (vgl. Emissionsspektrum NaJ)

Die Hochspannungswerte, die an einen Fotomultiplier gelegt werden, liegen in der Größenordnung 1000 - 2000 V, wobei durch ein Spannungsteilersystem dafür gesorgt wird, daß an jeder Dynode eine entsprechende Beschleunigungsspannung liegt. Die Hochspannung muß sehr gut stabilisiert sein, da sonst eine Schwankung der Ausgangsimpulse auftritt und damit die Messung verfälscht. Durch Variation der Hochspannung innerhalb zulässiger Grenzen kann die Höhe der Ausgangsimpulse (Verstärkung) eingestellt werden. Man erreicht Stromverstärkungen um das  $10^7 - 10^8$ -fache.

Auch bei unbeleuchteter Fotokathode fließt ein geringer Dunkelstrom. Er entsteht durch die thermische Emission der Kathode. Durch Einwirkung von Magnetfeldern kann die Fokussierung gestört werden. Deshalb umgibt man die Multiplier mit einem ferromagnetischen Mantel zur Abschirmung.

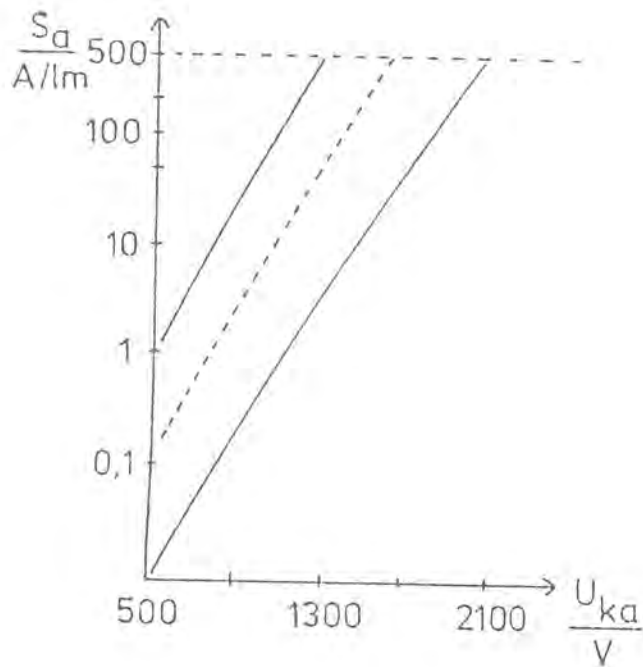


Bild 4.2.1.3-2: Anodenempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Kathoden-Anoden-Spannung (9856L)

Als geeigneter Fotomultiplier wurde der EMI 9856L ausgewählt. Der Fotokathodendurchmesser entspricht dem des Szintillatorkristalls. Die Kathodenbeschichtung besteht aus Bialkali. Der Fotovervielfacher zeichnet sich durch einen sehr geringen Dunkelstrom aus. Damit ist ein gutes Signal/Rausch-Verhältnis gewährleistet. Das Dynodensystem besteht aus 12 Abschnitten. Bei der maximalen Betriebsspannung erreicht man eine Anodenempfindlichkeit von 500 A/lm und damit eine Verstärkung um ca.  $10^7$ . Gegen eine Störung durch fremde Magnetfelder ist der Fotomultiplier mit einer ferromagnetischen Hülle umgeben.

#### 4.2.1.4 Zusammenstellung der technischen Daten

Szintillator:	Natriumjodid(Ti)	
	Durchmesser:	2" (5,1 cm)
	Dicke:	2" (5,1 cm)
	Auflösung:	8,5 %
	Reflexionsschicht:	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Aluminiumgehäuse:	0,4 mm dick
Fotomultiplier:	EMI 9856L	
	Durchmesser:	5,1 cm
	Kathodenmaterial:	Bialkali
	Dynodensystem:	Venetian-Blind
	Kathodenempfindlichkeit:	60 µA/lm
	Anodenempfindlichkeit:	500 A/lm
	Dunkelstrom:	max. 1,5 nA
	Anstiegszeit:	12 ns
	FWHM:	25 ns
	Transitzeit:	65 ns
	Anodenkapazität:	8 pF

#### 4.2.2 Signalerfassung

Für die Meßdatenerfassung in der Radiometrie steht ein Meßdatenerfassungs- und Steuerungssystem (DEV-8) zur Verfügung. Das System ist mit einem Standardinterface mit dem Digitalrechner gekoppelt. Der Austausch von Informationen zwischen Meßwerterfassungssystem und Experimentalaufbau kann auf analoge oder digitale Weise erfolgen. Dafür stehen dem Anwender eine Vielzahl von Funktionseinschüben zur Verfügung.

In der Radiometrie wird für die analoge Aufnahme der beiden Detektorsignale ein 16-Kanal-Multiplexer mit nachfolgendem Sample-and-Hold-Glied und Analog-Digital-Wandler eingesetzt. Informationen des Längenmeßsystems werden dem DEV-8 über eine 16-Bit-Digital-Eingabekarte mitgeteilt.

Die Anpaßschaltung formt das von den Strahlungsdetektoren gelieferte Meßsignal in ein für die Signalaufnahme geeignetes Signal um. Dieses erfordert eine Strom-Spannungswandlung, eine variable Spannungsverstärkung und Bandbegrenzung der Detektorsignale entsprechend dem jeweiligen Prüfobjekt, Amplitudenbegrenzung der Ausgangssignale zum Schutz der nachfolgenden Schaltung und eine analoge Meßdatenvorverarbeitung. Die Vorverarbeitung dient dazu, Intensitätsschwankungen der Strahlenquelle aus den Meßsignalen der beiden Detektoren zu eliminieren.



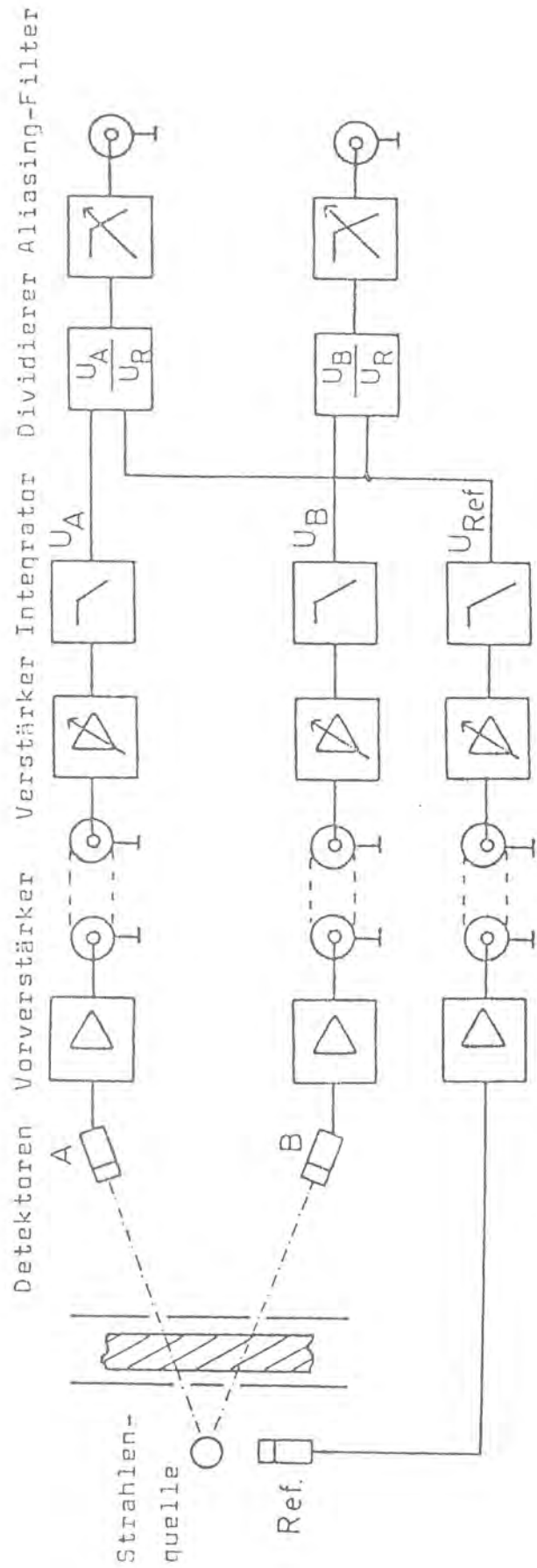


Bild 4.2.2-1: Blockschaltbild der Anpaßelektronik

Wie schon im Abschnitt über den Strahlungsdetektor gezeigt, gilt für alle Materialien das Absorptionsgesetz:

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

Die Detektoren registrieren die Strahlungsintensität  $I$ , die von der Materialdicke  $d$ , dem Absorptionskoeffizienten  $\mu$  und der Strahlungsintensität der Quelle  $I_0$  abhängt.

Wird eine Röntgenröhre als Strahlungsquelle verwendet, so ist das Bremsstrahlungsspektrum und damit die Intensität  $I_0$  nicht konstant. Ausschlaggebend ist die Schaltungsart der Röntgenanlage. Selbst bei einer Gleichspannungsanlage (symmetrische Villard-Schaltung mit Glättungszusatz) verfügt die Röhrenspannung über eine geringe Restwelligkeit (siehe Bild 4.2.2-2).

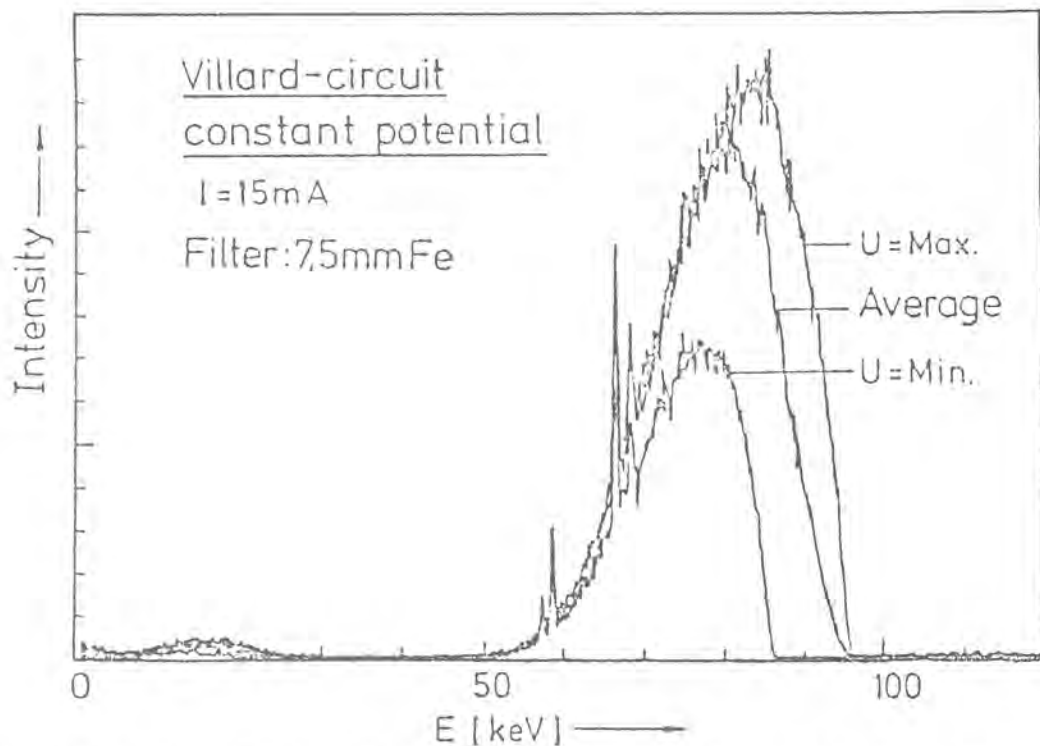


Bild 4.2.2-2: Bremsstrahlungsspektrum einer Röntgenanlage bei schwankender Röhrenspannung

Eine weitere Ursache für die Intensitätsschwankungen sind Windungssprünge beim Abgriff vom Regeltransformator.

Um Fehlmessungen zu verhindern, muß die Schwankung der Strahlenquellenintensität  $I_0$  berücksichtigt werden. Dies geschieht durch einen Referenzdetektor, der direkt die Strahlungsintensität der Röntgenröhre erfaßt. Die beiden anderen Detektorsignale werden dann durch das Referenzsignal analog dividiert.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{U_{\text{Det}}}{U_{\text{Ref}}} = e^{-\mu d} \quad (4.2.2-1)$$

Diese einfache Meßdatenvorverarbeitung entlastet die Datenaufnahme und die weitere Meßwertverarbeitung im Digitalrechner. Außerdem erreicht man höhere Abtastfrequenzen, da nur zwei statt drei Signale digitalisiert werden müssen.

#### 4.2.3 Signalverarbeitung

Zur Ermittlung der zeitlichen bzw. örtlichen Verschiebung des Fehlersignals gibt es verschiedene Möglichkeiten.

##### 4.2.3.1 Koinzidenzverfahren

Bei volumenhaften Fehlern und keinerlei oder nur geringen Oberflächenstrukturen genügt ein Vergleich der Fehlersignalamplituden mit einer Koinzidenzerkennung. Diese Signalverarbeitung ist auf analoge Weise einfach zu realisieren.

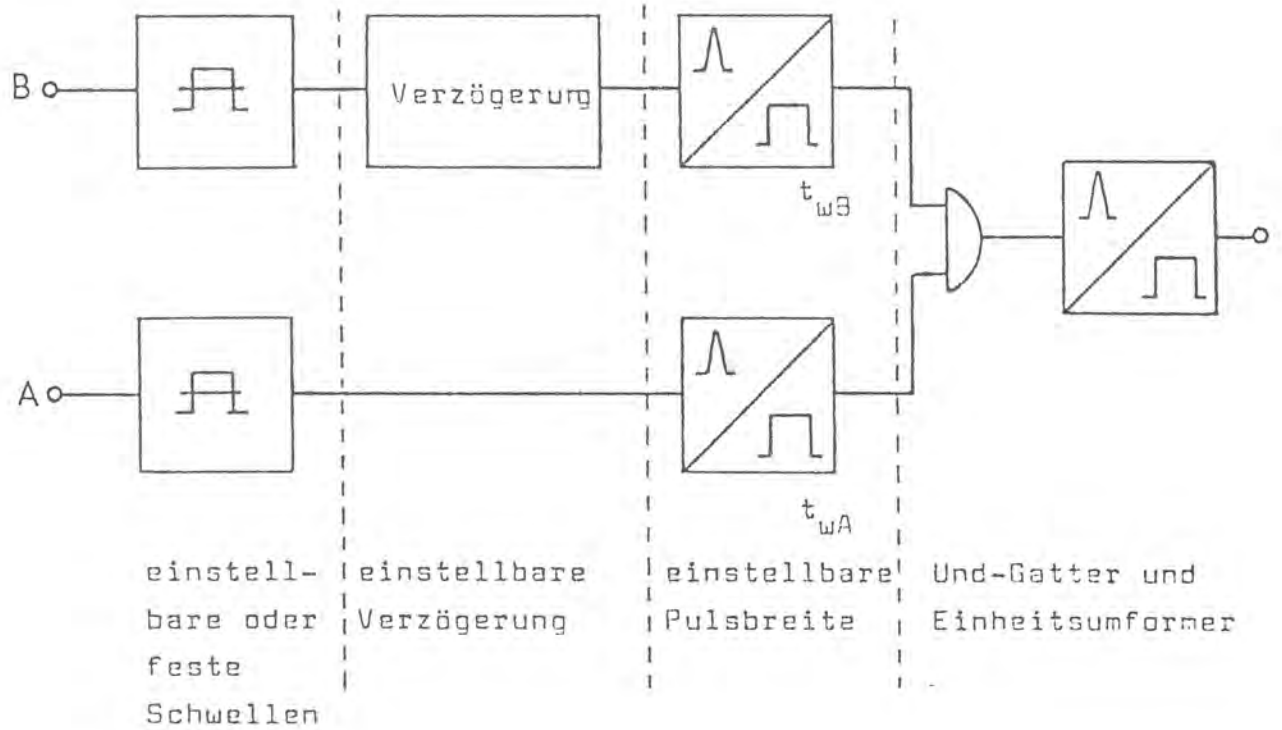


Bild 4.2.3.1-1: Prinzipieller Aufbau einer Koinzidenzanordnung

Auf den folgenden beiden Seiten sind zwei Signalverläufe abgebildet, die mit einer solchen Anordnung verarbeitet werden könnten.

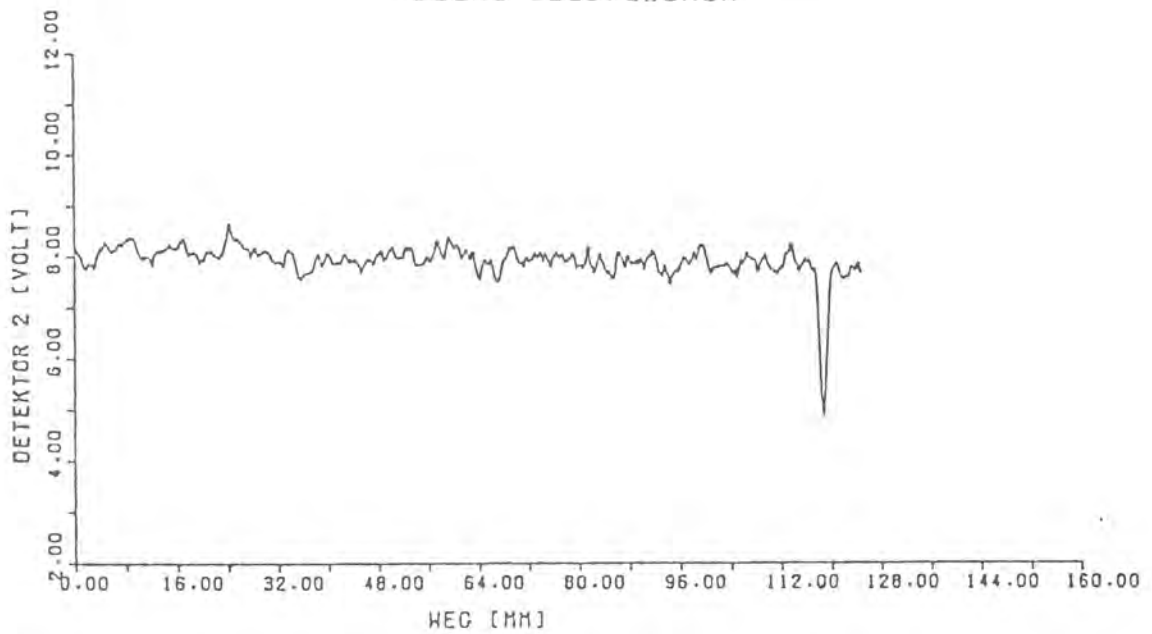
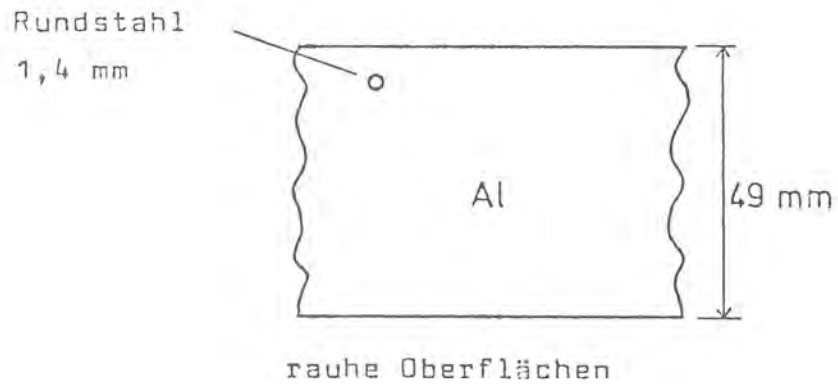
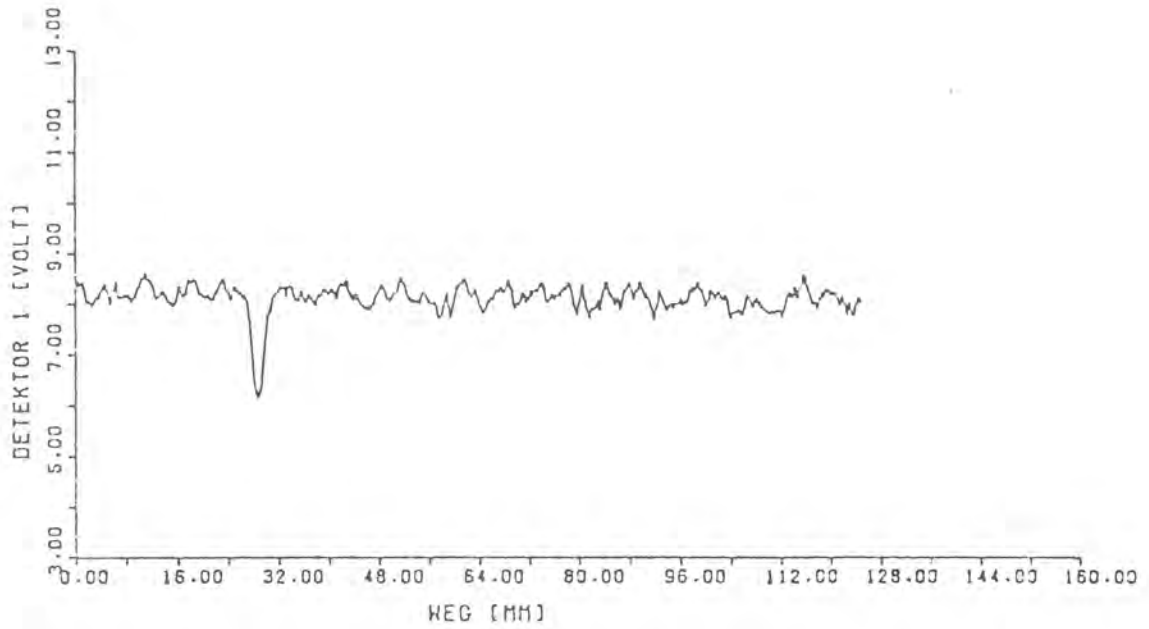


Bild 4.2.3.1-2: Signalverläufe zum Koinzidenzverfahren bei rauher Oberfläche

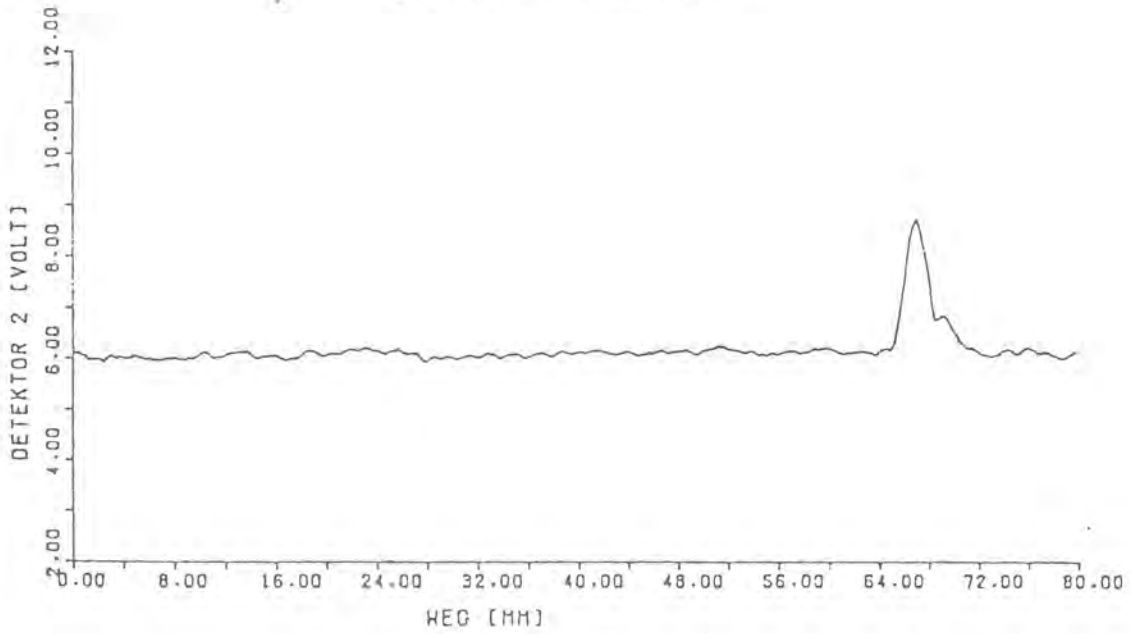
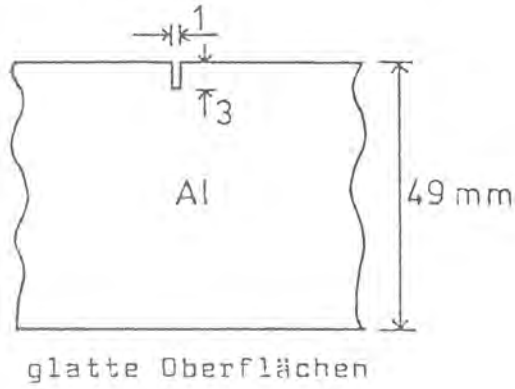
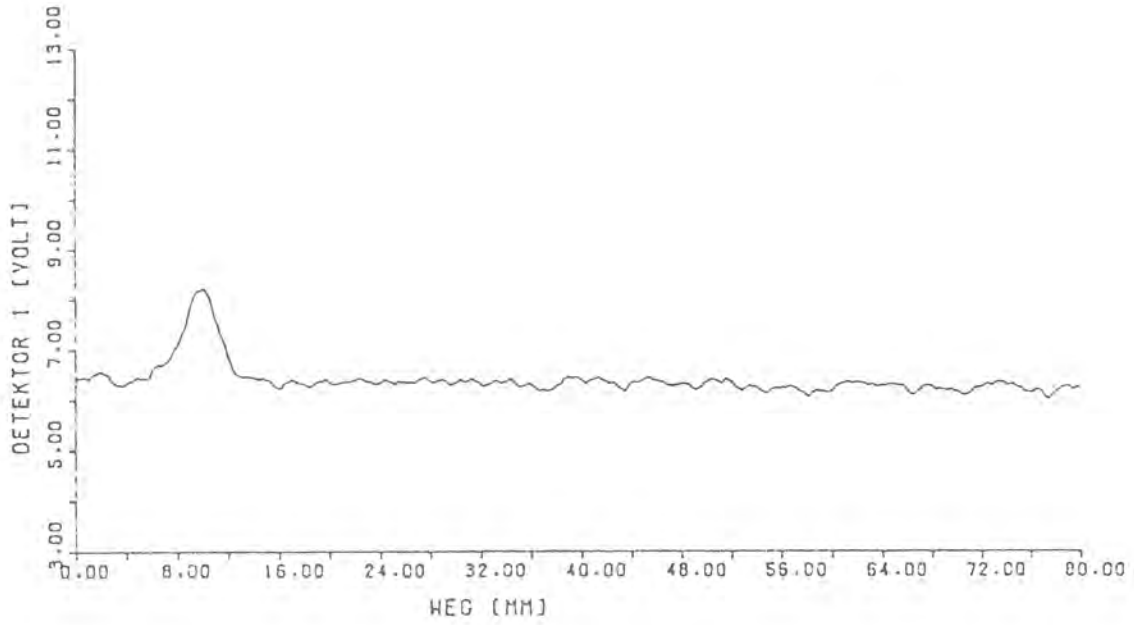


Bild 4.2.3.1-3: Signalverläufe zum Koinzidenzverfahren bei glatter Oberfläche

Die Verarbeitung der Detektorsignale in der Koinzidenzanordnung erfolgt auf folgende Weise:

Das Detektorsignal 1 wird mit Eingang B und das Detektorsignal 2 mit dem Eingang A verbunden. Überschreitet Detektorsignal 1 einen bestimmten Schwellwert, so liefert der Komparator einen Impuls. Dieser Impuls wird nun um die Zeit  $\Delta t$  verzögert. Die Verzögerungszeit setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

$$\Delta t = \frac{2 \tan \alpha}{v} \cdot y = \frac{\Delta x}{v}$$

- mit  $\alpha$  Winkel zwischen Röntgenstrahl und Normale  
 $v$  Geschwindigkeit, mit der das Prüfobjekt die Röntgenstrahlen passiert [mm/sec]  
 $y$  Abstand der zu untersuchenden Tiefenebene von der Strahlenquellenebene [mm]

Befindet sich ein Materialfehler in der zu untersuchenden Tiefenebene, so kreuzt dieser nach der Zeit  $\Delta t$  den Strahl zwischen Strahlenquelle und Detektor 2 und der Komparator des Eingangs A liefert einen Impuls. Über das Und-Gatter werden beide Komparatorsignale miteinander verknüpft. Liegen verzögerter Impuls B und Impuls A gleichzeitig vor, so erhält man am Ausgang eine Fehleranzeige (Impuls). Die dem Und-Gatter vorgeschalteten Impulsformer mit einstellbarer Pulsbreite dienen zum Ausgleich kleinerer Laufzeitunterschiede. Damit kann auch die nähere Umgebung der ausgewählten Tiefenebene mit in die Fehlerdetektion einbezogen werden. Zur gleichzeitigen Untersuchung verschiedener Tiefenebenen sind zusätzliche Verzögerungsglieder und Signalausgänge für die jeweilige Tiefenebene erforderlich.

#### 4.2.3.2 Korrelationsverfahren

Bei kleinen Fehlern und bei vorhandenen Störsignalen z. B. durch Oberflächenstrukturen bieten Korrelationsverfahren in

Verbindung mit anderen Signalverarbeitungsmethoden einen Lösungsweg.

Die Kreuzkorrelation ist ein Maß für die Ähnlichkeit zweier Signalfunktionen. Sie weist große Werte auf, wenn die beiden sich ähnlich sind und ist nahe Null, wenn dies nicht der Fall ist.

$$f_{R,B}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T A(t) \cdot B(t - \tau) dt$$

Die diskrete Form der Kreuzkorrelation lautet:

$$f_{R,B}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A(k \Delta t) \cdot B(k \Delta t - \tau)$$

mit N Anzahl der im zeitlichen Abstand  $\Delta t$  aufeinanderfolgender, die Funktionen A(t) und B(t) repräsentierenden Werte (Stützstellenzahl)

$\tau$  Verschiebungsparameter in Inkrementen  $\Delta \tau = \Delta t$

Um eine normierte Ausgabe zu erhalten, wird die normierte Kreuzkorrelation eingesetzt:

$$f'_{R,B}(\tau) = \frac{f_{R,B}(\tau)}{\sqrt{f_{R,R}(0) \cdot f_{B,B}(0)}} \quad (4.2.3.2-1)$$

$f_{R,R}$  Autokorrelation A(t) für die Verschiebung  $\tau = 0$   
 $f_{B,B}$  Autokorrelation B(t) für die Verschiebung  $\tau = 0$

Der Wertebereich dieser Funktion ist auf das Intervall  $\pm 1$  eingeschränkt. + 1 bedeutet volle konphasige Abhängigkeit. - 1 bedeutet volle, jedoch gegenphasige Abhängigkeit. Liegt der Wert  $\emptyset$  vor, so sind die beiden vorliegenden Signale im Mittel voneinander statistisch unabhängig.

Zur Bildung der Kreuzkorrelation der Signale A und B kann man direkt von der zeitlichen auf die örtliche Darstellungsweise übergehen, da sich das Prüfobjekt mit konstanter Geschwindigkeit v bewegt. Der Verschiebungsparameter läßt



sich bei bekanntem Öffnungswinkel der Strahlen A und B in die Abstandskoordinate  $y$  (Fehlertiefe) umrechnen.

Bild 4.2.3.2-1 zeigt ein Anwendungsbeispiel der Kreuzkorrelation. Als Testkörper diene eine Schweißnaht mit einem dahinterliegenden Rundstahl als Kontrollfehler. Deutlich treten zwei Maxima hervor. Die Schweißnahtraupe verursacht das erste Maximum, der Kontrollfehler das zweite. Um eine noch bessere Trennung zwischen Schweißnahtraupen- und Kontrollfehleranzeige zu erreichen, wurde ein erweiterter Korrelationsansatz hinzugezogen.

$$f_{A,B}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T A(t) \cdot B(t-\tau) \frac{1}{k + f(A(t) - B(t-\tau))} dt$$

Dieser Ansatz berücksichtigt nicht nur das Produkt, sondern auch die Differenz der jeweiligen Größen. Durch die Variable  $k$  läßt sich die Gewichtung der Differenz  $f[A(t) - B(t - \tau)]$  verändern. Als Funktion wurde  $f[A(t) - B(t - \tau)] = |A(t) - B(t - \tau)|$  gewählt. Diese gewichtete Kreuzkorrelation zeigt in einigen Fällen bessere Ergebnisse als die normale Kreuzkorrelation.

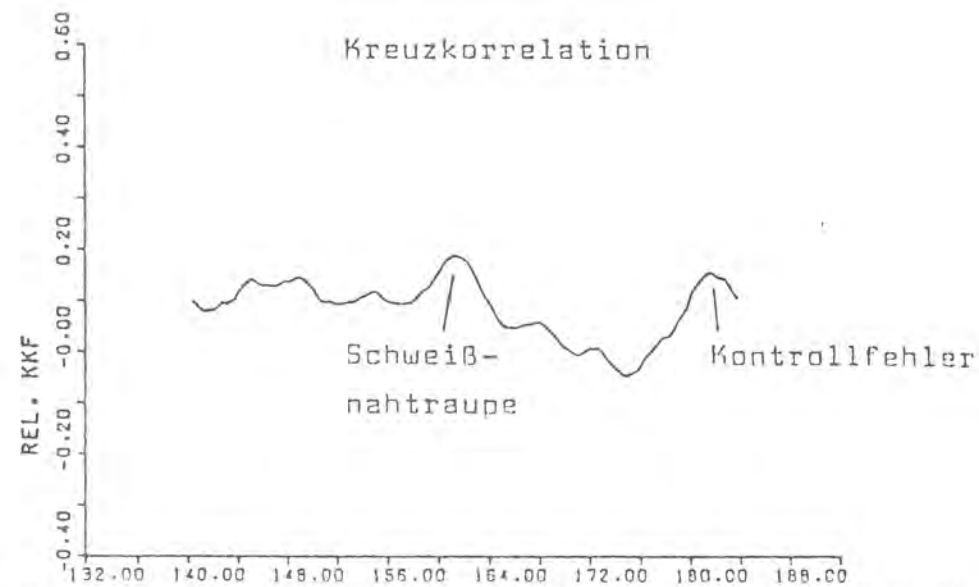
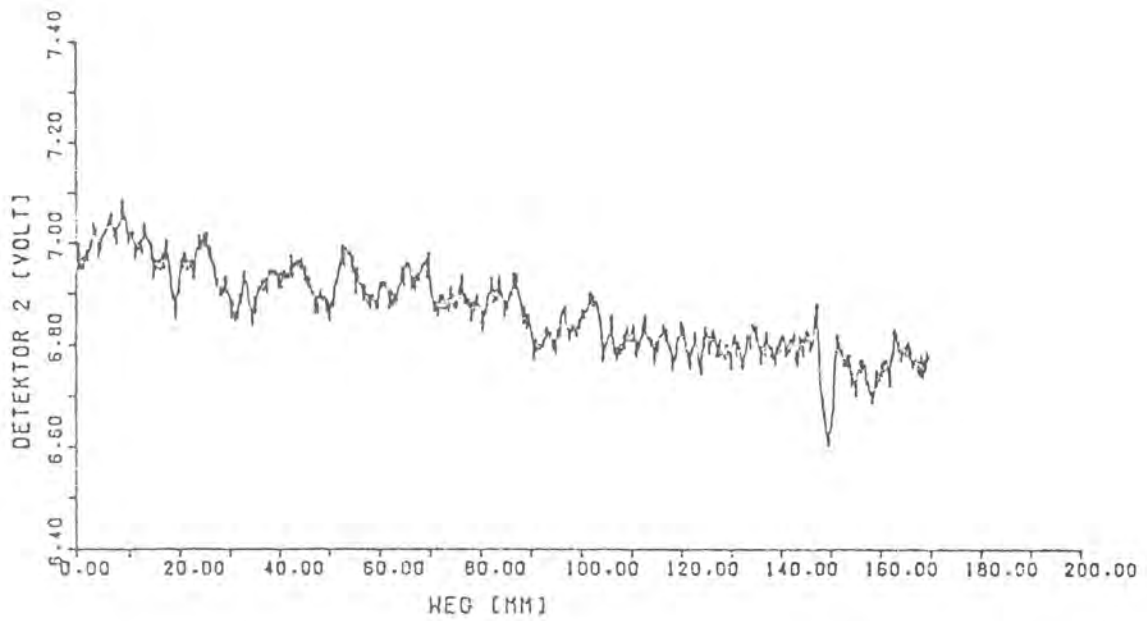
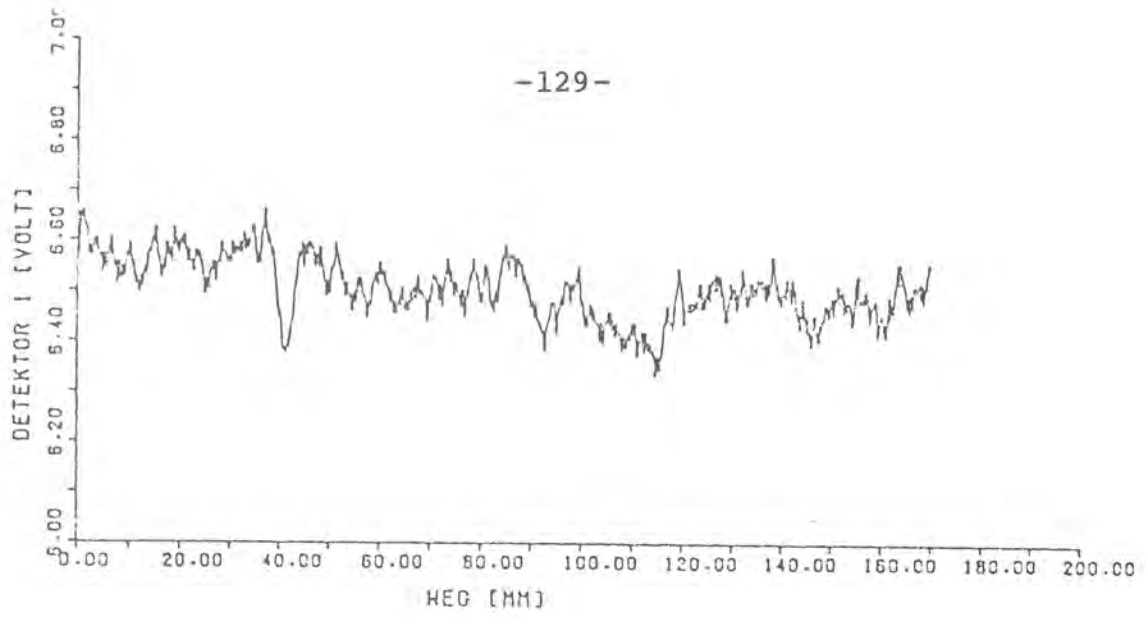


Bild 4.2.3.2-1: Kreuzkorrelation zweier Radiometriesignale

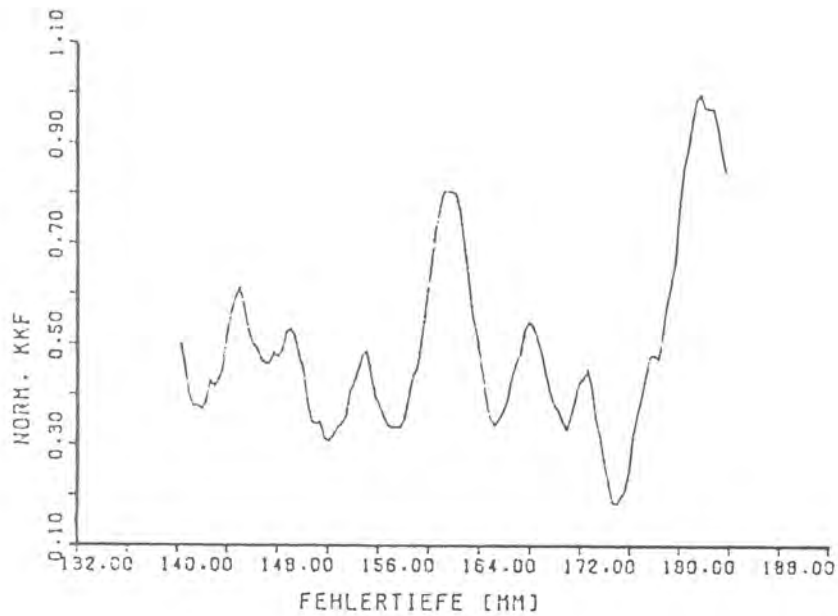


Bild 4.2.3.2-2: Gewichtete Kreuzkorrelation ( $k = 1$ )

Die Lage des Kontrollfehlers wird deutlich durch das absolute Maximum angezeigt. Das Nebenmaximum der Schweißnahttraupe und die anderen kleineren Nebenmaxima können zu Fehlinterpretationen führen. Damit diese Fehlanzeigen soweit wie möglich unterdrückt werden, ist eine Meßwertvorverarbeitung erforderlich.

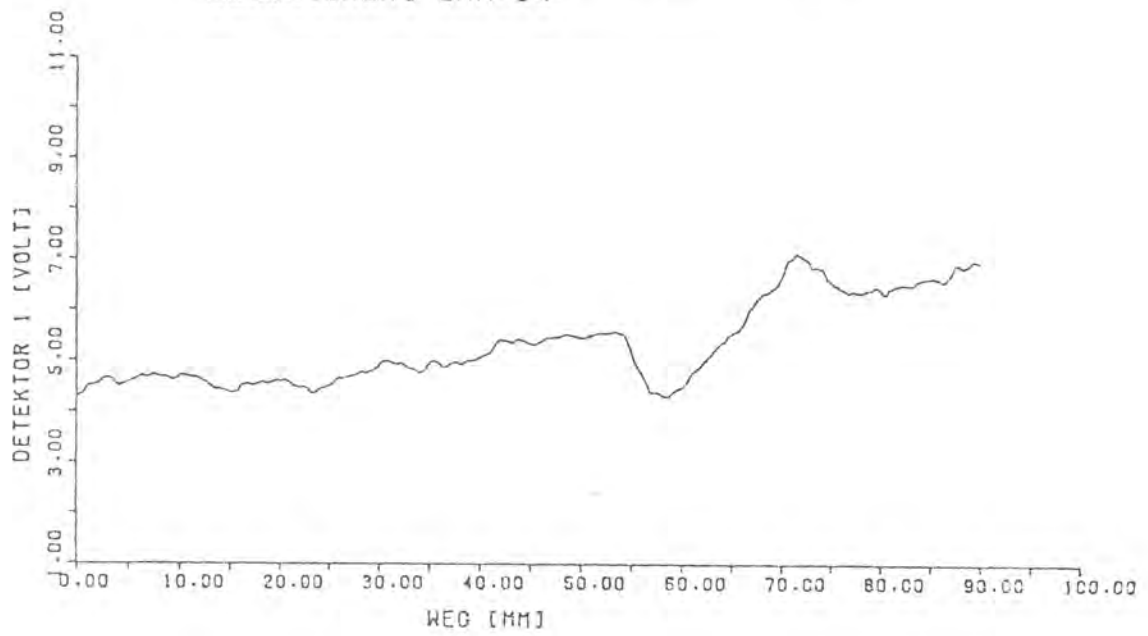
#### 4.2.3.3 Ausgleich durch eine Regressionsgerade

Ein keilförmiges Prüfobjekt verursacht z. B. einen linearen Anstieg der Signalfunktionen. Wird dieser lineare Trend nicht beseitigt, so kann es zu Verzerrungen der Korrelationsfunktion kommen.

Dieser Trend läßt sich mathematisch durch eine Regressionsgerade beschreiben:

$$Y = b_0 + b_1 X$$

Signalverlauf mit linearem Anstieg  
Schweißnaht BAM-34



linearer Anstieg durch eine Regressions-  
gerade beseitigt

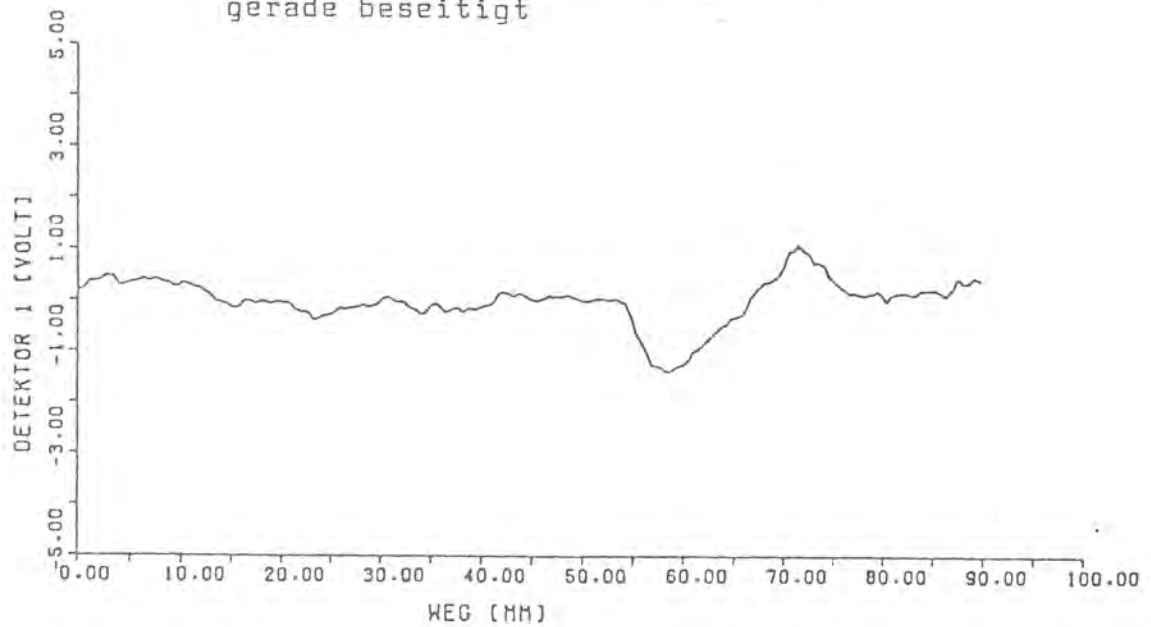


Bild 4.2.3.3-1: Korrektur eines Signalverlaufs durch Regression

Die unbekanntenen Größen berechnet man mit Hilfe der Gaußschen Methode der kleinsten Quadrate. Man fordert bei einer Stichprobe von N Wertepaaren (Weg  $x_i$ , Spannung  $u_i$ ) ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), daß

$$\sum_{i=1}^N (u_i - (b_0 + b_1 x_i))^2$$

ein Minimum wird. Aus dieser Forderung ergibt sich:

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(u_i - \bar{u})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i u_i - 1/N (\sum_{i=1}^N x_i) (\sum_{i=1}^N u_i)}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - 1/N (\sum_{i=1}^N x_i)^2}$$

$$b_0 = \bar{u} - b_1 \bar{x}$$

mit  $\bar{x}$ ,  $\bar{u}$  = arith. Mittelwerte

Die so ermittelte Funktion wird vom ursprünglichen Signalverlauf subtrahiert. Damit ist der Trend und auch der Offset beseitigt.

Die Methode der kleinsten Quadrate ist ein schnelles und einfaches Verfahren. Doch hat sich in einigen Fällen gezeigt, daß die Regressionsgerade als Ausgleichsverfahren nicht flexibel genug ist. Das Störsignal der Schweißnahtraupe kann beispielsweise nicht damit beseitigt werden. Die Wirkungsweise der ausgleichenden Regressionsgeraden ist in Bild 4.2.3.3-1 dargestellt.

#### 4.2.3.4 Ausgleich durch eine kubische Splinefunktion

Dieses Ausgleichsverfahren ist sehr anpassungsfähig und wirkungsvoll, aber leider sehr rechenintensiv und benötigt sehr viel Speicherplatz im Digitalrechner.

Die praktische Anwendung dieses Ausgleichsverfahrens sieht dann folgendermaßen aus: Materialfehler wie z. B. Schlackeneinschlüsse, Poren treten aus dem Grundsignal durch scharfkantige Peaks hervor. Das Grundsignal wird beispielsweise durch die Schweißnahttraupe verursacht. Ziel des Ausgleichsverfahrens ist es, Peaks und Grundsignal voneinander zu trennen. Dazu wird eine ausgleichende Splinefunktion mit verschiedenen Gewichtungen  $p$  vom Originalsignal berechnet und von diesem subtrahiert. Der große Vorteil dieses Verfahrens ist die flexible Anpassung der Splinefunktion an das zu eliminierende Grundsignal durch eine geschickte Wahl der Konstanten  $p$ .

Das folgende Bild 4.2.3.4-1 demonstriert die Wirkung verschiedener Werte für die Konstante  $p$ . Dargestellt wird jeweils die berechnete kubische Splinefunktion. Bild 4.2.3.4-2 zeigt einen Vergleich der beiden Ausgleichsverfahren. Man erkennt deutlich, daß bei einem komplizierteren Grundsignalverlauf (nicht linear) die Regressionsgerade als Ausgleichsverfahren nicht mehr anwendbar ist.

Eine Alternative zur ausgleichenden kubischen Splinefunktion bietet mit Einschränkungen eine digitale Hochpaßfilterung. Vorteilhaft wäre in diesem Fall ein verringerter Speicherplatzbedarf und eine kürzere Rechenzeit. Doch zwei entscheidende Nachteile ließen eine Implementierung nicht sinnvoll erscheinen:

- a) Sind in dem Grundsignal Frequenzanteile enthalten, deren Periodendauer länger als die gesamte Abtastzeit ist, so können diese Anteile nicht durch eine digitale Hochpaßfilterung beseitigt werden. In diesem Fall helfen nur Ausgleichsverfahren weiter.
- b) Die digitale Filterung ist nicht so flexibel anwendbar wie die ausgleichende Splinefunktion.

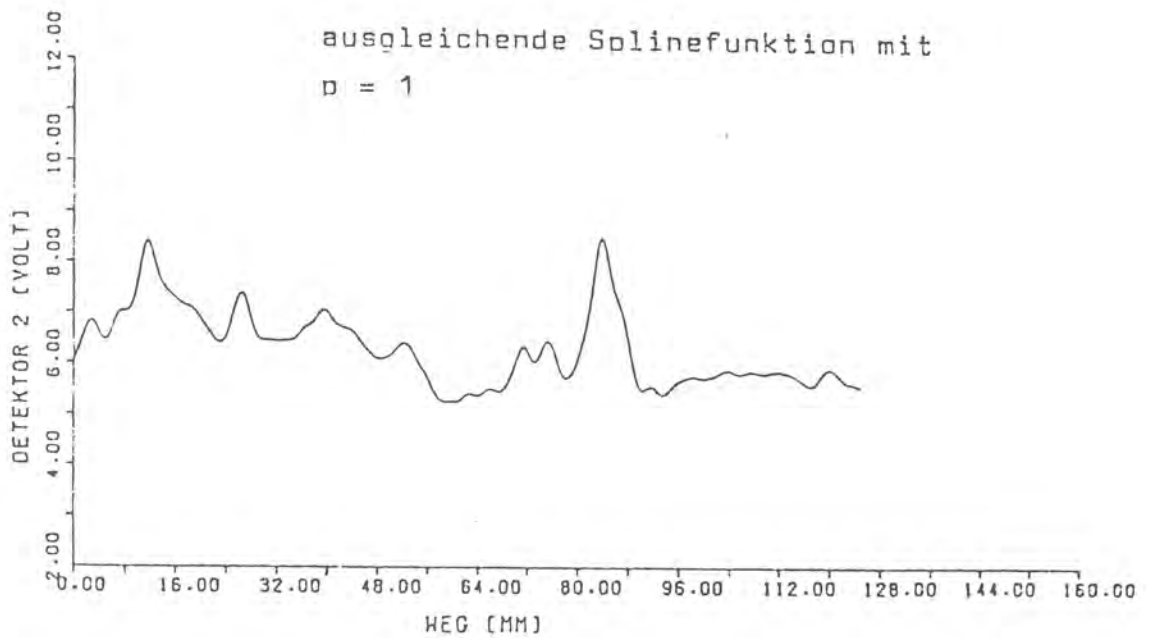
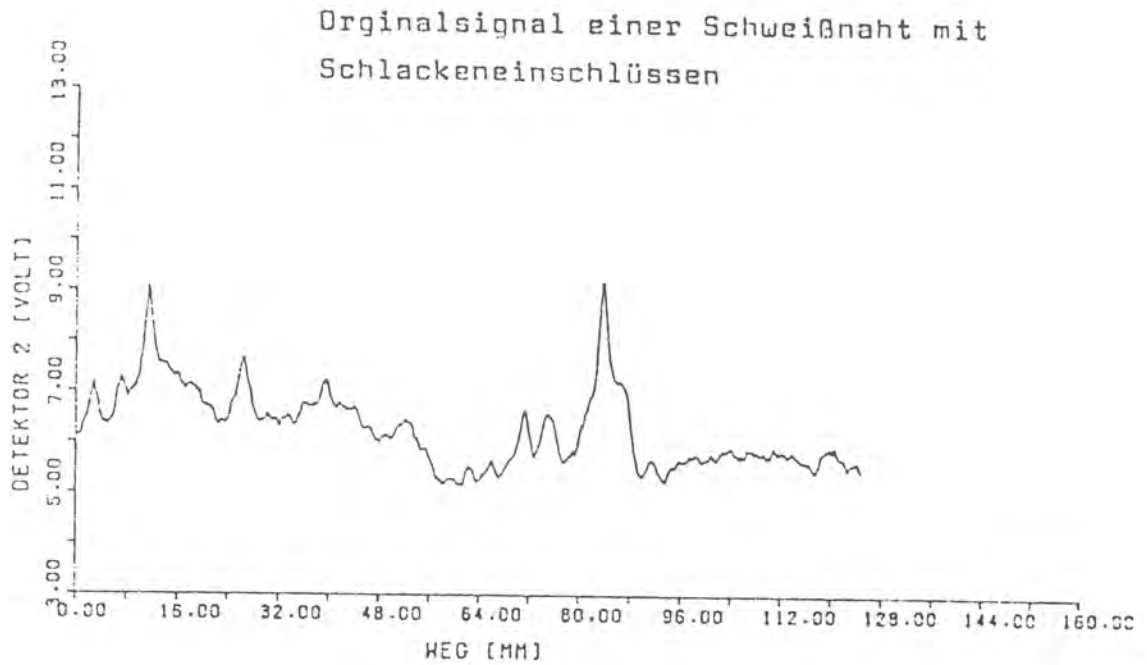
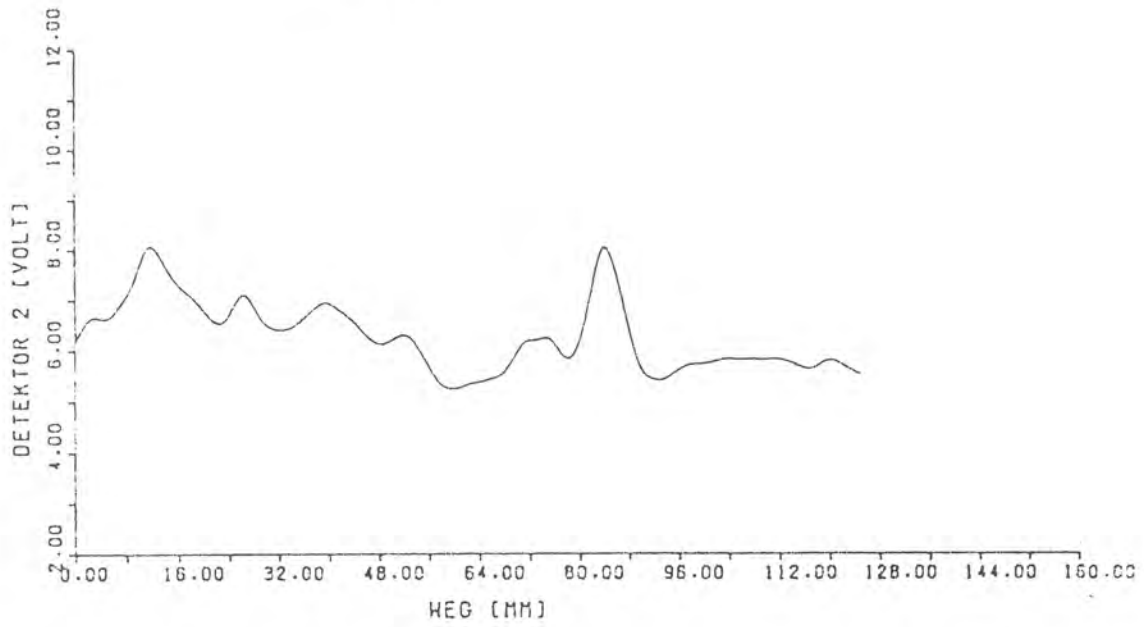
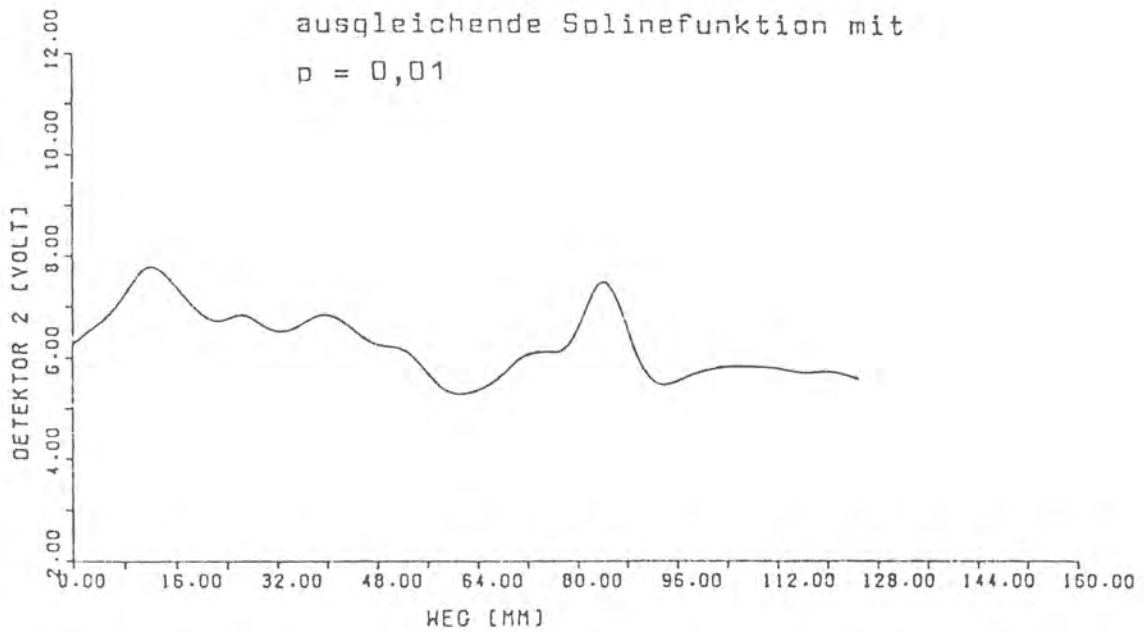


Bild 4.2.3.4-1: Originalsignal einer Schweißnaht mit  
Schlackeneinschlüssen und verschiedene aus-  
gleichende Splinefunktionen

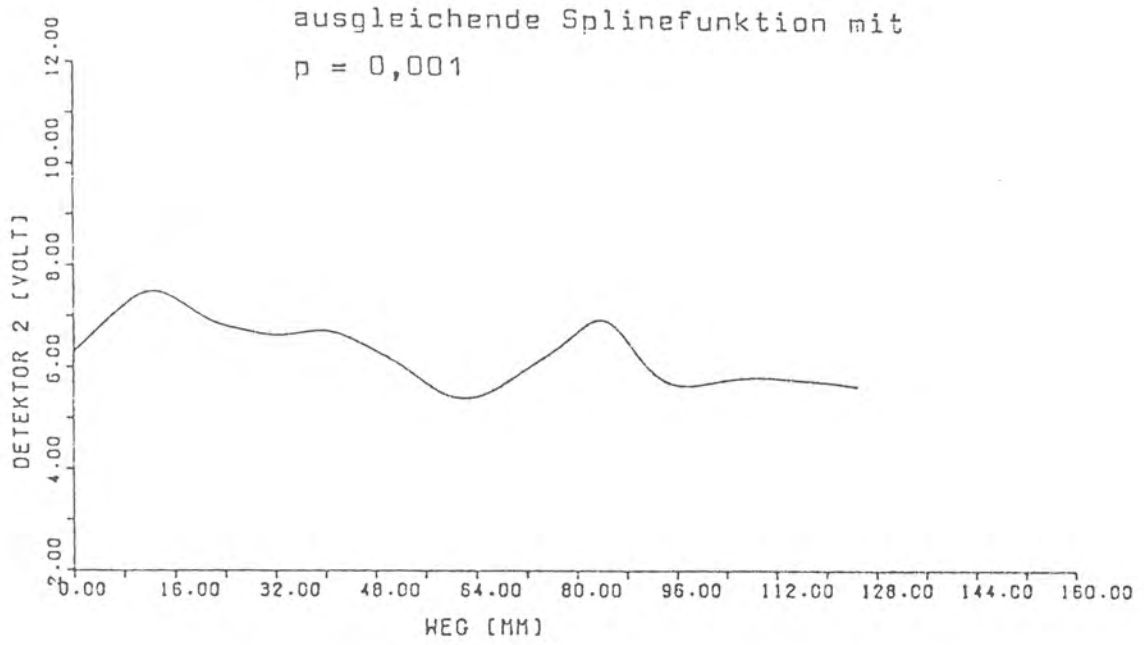
ausgleichende Splinefunktion mit  
 $p = 0,1$

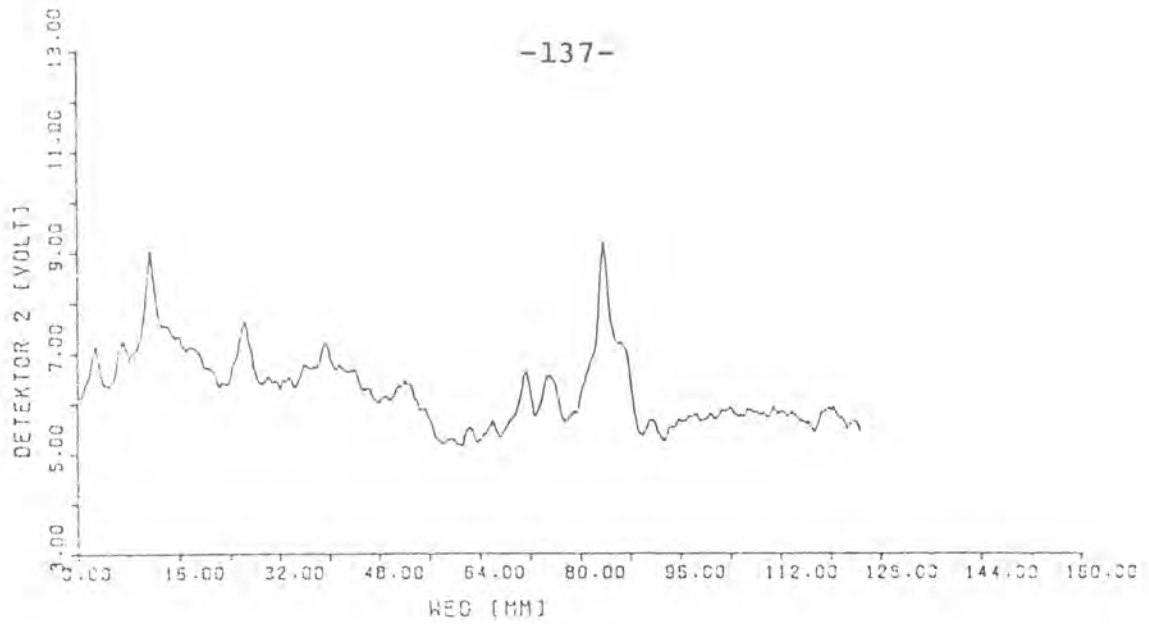


ausgleichende Splinefunktion mit  
 $p = 0,01$









Ausgleich durch eine Regressionsgerade



Ausgleich durch eine Splinefunktion mit  
 $p = 0,005$

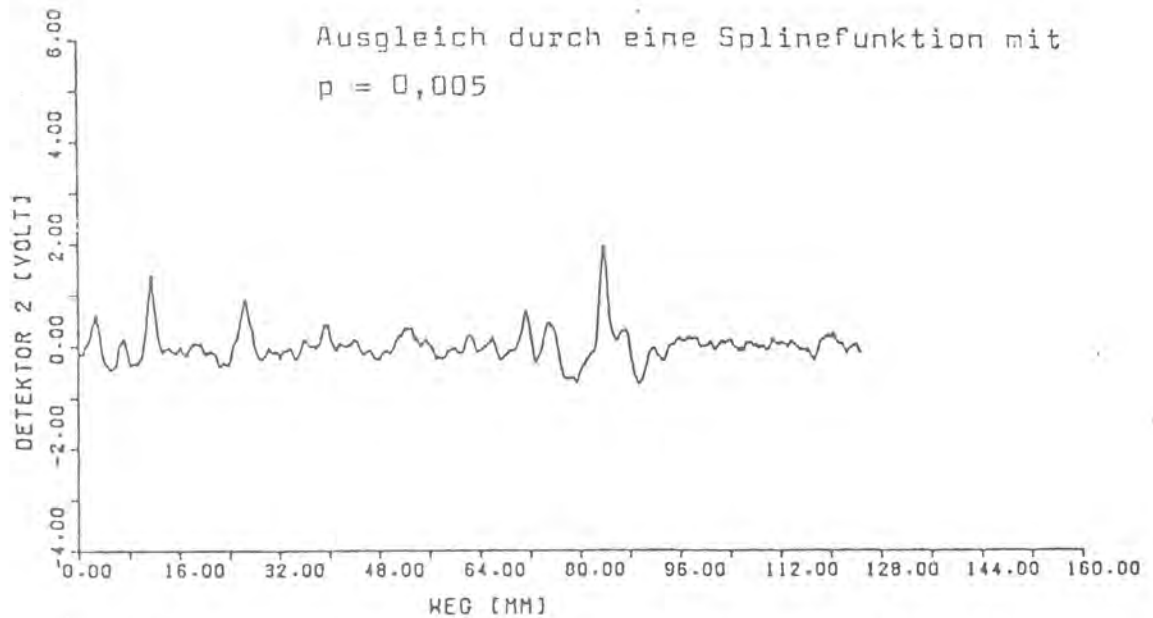


Bild 4.2.3.4-2: Vergleich von Regression und Splinefunktion

#### 4.2.4 Software

##### 4.2.4.1 Problemanalyse

Die beiden Detektorsignale liegen als analoges Ausgangssignal der Anpaßschaltung vor. Zur weiteren Verarbeitung müssen sie mit Hilfe des Meßdatenerfassungssystems digitalisiert werden. Für Dokumentationszwecke ist eine Speicherung der Meßdaten auf Magnetplatte erforderlich. Verschiedene Algorithmen zur digitalen Signalverarbeitung sollen dem Anwender in interaktiver Form zur Verfügung stehen. Für die graphische Ausgabe von Meßdaten und Ergebnissen ist ein Plotter vorgesehen.

##### 4.2.4.2 Leistungen des Programmsystems

- schnelle Analog-Digital-Wandlung mit Hilfe des DEV-8-Systems
- Speicherung der Meßdaten auf Magnetplatte
- Lesen der Meßdaten von der Platte
- Algorithmen zur digitalen Signalverarbeitung:
  - Berechnung der relativen Kreuzkorrelation und der normierten gewichteten Kreuzkorrelation,
  - Ermittlung einer ausgleichenden Splinefunktion und Ausgleich durchführen,
  - digitale Tiefpaßfilterung ausführen,
  - Schwellwert berechnen und Schwellwertsegmentierung durchführen,
  - linearen Trend und Offset ermitteln und ausgleichen
- graphische Ausgabe auf Plotter steuern
- interaktiv mit dem Anwender kommunizieren
- Fehler erkennen und behandeln
- Programmverwaltung vornehmen

#### 4.2.4.3 Programmbeschreibung

Das gesamte Programmsystem ist mit Ausnahme des Assemblerprogramms zur schnellen Analog-Digital-Wandlung in der Programmiersprache Fortran-4X geschrieben. Diese höhere Programmiersprache ist eine firmenspezifische Weiterentwicklung der Firma Hewlett-Packard aus dem Standard-Fortran 77. Programme, die in Standard-Fortran geschrieben sind, sind voll kompatibel mit Fortran-4X-Programmen.

Schematischer Aufbau des Programmsystems:

Das Programmsystem gliedert sich in drei Hauptprogramme mit unterschiedlichen Schwerpunktaufgaben:

##### **Programm XAUF**

- Meßdatenerfassung mit dem DEV-8-System
- Speicherung der Meßdaten in ein File auf der Wechselplatte
- Start des Hauptprogramms XVER

##### **Programm XVER**

- Lesen der Meßdaten aus einem File von der Wechselplatte
- Digitale Signalverarbeitung der Meßdaten mit verschiedenen Algorithmen
- Start des Hauptprogramms XBILD

##### **Programm XBILD**

- Graphische Ausgabe der Meßwerte und Ergebnisse auf dem Plotter

Alle drei Hauptprogramme sind in Menuetechnik aufgebaut, d.h. der Anwender wählt aus einer Liste von Unterprogrammen das gewünschte Programm aus und startet dieses durch Eingabe der zugehörigen Programmnummer. Zusätzliche Informationen, die zu weiteren Bearbeitungen erforderlich sind, werden im Dialogbetrieb abgefragt.

Der Gesamtstart des Programmsystems geschieht durch Starten des Hauptprogramms XAUF. Aus diesem Programm heraus kann durch einen Start-Befehl das Hauptprogramm XVER gestartet werden. Entsprechendes gilt für das Hauptprogramm XBILD, das von XVER aufgerufen werden kann. Der Start eines Hauptprogramms aus einem anderen Hauptprogramm heraus erfolgt über einen vom jeweiligen Betriebssystem abhängenden Start-Befehl (Exec-Kommando). Voraussetzung ist, daß sich das zu startende Programm im Dormant-Zustand befindet. Nach dem erfolgreichen Start geht das den Start-Befehl ausführende Hauptprogramm in den Wait-Zustand, d.h. es wartet mit seinem weiteren Programmablauf so lange, bis das gestartete Programm beendet ist.

Zwischen den einzelnen Hauptprogrammen werden keine Parameter übergeben. Lediglich zwischen den Hauptprogrammen XVER und XBILD erfolgt eine indirekte Datenübergabe, indem die zur graphischen Ausgabe bestimmten Meßdaten auf einem temporären Plattenfile zwischengespeichert werden.

Die Compilervereinbarungen über externen Plattenzugriff und erweiterten Speicherbereich müssen vor Beginn des jeweiligen Hauptprogramms stehen.

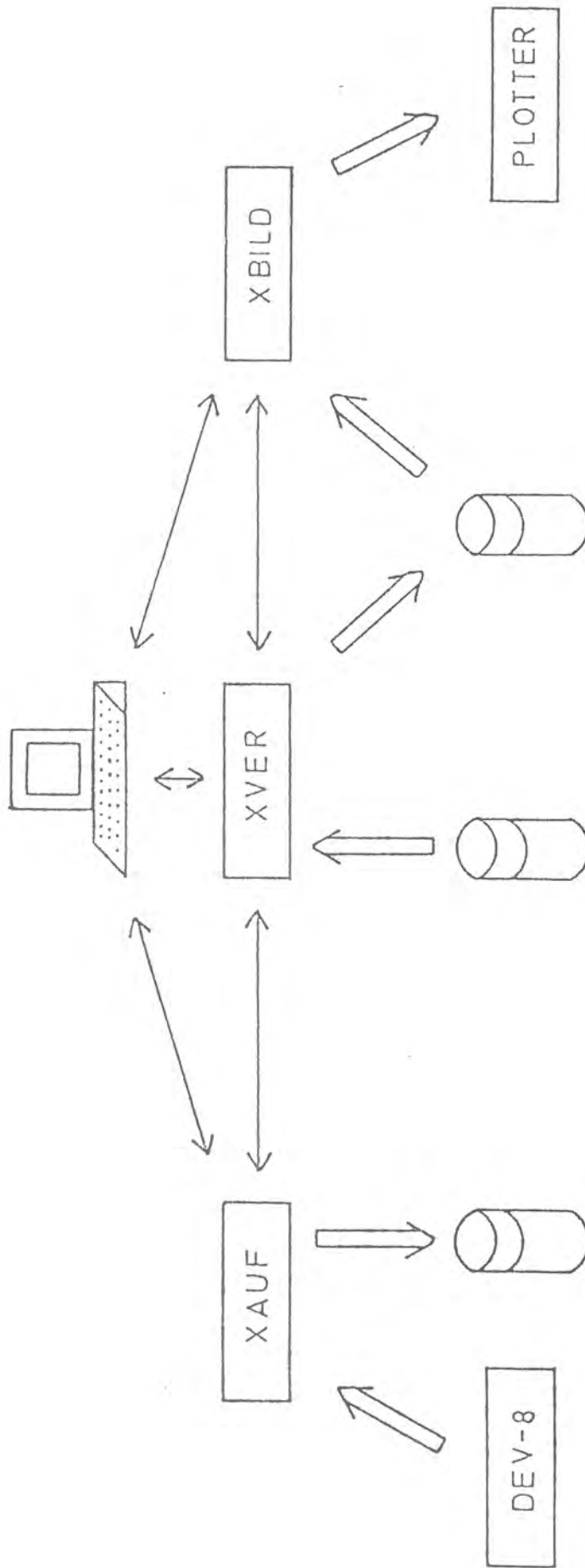


Bild 4.2.4.3-1: Aufbau des Programmsystems

Beschreibung der einzelnen Programmabschnitte:

#### Hauptprogramm XAUF

Das Hauptprogramm verwaltet die Unterprogramme zur Meßdatenerfassung und zur Speicherung der Daten auf der Wechselplatte.

#### Unterprogramm ADW

Das Unterprogramm initialisiert das DEV-8-System mit Hilfe der DEV-Software, liest verschiedene Parameter ein, berechnet die erforderliche Anzahl von Abtastungen und ruft dann das Unterprogramm INADC auf.

#### Unterprogramm INADC

Da die DEV-Software für eine schnelle A/D-Wandlung nicht ausreicht ( $f_{ab} \leq 100$  Hz bei zwei analogen Kanälen), ist dieses Programm in Assembler geschrieben. Damit sind Abtastfrequenzen bis 3 kHz möglich. Das Assemblerprogramm übernimmt die gesamte Kommunikation mit dem DEV-System. Um eine ungestörte Meßwerterfassung zu gewährleisten, wird das Interruptsystem des Prozeßrechners abgeschaltet.

#### Unterprogramm XWRFI

Das Unterprogramm richtet ein Datenfile auf der Wechselplatte mit einem vom Anwender vorgegebenen Namen ein und kopiert die Meßwerte. Das Datenfile hat den Typ 4 und ist damit bei Bedarf vom Anwender direkt lesbar (ASCII) und mit Hilfe des Editors bearbeitbar.

In allen Hauptprogrammen werden die Variablen per Referenz übergeben.

#### Hauptprogramm XVER

Dieser Teil des Programmsystems bereitet die Meßdaten nach vom Anwender ausgewählten Algorithmen auf. Dazu stehen folgende Unterprogramme zur Verfügung:

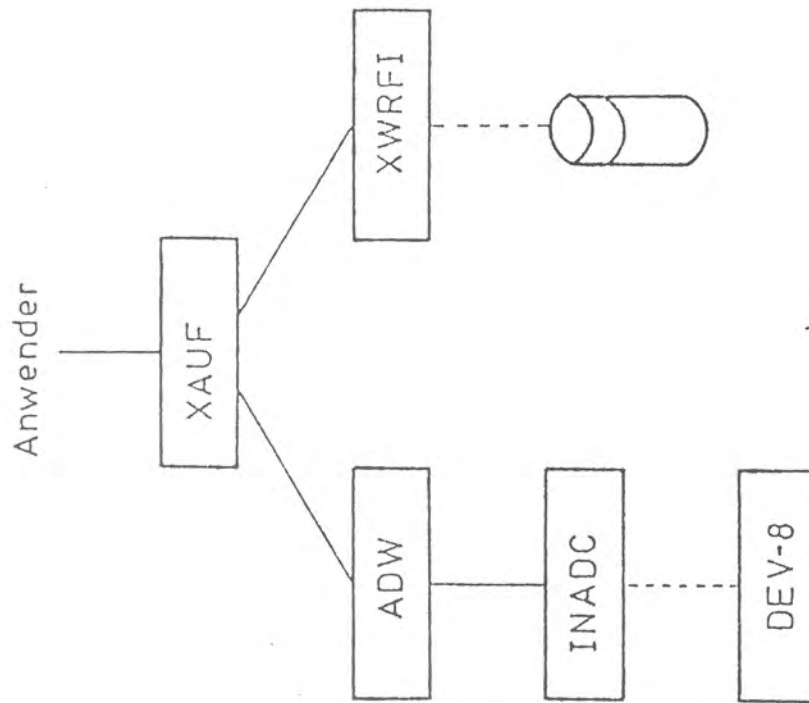


Bild 4.2.4.3-2: Aufbau des Hauptprogramms XAUF



#### Unterprogramm XREFI

Das Unterprogramm liest die Meßdaten aus einem vom Anwender angegebenen Datenfile von der Wechselplatte. Zur Lokalisation genügt der Dateiname. Die Filegröße und damit die Anzahl der Meßdaten ermittelt das Unterprogramm.

#### Unterprogramm TIEFP

In diesem Abschnitt erfolgt die digitale Tiefpaßfilterung eines Signals. Das Filter besteht aus 3 Filterabschnitten. Die Berechnung der Filterkoeffizienten erfolgt durch das Unterprogramm LPDES. Die Zwischensignalwerte  $F(4,3)$  sind wie folgt belegt:

$F(1,3)$  = Eingang Filterabschnitt 1 = aktuell. Wert Signal (I)  
 $F(1,2)$  = vorheriger Wert von  $F(1,3)$   
 $F(1,1)$  = vorheriger Wert von  $F(1,2)$   
 $F(2,3)$  = Eingang Filterabschnitt 2  
 $F(2,2)$  = vorheriger Wert von  $F(2,3)$   
 $F(2,1)$  = vorheriger Wert von  $F(2,2)$   
 $F(3,3)$  = Eingang Filterabschnitt 3  
 $F(3,2)$  = vorheriger Wert von  $F(3,3)$   
 $F(3,1)$  = vorheriger Wert von  $F(3,2)$   
 $F(4,3)$  = Ausgang Filterabschnitt 3 = gefilterter Wert Signal (I)  
 $F(4,2)$  = vorheriger Wert von  $F(4,3)$   
 $F(4,1)$  = vorheriger Wert von  $F(4,2)$

#### Unterprogramm OFFST

Das Unterprogramm ermittelt den linearen Trend (Steigung) und Offset (Achsenabschnitt) in einem Signalverlauf. Dies geschieht nach der Gaußschen Methode der kleinsten gefundenen Quadrate. Am Ende des Unterprogramms wird die gefundene Gerade vom Signalverlauf subtrahiert.

#### Unterprogramm EMITL

Ein Datenfeld (Signalverlauf) wird in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung exponentiell gemittelt.

#### **Unterprogramm RKKF**

Das Unterprogramm berechnet die relative Kreuzkorrelation zwischen zwei Signalen. Das dazugehörige Unterprogramm KKF ermittelt je nach Parameterübergabe sowohl die Kreuz- als auch die Autokorrelation für vorgegebene Verschiebungsparameter.

#### **Unterprogramm SCHWE**

Der Programmteil rechnet Mittelwert und Standardabweichung eines Datenfeldes aus. Standardabweichung multipliziert mit einem vom Anwender vorgegebenen Faktor ergibt die Schwelle. Alle Daten, die im Bereich Mittelwert  $\pm$  Schwelle liegen, erhalten als neuen Wert den Mittelwert. Nichtbetroffene Werte bleiben erhalten.

#### **Unterprogramm KUBSP**

Das Unterprogramm subtrahiert die vom Unterprogramm SPLIN berechnete ausgleichende kubische Splinefunktion von dem ursprünglichen Signalverlauf. Die umfangreichen Hilfsdatenfelder sind aus Speicherplatzgründen im erweiterten Speicherbereich des Prozeßrechners (Extended Memory Area EMA) positioniert. Die berechnete ausgleichende Splinefunktion ist im Datenfeld D abgelegt.

#### **Unterprogramm ROKKF**

Die Kreuzkorrelation zwischen zwei Signalen wird nach einer erweiterten mathematischen Beziehung von R. Oelmayer gebildet und anschließend normiert.

Bei Eingabe des Befehls zur graphischen Ausgabe von Daten werden diese auf ein temporäres Plattenfile zwischengespeichert und nachfolgend das Hauptprogramm XBILD per Start-Befehl gestartet.

#### **Hauptprogramm XBILD**

Der letzte Teil des Programmsystems sorgt für die graphische Ausgabe der Daten. Nach Programmstart wird zuerst das tempo-

räre Plattenfile gelesen und anschließend gelöscht. Für die Ausgabe eines Kurvenzuges auf dem Plotter existiert das Unterprogramm BILD.

**Unterprogramm BILD**

Unter Verwendung der Plottersoftware zeichnet das Programm einen Kurvenverlauf einschließlich der Koordinatenachsen und beschriftet bei Bedarf die Zeichnung. Dazu erforderliche Parameter und Texte werden im Dialog eingelesen. Die erforderliche Datenaufbereitung (z. B. Skalieren, Zwischenpunkte berechnen usw.) erfolgen mittels der Plottersoftware. Aus diesem Grund müssen die beiden den Meßdaten folgenden Datenfeldplätze für diese Routinen freigehalten werden. Deshalb können nur maximal 1022 Meßdaten abgetastet werden.

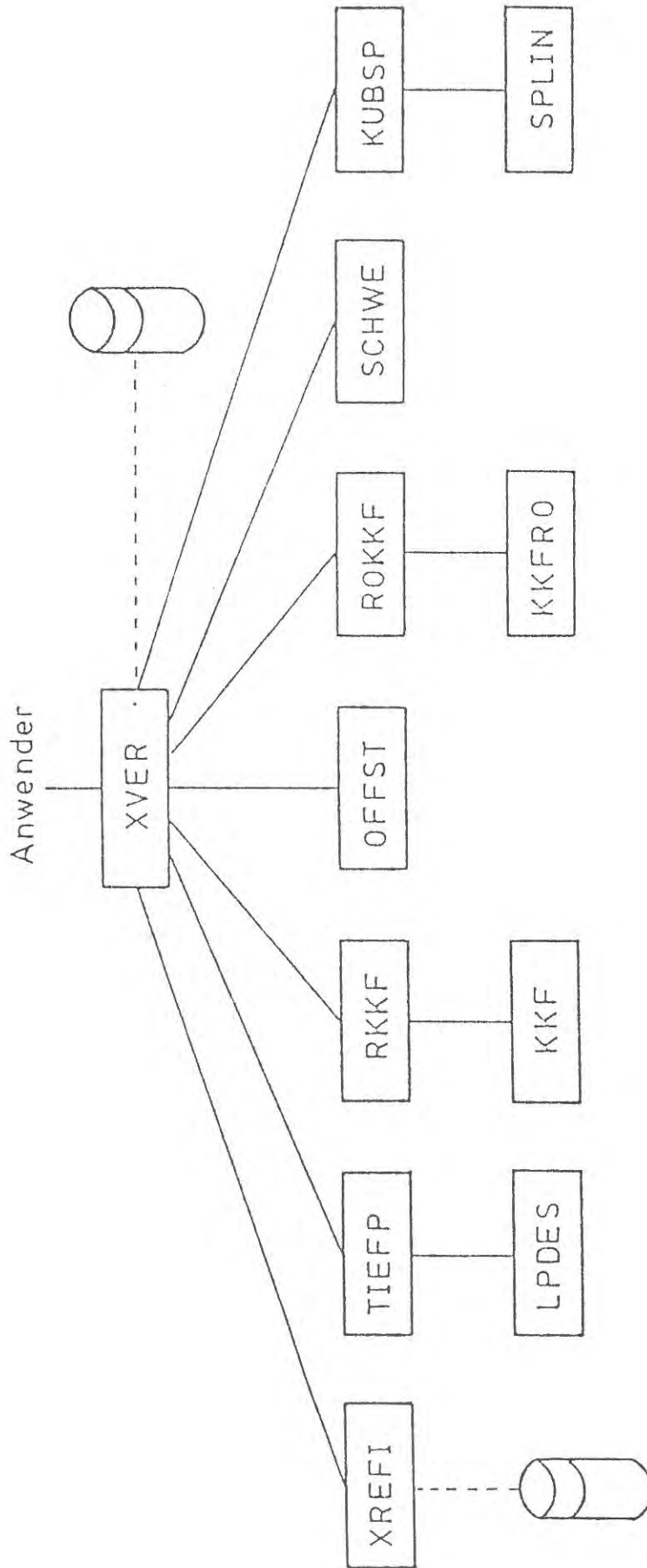


Bild 4.2.4.3-3: Aufbau des Hauptprogramms XVER

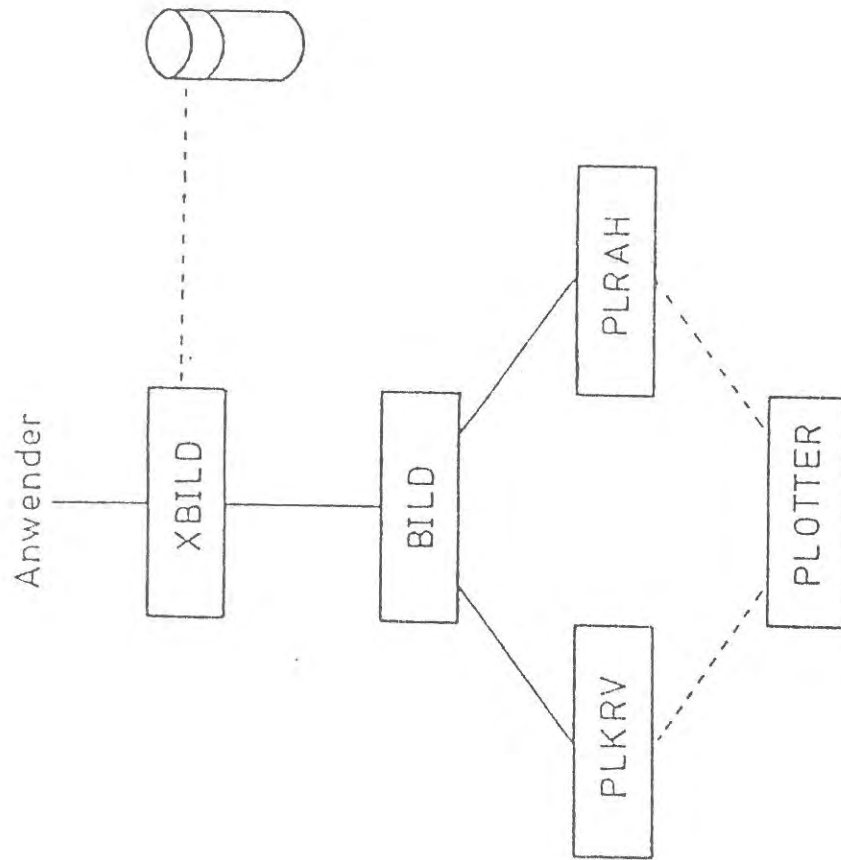


Bild 4.2.4.3-4: Aufbau des Hauptprogramms XBILD

### 4.3 Funkenerosion

Bei dem Aufbau von Vorrichtungen zur Funkenerosion für den vorgesehenen Zweck war eine Reihe besonderer Anforderungen zu beachten:

- Die Auswahl geeigneter Werkstoffe für die Werkzeugelektroden. Hierbei ist es wichtig, Materialien zu finden, die einen geringen Verschleiß zeigen und gleichzeitig so bearbeitbar sein müssen, daß feinste Elektroden daraus hergestellt werden können.
- Die Größe des Arbeitsspalt  $a$  und die Breite  $B$  der Schlitze sollten im  $\mu\text{m}$ -Bereich liegen. Daher muß die Anordnung eine hohe mechanische Stabilität aufweisen. Außerdem ist ein hinreichend kontinuierlicher Vorschub erforderlich. Sprünge sollten mindestens um eine Größenordnung kleiner sein als der Abstand zwischen den Elektroden.
- Ein optimaler Vorschub der WZE muß gewährleistet sein. Ein zu schneller Vorschub führt zu Kurzschlüssen zwischen den Elektroden, ein wesentlich zu langsamer liefert wegen der unvermeidbaren mechanischen Driften ein schlechtes Arbeitsergebnis. Die Breite eines Schlitzes liegt dann wesentlich über den zu erwartenden Werten.

Weitere Betriebsbedingungen sind weniger kritisch. So ergibt z. B. die Forderung nach einem möglichst kleinen Arbeitsspalt, daß die Generatorspannung und die Entladungsenergie klein sein müssen. Die Betriebsparameter des Entladekreises nehmen dann solche Werte an, daß die Rauhtiefe als Maß für die Oberflächengüte bereits sehr gering ist. Auch die Breite der im Werkstoff beeinflussten Randzone - durch die thermische Belastung tritt eine Veränderung des Gefüges auf - wird klein gegen die Abmessungen des Schlitzes.

Im Arbeitsspalt sammeln sich infolge der Entladungen Abtragsprodukte an. Dabei handelt es sich um feinste metallische Partikel und um Crack-Produkte der als Dielektrikum verwen-

deten organischen Flüssigkeit, in diesem Fall Testbenzin. Diese müssen wegen ihrer elektrischen Leitfähigkeit weitgehend entfernt werden, weil es sonst zu Störungen im Bearbeitungsablauf kommt. Häufige Kurzschlüsse und eine unerwünschte zusätzliche Vergrößerung des Arbeitsspalt es wären die Folge. Geeignete Bewegungen der Werkzeugelektrode und eine Spülung reichen hier i. allg. aus.

Für die Funkenerosions-Anlage (Bild 4.3-1) wurde als mechanischer Schwinger ein Piezo-Kristall mit einem maximalen Hub von 40  $\mu\text{m}$  verwendet, der bei 30 - 100 Hz betrieben wird. Der Vorschub der WZE wird mit einem Schrittmotor durchgeführt. Die Betriebsspannung beträgt 60 - 120 V mit einer RC-Zeitkonstanten von 20 kHz bis 1 MHz.

Die elektronische Steuerung der Anlage bewirkt im Normalbetrieb den Vorschub der WZE bis zu einer vorgewählten Tiefe. Bei Auftreten von Elektroden-Kurzschlüssen fährt die WZE zurück, bis der Kurzschluß behoben ist, und fährt dann bis in die Nähe des Kurzschlußpunktes im Schnellgang vor. Anschließend wird im Normalgang weitererodiert.

Mit dieser elektronischen Steuerung ist es möglich, die Maschine unbeaufsichtigt zu betreiben. Bei tiefen Schlitzten kann sich allerdings die Erosionsdauer wegen häufiger Kurzschlüsse erheblich verlängern.

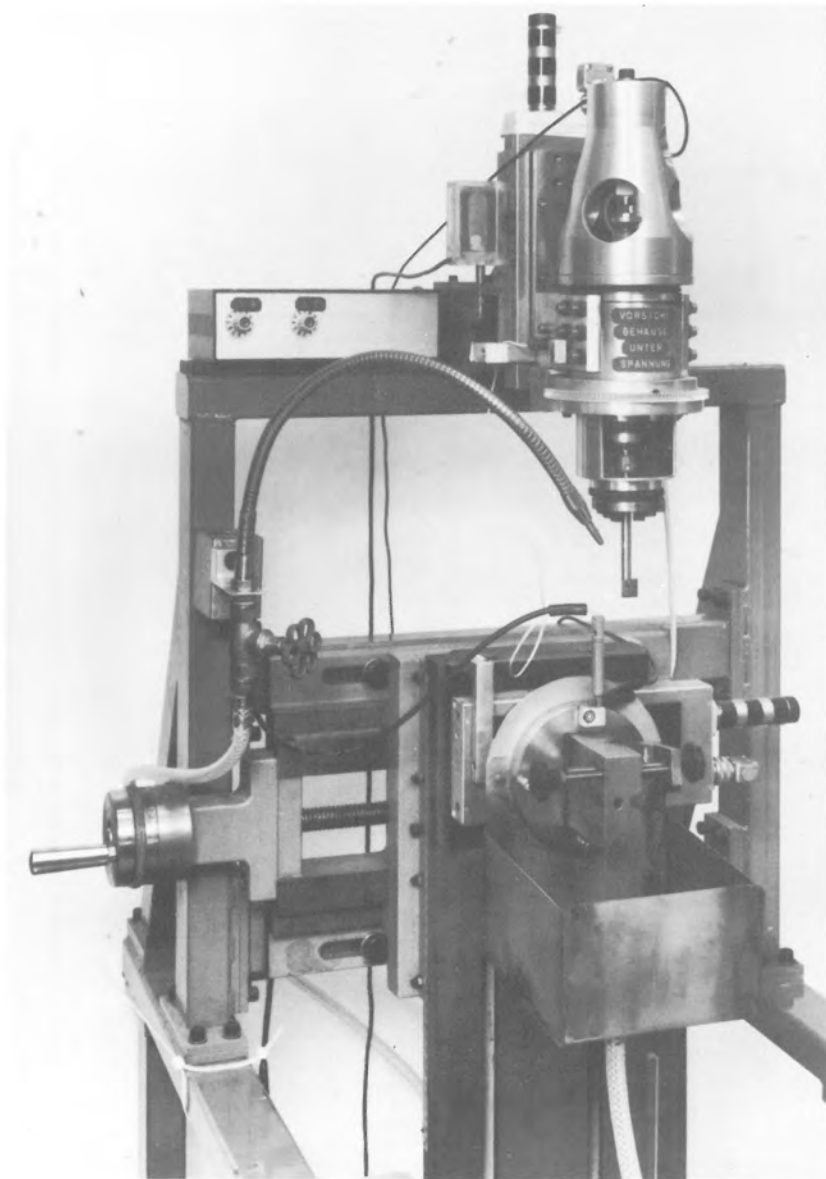


Bild 4.3-1: Funkenerosionsmaschine



#### 4.4 Optische Bildverarbeitung

Der Aufbau eines optischen Systems zur Bildverarbeitung wurde aus wirtschaftlichen Gründen nicht durchgeführt. Nach gründlichen Voruntersuchungen an bereits bestehenden Meßaufbauten wurde festgestellt, daß eine Bearbeitung von Röntgenfilmen aus der Materialprüfung nur mit großem technischen Aufwand realisiert werden kann. Die hohe Schwärzung und die Anforderungen hinsichtlich Detailerkennbarkeit erfordern leistungsstarke Laser-Lichtquellen sowie große und sehr genaue Linsensysteme. Die hohen Kosten für eine anwendbare optische Bank und die ebenfalls kostenintensive Herstellung präziser optischer Filtermasken führten zu der Entscheidung, keine eigene Versuchseinrichtung aufzubauen.

## 5. Ablauf

### 5.1 Digitale Bildverarbeitung

Zu Beginn der Arbeiten wurde der Meßplatz zur Bildverarbeitung aufgebaut. Hierzu wurde ein schnelles Bildverarbeitungssystem inklusive Fernsehkamera und Monitor sowie eine Prozeßrechenanlage beschafft und mit weiteren Komponenten wie Filmbetrachtungsgerät, Kamerastativ usw. zu einer lauffähigen Versuchseinrichtung zusammengestellt. Nach einer Untersuchung des Bildeinzugsystems und der Abtastung einiger ausgewählter Schweißnahtaufnahmen wurden erste Versuche an digitalisierten Röntgenbildern durchgeführt. Es wurden Programme für die verschiedenen Verarbeitungsmethoden entwickelt und zu einem modularen Software-Paket zusammengefaßt.

Eine im Labor vorhandene Schweißprobensammlung lieferte das Bildmaterial für weitere umfangreiche Untersuchungen und ermöglichte die Erprobung der Verarbeitungsroutinen an realen Aufnahmen. Neben den herkömmlichen aus der Literatur bekannten Verfahren zur Bildverbesserung wurden auch spezielle, der Röntgenfilmauswertung angepaßte Algorithmen entwickelt und auf die Durchstrahlungsaufnahmen angewendet. Die Arbeiten zum Vorhabensteil "digitale Bildverarbeitung" wurden termingerecht in vollem Umfang ausgeführt.

### 5.2 Mehrwinkel-Radiometrie

Für die radiometrische Durchstrahlungsprüfung wurden eine 160 kV-Röntgenanlage (Industrie-Ausführung), mehrere Detektoren mit Fotomultiplier sowie die elektronischen Bausteine beschafft. Die Kollimator-Anordnung sowie der Manipulator für variable Geschwindigkeiten wurden in der Mechanik-Werkstatt gebaut; die elektronischen Schaltungen konnten im Elektrolabor entwickelt und hergestellt werden. Die Programmierung der umfangreichen Prozeßrechner-Software erfolgte parallel zu den o.g. Arbeiten, so daß nach Inbetriebnahme

der Anlage nur noch Optimierungsarbeiten notwendig waren. Der Vorhabensteil "Radiometrie" konnte plangemäß abgeschlossen werden.

### 5.3 Funkenerosion

Zur Erzeugung künstlicher Fehler wurde eine Funkenerosionsmaschine aufgebaut. Die mechanischen und elektrischen Komponenten wurden im Labor entwickelt und hergestellt. Erste Testläufe bestätigten die Funktionsfähigkeit der Maschine, zeigten jedoch unzureichende Präzision in den Fehlergeometrien, insbesondere durch unsauberen Abbrand an den Fehlerflanken. Durch eine Änderung in der Elektrodenaufhängung (Piezo-Schwinger) und dem Einbau einer selbstentwickelten Kurzschlußüberwachung zur automatischen Steuerung des Vorschubs konnten die Eigenschaften der Maschine erheblich verbessert werden. Eine erneute Erprobung führte zu befriedigenden Ergebnissen bezüglich der Fehlergenauigkeit und der Abmessung der erreichbaren Fehlertiefe. Die Arbeiten zur Funkenerosion wurden gemäß der Aufgabenstellung mit der Herstellung austenitischer Testkörper abgeschlossen.

### 5.4 Optische Bildverarbeitung

Nach umfangreichen Literaturstudien wurde eine Übersicht über optische Verarbeitungsmethoden gewonnen. Es wurden geeignete Verfahren zur Röntgenfilmbearbeitung ausgewählt und an einigen typischen Beispielen aus der Schweißnahtprüfung erprobt. Die Versuche wurden an verschiedenen bereits bestehenden optischen Verarbeitungssystemen anderer Institute durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen waren nicht zufriedenstellend und führten zu der Entscheidung, keine eigene Versuchseinrichtung aufzubauen. Die weiteren Arbeiten blieben auf theoretische Untersuchungen beschränkt und wurden mit Betrachtungen über die prinzipiellen Möglichkeiten optischer Bildverarbeitung an industriellen Radiographien abgeschlossen.

## 6. Ergebnisse

### 6.1 Digitale Bildverarbeitung

#### 6.1.1 Möglichkeiten der Bildaufbereitung in der Radiographie

Das in der Radiographie erzeugte Röntgenbild wird im allgemeinen als Endergebnis der Aufnahmetechnik angesehen; Auswertung und Beurteilung stützen sich auf die visuelle Betrachtung dieser Filmaufnahme. Die Definitionen der Bildgüte beziehen sich deshalb auf die physiologischen Fähigkeiten des Menschen, z. B. auf die visuell unterscheidbaren Kontraste und die Detailerkennbarkeit.

Durch die visuelle Betrachtung kann jedoch häufig nicht der ganze Informationsgehalt einer Röntgenaufnahme ausgeschöpft werden. Geringe Kontraste mit weichen Übergängen werden vom Menschen nicht erkannt; in der Nähe großer Kontraste gehen Details verloren. Das menschliche Auge ist empfindlich gegen Blendungen und benötigt Dunkel-Adaptionszeiten von mehreren Minuten, bis die volle Empfindlichkeit erreicht wird.

Diese Einschränkungen bei der direkten Filmbetrachtung legen die Entwicklung von Geräten zur Bildaufbereitung nahe, die dem Menschen die im Film enthaltene Information deutlicher und damit sicherer erkennbar anbieten. Solche Systeme sollten zumindest folgende Funktionen erfüllen:

- Kontrastanhebung zur Spreizung ausgewählter Schwärzungsbereiche,
- Kantenanhebung zur Verdeutlichung von Kontrastübergängen,
- Varianzdarstellung zur Unterscheidung von Zonen homogener Schwärzung und Zonen mit "Rauhigkeit".

Darüber hinaus ist es oft hilfreich, wenn bestimmte Schwärzungswerte des aufbereiteten Bildes mit einzelnen Farben verknüpft werden können. Die zusätzliche Farbinformation

nutzt einen weiteren Sensor des menschlichen Auges, den Farbsinn, so daß die Aufmerksamkeit des Betrachters besser auf bestimmte Bildregionen gelenkt werden kann. Allerdings müssen auch bei der Farbdarstellung die physiologischen Bedingungen beachtet werden, so z. B. die unterschiedliche Empfindlichkeit des Auges für verschiedene Farben.

Eine weitere Möglichkeit, durch Bildverarbeitung die visuelle Auswertung eines Röntgenfilmes zu erleichtern, besteht in der Verminderung des im Bild vorhandenen Rauschens. Als Rauscheinflüsse kommen in einer Durchstrahlungsaufnahme mehrere Größen in Betracht. So führt z. B. bei Verwendung grobkörniger Filme das Filmrauschen zu einer Beeinträchtigung in der Detailerkennbarkeit kontrastschwacher Fehleranzeigen. Ebenso können sich im Werkstück vorhandene Strukturen der Fehlerabbildung überlagern und somit die Erkennung des Fehlers erschweren. Durch eine geeignete Filterung des Bildes ist es in vielen Fällen möglich, vorhandene Rauschanteile weitgehend zu unterdrücken, ohne die Fehlerabbildungen wesentlich zu verändern. Die digitale Bildverarbeitung bietet hierzu verschiedene Filtermethoden an, die sich durch Programmierung leicht auf die jeweiligen Bildinhalte optimieren lassen.

Alle bisher genannten Verfahren behandeln die Verarbeitung eines Röntgenfilms und beziehen sich daher auf die Abbildungsverhältnisse in dieser einen Durchstrahlungsaufnahme. Die Bildverarbeitung besitzt jedoch die Möglichkeit, mehrere Bildvorlagen miteinander zu verknüpfen und kann somit durch Kombination von Einzelaufnahmen zusätzliche Informationen gewinnen. Durch einen rechnergestützten Vergleich zweier Aufnahmen lassen sich Veränderungen in einem Bauteil leicht feststellen und quantitativ ermitteln. Der Bildvergleich kann z. B. in der Schweißnahtprüfung vorzüglich zur Bestimmung von Rißfortpflanzungen eingesetzt werden. Eine andere Art der Verarbeitung mehrerer Einzelaufnahmen ist die Mehrfilmtechnik (siehe Kapitel 3.1.7). Existieren von einem

Prüfstück mehrere unter gleichen Bedingungen aufgenommene Durchstrahlungsaufnahmen, so kann durch Überlagerung dieser Einzelaufnahmen ein Durchstrahlungsbild mit verbessertem Signal/Rausch-Verhältnis erzeugt werden. Die digitale Bildverarbeitung bietet die Möglichkeit, die Einzelfilme nacheinander mit einer Fernsehkamera abzutasten und die Überlagerung nachträglich in einer Rechenanlage durchzuführen. Dadurch können gegenüber einer optischen Überlagerung beliebig viele Einzelfilme verarbeitet werden.

Die hier aufgeführten Beispiele geben nur einen groben Überblick über die Einsatzmöglichkeiten der digitalen Bildverarbeitung in der Radiographie. In den meisten Fällen werden zur Bildverbesserung jedoch Bearbeitungen notwendig sein, die den speziellen Auswertproblemen des gerade vorliegenden Röntgenbildes angepaßt sein müssen. Die Flexibilität rechnergestützter Systeme kommt diesen Anforderungen entgegen und ermöglicht die Erstellung anwenderspezifischer Verarbeitungsroutinen. Geräte für die Bildaufbereitung, die zumeist mit TV-Kameras und Monitoren sowie einer analogen oder digitalen elektronischen Signalverarbeitung ausgerüstet sind, werden bereits kommerziell angeboten. Es fehlen indes umfassende Erfahrungsberichte über die Einsetzbarkeit und Leistungsgrenzen dieser Geräte in der industriellen Radiographie.

### 6.1.2 Probleme bei der Bearbeitung von Schweißnahtaufnahmen

Obwohl die digitale Bildverarbeitung heute die technologischen Voraussetzungen zur Röntgenfilmabtastung weitgehend erfüllt, kommt es bei der Bearbeitung von Schweißnahtaufnahmen immer wieder zu Schwierigkeiten. Die Gründe hierfür liegen hauptsächlich in der Darstellung der Schweißnaht selbst und betreffen sowohl den Bildeinzug als auch die rechnerische Verarbeitung des bereits digitalisierten Röntgenbildes. Die auftretenden Probleme sollen im folgenden kurz beschrieben werden.

#### **Probleme beim Bildeinzug:**

Im allgemeinen wird bei der Durchstrahlung einer Schweißnaht sowohl der Schweißnahttrandbereich als auch ein Teil des Muttermaterials auf dem Röntgenfilm mit abgebildet. Dies kann bei Nahtüberhöhungen zu Schwärzungsunterschieden führen, die die Abtastung des Röntgenfilms erheblich erschweren. Übersteigt der im Film vorhandene Kontrast den aufnehmbaren Schwärzungsbereich der abtastenden Fernsehkamera, so kommt es zu Überblendungen, die eine einwandfreie Auswertung der Aufnahme unmöglich machen. Selbst ohne Überblendungen bringen hohe Kontrastunterschiede Schwierigkeiten beim Bildeinzug. Fernsehkameras haben in dunklen Bereichen eine schlechtere Helligkeitsauflösung als in hellen Bereichen (siehe Kapitel 4.1.3). D.h., daß in Bildregionen mit höherer Schwärzung, also im Schweißnahttrandbereich, Fehlerabbildungen vom Aufnahmesystem schlechter erfaßt werden.

Ein weiteres Problem ergibt sich durch die begrenzte geometrische Auflösung digitaler Bilder. Das im Rechner gespeicherte Bild besteht aus einer Vielzahl einzelner Bildpunkte, die zu einer Bildmatrix zusammengefaßt sind und den Röntgenfilm als diskrete Helligkeitsfunktion beschreiben. Die Fläche, die ein Bildpunkt in der Bildvorlage repräsentiert,

bestimmt die geometrische Auflösung des digitalen Bildes. Geht man davon aus, daß zur Erfassung von Schweißnahtfehlern eine Auflösung von 50 µm erforderlich ist, so ergeben sich für eine Abtastfläche von 5 cm x 5 cm bereits 1000 x 1000 = 1.000.000 Bildpunkte. Die Anzahl der Bildpunkte pro Bild sind maßgebend für die Qualität eines Verarbeitungssystems und bestimmen entscheidend die Rechenzeit für die Bearbeitung eines Bildes. Das in diesem Vorhaben verwendete Bildverarbeitungssystem hat eine Bildmatrixgröße von 512 x 512 Bildpunkten. Bei der Abtastung von Röntgenfilmen war es daher erforderlich, einzelne interessierende Bildbereiche aus den Schweißnahtaufnahmen herauszunehmen und diese gesondert zu bearbeiten.

#### Probleme bei der Bildaufbereitung:

Die Bildaufbereitung hat das Ziel, die in einer Durchstrahlungsaufnahme abgebildeten Fehlerstellen vom übrigen Bildinhalt hervorzuheben. Die unbearbeitete Schweißnaht stellt aus verschiedenen Gründen ein besonderes Problem für diese Verarbeitung dar.

1. Schweißnahtaufnahmen unterscheiden sich nicht nur von Objekt zu Objekt, sondern auch von Abschnitt zu Abschnitt am gleichen Prüfstück. Das bedeutet, daß Fehler in unterschiedlicher Umgebung abgebildet werden.
2. Durch überlagerte Bildstrukturen - Raupe, Wurzeldurchhang etc. - wird das Schwärzungsprofil auch bei intakten Schweißnähten gestört, so daß Fehlerabbildungen nicht ohne weiteres isoliert werden können.
3. Bestimmte Fehlerarten (Risse, Bindefehler) werden häufig mit sehr geringem Kontrast abgebildet, so daß eine sehr gute Kontrastauflösung gefordert werden muß, um diese Fehler zu erkennen.



4. Bestimmte Fehlerarten (z. B. Querrisse) können auf einer einzigen Aufnahme unterschiedlich dargestellt sein, je nachdem, an welcher Stelle der Naht sie sich befinden und mit welchem Einstrahlwinkel sie getroffen werden.
5. Die Aufnahmequalität wird durch äußere Einflüsse mitbestimmt, z. B. innere und geometrische Unschärfe, spezifischer Kontrast (Energiewahl), Filmkörnigkeit u.a. Einige dieser Einflüsse können von Aufnahme zu Aufnahme schwanken und sich auf die Fehlerabbildung auswirken.

Einfache Verfahren der Bildaufbereitung wie z. B.. Kontrastanhebungen oder Farbzuordnungen wirken global auf das gesamte Bild und verarbeiten die oben genannten Störungen in gleicher Weise wie die tatsächlichen Fehlerabbildungen. Eine Bildverbesserung im Sinne einer Fehlerhervorhebung wird durch alleinige Anwendung dieser Verfahren nicht zu erreichen sein. Daher muß sich die Bildaufbereitung bei Durchstrahlungsaufnahmen unbearbeiteter Schweißnähte vorerst auf eine Beseitigung der zusätzlich im Bild vorhandenen Strukturen konzentrieren. Hierzu ist es notwendig, Verfahren anzuwenden, die den Bildhintergrund unterdrücken, ohne die zur Fehlererkennung relevante Bildinformation zu zerstören.

Weiterhin ist für die Bildaufbereitung von Schweißnahtaufnahmen die große Anzahl unterschiedlicher Fehlertypen von Bedeutung. Die Abbildungen verschiedener Fehlerarten unterscheiden sich in erster Linie durch ihre geometrische Form, ihre Kontur und durch ihre Lage in der Schweißnaht. Poren erscheinen meist als runde Objekte mit weichen Kantenübergängen am Fehlerrand, während Risse vornehmlich als längliche Gebilde mit starken Fehlerflanken auf dem Röntgenfilm abgebildet werden. Einige Aufbereitungsverfahren, insbesondere die Bildfilterung, reagieren auf diese fehlerspezifischen Eigenschaften und haben deshalb unterschiedliche Wirkung auf die verschiedenen Fehlertypen. Dies hat zur Folge, daß die Aufbereitung einer Schweißnahtaufnahme ziel-

gerecht auf die Bearbeitung vorher festgelegter Fehler ausgelegt werden kann. Durch eine richtungsorientierte Filterung können z. B. Querrisse besonders hervorgehoben werden, während Längsrisse, Wurzelfehler und andere in Schweißnaht-richtung ausgedehnte Fehlstellen mit dieser Filtereinstellung stark unterdrückt werden. Die Verschiedenartigkeit in den Abbildungen unterschiedlicher Fehlerarten ermöglicht zwar eine gute Verarbeitung einzelner Fehler, behindert jedoch die umfassende Aufbereitung von Gesamtaufnahmen, in denen mehrere Fehlerarten gleichzeitig auftreten.

### 6.1.3 Antishading und Wanddickenausgleich

Leuchtdichteabweichungen auf Filmbetrachtungsgeräten, schräge Einstrahlrichtung bei Röntgenaufnahmen, optische Inhomogenitäten bei Videokameras führen häufig zu unerwünschten großflächigen Grauwertschwankungen in Digitalbilern (Shading), die eine weiterführende Bildverarbeitung im Rechner negativ beeinflussen.

Ein Verfahren zum Ausgleich von Shading-Einflüssen wurde bereits im Kapitel 4.4 beschrieben. Es handelte sich hierbei um ein Korrekturverfahren, bei dem unmittelbar nach der Röntgenfilmaufnahme eine homogene Film-Korrekturfläche abgetastet und von dem digitalen Röntgenbild subtrahiert wurde. Die dabei erzielten Ergebnisse waren gut; dennoch erwies sich das Verfahren, u.a. bedingt durch eine zweifache Filmabtastung, technisch wie zeitlich zu aufwendig.

Ein einfaches Verfahren zur Reduzierung von Shadingeinflüssen kann durch eine Korrekturfläche erreicht werden, die aus dem Digitalbild  $f(x,y)$  der abgetasteten Radiographie durch eine extreme Tiefpaßfilterung im Orts- bzw. Frequenzbereich abgeleitet wird. Der einfachste Weg führt zur schrittweisen Mittelwertbildung der Grauwerte über einen definierten Bereich des Originalbildes, wobei jeweils der mittlere Bildpunkt innerhalb eines betrachteten Bildausschnittes durch den Mittelwert seiner Umgebung errechnet wird, Gleichung 6.1.3-1.

$$\overline{f(x,y)} = \frac{1}{M} \cdot \sum_{(n,m) \in S} f(n,m) \quad \left| \begin{array}{l} \text{für } x = 0, 1, \dots, N-1 \\ \quad y = 0, 1, \dots, N-1 \end{array} \right. \quad (6.1.3-1)$$

$\overline{f(x,y)}$  = arith. Mittelwert

M = Anzahl der Bildelemente in S

S = Maske mit  $m \cdot n$  Bildelementen

Die Mittelwertbildung hat zur Folge, daß großflächige Grauwertschwankungen erhalten bleiben, während Detailinformationen im Bild wie feine Risse oder Poren vollständig geglättet werden. Die Differenz (Glg. 6.1.3-2) aus  $f(x,y)$  und  $\overline{f(x,y)}$  ist ein Digitalbild mit weitgehend homogenen Bildflächen. Voraussetzung für diese Korrektur ist allerdings, daß die Fehlergrößen klein gegenüber den Shadingflächen sind.

$$g(x,y) = f(x,y) - \overline{f(x,y)} \quad (6.1.3-2)$$

$f(x,y)$  = Original

$\overline{f(x,y)}$  = Mittelwert

$g(x,y)$  = korrigiertes Digitalbild

Ein weiterführendes Verfahren, auch im Hinblick auf Wanddickenausgleich, besteht in der Zerlegung eines Digitalbildes in kleine Bildbereiche, die unabhängig voneinander verarbeitet werden. Ziel dieser Verarbeitung ist die Anpassung der Mittelwerte innerhalb der Submatrizen an einen vorgegebenen konstanten Wert. Das setzt die Berechnung sämtlicher Mittelwerte, gegebenenfalls auch der Standardabweichungen in den Bildbereichen voraus. Durch Offset-Berechnungen können die Bildbereiche in ihrem Grauwertverhalten angehoben bzw. abgesenkt werden, so daß sich schließlich eine Homogenisierung des Digitalbildes ohne Kontrastverfälschungen oder Verwaschungseffekte ergibt. Eine zusätzliche Normierung der Standardabweichungen innerhalb der Submatrizen kann außerdem zu einer besseren Ausnutzung des vorhandenen Dynamikbereiches führen.

Die Anpassung der Submatrizen an einen vorgegebenen Mittelwert  $\overline{XN}$  geht aus Gleichung 6.1.3-3 hervor.

$$g_K(x,y)_N = f_K(x,y) + (\overline{f_K(x,y)} - \overline{XN}) \quad (6.1.3-3)$$

$g_K(x,y)_N$  = Bildfunktion nach Mittelwertnormierung

$f_K(x,y)$  = Bildfunktion der K-ten Submatrix

$\overline{f_K(x,y)}$  = Mittelwert der K-ten Submatrix

$\overline{XN}$  = Norm-Mittelwert

Eine zusätzliche Anpassung der Standardabweichungen an einen vorgegebenen Normwert  $S_N$  führt zu einer besseren Ausnutzung des vorhandenen Dynamik-Bereiches. Durch diesen Rechenschritt wird eine Angleichung der unterschiedlichen Kontrastverhältnisse über die Fläche der Röntgenaufnahme erreicht.

$$g_K(x,y)_S = f_K(x,y) \cdot C \quad \left| \quad \text{mit } C = \frac{S_N}{S_K} \right. \quad (6.1.3-4)$$

$g_K(x,y)_S$  = Bildfunktion nach Normierung der Standardabweichung  
 $f_K(x,y)$  = Bildfunktion der K-ten Submatrix  
 $S_N$  = Normwert der Standardabweichung  
 $S_K$  = Standardabweichung der K-ten Submatrix

$$g_K(x,y) = f_K(x,y)_S + \overline{(f_K(x,y)_S - \overline{XN})} \quad (6.1.3-5)$$

$g_K(x,y)$  = Bildfunktion nach Normierung auf Mittelwert und Standardabweichung.

Abbildung 6.1.3-1 zeigt im oberen Bildbereich einen Schweißnahtausschnitt mit einem stark ausgeprägten Shading-Verhalten. Der rechte Schweißnahtbereich ist durch die hohe Grundschwärzung nicht auszuwerten. Im unteren Bildbereich wurde eine Shading-Korrektur durchgeführt. Das Ergebnis ist eine gleichmäßige Grundschwärzung mit ausgeglichenem Kontrastverhalten über den gesamten Schweißnahtausschnitt.

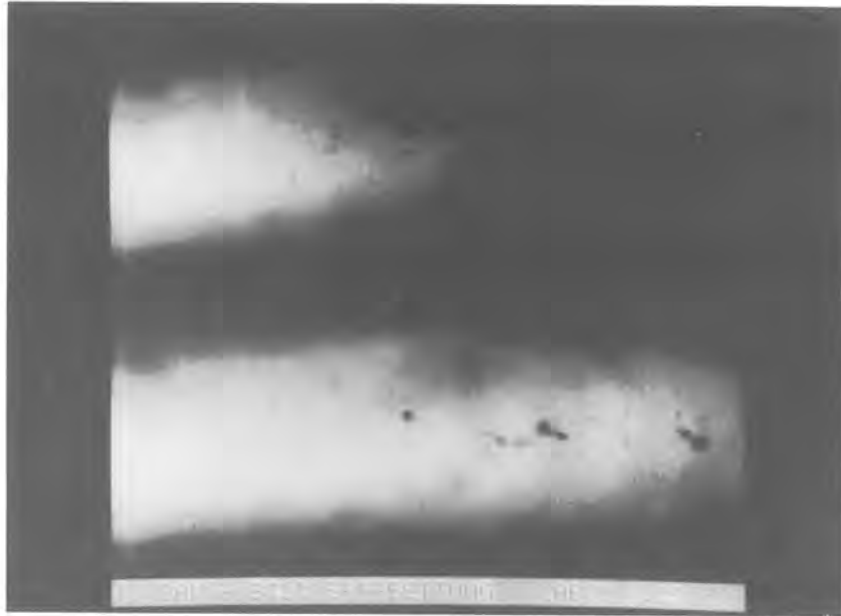


Bild 6.1.3-1: Originalaufnahme eines Schweißnahtbereiches  
und Bildverbesserung durch Antishading-Verfahren

#### 6.1.4 Verbesserung der Bildqualität durch Rauschunterdrückung

##### 6.1.4.1 Einsatz verschiedener Filtermethoden

Filtermethoden mit Tiefpaß-Charakter werden häufig zur Unterdrückung von Rauscheinflüssen eingesetzt. Dabei kommt es zu einer Informationsveränderung im Bild, die neben einer Störgrößenreduzierung auch einen Verlust an Detailinformation zur Folge hat. Die Art des Tiefpaßfilters wird auf Grund der Zielsetzung unter Berücksichtigung der Bildeigenschaften von Fall zu Fall variieren.

Für die Filterung eignen sich sowohl Methoden im Ortsbereich (Faltung, Medianfilter) als auch in der komplexen Fourier-ebene. Die größte Wirksamkeit hinsichtlich der Qualitätsverbesserung wird bei Rauscheinflüssen erzielt, bei denen eine gleichmäßige Rauschverteilung vorliegt.

Das erste Verfahren, das beschrieben werden soll, ist die Rauschunterdrückung mittels Mittelwertberechnung. Bildgrundlage ist ein Digitalbild mit  $N \times N$  Bildpunkten und der Bildfunktion  $f(x,y)$ , das nach vorgegebenem Filteralgorithmus in eine Bildfunktion  $g(x,y)$  umgerechnet wird. Bei diesem Verfahren wird ein Bildpunkt  $g(x,y)$  aus den Grauwerten eines definierten, den Bildpunkt  $f(x,y)$  umgebenden Bildpunktfeldes berechnet. Die Berechnung geht aus Gleichung 6.1.4.1-1 hervor.

$$g(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{(n,m) \in S} f(n,m) \quad (6.1.4.1-1)$$

für  $|x,y = 0, 1 \dots, N-1$

S = Koordinaten der Nachbarschaftspunkte ohne  $f(x,y)$   
(z. B.:  $S = [(x,y+1), (x,y-1), (x+1,y), (x-1,y)]$ )  
M = Anzahl der Pixel im Bereich von S

Eine weiterführende adaptive Mittelung nach Gleichung 6.1.4.1-2 verhindert die Verwaschung von Hell-Dunkel-Kanten im Bild bei gleichzeitiger Rauschunterdrückung. Ein vordefinierter Schwellwert D dient als Vergleichskriterium, ob die Umgebungsvoraussetzungen für eine Mittelwertberechnung auf Grund der Bildeigenschaften gegeben sind.

$$g(x,y) = \begin{cases} \frac{1}{M} \sum_{(m,n) \in S} f(m,n) & | f(x,y) - \frac{1}{M} \sum_{(m,n) \in S} f(m,n) > D \\ f(x,y) & | f(x,y) - \frac{1}{M} \sum_{(m,n) \in S} f(m,n) \leq D \end{cases} \quad (6.1.4.1-2)$$

Die Abbildungen 6.1.4.1-1A bis -1C zeigen an zwei Beispielen die Rauschunterdrückung durch Mittelung von Grauwerten über einer Filmfläche von  $m \cdot n$  Bildelementen.

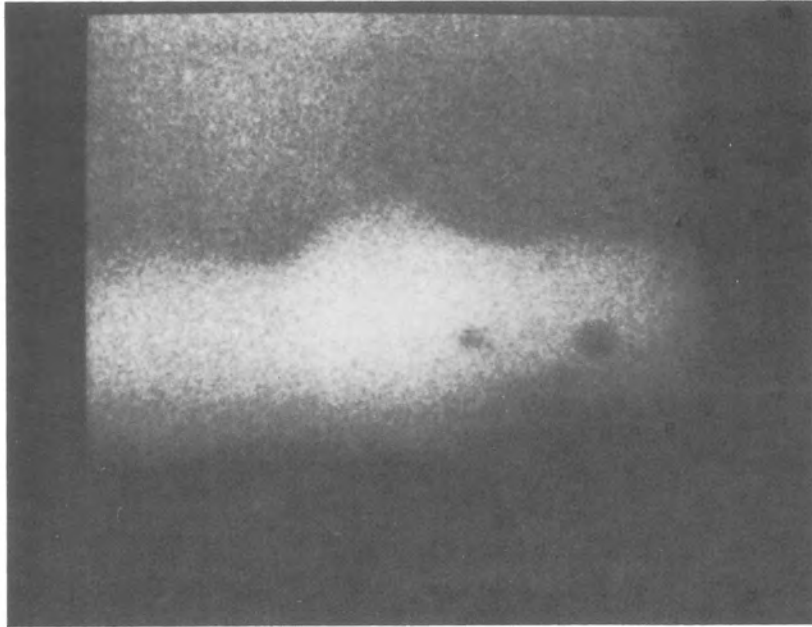


Bild 6.1.4.1-1A: Originalaufnahme, stark verrauscht

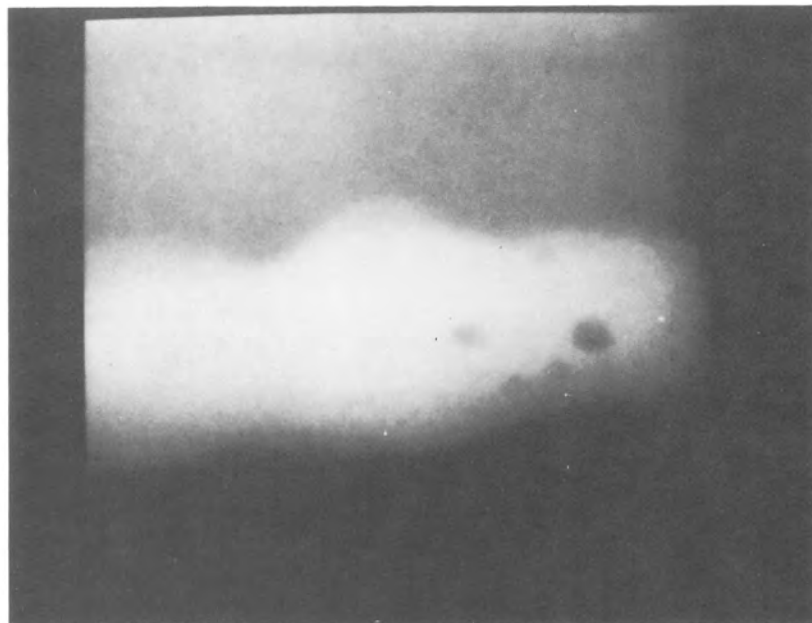


Bild 6.1.4.1-1B: Filterung mit 3 x 3 Filtermaske



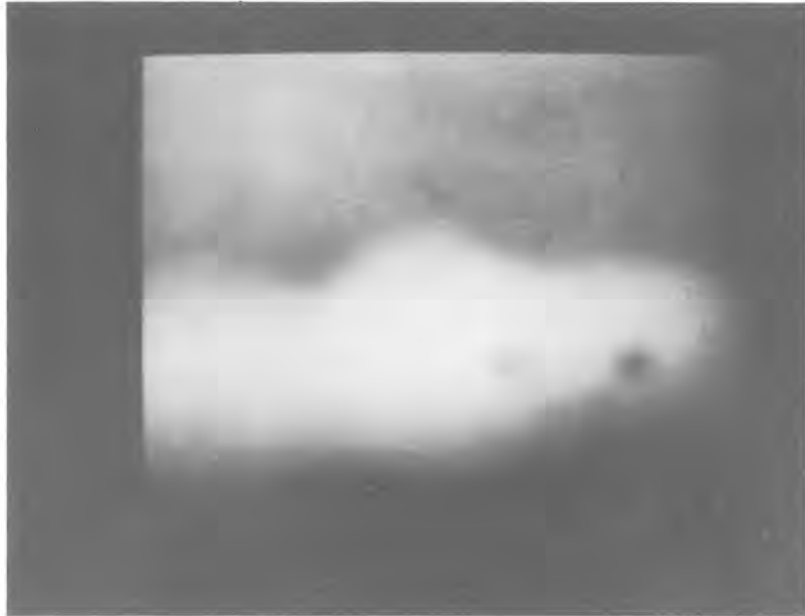


Bild 6.1.4.1-1C: Filterung mit 10 x 10 Filtermaske

Ein weiteres Rauschunterdrückungsverfahren steht mit der sogenannten Median-Filterung zur Verfügung. Das Median-Filter hat ebenso wie die adaptive Mittelung den Charakter eines kantenerhaltenden Filters. Wirkungsvoll erweist sich die Median-Filterung vor allem bei der Unterdrückung von kleinflächigen Störgrößen in Binärbildern. Die Wirkungsweise des Filters beruht auf der Berechnung eines Zentralwertes oder Medians aus einer Anzahl von Grauwerten innerhalb einer definierten Matrixfläche des Digitalbildes. Der Zentralwert erweist sich gegenüber Mittelungs-Verfahren dann überlegen, wenn extreme Werte auftreten, die das arithmetische Mittel stark beeinflussen und zu einer fiktiven Größe machen würden. Der Zentralwert  $x$  einer aus  $n$  Grauwerten bestehenden Folge ist derjenige Wert, der die nach der Größe der einzelnen Grauwerte geordnete Folge halbiert. Die Ordnungszahl des Zentralwertes berechnet sich nach Gleichung 6.1.4.1-3.

$$\frac{n+1}{2} \quad | \quad \text{mit } n = \text{Anzahl der Grauwerte} \quad (6.1.4.1-3)$$

Die folgende Abbildung verdeutlicht die Wirkung der Median-Filterung auf ein stark verrauschtes Binärbild. Abbildung 6.1.4.1-2 zeigt das verrauschte Binärbild sowie die Unterdrückung von Störgrößen nach einer Median-Filterung.

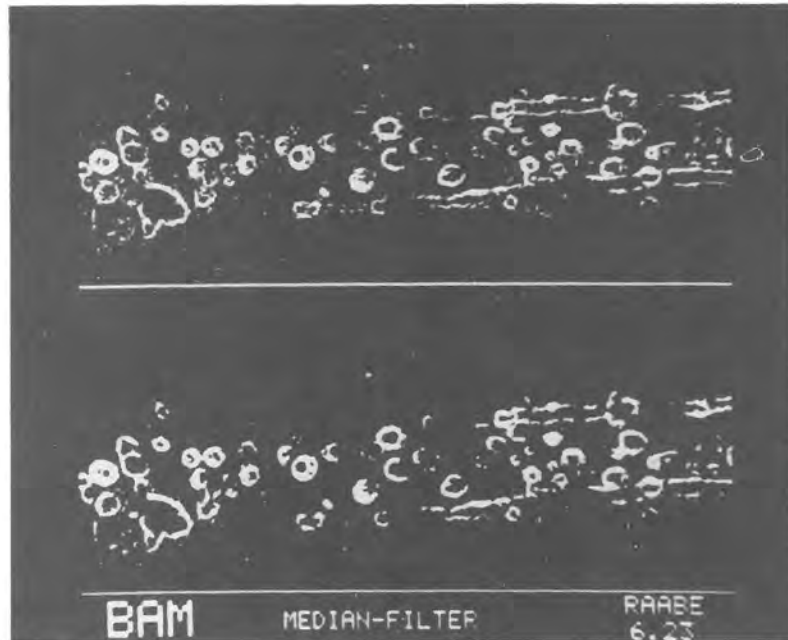


Bild 6.1.4.1-2: Verrauschtes Binärbild

Tiefpaßfilterungen über eine zweidimensionale Faltung (Konvolution) im Ortsbereich gehören zu den grundlegenden Verarbeitungsroutinen in der digitalen Bildverarbeitung. Das Ziel ist auch hier die Unterdrückung von hochfrequenten Rauschanteilen aus dem Digitalbild. Eine zweidimensionale diskrete Faltung einer Bildfunktion  $f(x,y)$  mit der Filterfunktion  $g(x,y)$  wird in Gleichung 6.1.4.1-4 beschrieben.

$$f(x,y) * g(x,y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m,n) \cdot g(x-m, y-n) \quad (6.1.4.1-4)$$
$$\left| \begin{array}{l} \text{für } x = 0, 1, \dots, M-1 \\ \quad y = 0, 1, \dots, N-1 \end{array} \right.$$

Zwischen der Faltung und der Fourier-Transformation besteht ein wichtiger Zusammenhang, der durch das Faltungs-Theorem beschrieben wird. Mit  $F(u,v)$  als Fourier-Transformation von  $f(x,y)$  und  $G(u,v)$  mit der Transformation von  $g(x,y)$  ergibt sich danach:

$$f(x,y) * g(x,y) \iff F(u,v) \cdot G(u,v) \quad \text{Faltungs-Theorem}$$

Eine zweidimensionale diskrete Fouriertransformation von  $f(x,y)$  in die komplexe Fourierebene beschreibt Gleichung 6.1.4.1-5.

$$F(u,v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (f(x,y) \cdot \exp [-j2\pi (u \cdot x/M + v \cdot y/N)]) \quad (6.1.4.1-5)$$
$$\left| \begin{array}{l} \text{für } u = 0, 1, \dots, M-1 \\ \quad v = 0, 1, \dots, N-1 \end{array} \right.$$

Die Filterung in der Fourierebene wird in Gleichung 6.1.4.1-6 beschrieben.

$$G(u,v) = H(u,v) \cdot F(u,v) \quad (6.1.4.1-6)$$

$G(u,v)$  = gefiltertes Bild in der Fourierebene  
 $F(u,v)$  = Fouriertransformation der Bildfunktion  
 $H(u,v)$  = Fouriertransformation der Filterfunktion

Die Funktion  $g(x,y)$  des gefilterten Bildes kann aus  $G(u,v)$  durch eine Rücktransformation nach Gleichung 6.1.4.1-7 gewonnen werden.

$$g(x,y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} G(u,v) \cdot \exp [j 2\pi(u \cdot x/M + v \cdot y/N)] \quad (6.1.4.1-7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{für } x = 0, 1, \dots, M-1 \\ \quad y = 0, 1, \dots, N-1 \end{array} \right.$$

Die Auswirkungen einer Fourier-Tiefpaßfilterung sind in Abbildung 6.1.4.1-3 zu sehen. Das Originalbild und das zugehörige Spektrum gehen aus Abbildung A und C hervor. Abbildung B und D beinhalten das tiefpaßgefilterte Bild sowie das zugehörige Leistungsspektrum. Der Vergleich der Leistungsspektren ergibt eine deutliche Verminderung der hochfrequenten Rauschanteile im Spektrum D.

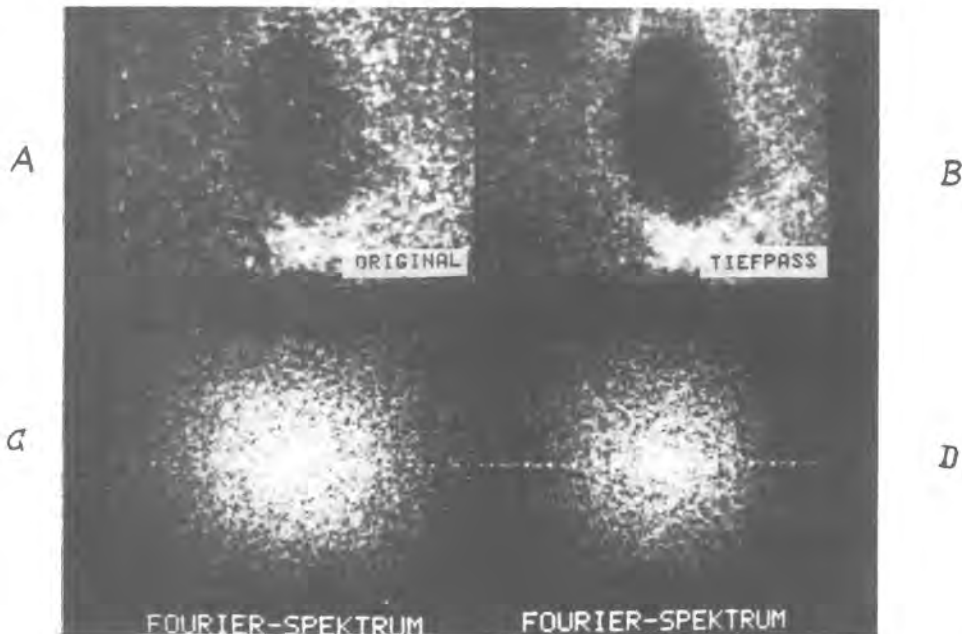


Bild 6.1.4.1-3: Fourier-Tiefpaßfilterung

#### 6.1.4.2 Mehrfilmtechnik

Bei den Untersuchungen im Rahmen der rechnergestützten Mehrfilmtechnik ging es in erster Linie um eine Qualitäts-Bewertung der erzielten Ergebnisse. Im Vordergrund stand dabei die Verbesserung des Signal/Rauschverhältnisses. Grundlage waren sowohl reale Schweißnahtaufnahmen als auch Radiographien eines Testkörpers mit Oberflächenfehlern definierter Größe, die durch Funkenerosion eingebracht wurden.

Einen qualitativen Vergleich zwischen einem Einzelfilm (D7) und der rechnergestützten Überlagerung von 6 Filmen (D7) zeigt Bild 6.1.4.2-1. Die Abbildung enthält im oberen Bild die Radiographie eines Rißfehlers von ca. 1 cm Länge und darunter den Fehlerbereich im Überlagerungsbild nach der Addition von 6 Einzelfilmen und nachfolgender Berechnung des arithmetischen Mittelwertes. Es läßt sich eine deutliche Verminderung der Rauschanteile im Überlagerungsbild erkennen. Bild 6.1.4.2-2 vergleicht zwei Spaltenprofile aus Bild 6.1.4.2-1 (linker Rißbereich).

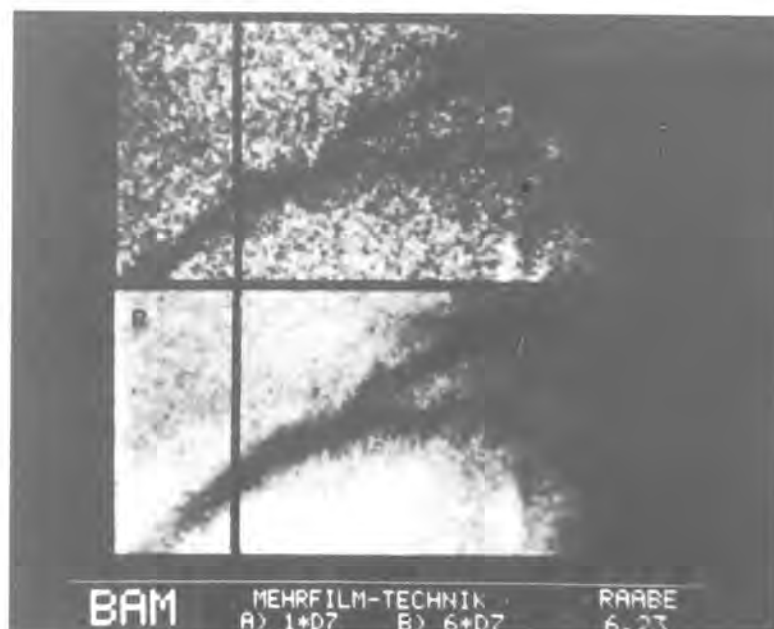


Bild 6.1.4.2-1: Rauschverminderung

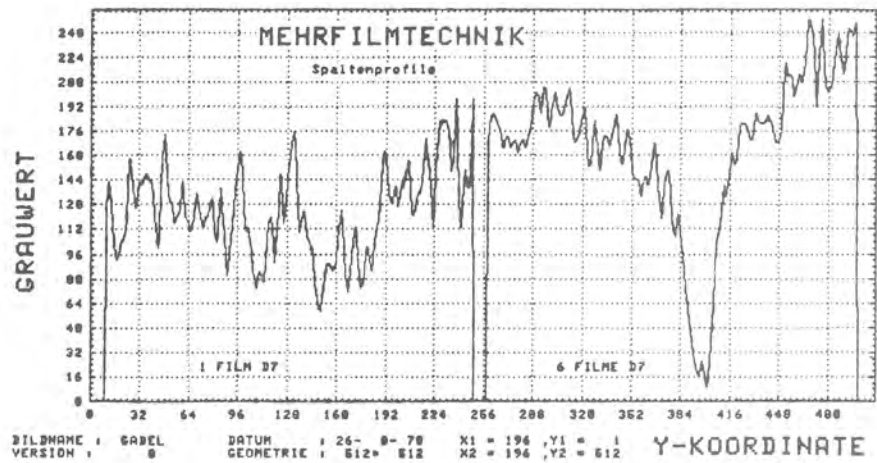


Bild 6.1.4.2-2: Rißprofile eines Einzelfilms D7 und der Überlagerung von 6 Filmen D7

Ein Beispiel für die Überlagerung von 4 Filmen (D7) und nachfolgender Selektion eines Grauwertintervalles von 256 Graustufen (8 Bit) aus dem Überlagerungsbild wird in Bild 6.1.4.2-3 dargestellt. Während im oberen Bild (Einzelfilm, D7) die Porengruppe unterhalb des Rißfehlers nahezu vollständig im Rauschbereich liegt, hebt sich die Porengruppe im Überlagerungsbild deutlich vom Rauschen ab.

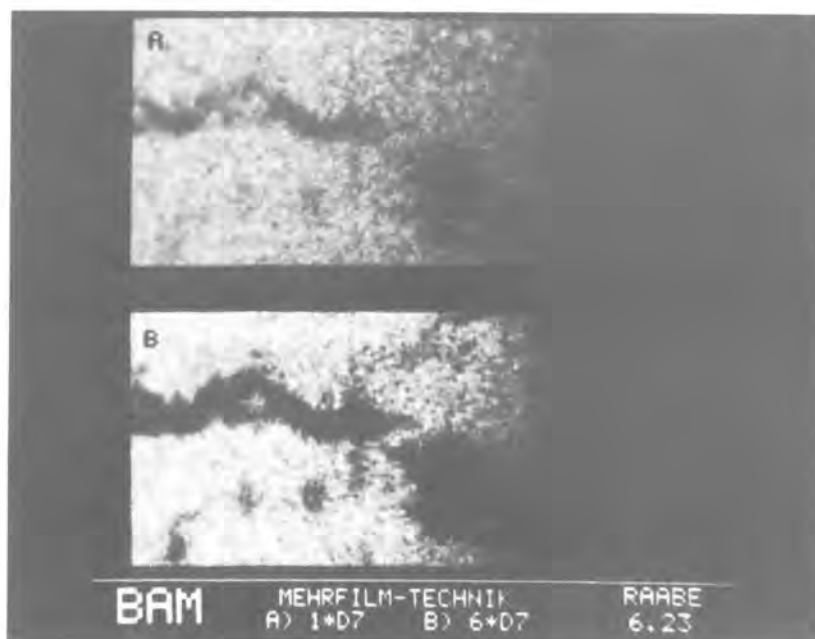


Bild 6.1.4.2-3: Kontraststeigerung

Die Entwicklung des Signal/Rauschverhältnisses als Funktion der Anzahl überlagerter Filme geht aus Bild 6.1.4.2-4 hervor. Grundlage war eine Mehrfilmaufnahme eines Filmpaketes mit 6 Röntgenfilmen (D7). Der Funktionsverlauf entspricht in grober Näherung einer Wurzelfunktion. Die Abweichungen der in Bild 6.1.4.2-4 dargestellten Kurve von einer Wurzelfunktion ergeben sich aus den ungleichen Abbildungsverhältnissen innerhalb des Filmpaketes. Der 1. Film, der die geringste Distanz zum Prüfobjekt aufweist, verfügt in der Regel über die besten Kontrasteigenschaften.

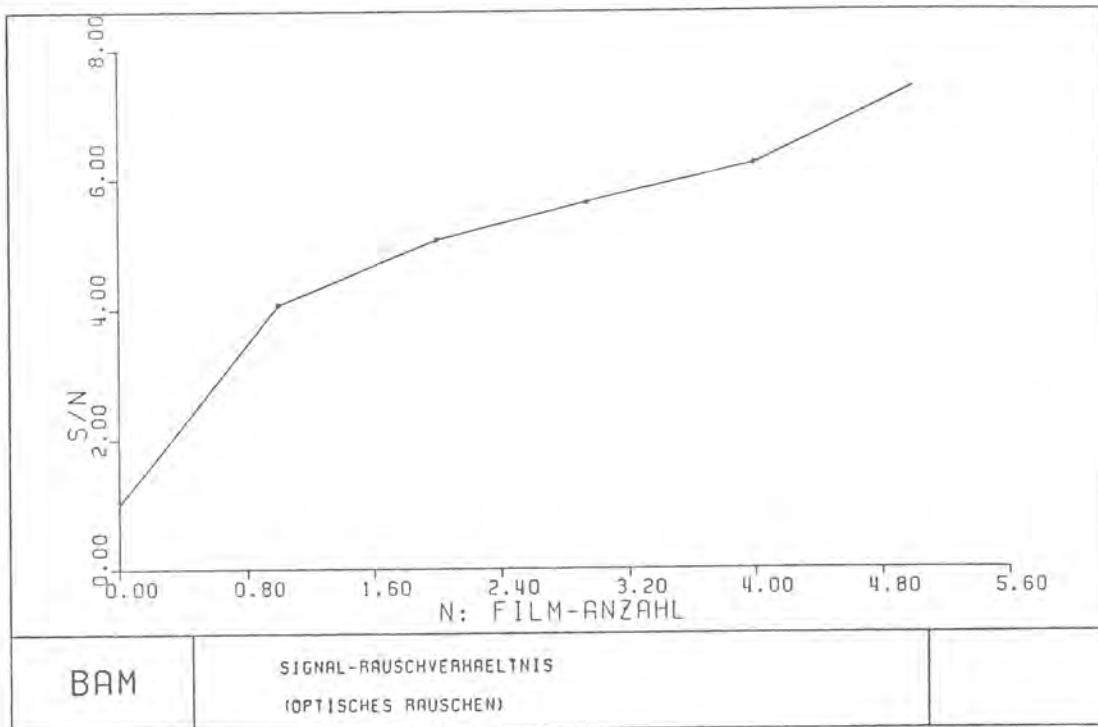
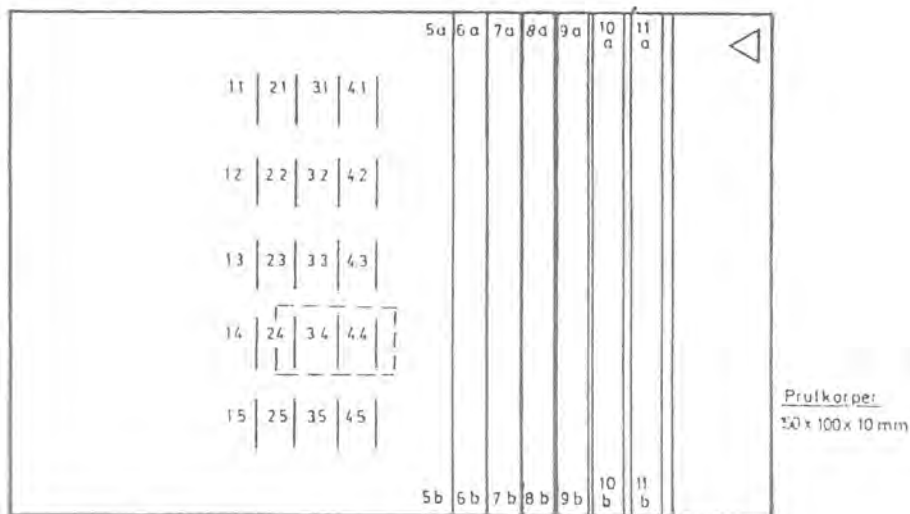


Bild 6.1.4.2-4: Entwicklung des Signal/Rauschverhältnisses bei serieller Überlagerung von N Einzelfilmen einer Mehrfilmaufnahme

Eine quantitative Betrachtung der Mehrfilmtechnik liefert der folgende Abschnitt:

Versuchsgrundlage bildeten die Mehrfilmaufnahmen einer austenitischen Testplatte (l = 150 mm, b = 100 mm, h = 10 mm), deren künstliche Oberflächenfehler (Schlitze) definierter Größe mit Hilfe der Funkenerosion erzeugt wurden. Bild 6.1.4.2-5 und Bild 6.1.4.2-6 zeigen eine Oberflächenaufnahme des Testkörpers und eine Positionsskizze mit den geometrischen Maßen der Schlitze. Für die weiterführende Auswertung wurde eine Gruppe von 3 Schlitzen ausgewählt (gestrichelte Linie), deren Kontrastverhalten auf einem Röntgenfilm in den Grenzbe- reich der visuellen Wahrnehmung fiel.

Prüfkörper (austenit. Werkstoff)



	1.	2.	3.	4.							
.1	825/260	780/200	425/110	440/70							
.2	650/280	627/200	550/120	360/75	5	6	7	8	9	10	11
.3	326/230	233/180	300/110	300/60	a-b	a-b	a-b	a-b	a-b	a-b	a-b
.4	235/230	195/175	200/110	200/60	319	429	539	845	1058	1667	1974
.5	100/220	108/165	100/100	100/50	Breite [µm] (Tiefe 0-3 mm)						
Tiefe/Breite [µm]											

Bild 6.1.4.2-5: Lageskizze und Maße der Testplatten- Fehler (gestrichelter Bereich: ausgewählte Fehlergruppe)





Bild 6.1.4.2-6: Testplatte mit künstlichen Fehlern

Bild 6.1.4.2-7 beinhaltet eine Gegenüberstellung zwischen einem Einzelfilm (D7) und der rechnergestützten Überlagerung von 6 Filmen (D7) einer Röntgenfilmaufnahme mit anschließender Mittelwertbildung. Bild 6.1.4.2-7A und Bild 6.1.4.2-7C zeigen das digitale Einzelbild und das Überlagerungsbild. Bei beiden Digitalbildern wurde eine nichtlineare Grauwerttransformation zur Kontraststeigerung durchgeführt, da die Originale auf Grund der sehr geringen Kontraste, bedingt durch Schlitziefen  $< 300 \mu\text{m}$ , eine photographische Monitor-Aufnahme ausschließen. Zur weiteren Verbesserung wurde zusätzlich auf beide Bilder eine richtungsabhängige Tiefpaßfilterung im Ortsbereich (Längsrichtung) durchgeführt (Bild 6.1.4.2-7B und Bild 6.1.4.2-7D). Während der untere Schlitz (3. Fehlerposition) bei dem Einzelbild auch nach der Tiefpaßfilterung (Bild 6.1.4.2-7B) nicht sichtbar wird, läßt sich beim Überlagerungsbild eine eindeutige Fehleraussage treffen (Bild 6.1.4.2-7D).

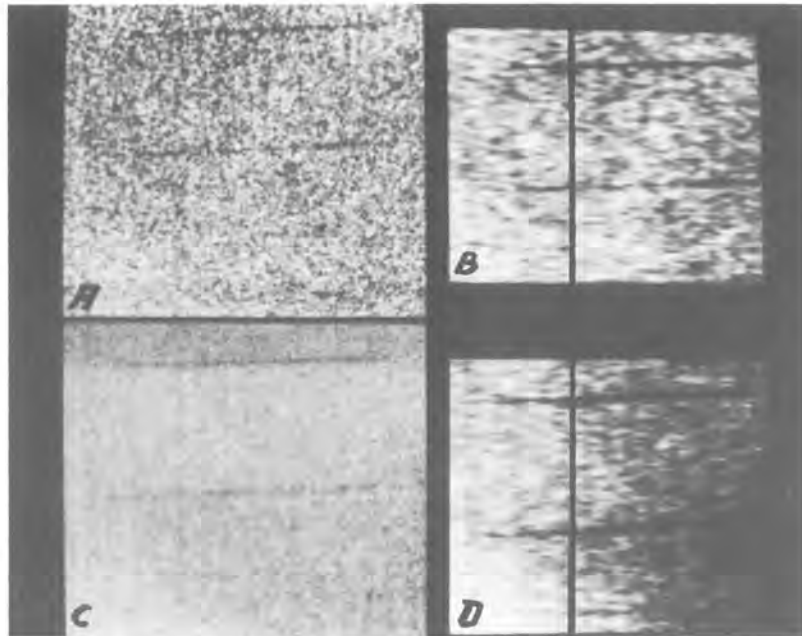


Bild 6.1.4.2-7 (A-D): Vergleich einer Einzelaufnahme mit dem Überlagerungsbild einer Mehrfilmaufnahme

Die Spaltenprofile der in Bild 6.1.4.2-7B und -7D gekennzeichneten Position werden in Bild 6.1.4.2-8 dargestellt. Die Abszisse stellt die den Filmschwärzungen entsprechenden Grauwerte der Digitalbilder dar, während die Ordinate die Bildpunktposition in Spaltenrichtung angibt. Die Grauwert-Minima der Spaltenprofile (Position: 1, 2, 3) kennzeichnen die Fehlerposition sowie das Kontrastverhalten der Oberflächenfehler. Das Digitalbild des Einzelfilmes weist zwei eindeutige Minima auf, das digitale Überlagerungsbild (6 Filme) läßt dagegen drei Fehlerstellen erkennen. Eine eindeutige Fehleraussage aus den Profilverläufen kann nur aus dem Überlagerungsbild (6 Filme) gewonnen werden.

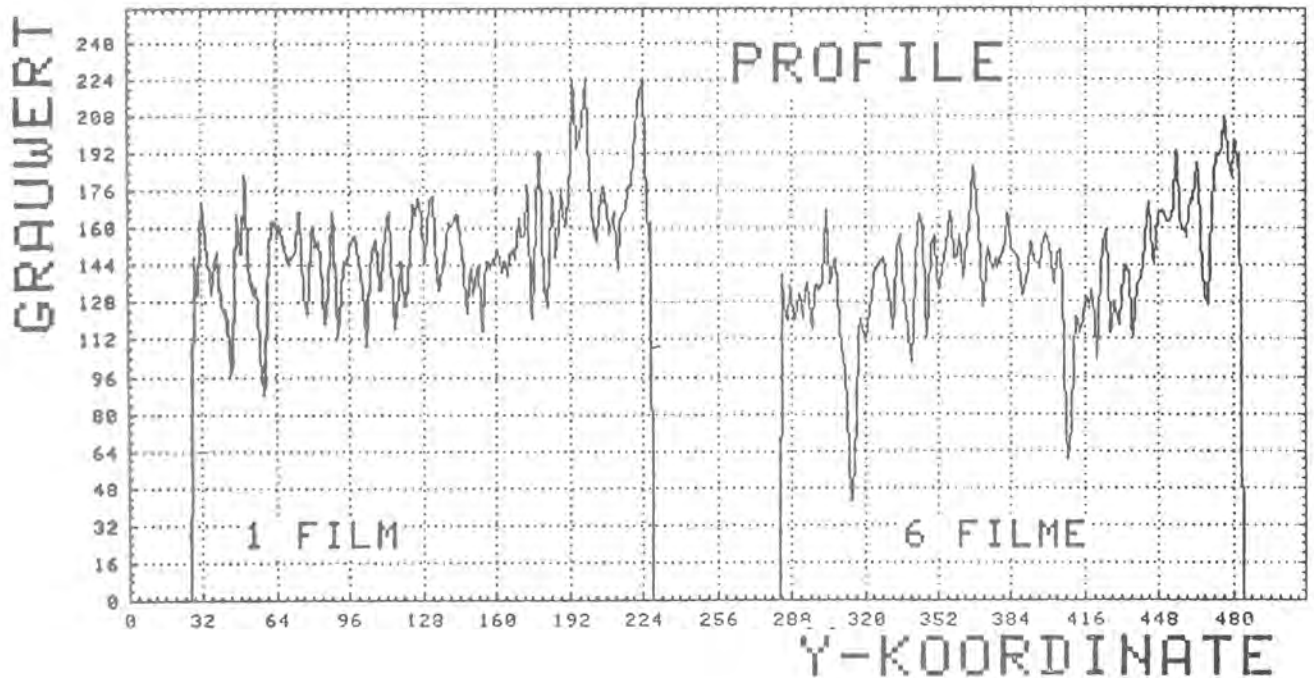


Bild 6.1.4.2-8: Profilverläufe einer Fehlergruppe (3 Fehler) bei einer Einzelaufnahme und einer Mehrfilmaufnahme

KE = mittl. Rauschamplitude - Signalamplitude (Einzelfilm)

KM = mittl. Rauschamplitude - Signalamplitude (Mehrfilmtechnik)

$$K = \frac{KE}{KM} \quad \text{Kontrastgewinn}$$

Eine abschließende Untersuchung galt einem qualitativen Vergleich zwischen einem Überlagerungsbild auf der Basis von 6 Filmen (D7) und einem Einzelfilm (D4). Bild 6.1.4.2-9 vergleicht drei Filmausschnitte (F = 5\*5 mm), die denselben Testkörperbereich darstellen. Die obere Bildreihe zeigt von links nach rechts das Digitalbild eines Einzelfilmes (D7), zweitens das Überlagerungsbild (6 Filme D7) und drittens das Digitalbild eines Einzelfilmes (D4). Die untere Reihe enthält jeweils die zugehörigen Fourier-Leistungsspektren. Die Fehlererkennbarkeit zeigt eine vergleichbare Qualität zwischen dem Überlagerungsbild (6 Filme D7) und dem Einzelfilm (D4), während der Einzelfilm (D7) eine wesentlich gröbere Kornstruktur aufweist.

Bild 6.1.4.2-10 unterscheidet sich von Bild 6.1.4.2-9 durch eine weiterführende Schwellwertoperation. Der helle senkrechte Linienzug in der Mitte der Leistungsspektren (untere Bildreihe) enthält im wesentlichen die Information der waagerechten Fehlerpaare der darüberliegenden Digitalbilder (Ortsbereich). Das Spektrum des Einzelfilmes (D7) der unteren Bildreihe ganz links zeigt im Gegensatz zu den zwei weiteren Leistungsspektren einen nur schwach ausgeprägten Linienzug.

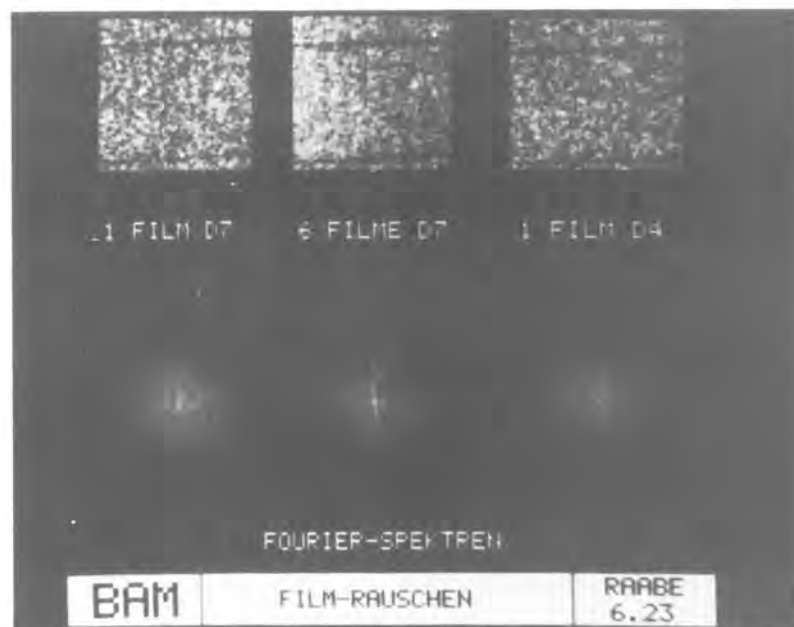


Bild 6.1.4.2-9: Qualitativer Vergleich von Röntgenfilmen

Ein Vergleich der Filmausschnitte und der Fourierspektren verdeutlicht, daß ein Überlagerungsbild auf der Basis von D7-Filmen durchaus die Qualität einer Röntgenfilmaufnahme eines D4-Filmes erreicht. Die Mehrfilmtechnik könnte demzufolge bei zeitkritischen Durchstrahlungsaufnahmen eine Alternative zur bisherigen Aufnahme-Praxis darstellen.

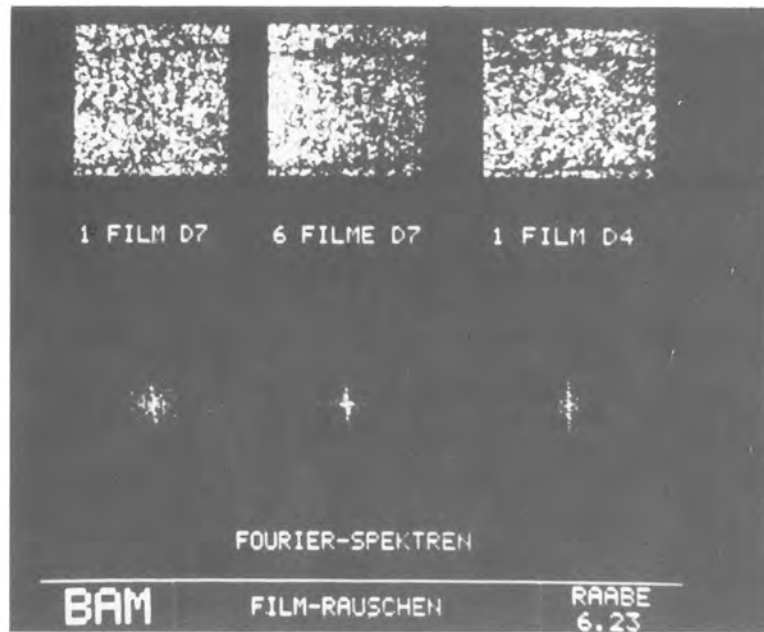


Bild 6.1.4.2-10: Binärbilddarstellung von Bild 6.1.4.2-9

### 6.1.5 Fehlerhervorhebung

#### 6.1.5.1 Kontrastanhebung interessierender Bildbereiche

Digitalbilder aus der Radiographie besitzen häufig unzureichende Kontrasteigenschaften, d.h. Materialfehler wie Risse oder Poren heben sich nur geringfügig von ihrer unmittelbaren Umgebung ab. Das führt zu Interpretationsschwierigkeiten bei der Fehlerbestimmung. Soll ein Digitalbild dem menschlichen Betrachter besser angepaßt werden, setzt das eine Neuverteilung der Grauwerte voraus. Ähnliche Überlegungen gelten auch für eine maschinelle Auswertung von Radiographien, auch hier sollten die Digitalbilder dem Maschinen-System in geeigneter Weise zur Weiterverarbeitung übergeben werden.

Eine Kontrastmanipulation zur Bildverbesserung steht mit der sogenannten Grauwert-Transformation zur Verfügung. Dabei wird über eine Transformations-Funktion jedem Grauwert des Ursprungsbildes ein neuer Grauwert zugeordnet. Diese Berechnung ist abhängig von den aktuellen Grauwerten, nicht aber von der Bildpunktposition innerhalb der Bildmatrix.

Die Transformationsfunktionen können linearen oder nichtlinearen Charakter besitzen. Die Auswahl einer geeigneten Funktion wird bestimmt durch den Bildinhalt und damit durch die vorhandene Grauwertverteilung (Grauwerthistogramm). Der Einsatz kann auf Bildausschnitte begrenzt werden, die vor einer Grauwert-Transformation durch ein Koordinaten-Fenster zu markieren sind.

Über die Transformationsvereinbarung wird jedem Grauwert  $r$  ein eindeutiger Grauwert  $s$  zugeordnet, wobei es sich bei  $r$  und  $s$  um normierte Grauwerte im Bereich  $0 \leq r \leq 1$  handelt. Der typische Grauwertbereich umfaßt 256 Graustufen zwischen 0 und 255.

$$s = T(r)$$

(6.1.5.1-1)

$$\text{mit } \begin{array}{l} 0 \leq T(r) \leq 1 \\ 0 \leq r \leq 1 \end{array}$$

Etwas anschaulicher wird dieser Zusammenhang für eine lineare Transformationsfunktion  $s = 2 \cdot r$  in Bild 6.1.5.1-1 dargestellt.

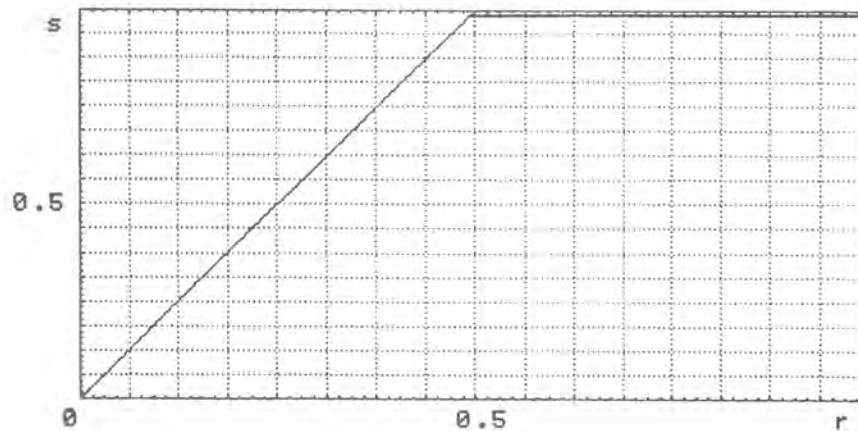


Bild 6.1.5.1-1: Lineare Transformationsfunktion  $s = 2 \cdot r$

$$\text{mit } \left| \begin{array}{ll} 0 \leq s \leq 1 & \text{für } 0 \leq r \leq 0,5 \\ s = 1 & \text{für } 0,5 < r \leq 1 \end{array} \right.$$

Wie aus Bild 6.1.5.1-1 zu entnehmen ist, werden die Grauwerte im Bereich  $0 \leq r \leq 0,5$  in den Grauwertbereich  $0 \leq s \leq 1$  transformiert. Daraus ergibt sich für alle Grauwerte bis  $r = 0,5$  eine Kontraststeigerung um den Faktor 2.

Die Abbildungen 6.1.5.1-2 und 6.1.5.1-3 geben ein Beispiel für eine isolierte Kontrastanhebung zur Detektion eines Risses in der Wärmeeinflußzone.



Bild 6.1.5.1-2: Originalaufnahme mit markiertem Schweißnahtbereich

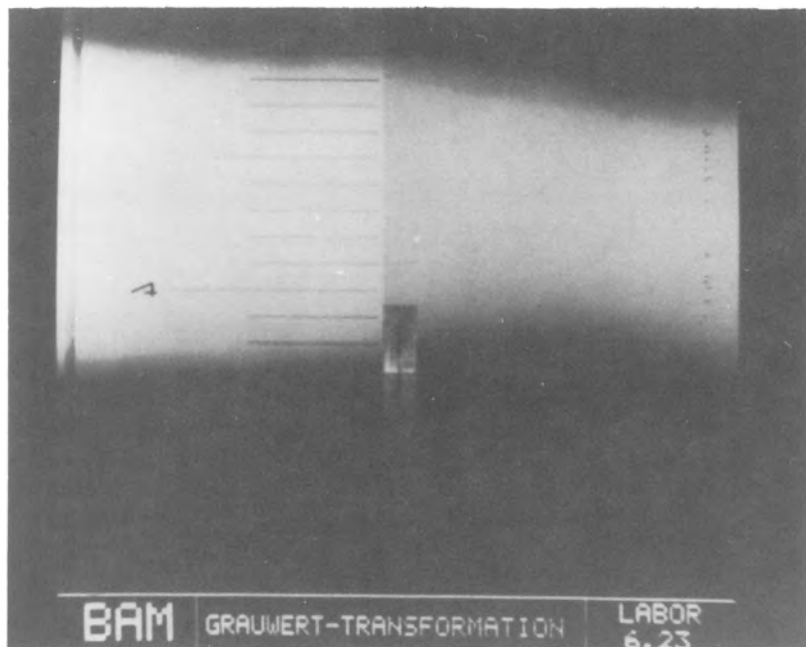


Bild 6.1.5.1-3: Lineare Grauwert-Transformation über den Bereich  $f(x,y)_{\min}$  bis  $f(x,y)_{\max}$



Ein weiteres bewährtes Verfahren steht mit der sogenannten Histogramm-Linearisierung zur Verfügung. Aus einem vorliegenden Digitalbild  $f(i, j)$  oder einem Bildausschnitt wird eine Wahrscheinlichkeitsverteilungskurve  $p(r)$  der im Bereich  $0 \leq r \leq 1$  normalisierten Grauwerte erstellt (Gleichung 6.1.5.1-2).

$$p(r_K) = \frac{n_K}{n} \quad \left| \begin{array}{l} 0 \leq r_K \leq 1 \\ K = 0, 1, \dots, L-1 \end{array} \right. \quad (6.1.5.1-2)$$

$p(r_K)$  = Wahrscheinlichkeit des K-ten Grauwertes  
 $L$  = Anzahl der möglichen Grauwerte  
 $n_K$  = Häufigkeit eines Grauwertes im Digitalbild  
 $n$  = Gesamtzahl der Bildpunkte

Die sich anschließende Histogramm-Linearisierung hat eine gleichförmige Verteilung der Grauwerte  $f(i, j)$  zum Ziel. Die Wahrscheinlichkeit aller normalisierten Grauwerte  $s$  der neuverteilten Bildmatrix  $g(i, j)$  wird gleich groß. Die Berechnung der kumulativen Wahrscheinlichkeitsfunktion für diskrete Verteilungen geht aus Gleichung 6.1.5.1-3 hervor. Sie bildet die Transformationsfunktion zur Histogramm-Linearisierung.

$$s_K = T(r_K) = \sum_{j=0}^K \frac{n_j}{n} = \sum_{j=0}^K p(r_j) \quad \left| \begin{array}{l} 0 \leq r \leq 1 \\ K = 0, 1, \dots, L-1 \end{array} \right. \quad (6.1.5.1-3)$$

$s_K$  = normierter Grauwert nach der Grauwerttransformation  
 $n_j$  = Häufigkeit des Grauwertes  $j$   
 $n$  = Gesamtzahl der Bildpunkte  
 $p(r_j)$  = Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Grauwertes  $j$

Die Histogramm-Linearisierung erweist sich bei radiographischen Aufnahmen besonders wirksam, wenn es sich um die Hervorhebung von Materialfehlern mit geringen Kontrastunterschieden zu einem angrenzenden, weitgehend homogenen Materialbereich handelt.

#### 6.1.5.2 Kantenanhebung

Eine Verbesserung der Bildauswertung kann auch durch konturverstärkende Bildverarbeitungsroutinen erreicht werden.

Dabei wird der Grauwertabstand zwischen einem Linienzug oder Kontur und dem angrenzenden Bildbereich durch einen geeigneten Algorithmus verstärkt. Die Berechnungen basieren in erster Linie auf Grauwertdifferenzen benachbarter Bildpunkte. Wie in der eindimensionalen Signalverarbeitung zur Hervorhebung von Sprungstellen kommen auch in der Bildverarbeitung Gradientenverfahren zur Anwendung.

Bei dem Roberts-Gradienten (Gleichung 6.1.5.2-1) wird jeder Bildpunkt (Pixel) des transformierten Bildes  $g(i, j)$  durch die Summe der Diagonal-Differenzen von vier benachbarten Bildelementen berechnet. Abbildung 6.1.5.2-1 zeigt den Effekt einer Konturverstärkung durch Berechnung des Roberts-Gradienten.

$$g(i, j) = | f(i, j) - f(i+1, j+1) | + | f(i, j+1) - f(i+1, j) | \quad (6.1.5.2-1)$$

$g(i, j)$  = transformierter Grauwert

$f(i, j)$  = Grauwert des Ursprungsbildes

Die Berechnung hat Extremwerte an Kanten und Konturen zur Folge, die in der Regel eine bessere Wahrnehmung von Rissen oder Poren (umgebende Konturen) ermöglichen. Eine weiterführende Schwellwertoperation, die allen Konturstellen den Grauwert schwarz (= 0) und allen übrigen Bildelementen den Grauwert weiß (= 255) zuordnet, kann zu einer weiteren Verbesserung führen.



Bild 6.1.5.2-1: Kantenanhebung durch Berechnung des Roberts-Gradienten

Ähnliche Ergebnisse wie der Roberts-Gradient liefert der Laplace-Operator. Auch er besitzt die Eigenschaft, Linienstrukturen hervorzuheben. Dabei bestimmt die Differenz aus der Summe von vier Pixelwerten in den Eckpunkten einer 3 x 3 Matrix mit dem vierfachen Wert des Bildelementes im Matrixmittelpunkt den Betrag des Operators. Gleichung 6.1.5.2-2 beschreibt die Berechnung des Laplace-Operators für diskrete Anwendungsfälle im Ortsbereich.

$$\nabla^2 f(i, j) = [f(i+1, j) + f(i-1, j) + f(i, j+1) + f(i, j-1)] - 4f(i, j)$$

(6.1.5.2-2)

Ein Beispiel für dieses Hochpaßfilter im Ortsbereich wird in Abbildung 6.1.5.2-2 gegeben. Im Gegensatz zum Original wird deutlich die Verstärkung von hochfrequenten Bildanteilen sichtbar. Nachteilig wirkt sich diese Operation bei stark verrauschten Bildinhalten aus, da durch diesen Vorgang nicht zuletzt auch Rauschanteile hervorgehoben werden. Für viele Anwendungsfälle ist daher eine vorherige Tiefpaßfilterung durchzuführen.



Bild 6.1.5.2-2: Laplace-Filterung

Die pseudoplastische Darstellung von Digitalbildern wirkt sich ebenfalls positiv auf die Detektion von Konturen aus. Für diese Darstellungsform wird die Differenz von zwei Bildmatrizen desselben Inhalts gebildet, wobei vor der Subtraktion eine Positionsverschiebung einer Bildmatrix um ein bis zwei Bildelemente in den Ortkoordinaten  $(x,y)$  der Bildebene erfolgt (Gleichung 6.1.5.2-3).

$$g(i,j) = f(i,j) - f(i + \Delta i, j + \Delta j) \quad (6.1.5.2-3)$$

$f(i,j)$  = Bildmatrix eines Digitalbildes in Originallage

$f(i + \Delta i, j + \Delta j)$  = Bildmatrix nach einer Positionsverschiebung

$g(i,j)$  = Digitales Differenzbild

Der scheinbar dreidimensionale Charakter des Differenzbildes entsteht durch die abgesetzten Konturstrukturen nach der Subtraktion. Ein Beispiel für die pseudoplastische Darstellung einer Röntgenaufnahme zeigt die Abbildung 6.1.5.2-3.



Bild 6.1.5.2-3: Pseudoplastische Darstellung

### 6.1.5.3 Pseudocolorotechnik

Die Pseudocolorotechnik basiert auf den gleichen Transformations-Verfahren, wie sie in Kapitel 6.1.5.1 beschrieben wurden. Auch hier findet über eine vorgegebene Transformations-Funktion eine ortsunabhängige Grauwert-Transformation statt. Der Unterschied beruht auf drei unabhängigen Transformationen der Grauwerte durch Zuordnung zu den drei Grundfarben rot, grün und blau. Dabei zeigt sich, daß Farbunterschiede (z. B. rot, blau) besser wahrnehmbar sind als Kontrastunterschiede zwischen benachbarten Grauwerten. Eine gezielte Kombination der drei Transformationsfunktionen für rot, grün und blau ermöglicht auch beliebige Farbmischungen und Farbsättigungen. Eine Aufteilung des Grauwertbereiches von Grauwert (0 = schwarz) bis Grauwert (255 = weiß) in drei Farbbereiche mit konstanter Farbsättigung wird durch die Funktionsverläufe in Abbildung 6.1.5.3-1 gegeben.

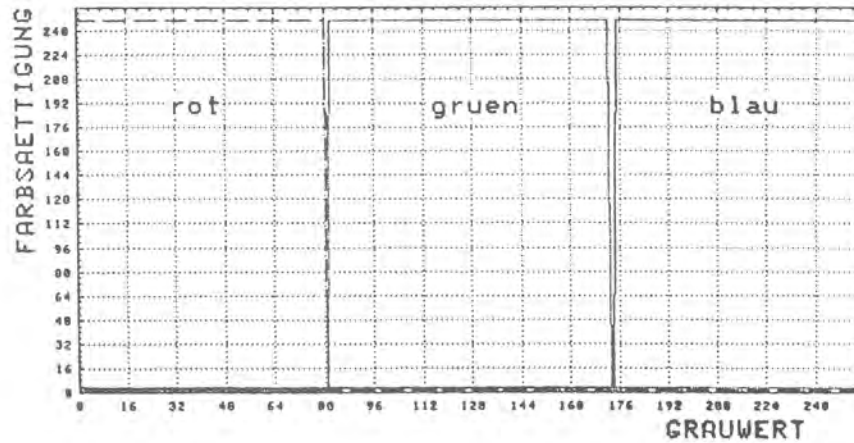


Bild 6.1.5.3-1: Funktionsdarstellung einer Farbverteilung des Grauwertbereiches ( 0 - 255) in drei Farbtöne mit konstanter Farbsättigung

In Bild 6.1.5.3-1 wird dem Grauwertintervall 0 bis 85 die Farbart rot zugeordnet, dem Bereich zwischen Grauwert 86 bis 170 die Farbart grün und dem restlichen Bereich bis Grauwert 255 die Farbart blau. Bei den vorliegenden Funktionsverläufen erscheinen in einem Farbbild monochromatische Farbbereiche mit maximaler Farbsättigung.

## 6.1.6 Fehlersegmentierung

### 6.1.6.1 Unterdrückung des Bildhintergrundes und Beseitigung von fehlerähnlichen Störgrößen

Bei der Bewertung von Digitalbildern oder von Teilbereichen innerhalb eines Bildes wird sich häufig statistischer Methoden bedient. Sie beschreiben unabhängig von dem subjektiven Bildeindruck des Betrachters Bildinhalte und Grauwertverteilungen auf Grund mathematischer Gesetzmäßigkeiten.

Ein Verfahren ist die Erstellung eines Grauwert-Histogramms, bei dem die absolute oder relative Häufigkeit eines bestimmten Grauwertes innerhalb des Digitalbildes über einer Grauwertskala dargestellt wird. Die Berechnung der relativen Häufigkeit erfolgt nach Gleichung 6.1.6.1-1.

$$\text{Pr}(K) = \frac{n_K}{n} \quad | \quad K = 0, 1, \dots, L-1 \quad (6.1.6.1-1)$$

$\text{Pr}(K)$  = Wahrscheinlichkeit des K-ten Grauwertes (relative Häufigkeit)

$n_K$  = Anzahl der Ereignisse des K-ten Grauwertes im Bild

$n$  = Anzahl der Bildelemente des Digitalbildes

$L$  = Zahl der Quantisierungsintervalle (Grauwertstufen)

Abbildung 6.1.6.1-1 zeigt eine typische Schweißnahtaufnahme, Abb. 6.1.6.1-2 beinhaltet das zugehörige Grauerthistogramm. Der Schweißnahtbereich besteht aus hellen Bildbereichen und erstreckt sich in erster Linie über den rechten Histogrammbereich, während Fehler und Muttermaterial den linken Teil des Histogrammes, d.h. den Bereich niedriger Grauwerte einnehmen.



Bild 6.1.6.1-1: Typische Schweißnahtaufnahme mit hellem Schweißnahtbereich und eingelagerten Fehlern, sowie angrenzendes Muttermaterial (dunkler Bildbereich)

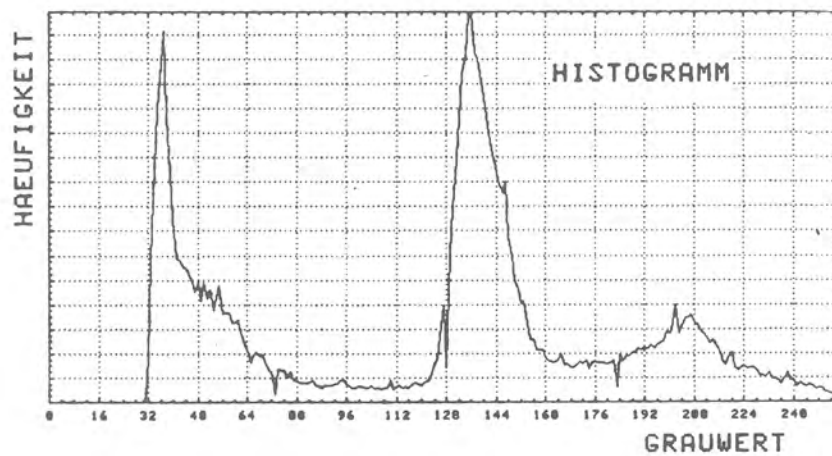


Bild 6.1.6.1-2: Häufigkeitsverteilung der Grauwerte in Bild 6.1.6.1-1



Mit dem Grauwertprofil zwischen zwei Bildelementen (Pixels) besteht eine weitere Möglichkeit, das Grauwertverhalten im Bild darzustellen. Beim Profil werden die Absolutbeträge der Grauwerte ( $0 \leq \text{Grauwert} \leq 255$ ) als Funktion der Ortskoordinate dargestellt. In Abbildung 6.1.6.1-3 ist ein Zeilenprofil aus dem Schweißnahtbereich (Bild 6.1.6.1-1) aufgezeichnet. Eingelagerte Schweißnahtfehler heben sich durch niedrige Grauwerte von den Werten des Schweißgutes ab.

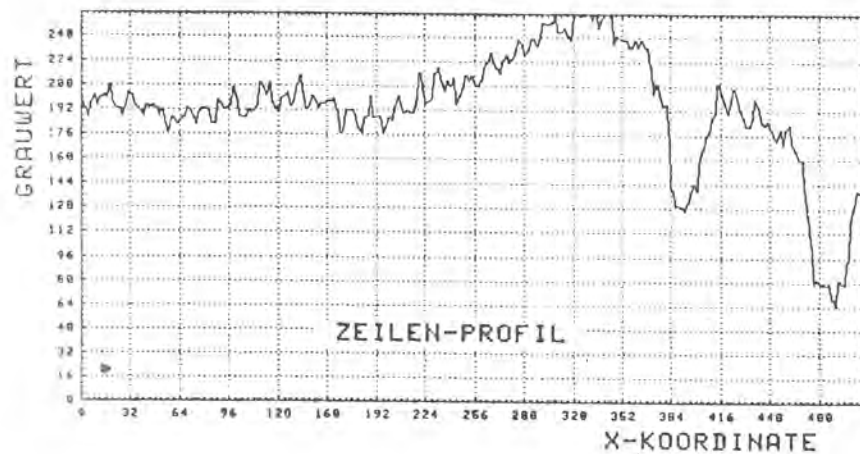


Bild 6.1.6.1-3: Zeilenprofil aus dem Schweißnahtbereich von Abbildung 6.1.6.1-1, deutlich sichtbar die Profile von zwei eingelagerten Poren

Die Fehlererkennung in Schweißnahtaufnahmen kann wesentlich erleichtert werden, wenn es gelingt, redundante Bildinformation wie Störgrößen oder Raupenstrukturen im Schweißnahtbereich zu eliminieren. Voraussetzung sind Unterscheidungskriterien, die mit ausreichender Sicherheit eine Segmentierung gewährleisten. Sieht man einmal von typischen Formmerkmalen ab, so bleiben die Aufteilung des Digitalbildes in einen prüftechnisch wichtigen Teil mit Fehlermerkmalen und ein Materialbereich ohne erkennbare Fehlerstrukturen. Zwei grundlegende Verarbeitungsmethoden bieten sich an. Einmal die Trennung durch Schwellwertoperationen, die auf Segmentierung des Grauwertbereiches basieren, zum anderen die Unterdrückung von Strukturen durch Filterungstechniken im Orts- bzw. Frequenzbereich.

Die Segmentierung des Grauwertbereiches setzt Informationen voraus, die Aufschluß über die Grauwertlage von Schweißnahtstrukturen oder Materialfehlern zulassen. Die Erstellung des Histogramms einer Schweißnahtaufnahme zeigt in der Regel ausgeprägte Häufigkeitsverteilungen, die durch die Festlegung eines Schwellwertes  $T$  die Unterdrückung redundanter Bildinformation ermöglichen. Gleichung 6.1.6.1-1 beschreibt die Homogenisierung störender Bildstrukturen unter Beibehaltung der Bildeigenschaften in Materialfehlerbereichen.

$$g(x,y) = \begin{cases} f(x,y) & \text{für } f(x,y) < T \\ K & \text{für } f(x,y) \geq T \end{cases} \quad (6.1.6.1-1)$$

Die Abbildungen 6.1.6.1-4 bis 6.1.6.1-6 verdeutlichen die schrittweise Bildverbesserung durch eine Kombination aus Grauwerttransformation und Bildsegmentierung. Das Original (Bild 6.1.6.1-4A) wird über eine nichtlineare Grauwerttransformation in seinen Kontrasteigenschaften so verbessert, daß die Festlegung eines Schwellwertes zur Bildsegmentierung ermöglicht wird. Die Unterdrückung der störenden Raupenstrukturen durch die geeignete Wahl eines Schwellwertes führt,

wie in Abbildung 6.1.6.1-6 zu sehen, zu einer deutlichen Verbesserung der Fehlererkennbarkeit. Eine automatische Schwellwertbestimmung durch Berechnung eines Minimums der Verteilung zwischen einem Häufigkeitsmaximum im unteren bzw. oberen Grauwertbereich setzt eine Häufigkeitsverteilung mit zwei ausgeprägten Maxima voraus.

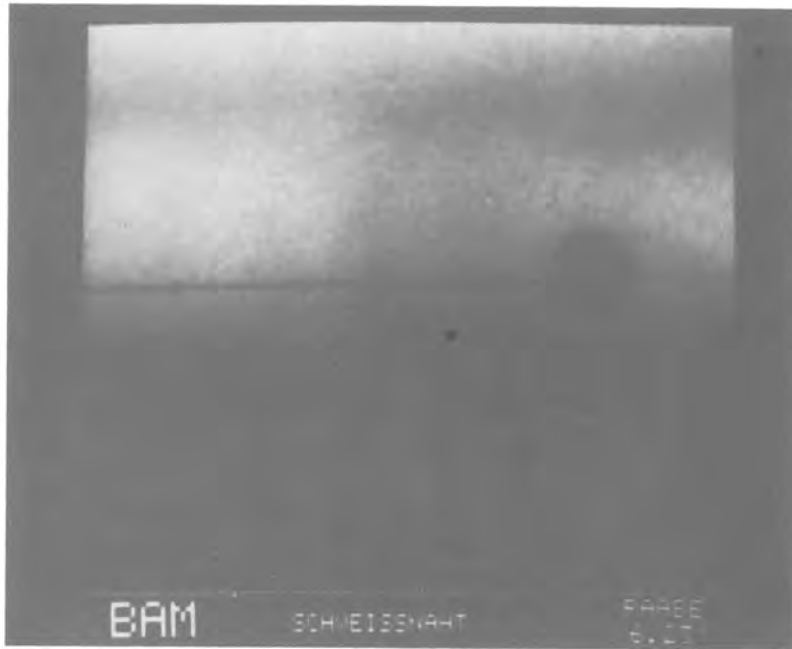


Bild 6.1.6.1-4A: Schweißnahtaufnahme (Original)

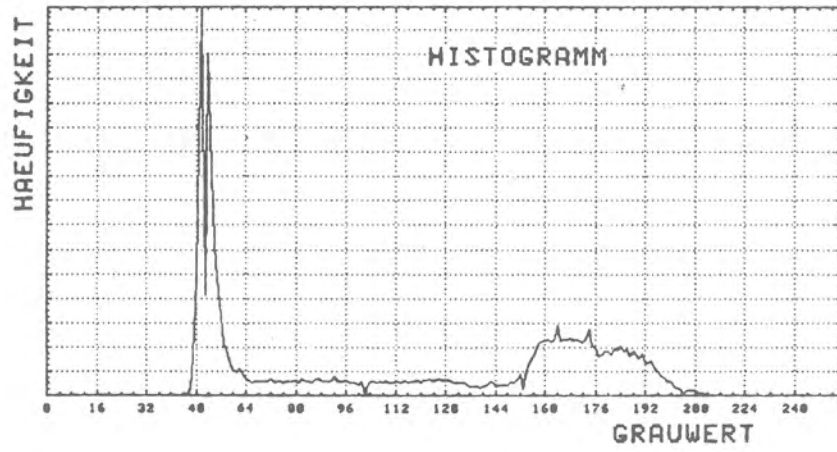


Bild 6.1.6.1-4B: Histogramm von Bild 6.1.6.1-4A



Bild 6.1.6.1-5A: Schweißnahtaufnahme nach erfolgter Grauwerttransformation

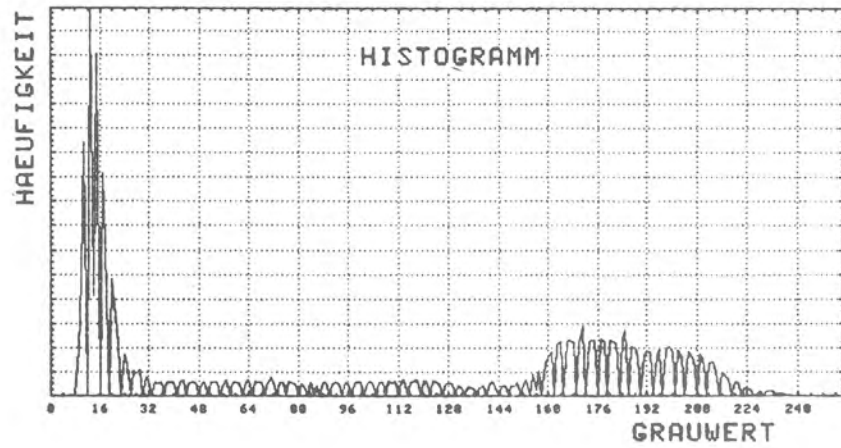


Bild 6.1.6.1-5B: Histogramm von Bild 6.1.6.1-5A



Bild 6.1.6.1-6A: Segmentiertes Digitalbild

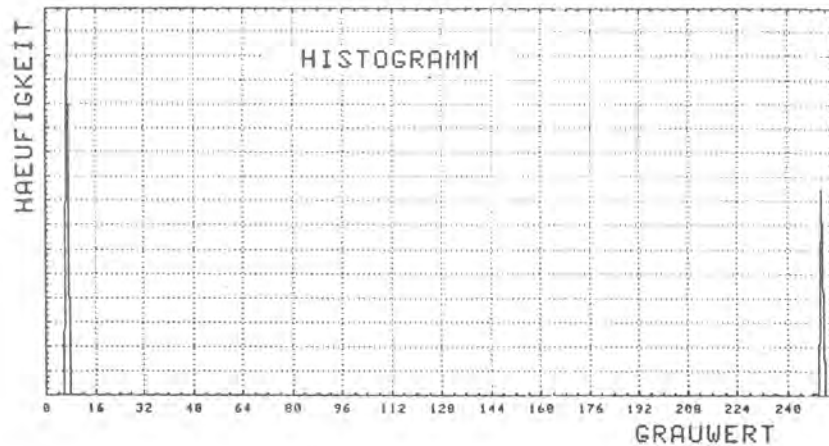


Bild 6.1.6.1-6B: Histogramm von Bild 6.1.6.1-6A

Sollen Störstrukturen gleicher Grauwertlage, wie sie Risse oder Poren aufweisen, aus der Bildebene entfernt werden, so sind Schwellwertoperationen mit abgestufter Unterteilung des Grauwertbereiches ungeeignet. Filterungen im Orts- oder Frequenzbereich bieten hier die Möglichkeit einer gezielten Bildverbesserung. Dabei spielt die Ortsfrequenz als charakteristische Größe der Bildfunktion eine wichtige Rolle. Sie beschreibt die Anzahl der Grauwert-Wechsel pro Längeneinheit und ist somit ein Maß für die Feinheit der im Bild vorhandenen Struktur. Die Struktur von Schweißnahtaufnahmen setzt sich in der Regel aus niederfrequenten Anteilen im Muttermaterial, bedingt durch homogene Flächen mit geringen Kontrastunterschieden und höheren Ortsfrequenzen im Schweißnahtbereich zusammen, die eine Trennung zwischen Schweißnaht und Muttermaterial zulassen. Raupenstrukturen im Schweißnahtbereich

sind in der Regel niederfrequenter als eingelagerte Risse oder Poren. Das ermöglicht eine Segmentierung im Frequenzbereich nach der Objektgröße. So können fehlerbeschreibende Frequenzanteile, sofern sie höher liegen als Störfrequenzen, durch eine Hochpaßfilterung mit einer Grenzfrequenz  $f_g$ , die oberhalb der Störfrequenzen, aber unterhalb der Fehlerfrequenzen liegt, selektiert werden.

Ein Beispiel für die Segmentierung von Materialfehlern über die Objektgröße wird in den Abbildungen 6.1.6.1-7A und 6.1.6.1-7B vorgestellt.



Bild 6.1.6.1-7A: Schweißnahtaufnahme mit eingelagerten Poren, Hochpaßfilterung zur Unterdrückung störender Schweißnahtstrukturen



Bild 6.1.6.1-7B: Originalaufnahme und Segmentierung des hochpaßgefilterten Bildbereiches aus Bild 6.1.6.1-7A

Gelingt es mittels Schwellwertoperationen, ein Binärbild zu erstellen, das neben Materialfehlern noch heterogene Bereiche mit kleinflächigen Störpunkten enthält, so gelingt in der Regel eine erhebliche Bildverbesserung durch den Einsatz eines Median-Filters. Die Abbildungen 6.1.6.1-8A bis -8C zeigen die stufenweise Verbesserung einer Bildvorlage durch die Kombination einer Schwellwertoperation mit einer nachfolgenden Median-Filterung und abschließender Ortsfilterung durch den Einsatz eines kantenerhaltenden Tiefpaßfilters.



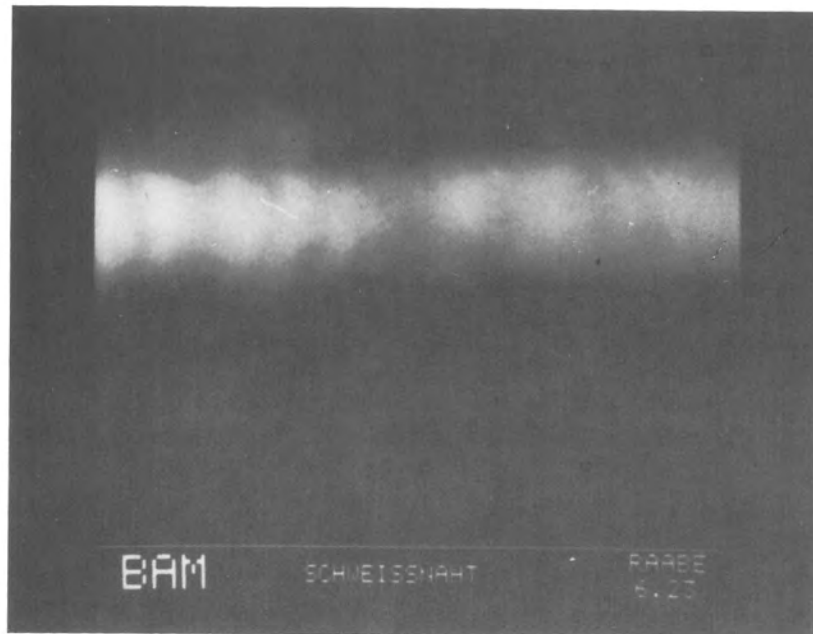


Bild 6.1.6.1-8A: Originalaufnahme

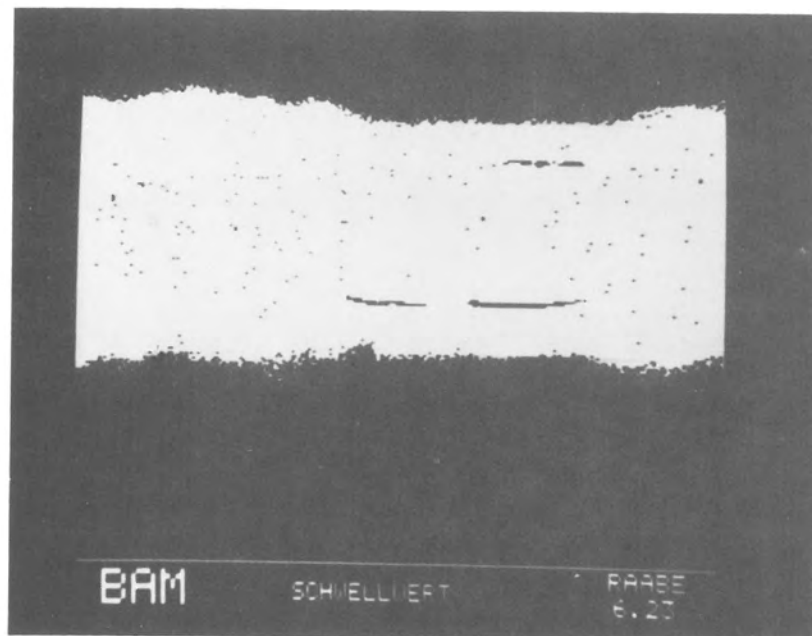


Bild 6.1.6.1-8B: Ergebnis nach Durchführung einer Schwellwertoperation



Bild 6.1.6.1-8C: Unterdrückung von Störstrukturen durch Einsatz einer Median-Filterung und abschließender Tiefpaßfilterung

#### 6.1.6.2 Eliminierung bestimmter Schweißnahtfehler mit Schwellwertoperationen

Wie in Kapitel 6.1.6.1 beschrieben, eignen sich Schwellwertoperationen u.a. zur Trennung von Fehlerinformation und redundanter Bildinformation. Eine Verfeinerung dieses Verfahrens kann durch das Setzen mehrerer Schwellwerte erreicht werden. Interessierende Bildbereiche werden durch homogene Flächen mit konstanten Grauwerten dargestellt. Die Festlegung der Schwellwerte wird durch den Bildinhalt und die Zielsetzung der Verarbeitung bestimmt. Diese sogenannte Äquidensitendarstellung setzt voraus, daß die darzustellenden Bildbereiche nur Grauwerte in bestimmten Grauwertintervallen beeinhaltten. Die Erstellung eines Binärbildes, dessen Fehlerbereich im Grauwertintervall  $T_1 < f(x,y) < T_2$  ( $T_1$  = unterer Schwellwert,  $T_2$  = oberer Schwellwert) liegt, kann durch Gleichung 6.1.6.2-1 beschrieben werden.

$$g(x,y) = \begin{cases} 255 & \text{für } f(x,y) \geq T_1 \\ 0 & \text{für } T_1 < f(x,y) < T_2 \\ 255 & \text{für } f(x,y) \leq T_2 \end{cases} \quad (6.1.6.1.2-1)$$

$g(x,y)$  = transformiertes Bild

$f(x,y)$  = Bildfunktion des Originals

In vielen Anwendungsfällen wird aber die einfache Schwellwertoperation zu keinem auswertbaren Ergebnis führen. Inhomogenitäten selbst in kleinen Rissen führen zu einer Grauwertstreuung, die einer eindeutigen Fehlertrennung entgegenwirken. Eine vorausgehende Ortsfilterung mit quadratischen Filtermasken führt zwar zu kleineren Streuungswerten, hat aber häufig zur Folge, daß rißförmige Fehler nach einer Filterung nicht mehr detektierbar sind. Dieser Sachverhalt kann vielfach durch Ortsfilterungen mit rechteckigen Filtermasken ausgeglichen werden, indem eine richtungsabhängige Ortsfilterung mit rechteckigen Filtermasken durchgeführt wird (Gleichung 6.1.6.2-2).

$$g(x,y) = \frac{1}{n \cdot m} \cdot \sum_{(n,m) \in S} f(n,m) \quad \left| \begin{array}{l} \text{für } x,y = 0, 1, \dots, N-1 \\ \text{mit } n \ll m \text{ bzw. } n \gg m \end{array} \right. \quad (6.1.6.2-2)$$

### 6.1.7 Spezielle Probleme bei der Prüfung austenitischer Werkstücke

Bei der Grobstrukturprüfung ferritischer Werkstoffe auf Innenfehler tritt im allgemeinen keine störende Struktur auf den Durchstrahlungsaufnahmen auf, sofern nicht Oberflächenstrukturen wie Walzhaut, Schweißnahttraupe und -wurzel oder Schlagzeichen die Auswertung erschweren. Etwas komplizierter werden die Verhältnisse bei grobkörnigen austenitischen Blechen, bei denen auch an dünnem Blech mit einigen Millimetern Dicke häufig Kornstrukturen zu beobachten sind. Offenbar wurden diese Erscheinungen in Deutschland in früheren Jahren nicht beobachtet, denn sie werden auch hier mit dem englischen Ausdruck "mottling" bezeichnet. Dieses mottling läßt auf den Durchstrahlungsaufnahmen gleichsam eine Gänsehaut erscheinen, d.h., daß die Aufnahme von dunklen Linien und hellen Flecken überzogen erscheint. Dieses mottling kann die Erkennung von Innenfehlern deutlich erschweren, besonders in der Wärmeeinflußzone sind Fehlinterpretationen möglich, wenn sich die Korngrenzen zu durchgehenden Linien zusammenfinden.

Eine Nachverarbeitung von Radiographien solcher austenitischen Bleche hat das Ziel, das mottling gegenüber den wahren Fehleranzeigen zurücktreten zu lassen, also das Signal/Rausch-Verhältnis zu verbessern.

Einige Untersuchungen wie auch Literaturangaben, speziell aus Japan, bestätigen die Annahme, daß die Abbildungen der Kornstruktur sich mit der Energie der Primärstrahlung ändern müßten. Ein Lösungsansatz zur Bildverbesserung wäre dann die Überlagerung von Durchstrahlungsaufnahmen verschiedener Energie, ähnlich der Einzelbild-Überlagerung in der Mehrfilmtechnik (siehe Kapitel 6.1.4.2). Bei positionsgerechter Überlagerung entsteht ein Summenbild, das ortsfeste Anzeigen verstärkt, während ortsveränderliche Anzeigen durch Mittelung unterdrückt werden. Demnach muß die Überlagerung, angewendet auf Durchstrahlungsaufnahmen mit veränderter

Abbildung der Kornstruktur, bei Austenitaufnahmen zu einer verbesserten Bildvorlage führen.

Als Versuchsobjekt wurde ein austenitisches Feinblech mit 2 mm Wandstärke verwendet, wie es in der Durchstrahlungsaufnahme in Bild 6.1.7-1 abgebildet ist. Neben der Schweißnaht wurde ein 13 mm langer und 120 µm breiter Schlitz mit Funkenerosion eingebracht, dessen Tiefe von ca. 250 µm bis 80 µm verläuft. Um den Schlitz im Bild besser sichtbar zu machen, wurde er mittels Bildvorverarbeitung im Kontrast angehoben.



Bild 6.1.7-1: Durchstrahlungsaufnahme eines austenitischen Feinblechs

Die Verarbeitungen zur Kornstrukturunterdrückung werden nun im vorliegenden Bild an zwei Stellen demonstriert. Zum einen an dem kontrastangehobenen Bildausschnitt mit Fehler und zum anderen an einem Schwärzungsprofil, das so angelegt wurde, daß es den 14er, 15er und 16er Draht des Bildgüteprüfkörpers erfaßt. Durch den Bildgüteprüfkörper als Kontrastreferenz lassen sich in den Profilen die Unterschiede zwischen mottling-Rauschen und Abbildungskontrast besonders gut sichtbar machen.

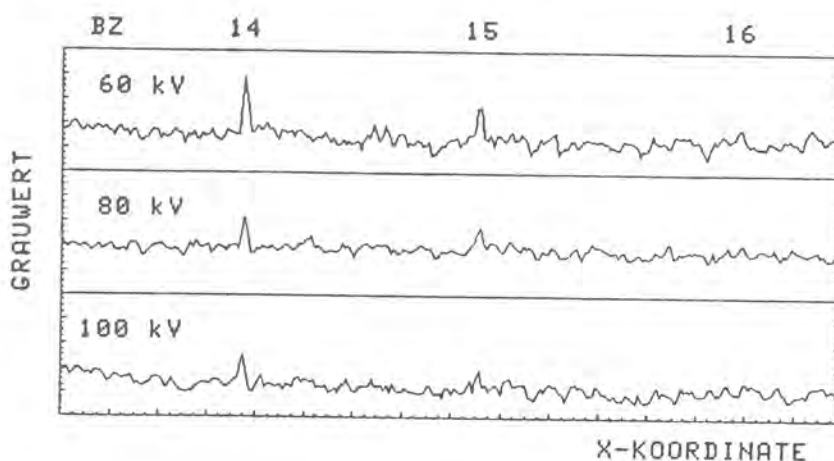


Bild 6.1.7-2: Drahtsteg-Profile bei verschiedenen Röhrensparnungen

Bild 6.1.7-2 zeigt die Profile mit den Drahtstegen bei drei verschiedenen Röhrensparnungen. Die Profile unterscheiden sich durch den Kontrast der Drahtstege, der bei 60 kV am größten ist, und die Amplitude des mottling, die bei 100 kV dem Kontrast der Drahtstege am nächsten kommt. Außerdem zeigt sich schon mit bloßem Auge eine Verschiebung und Formänderung des mottling.

Für die Überlagerung dieser Profile wie auch der zugehörigen Bilder kommen verschiedene Verfahren in Frage.

### Additive Überlagerung

Die einfachste Form der Überlagerung ist eine lineare Addition der Einzelbilder.

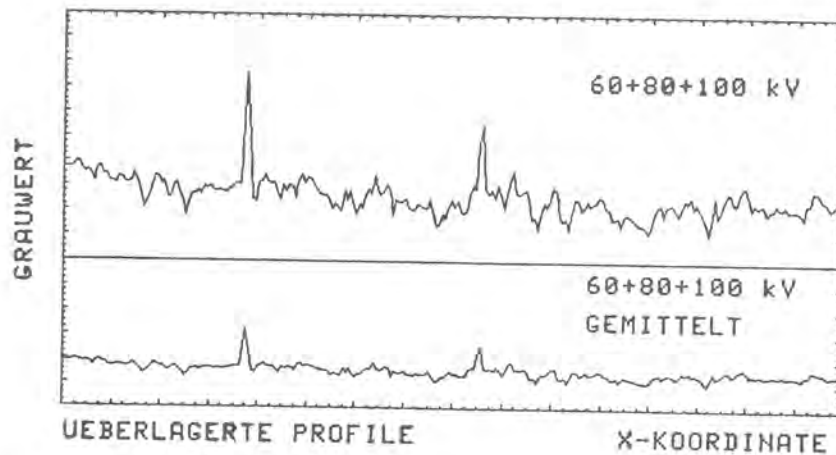


Bild 6.1.7-3: Additive Überlagerung der Drahtsteg-Profile

Im oberen Teil des Bildes 6.1.7-3 wurden die drei Profile des Bildes 6.1.7-2 additiv überlagert. Damit sind auch die Amplituden zumindest für die ortsfesten Anzeigen auf den dreifachen Wert angehoben. Um die Wirkung der additiven Überlagerung mit den Einzelprofilen besser vergleichen zu können, wurde das obere Profil durch die Anzahl der Überlagerungen gemittelt und im unteren Teil des Bildes 6.1.7-3 dargestellt.

Es ist deutlich zu erkennen, daß sich das Verhältnis von Fehlerkontrast zu mottling sichtbar verbessert hat. Die Ausschläge in den Kornanzeigen sind wahrnehmbar zurückgegangen, während die Abbildung der Drähte etwa erhalten blieb.

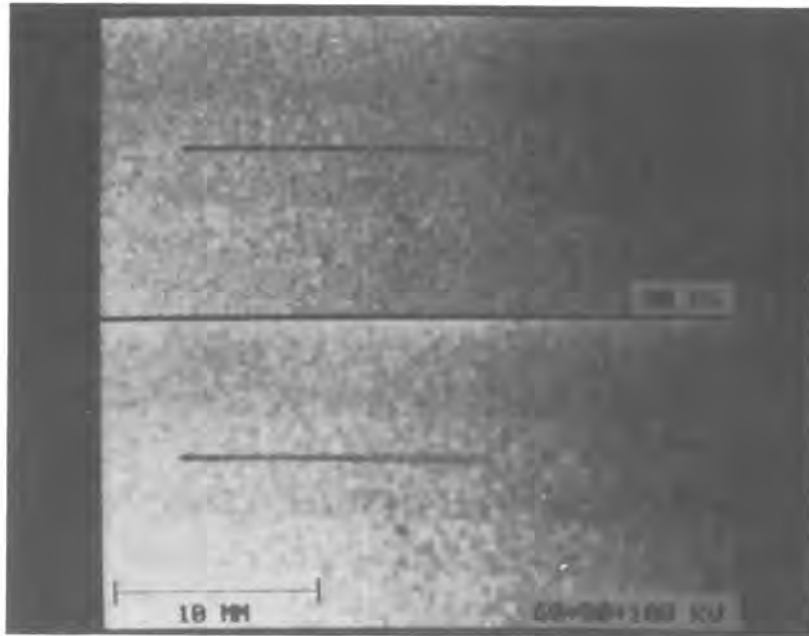


Bild 6.1.7-4: Additive Überlagerung der Duchstrahlungsaufnahme

Das vollständige Bild bestätigt diesen Eindruck. Der obere Teil des Bildes 6.1.7-4 zeigt den bereits erwähnten Bildausschnitt mit funkenerosiv eingebrachtem Fehler einer 80 kV Einzelaufnahme. Im unteren Teil ist die Überlagerung aus 60, 80 und 100 kV Aufnahmen dargestellt. Die mottling-Anzeigen erscheinen im Vergleich zu dem Referenzbild mit 80 kV verwischt und kontrastarm. Die in der oberen Einzelaufnahme enthaltene harte Abbildung der Kornstruktur ist durch die Überlagerung in einen weichen Rauschuntergrund übergegangen, wie aus den Betrachtungen der Profile zu erwarten war.

Nachteilig bei diesem Verfahren ist, daß die Aufnahme mit der niedrigsten Strahlungsenergie den höchsten Beitrag zum Endergebnis liefert, während die Aufnahmen mit höherer Strahlungsenergie wegen des geringen Kontrastes unterbewertet eingehen.



### Normierung auf Fehlerkontrast

Wenn gleiche Beiträge der einzelnen Aufnahmen zum Gesamtergebnis erzielt werden sollen, muß eine Normierung des Fehlerkontrastes erfolgen. Dabei wird der Kontrast der einzelnen Aufnahmen auf jeweils den gleichen Betrag angehoben.

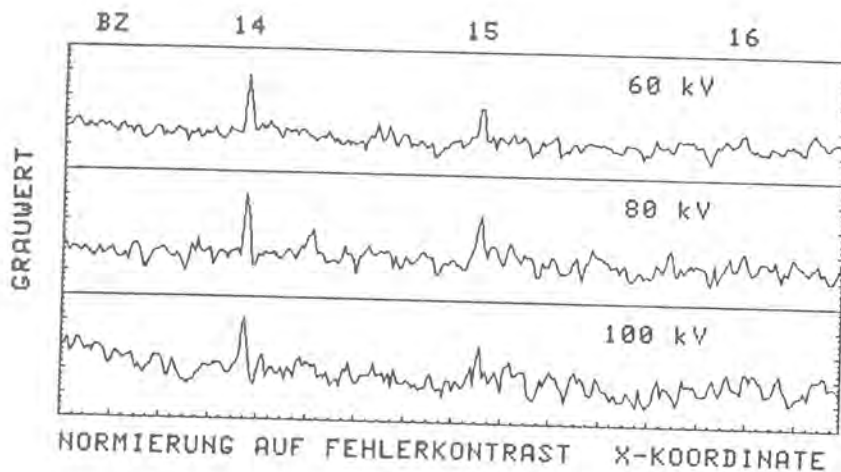


Bild 6.1.7-5: Kontrastnormierung der Drahtsteg-Profile

Das Bild 6.1.7-5 zeigt wiederum die drei Profile am Drahtsteg bei 60, 80 und 100 kV. Im Gegensatz zu den vorigen Profilen werden hier die 80 und 100 kV Profile in ihrem Betrag derart angehoben, daß die Drahtabbildungen in allen drei Profilen etwa gleiche Amplituden aufweisen. Die Anhebung auf gleiche Fehleramplitude hat natürlich auch eine Ausdehnung der mottling-Anzeigen zur Folge. Werden die drei Profile überlagert, so ergibt sich folgender Verlauf.

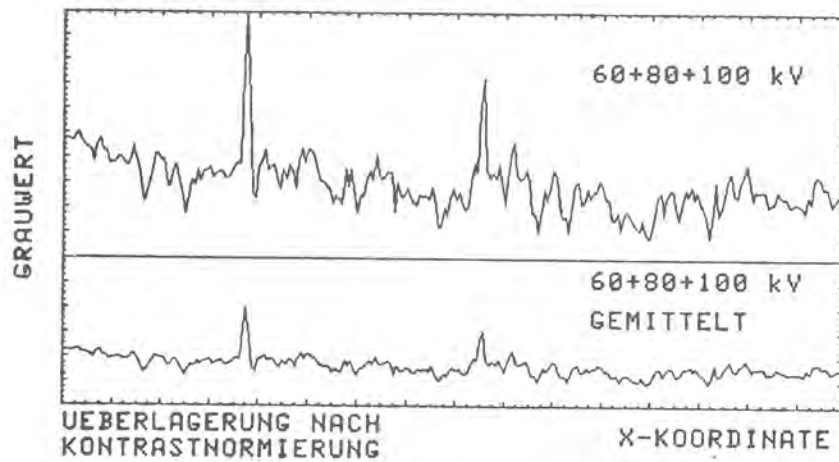


Bild 6.1.7-6: Überlagerung der Drahtsteg-Profile nach Kontrastnormierung

Der obere Teil des Bildes 6.1.7-6 zeigt wiederum die direkte additive Überlagerung und der untere Teil das durch Mittelung gewonnene Profil.

Im Vergleich zu der einfachen additiven Überlagerung ohne Normierung im Bild 6.1.7-3 zeigt sich hier ein nur geringfügig verbessertes Verhältnis zwischen mottling und Fehlerkontrast. Die Amplituden der Drahtabbildungen haben sich zwar erhöht, jedoch ist das mottling-Rauschen ebenfalls angehoben worden. Bei der Wahl von weiter auseinanderliegenden Röhrenspannungen als 60, 80 und 100 kV wäre das Ergebnis wohl eindrucksvoller.



Bild 6.1.7-7: Überlagerung kontrastnormierter Durchstrahlungsaufnahmen

Das nach dem Verfahren der Überlagerung kontrastnormierter Aufnahmen gewonnene Bild zeigt dennoch eine deutliche Verbesserung. Das unten dargestellte Überlagerungsbild in Bild 6.1.7-7 weist gegenüber der 80 kV Einzelaufnahme oben erhöhten Fehlerkontrast und eine Unterdrückung des mottling auf. Die Schärfe der Fehlerabbildung hat sich gegenüber der einfachen Addition verbessert. Durch die Anhebung der 80 und 100 kV Aufnahmen auf den gleichen Fehlerkontrast ist hier jedoch die Unterdrückung der Kornstruktur etwas geringer ausgefallen.

#### Koinzidenzfilterung

Um die Kornanzeigen noch weiter zu reduzieren, wurde ein weiteres Verfahren der digitalen Bildverarbeitung eingesetzt.

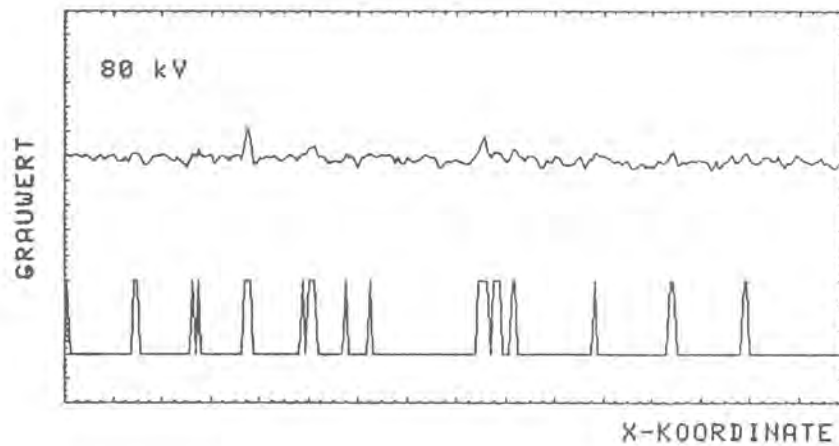


Bild 6.1.7-8: Binäres Profil

Aus den Grauwertprofilen werden durch geeignete Schwellwertoperationen binäre Profile gebildet. D.h., daß alle Amplituden, die einen bestimmten Grauwert überschreiten, auf einen einheitlichen Wert gesetzt werden, während alle anderen Teile des Profils einen konstanten niedrigen Wert erhalten. Das Bild 6.1.7-8 zeigt die Binarisierung des 80 kV-Profiles. Der Grenzwert wurde so gewählt, daß den Amplituden der Drahtabbildungen auf jeden Fall hohe Werte zugewiesen werden. Neben den Drahtanzeigen werden allerdings auch einzelne Kornabbildungen von dem Grenzwert erfaßt.

Beim Vergleich von zwei Profilen im Bild 6.1.7-9 von den 60 und 80 kV Profilen oben und mitte, zeigt sich, daß die Kornabbildungen an verschiedenen Orten auftreten. Dies kann in einer sogenannten Koinzidenzfilterung dazu benutzt werden, Korn- und Draht- bzw. Fehlerabbildungen voneinander zu unterscheiden. Das untere Profil zeigt die Koinzidenz zwischen dem oberen und dem mittleren Profil. Nur die ortsfesten

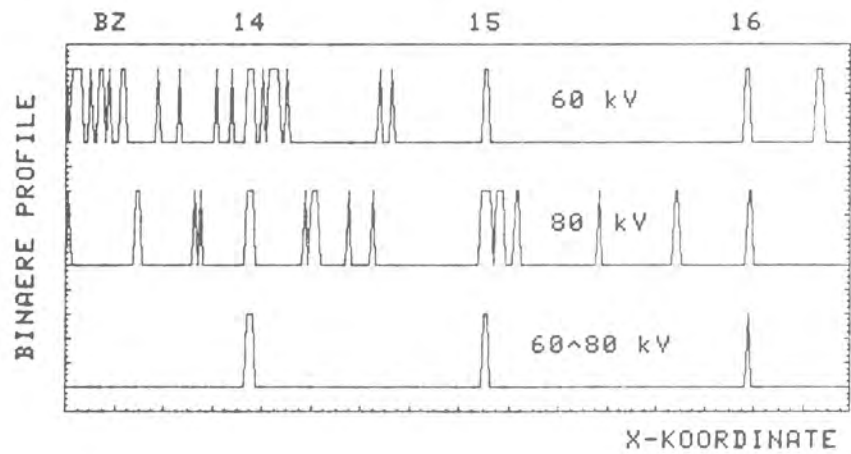


Bild 6.1.7-9: Koinzidenz zweier Binärprofile

Anzeigen bleiben im Koinzidenzprofil erhalten. Um eine weiter erhöhte Erkennungssicherheit zu erreichen, sollten mehrere verschiedene Aufnahmen unterschiedlicher Durchstrahlungsenergie miteinander verknüpft werden.

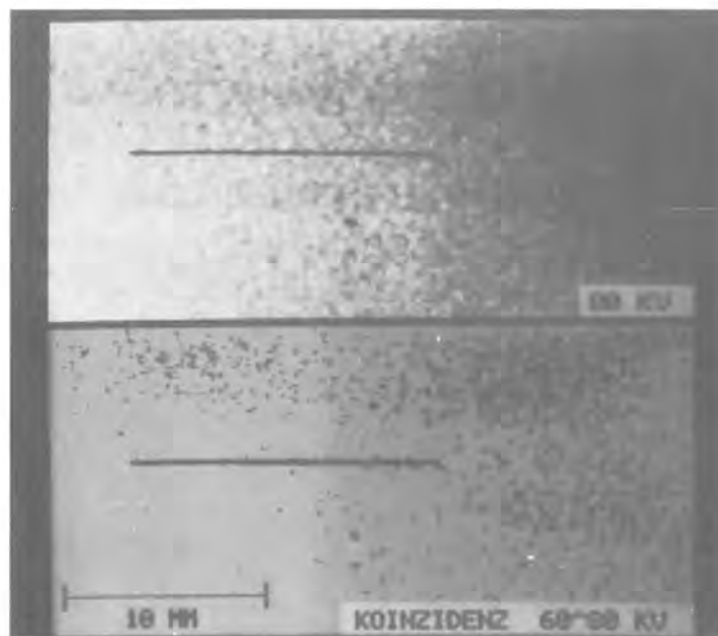


Bild 6.1.7-10: Koinzidenzfilterung zweier Durchstrahlungsaufnahmen mit verschiedener Röhrenspeisung

Ein auf der Basis der Koinzidenzfilterung erstelltes Bild zeigt die Abbildung 6.1.7-10.

Die Koinzidenzoperation wurde hier an nur zwei Röntgenaufnahmen (60 und 80 kV) durchgeführt. Es ergibt sich bereits ein wesentlich verbessertes Binärbild, das fast keine Kornanzeigen mehr enthält. Die auftauchenden einzelnen Punkte werden durch zufällige Übereinstimmungen von Kornabbildungen verursacht und können durch Hinzunahme weiterer Abbildungen beseitigt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß durch digitale Überlagerung von Einzelaufnahmen verschiedener Energie mottling-Anzeigen signifikant vermindert werden können. Eine optimale Unterdrückung von mottling-Anzeigen ergibt sich jedoch durch Koinzidenzfilterung an einer Folge von Einzelaufnahmen. Die Röhrenspannungen für die Einzelaufnahmen sollten möglichst weit auseinander liegen um deutliche Unterschiede in den Kornanzeigen zu erzielen.

## 6.2 Mehrwinkel-Radiometrie

### 6.2.1 Abschätzung und Messung der Tiefenauflösung

Die Genauigkeit, mit der die Tiefenlage eines Materialfehlers ermittelt werden kann, hängt von der Schrittweite  $\Delta x$  bei der Abtastung und dem Winkel  $2\alpha$  zwischen den beiden Röntgenstrahlen ab. Für die Tiefenauflösung gilt:

$$\Delta y = \frac{\Delta x}{\tan \alpha}$$

$\Delta x$  Schrittweite

$\alpha$  Winkel zwischen Röntgenstrahl und Normale auf der Strahlenquellenebene

Das nachstehende Diagramm (Bild 6.2.1-1) zeigt den theoretischen Verlauf der Tiefenauflösung als Funktion der Schrittweite. Als Parameter ist der Winkel  $\alpha$  aufgeführt.

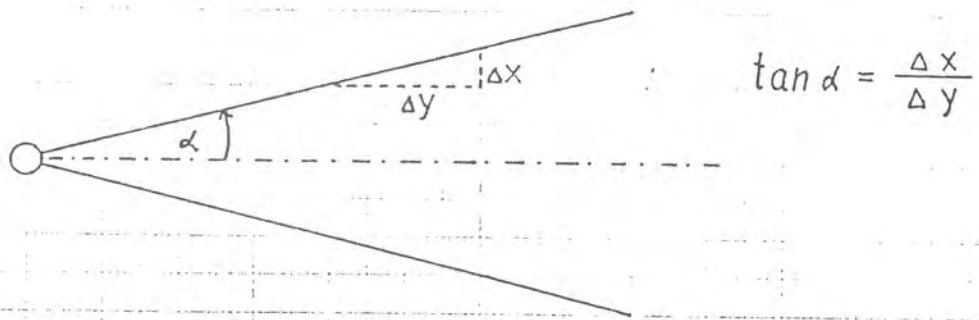
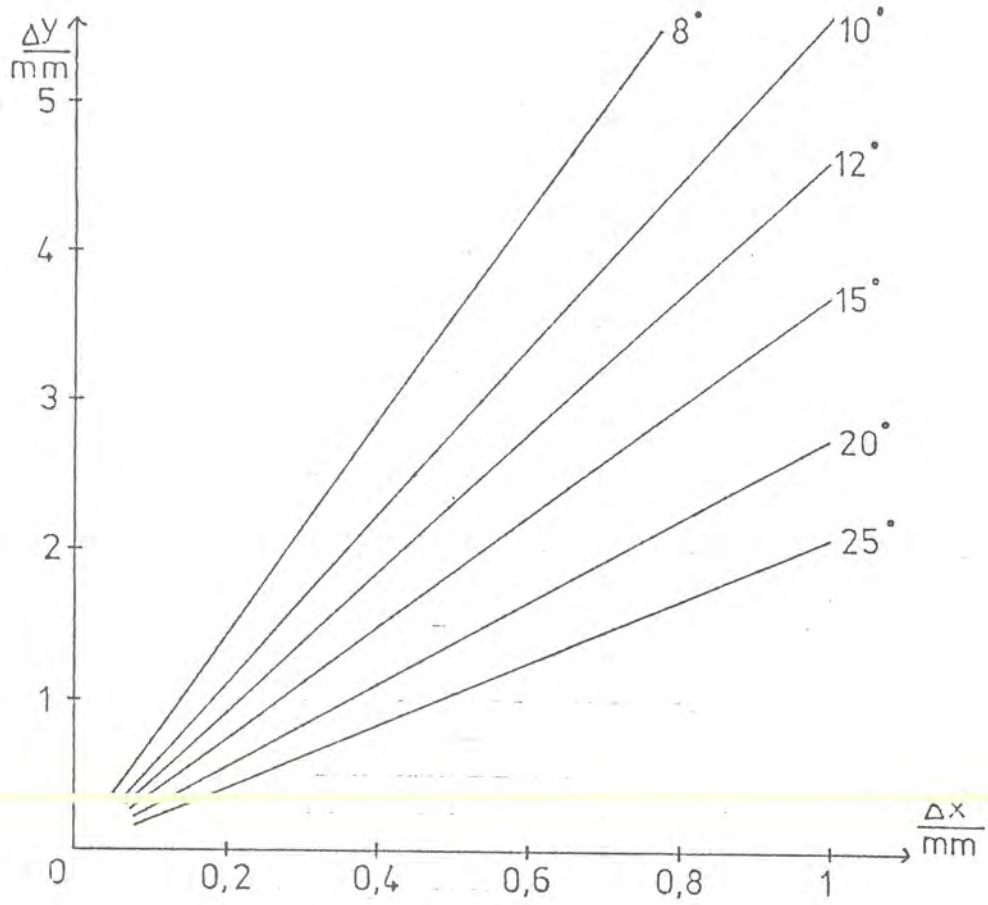
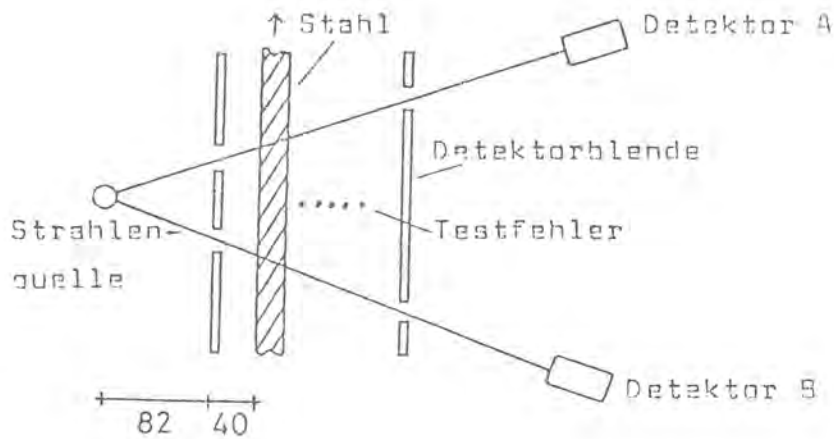


Bild 6.2.1-1: Tiefenauflösung als Funktion der Abtastschrittweite (theoretisch)  
Parameter: Winkel



Meßaufbau



Prüfobjekt:	10 mm Stahl
Testfehler:	1 mm Rundstahl
Röhrenspannung:	120 kV
Röhrenstrom:	8 mA
Winkel:	14,7°
Detektorblendendurchm.:	1 mm
Abtastschrittweite:	0,2 mm / 0,4 mm
Abtastfrequenz:	200 Hz

Meßablauf:

Der 1 mm Rundstahl bildet eine Materialdickenänderung nach. Dieser wird auf der der Strahlenquelle abgewandten Seite des Stahlkörpers positioniert und nach jeder Messung um 2 mm verschoben. Der Abstand des Fehlers von der Prüfobjektoberfläche ergibt sich einmal durch direkte Messung und andererseits durch das Maximum der Kreuzkorrelation der beiden Detektorsignale. Ein Vergleich beider Messungen erlaubt dann eine Aussage über die Tiefenauflösung.

1. Messung: Abtastschrittweite = 0,2 mm

Fehlertiefe direkt gemessen	Fehlertiefe aus KKF ermittelt	Abweichung
mm	mm	mm
13	12,4	0,6
15	15,6	0,6
17	16	1
19	20,8	1,8
21	22,4	1,4
23	22,5	0,5
25	26	1
27	28,4	1,4
29	30,2	1,2
31	32,4	1,4

mittlere Abweichung:  $1,09 \pm 0,31$  mm mit  $P = 95 \%$

erwartete Tiefenauflösung: 0,76 mm

2. Messung: Abtastschrittweite = 0,4 mm

Fehlertiefe direkt gemessen	Fehlertiefe aus KKF ermittelt	Abweichung
mm	mm	mm
13	16,8	3,8
15	12	3
17	17,8	0,8
19	20,8	1,8
21	25,2	4,2
23	26	3
25	22	3
27	30,1	3,1
29	31,2	2,2
31	29,5	1,5

mittlere Abweichung:  $2,64$  mm  $\pm 0,76$  mm mit  $P = 95 \%$

erwartete Tiefenauflösung: 1,53 mm

3. Messung: Tiefenauflösung hinter einer Schweißnaht

Prüfobjekt: 20 mm Stahl mit Schweißnaht  
Testfehler: 3 mm Rundstahl  
Röhrenspannung: 150 kV  
Röhrenstrom: 13 mA  
Winkel: 16,5°  
Detektorblendendurchm.: 1 mm  
Abtastschrittweite: 0,2 mm  
Abtastfrequenz: 200 Hz

Fehlertiefe direkt gemessen	Fehlertiefe aus KKF ermittelt	Abweichung
mm	mm	mm
55	55,4	0,4
50	50,4	0,4
45	46,2	1,2
40	39,6	0,4
35	36,2	0,4
30	32	2
25	25,2	0,2
23	24,2	1,2

mittlere Abweichung:  $0,87 \text{ mm} \pm 0,45 \text{ mm}$  mit  $P = 95 \%$   
erwartete Tiefenauflösung: 0,68 mm

Die Abweichung zwischen theoretischer und gemessener Tiefenauflösung läßt sich auf verschiedene Ursachen zurückführen:

- a) Durch die begrenzte laterale (seitliche) Auflösung erhält die Tiefenauflösung eine zusätzliche Ungenauigkeit, die in der theoretischen Abschätzung nicht berücksichtigt ist.

- b) Je größer die Abtastschrittweite gewählt wird, umso schlechter wird das Signal/Rausch-Verhältnis. Verdoppelt sich die Abtastschrittweite, so halbiert sich die Anzahl der diskreten Signalwerte pro Längeneinheit. Die Verschlechterung des Signal/Rausch-Verhältnisses wirkt sich auch geringfügig auf die Kreuzkorrelationsfunktion der beiden Detektorsignale aus. Das Funktionsmaximum kann gering verschoben oder verzerrt werden und damit eine abweichende Tiefenlage des Werkstofffehlers anzeigen.
- c) Die Bestimmung des Winkels zwischen den beiden Röntgenstrahlen (bzw. Strahl-Normale) ist ebenfalls mit einem Fehler behaftet.

Für die Berechnung der Tiefenlage eines Werkstofffehlers gilt folgende Beziehung für den Gesamtfehler:

$$\Delta(\Delta y) = \frac{\Delta(\Delta X)}{2 \tan \alpha} - \frac{\Delta X \cdot \Delta \alpha}{2 (\tan \alpha)^2 (\cos \alpha)^2}$$

In der Praxis ist je nach Prüfproblem und gewünschter Tiefenauflösung die Abtastschrittweite zu wählen. Nachteil großer Tiefenauflösung (kleiner Schrittweiten) ist die große Anzahl von Meßwerten, die dann mit entsprechendem Speicher- und Zeitaufwand im Digitalrechner verarbeitet werden müssen.

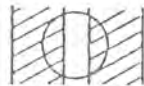
#### 6.2.2 Abschätzung und Messung der lateralen Auflösung

Die laterale (seitliche) Auflösung gibt an, bei welchem Abstand noch getrennt detektiert werden bzw. bei welcher seitlichen Abmessung ein einzelner Materialfehler registriert wird. Sie ist allein von der Detektorblendenöffnung abhängig. In dem Experimentalaufbau beträgt der Blendendurchmesser 1 mm. Damit ist auch die laterale Auflösung von 1 mm festgelegt.

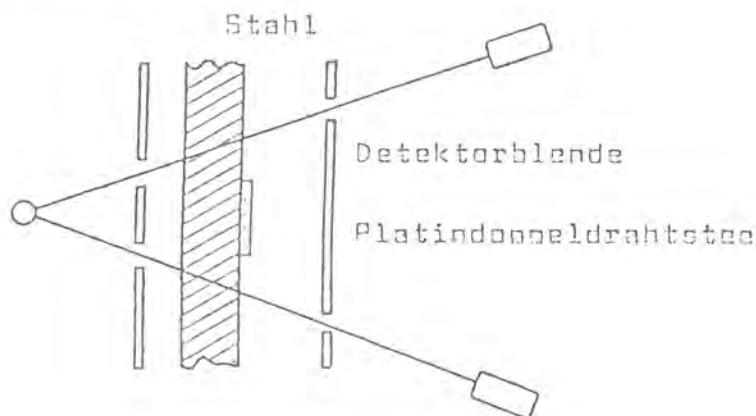
Liegen zwei Materialfehler in einem Abstand von  $\geq 1$  mm auseinander, so wird beim Passieren der Blendenöffnung diese kurzzeitig von keinem der Fehler bedeckt.



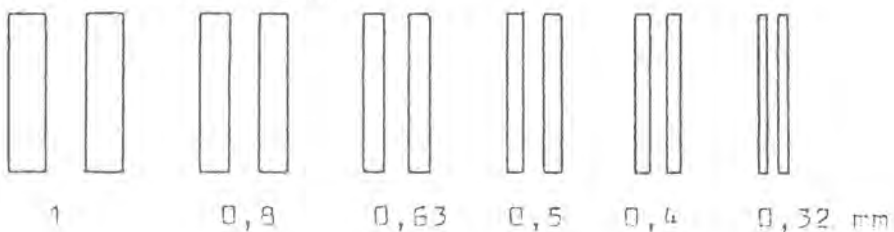
Liegen die beiden Fehler jedoch dichter als 1 mm beieinander, so bedeckt immer ein Teil von ihnen die Blendenöffnung. Eine Trennung ist dann auf Grund des schlechten Signal/Rausch-Verhältnisses nicht möglich. In diesem Fall bedeutet das, daß die Photonenzahldifferenz zwischen vollbedeckter und teilweise bedeckter Blendenöffnung kleiner als die statistische Unsicherheit (Rauschen) der registrierten Photonenzahlen ist.



### Meßaufbau



### Platindoppeldrahtstea



Der Testkörper besteht aus einer Folge von Doppeldrähten verschiedener Durchmesser, die in Kunststoff eingegossen sind. Der Abstand zwischen zwei Drähten entspricht jeweils dem Durchmesser.

Prüfobjekt:	20 mm Stahl mit Platindoppeldrahtsteg
Röhrenspannung:	150 kV
Röhrenstrom:	11 mA
Winkel:	14,7°
Detektorblendendurchm.:	1 mm
Abtastschrittweite:	0,2 mm
Abtastfrequenz:	200 Hz

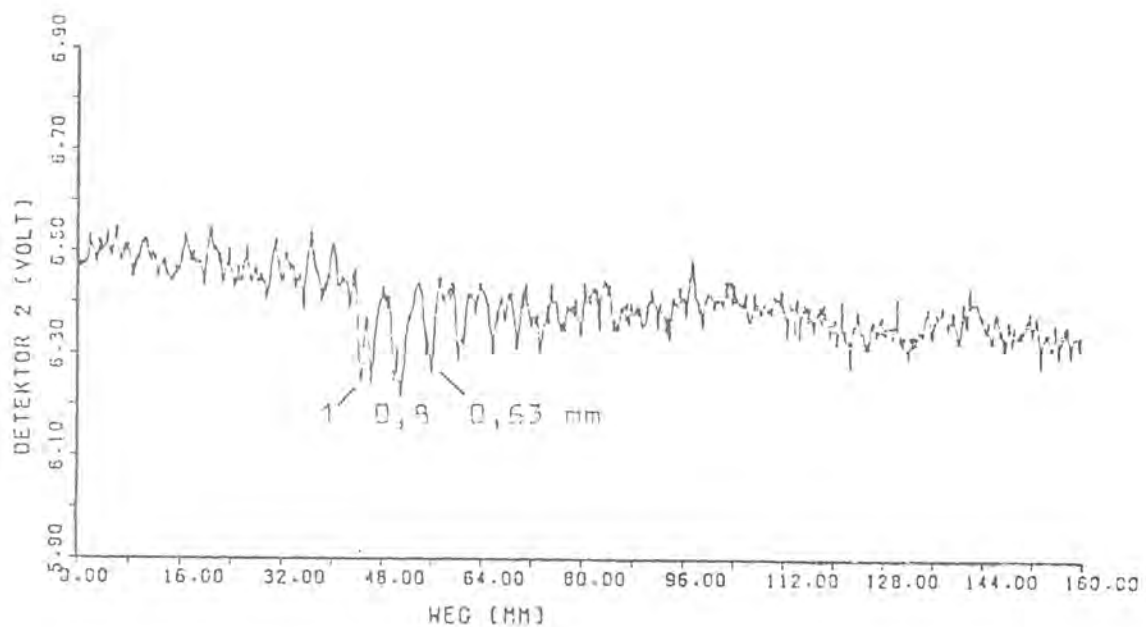


Bild 6.2.2-1: Profil des Platindoppeldrahtsteges

### 6.2.3 Praktische Anwendungen der Stereo-Radiometrie

An einigen ausgewählten Testkörpern soll die Anwendung der Stereo-Radiometrie demonstriert werden. Die angegebene Fehlertiefe entspricht dem Abstand des Materialfehlers von der Strahlenquellenebene.

### Beispiel 1

Die Tiefenlage des Testfehlers wird deutlich durch das Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion angezeigt. Ein Vergleich der beiden implementierten Korrelationsverfahren zeigt, daß die gewichtete Kreuzkorrelation einen 'schärferen' und höheren Peak erzeugt. Die Nebenmaxima sind nicht so stark ausgeprägt. Durch weitere Anwendung der Signalverarbeitungsmethoden erreicht man eine eindeutige Fehleranzeige.

### Beispiel 2

In diesem Testkörper befinden sich zwei simulierte Werkstofffehler in einer Linie hintereinander. Bildet man die Kreuzkorrelation, so erfolgt zwar die Tiefenlagebestimmung der beiden Testfehler, doch erscheint noch die Scheinanzeige eines nicht existierenden Werkstofffehlers. Dies ist eine Schwachstelle der Stereo-Radiometrie. Abhilfe kann bei dieser Fehleranordnung eine Drehung des Prüfobjektes um  $90^\circ$  und eine erneute radiometrische Untersuchung schaffen.

### Beispiele 3, 4, 5

Störende Signalteile, die zum Beispiel durch Schweißnahtraupen und andere Oberflächenstrukturen erzeugt werden, können durch die Anwendung verschiedener implementierter Signalverarbeitungsmethoden beseitigt oder stark unterdrückt werden.

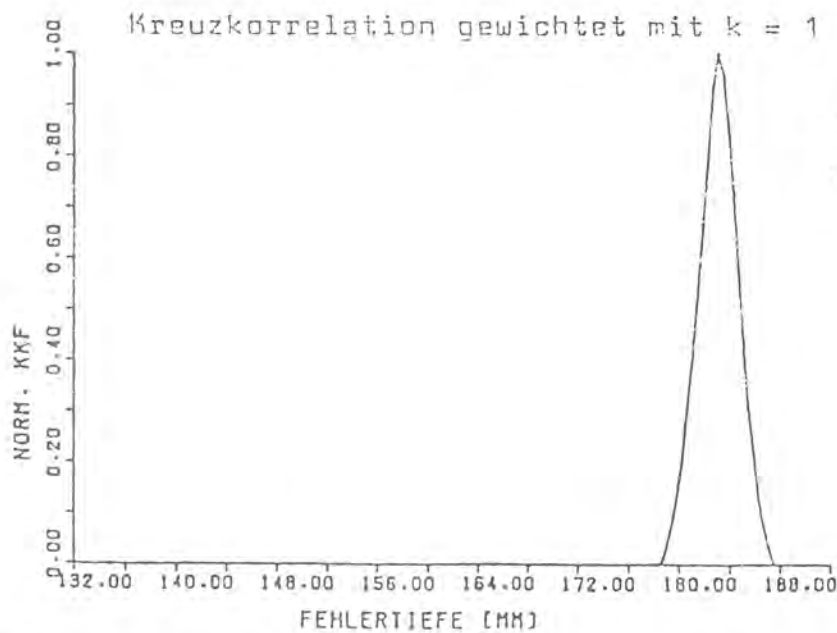
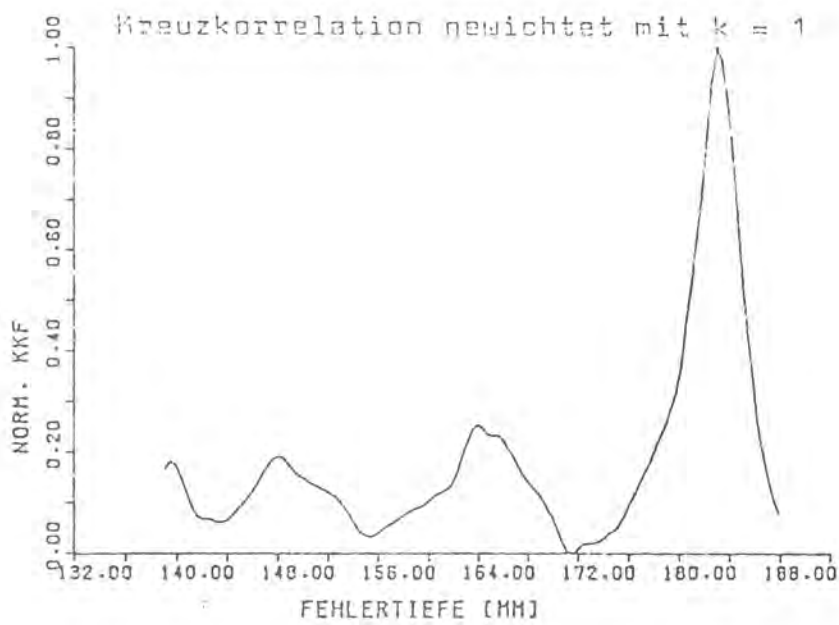
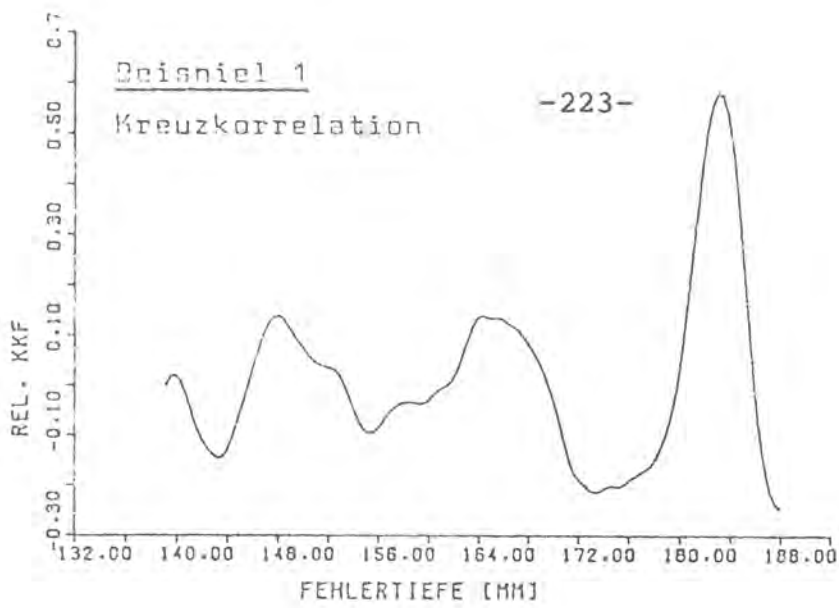


Bild 6.2.3-1: Tiefenlagebestimmung eines Fehlers mittels Kreuzkorrelation



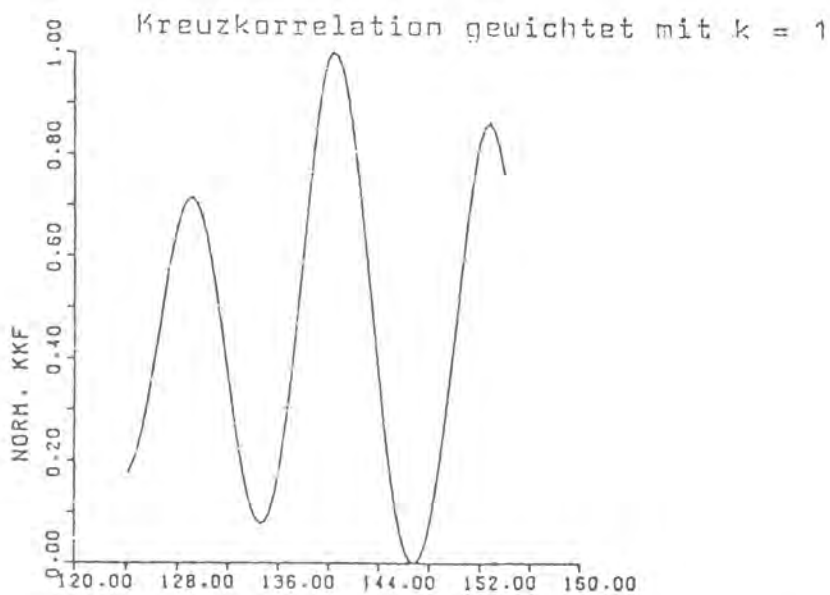
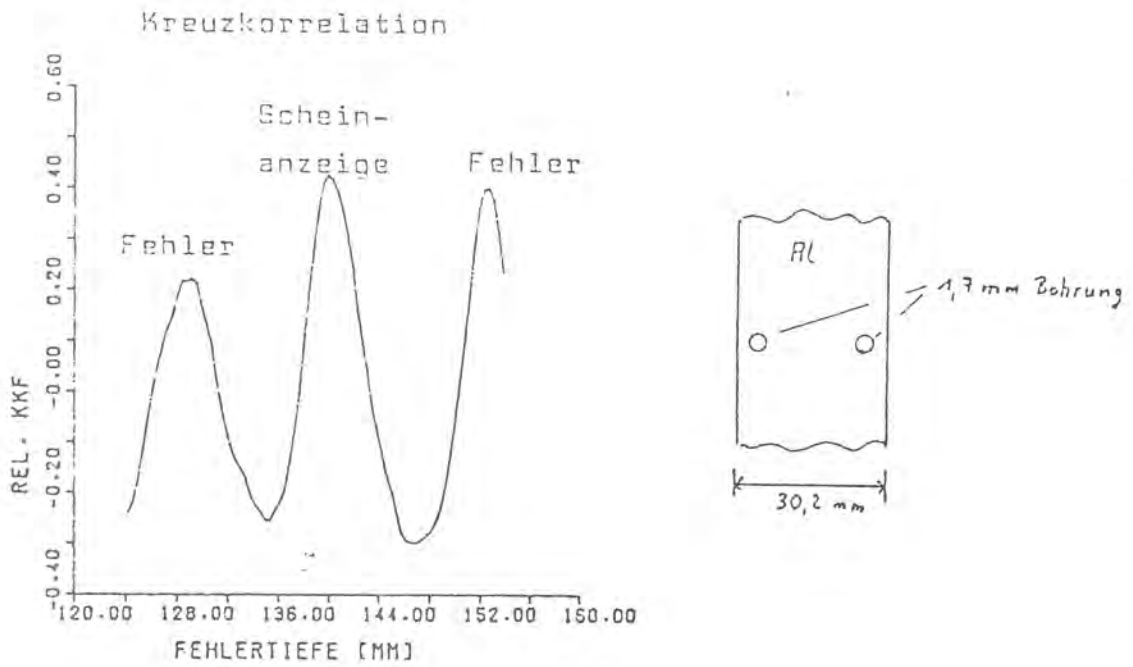
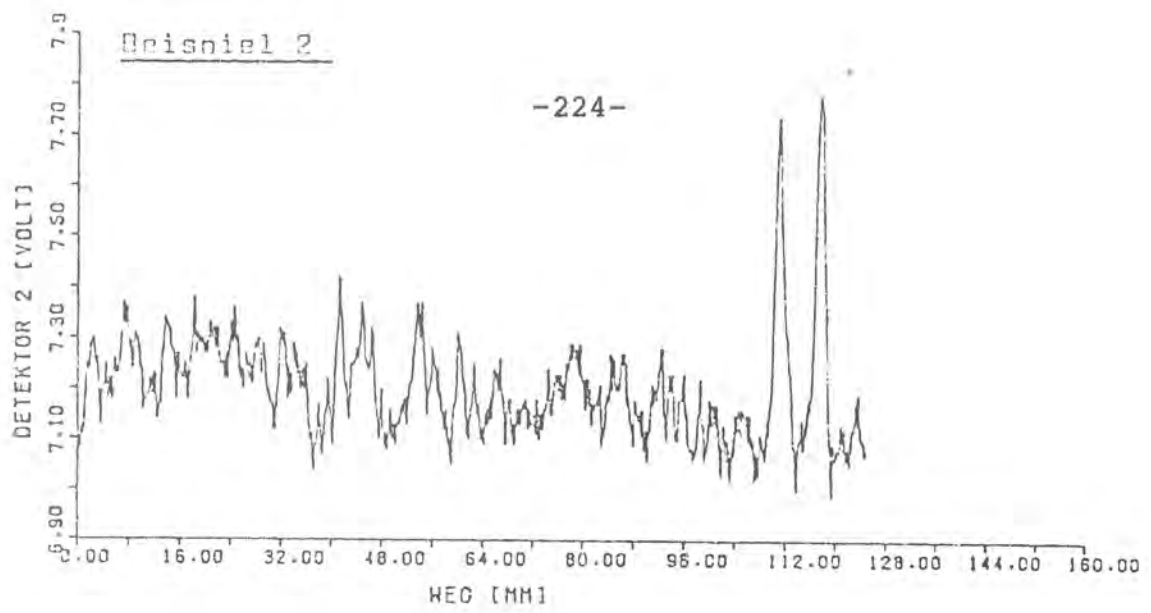


Bild 6.2.3-2: Tiefenlagebestimmung zweier Fehler mittels Kreuzkorrelation

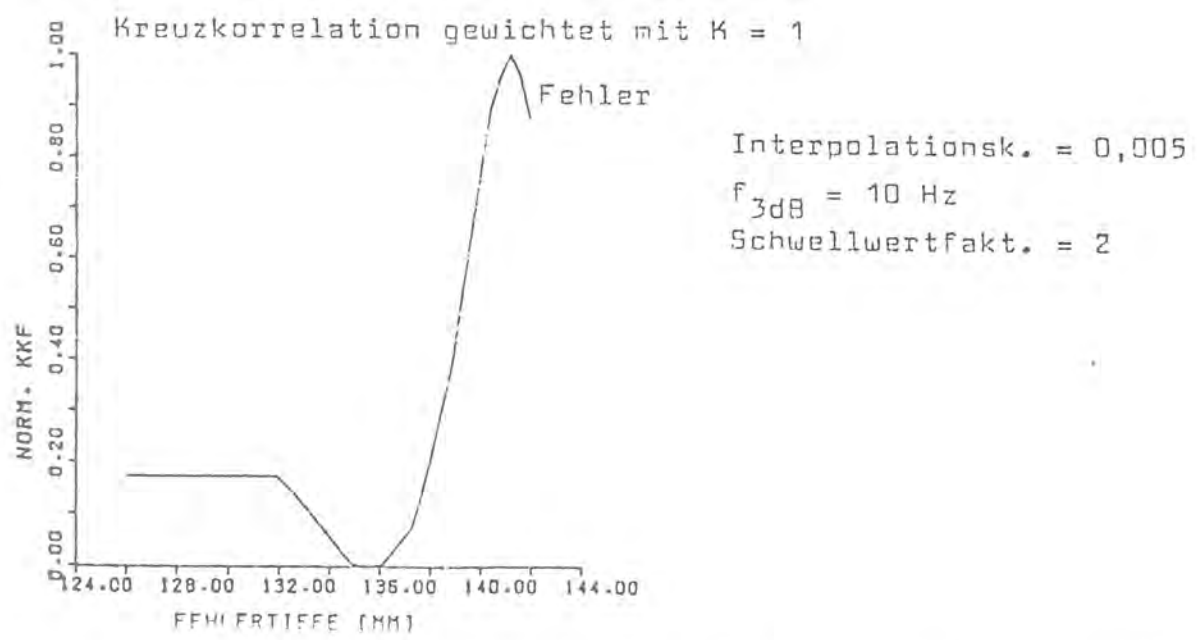
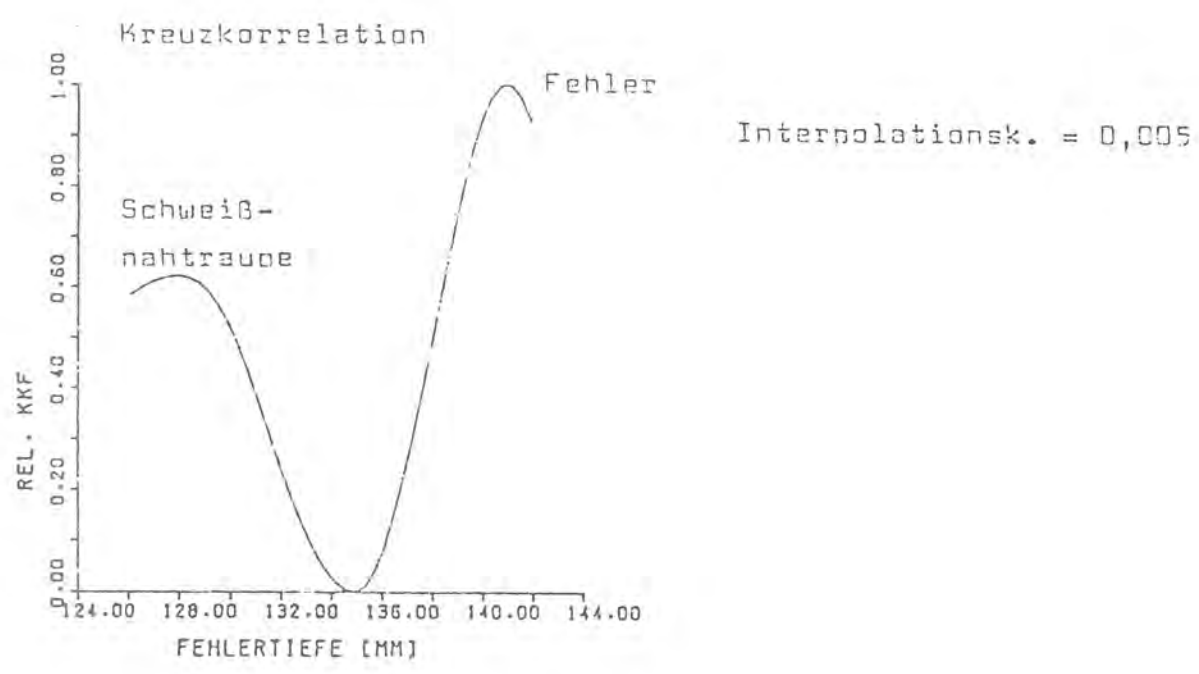
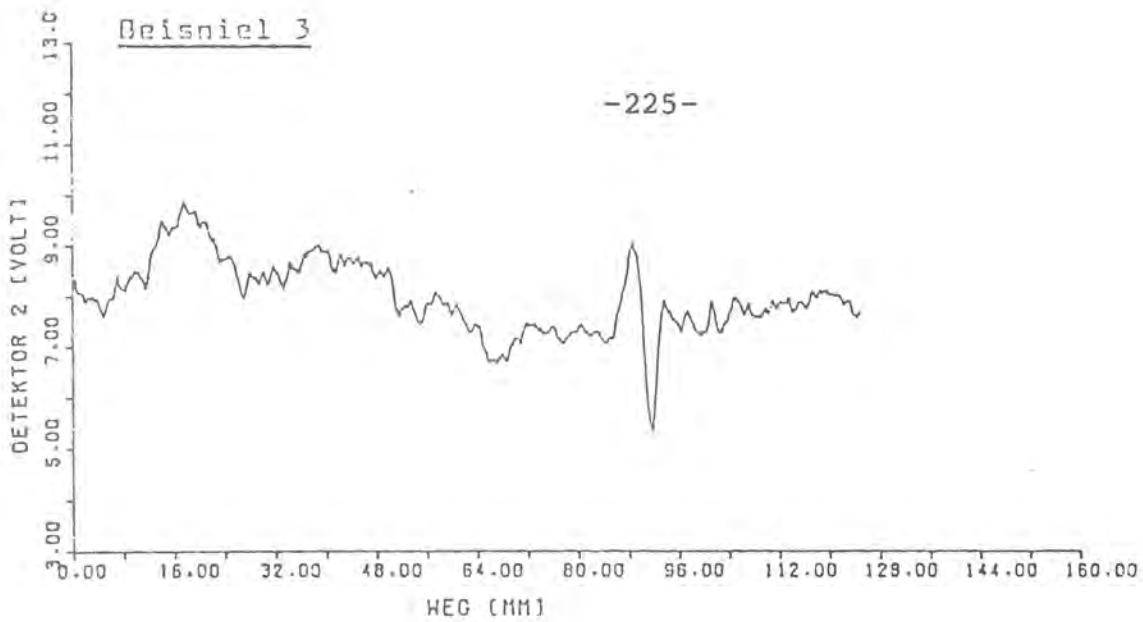


Bild 6.2.3-3A: Nachweis eines Testfehlers mit überdeckter Schweißnahtstruktur

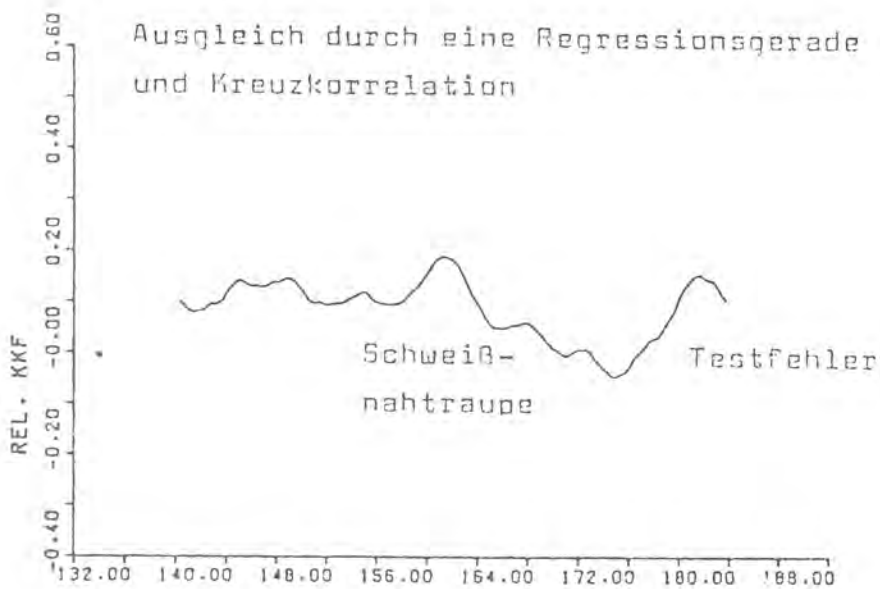
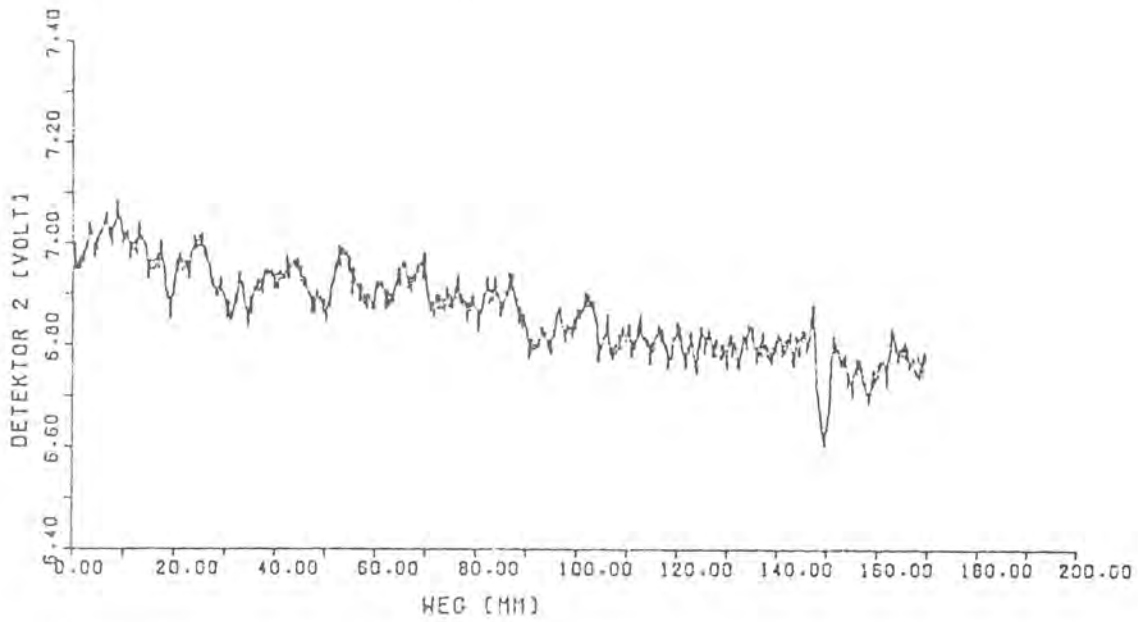
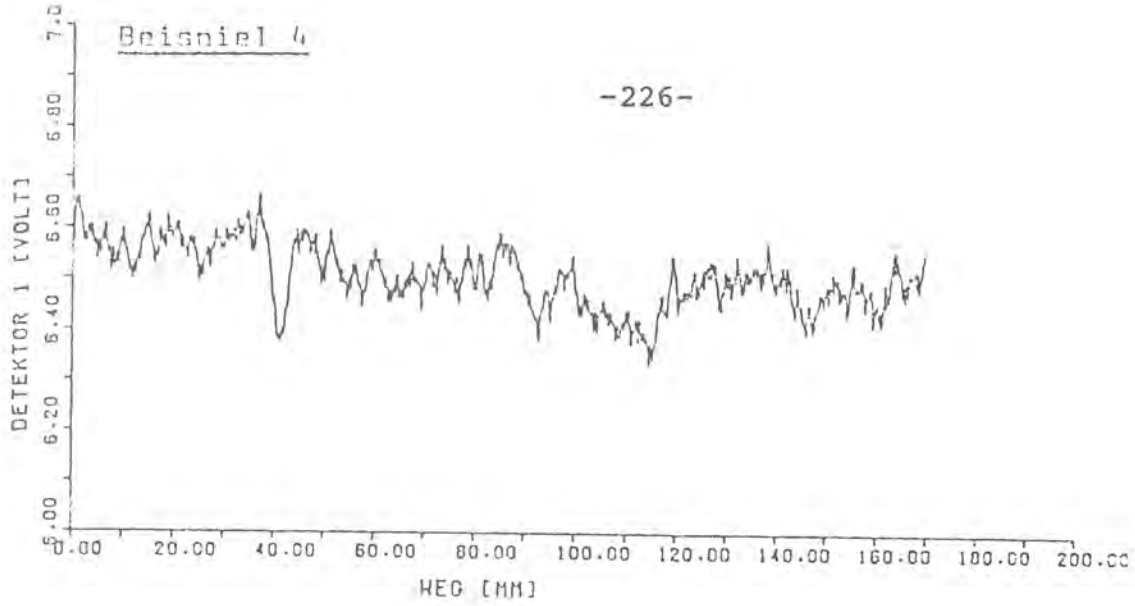


Bild 6.2.3-3B: Nachweis eines Testfehlers mit überdeckter Schweißnahtstruktur

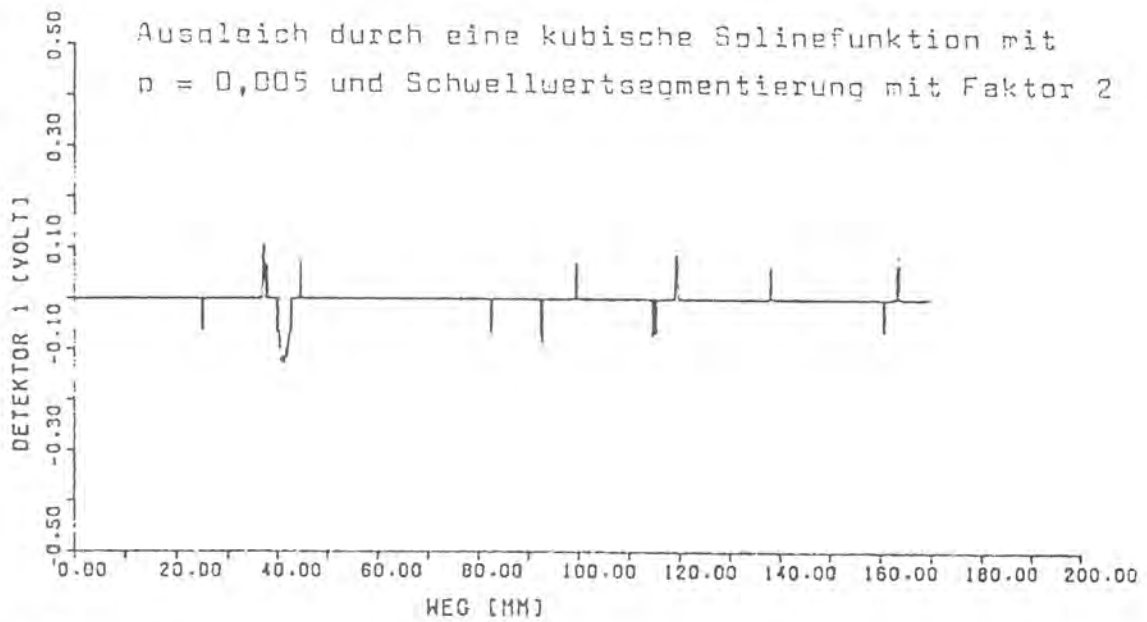


Bild 6.2.3-4: Verschiedene Signalverarbeitungsverfahren zur Fehlertiefenlagebestimmung

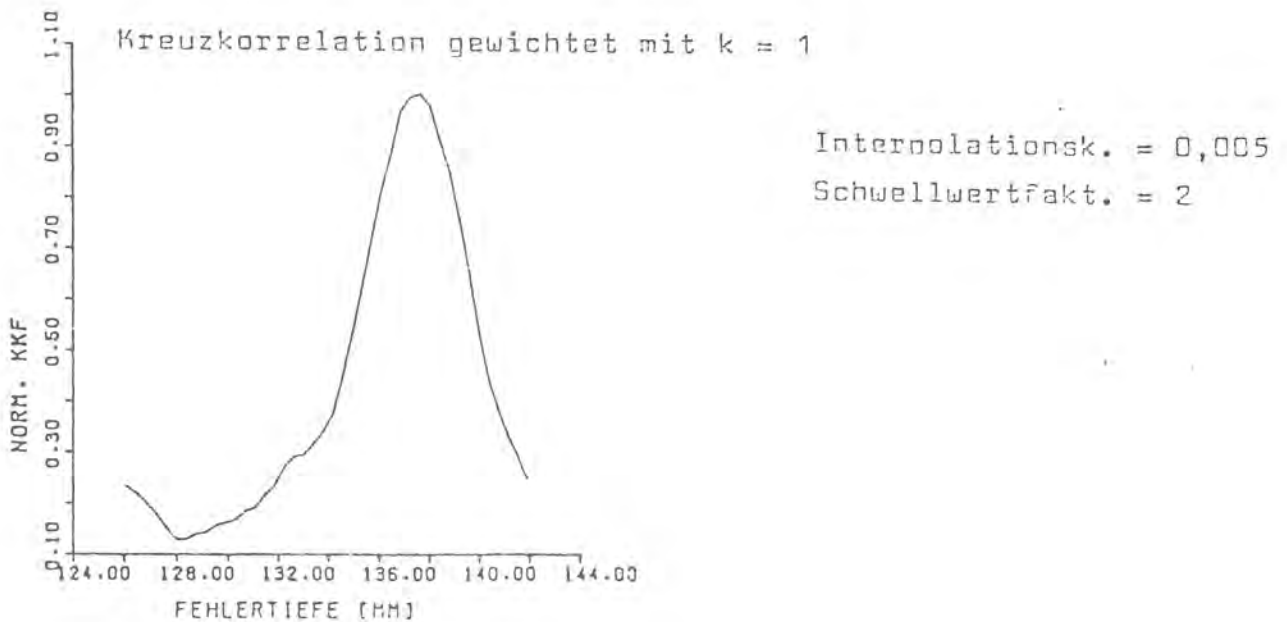
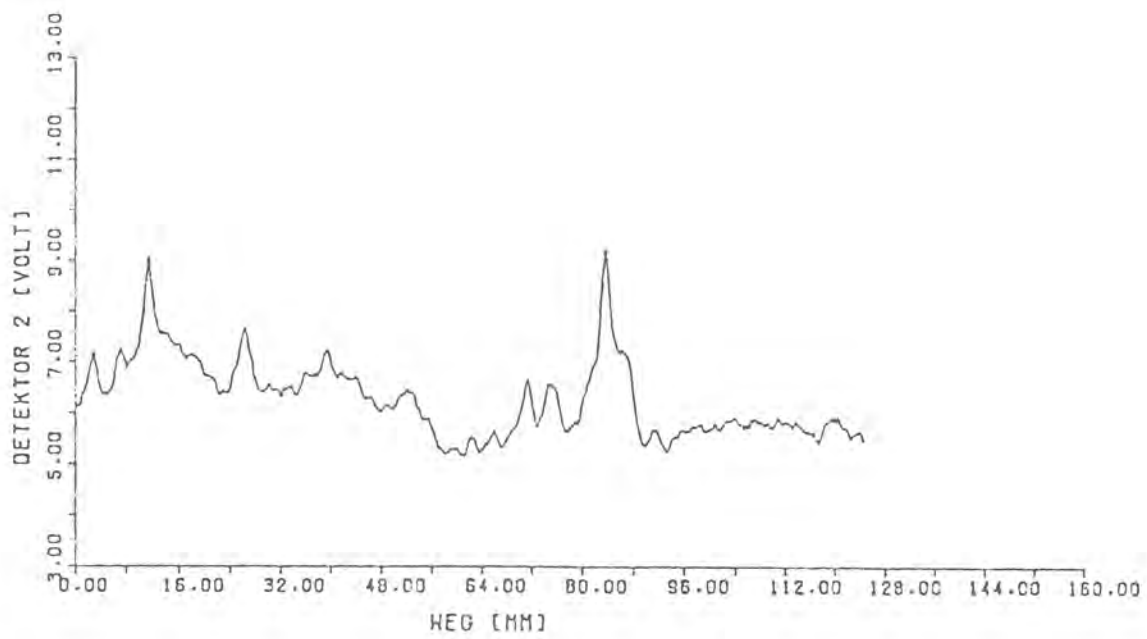
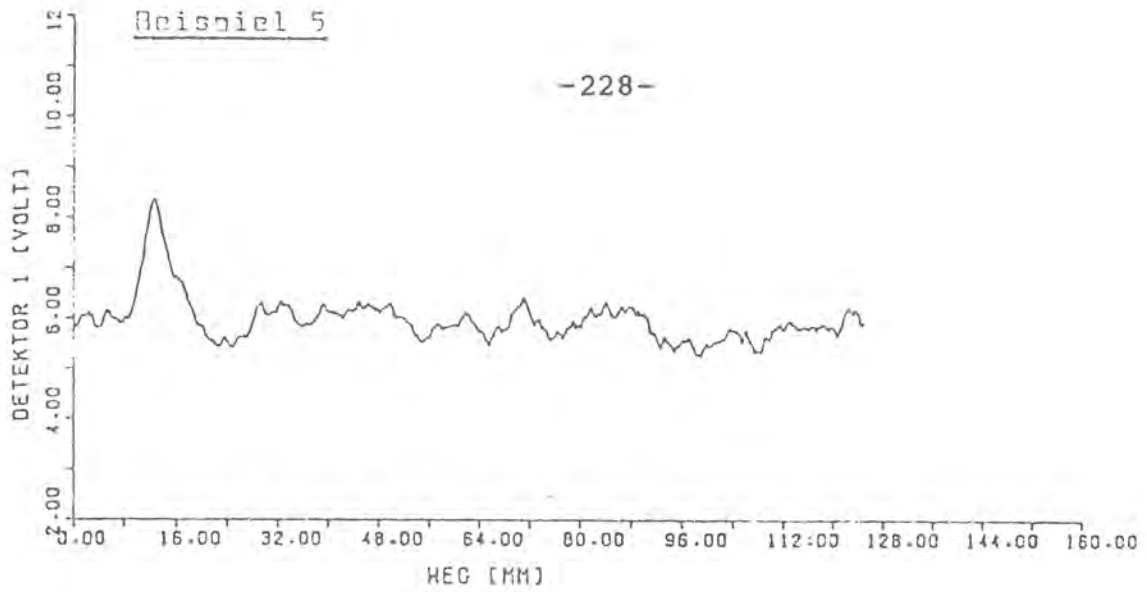


Bild 6.2.3-5: Nachweis von Schlackeneinschlüssen in einer Schweißnaht

### 6.3 Funkenerosion

Mit der Erosionsmaschine wurden Fehler mit Breiten von 50 - 200  $\mu\text{m}$  und Tiefen bis über 500  $\mu\text{m}$  hergestellt. Neben verschiedenen einfachen Testkörpern aus verschiedenen Materialien wurden aufwendigere Testkörper für die Bildverarbeitung entwickelt:

Der vorliegende Prüfkörper aus austenitischem Werkzeugstahl enthält eine Auswahl von speziellen Fehlern mit unterschiedlichen Abmessungen. In Abbildung 6.1.4.2-6 im Kapitel 6.1.4.2 ist die Oberflächenaufnahme des Prüfkörpers mit den künstlichen Nuten zu sehen, die mit Hilfe der Funkenerosionsmaschine in die Oberfläche eingebracht wurden. Die vier erstellten Fehlergruppen enthalten jeweils fünf Nuten mit abgestuften Nutentiefen im Bereich 100  $\mu\text{m}$  bis ca. 800  $\mu\text{m}$ . Für Untersuchungen größerer Fehlerabmessungen wurden zusätzlich sieben Nuten eingefräst, deren Tiefe von 0 mm bis 3 mm kontinuierlich abnimmt. Abbildung 6.1.4.2-5 zeigt eine Skizze des Prüfkörpers mit den Nutenpositionen und ferner eine tabellarische Aufstellung der mikroskopisch ermittelten Fehlermaße.

#### 6.4 Optische Bildverarbeitung

Es ist die Aufgabe dieses Teilvorhabens, Radiographien mit Hilfe bekannter optischer Methoden so zu bearbeiten, daß sich die in ihnen enthaltene Information deutlicher offenbart als auf der unbearbeiteten Vorlage und erzielte Erfolge im Hinblick auf eine praktische Relevanz am Aufwand zu messen. Die Literatur zur optischen Bildverarbeitung enthält ein ganzes Arsenal von Verfahren, das für die verdeutlichte Wiedergabe von Einzelheiten auf Radiographien geeignet erscheint.

Dieser Eindruck wird verstärkt durch erfolgreiche Beispiele aus der Literatur mit relativ einfachen Filtern und war schließlich das Motiv, optische Verfahren zu prüfen. Da aber viele mit der unter 3.4.3 genannten Verfahren an Vorlagen mit geringer Schwärzung und hohen Kontrasten demonstriert wurden, zogen wir es vor, zunächst die einfachen, bewährten Verfahren mit realistischen Radiographien der Schwärzung  $S \geq 2$  zu erproben und hierbei auf die optische Ausrüstung und die praktische Erfahrung von mit optischer Informationsverarbeitung vertrauten Instituten zurückzugreifen. Für dieses Vorgehen sprachen die Kosten eines leistungsfähigen optischen Systems und der Aufwand zum Herstellen komplizierter Filter.

In Zusammenarbeit mit dem Fachbereich 2 der Universität Bremen (Prof. Dr. S. Boseck) und dem Institut für Nachrichtentechnik der TU München wurden generelle Verarbeitungsmöglichkeiten erörtert und einige typische Schweißnahtaufnahmen optisch gefiltert. Es bestand Übereinstimmung, daß angesichts einer Vielzahl von erkennbaren Rissen in der Naht eine Hochpaßfilterung am sinnvollsten wäre. Deshalb wurde sowohl an umkopierten und verkleinerten als auch an den Originalvorlagen eine Hochpaßfilterung vorgenommen. Die Ergebnisse waren sehr unbefriedigend. Beim Umkopieren und Verkleinern gingen bereits so viele Details verloren, daß die gefilterte Aufnahme erheblich schlechter war als das Original und kaum

noch die Naht zeigte. Der Versuch mit einem entsprechend dem Linsendurchmesser begrenzten Ausschnitt aus der Originalaufnahme schlug vollends fehl. Hier kam trotz des 4 mW-Lasers aus Intensitätsgründen keine Abbildung zustande. Die Autokorrelation mit einem van der Lugt-Filter mißlang gleichfalls. Die Fehlschläge beim Nachvollzug erfolgreicher Techniken aus anderen Anwendungsbereichen beruhen offensichtlich auf den ungleich schlechteren Voraussetzungen und höheren Ansprüchen bei industriellen Radiographien. Die realistische Schwärzung ( $S \geq 2$ ) der Aufnahmen erfordert eine wesentlich größere Laser-Leistung (ca. 15 mW) als die verfügbare von 4 mW.

Der große Dynamikbereich eines industriellen Röntgenfilms und die wesentlich bessere geforderte Auflösung (Risse!) verbieten ein Umkopieren und Verkleinern der Radiographie, wie es bei medizinischen Beispielen erfolgreich war. Medizinische Röntgenaufnahmen weisen geringere Schwärzung und relativ große Details auf. Vom Mißerfolg der optischen Bearbeitung von normalen Radiographien an einer recht leistungsstarken und bewährten Anlage abgesehen, sei noch auf die lange Dauer der Maßnahmen sogar bei geübtem Personal hingewiesen.

Eine Vielzahl der prinzipiell möglichen Operationen sowie die Parallelverarbeitung riesiger Mengen von optischer Information in Echtzeit sind Vorzüge der optischen Bildverarbeitung, die mit den heutigen Mitteln in der Radiographie nicht genutzt werden können. Es lassen sich zwar schon jetzt leistungsstärkere optische Systeme zusammenstellen, die Filteroperationen an Filmen hoher Schwärzung und einen ausreichend großen Bildausschnitt erlauben, aber der Erfolg steht in keinem Verhältnis zum Aufwand an Geld, Präzision und Zeit. Wäre eine optische Bildfilterung für einzelne Spezialfälle noch akzeptabel, so ist sie für eine Massenverarbeitung ungeeignet.



## 7. Diskussion

Als wesentlichstes neues Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mit Durchstrahlungsprüfung wurde in diesem Vorhaben die digitale Bildverarbeitung bearbeitet. Für eine Reihe von typischen Prüfaufgaben wurden verwendbare Lösungen erarbeitet:

- Korrektur ungleichmäßiger Schwärzungsverteilung auf Durchstrahlungsbildern, wie sie durch Wanddickenübergänge oder symmetrische Strahleranordnung verursacht wird (Kap. 6.1.3)
- Verbesserung der Bildqualität durch Verringerung der Körnigkeit (Kap. 6.1.4)
- Verbesserung der Fehlererkennbarkeit durch Kontrastanhebung, Kantenanhebung und Farbdarstellung (Kap. 6.1.5)
- Beseitigung des störenden Bildhintergrundes und Isolierung (Segmentierung) der Fehleranzeigen (Kap. 6.1.6)
- Verbesserung der Auswertbarkeit von austenitischen Blechen durch Verringerung der Strukturanzeigen (mottling) (Kap. 6.1.7)

Die Lösungswege wurden in dem Software-Paket zur Bildverarbeitung als Module implementiert; einzelne Verfahrensschritte wurden in das schnelle Comtal-System (Kap. 4.1.4) übernommen.

In einer begleitenden Untersuchung wurden die Eigenschaften des Bildgeber-Systems (Fernsehkamera) gemessen (Kap. 4.1.3). Dabei wurde eine radiographisch sinnvolle Ortsauflösung von 60  $\mu\text{m}$  bei einem 30 x 30 mm Bildfeld und von 200  $\mu\text{m}$  bei einem 100 x 100 mm Bildfeld zugrundegelegt. Mit dem Kamerasystem und dem vorhandenen Leuchtkasten konnten Aufnahmen bis zu einer optischen Dichte (Schwärzung) von 3,6 ausgewertet werden, jedoch konnte die ausgezeichnete Kontrastempfindlich-

keit des menschlichen Auges nicht erreicht werden. Einzelbilder der genannten Bildfeldgrößen können in 40 ms digitalisiert und gespeichert werden; für eine rauscharme Abtastung werden ca. 30 s (20 Einzelbilder) benötigt. Die vorhandene Bildverarbeitungsanlage ist für die Auswertung einzelner Durchstrahlungsaufnahmen oder kleiner Serien ausgelegt. Für einen Einsatz am Prüfort oder in Verbindung mit einer filmlosen Röntgenfernsehkette müssen die Verfahren auf wirtschaftlichere Rechnersysteme, die auch die erforderliche Geschwindigkeit aufweisen, übertragen werden.

Nachdem in diesem Vorhaben die Bildaufbereitung und visuelle Fehlererkennung im Vordergrund standen, muß sich eine Weiterführung der Arbeiten mit einer objektiven Fehlerbeurteilung befassen. Anwendungsbereiche sind die Endprüfung von Komponenten und Schweißverbindungen im Hinblick auf die Zulässigkeit von Fehlern sowie die wiederkehrende Prüfung im Hinblick auf Fehlerwachstum und Fehleranalyse.

Mit der Mehrwinkel-Radiometrie (Kap. 6.2) konnte ein anderes grundlegendes Problem der Durchstrahlungsprüfung in automatisierbarer Form gelöst werden: Die Bestimmung der Tiefenlage von Fehlern in Prüfgegenständen. Der universelle Versuchsaufbau mit üblichen Industrie-Komponenten erreichte eine praktische Tiefenauflösung von 1 mm; die Prüfgeschwindigkeit betrug bis zu 1 m/s. Mit diesem Verfahren können insbesondere Prüfgegenstände mit Dicken über 10 mm und mit mäßiger Oberflächenstruktur untersucht werden. Für eine industrielle Anwendung muß das Verfahren auf geeignete transportable Komponenten übertragen werden; die Auswertung, die beim Versuchsaufbau je Prüfabschnitt bis zu einer Minute beträgt, muß beschleunigt werden.

Die Erstellung von Testfehlern ist für die Qualifizierung von radiographischen Verfahren und für die Verfahrensoptimierung unbedingt notwendig. Um die erforderliche Freiheit bei der Wahl von Fehlerform, Fehlertiefe und Fehlerart zu

erhalten, wurde eine Funkenerosionsmaschine (Kap. 6.3) entwickelt. Mit dieser Maschine können in metallischen Werkstoffen Fehler mit Breiten bis herunter zu 50  $\mu\text{m}$  und mit Tiefen bis über 500  $\mu\text{m}$  erodiert werden. Die Maschine ist auch für schwer zugängliche Fehlerorte (Innenseite von Rohren) geeignet.

Eine Alternative zur digitalen Bildverarbeitung bietet die optische Bildverarbeitung (Kap. 6.4). Ihr wesentlicher Vorzug besteht in der hohen Arbeitsgeschwindigkeit durch paralleles Verarbeiten großer optischer Datenmengen. Dieser Vorzug erhält sein besonderes Gewicht angesichts der Speicherkapazität und Wirtschaftlichkeit des Films. Das zur Bildverarbeitung benötigte optische System ist relativ einfach aufgebaut, wobei die Ansprüche an seine Güte mit den für das Problem erforderlichen Übertragungseigenschaften steigen. Der Vorteil einer Echtzeit-Verarbeitung wird im allgemeinen aber durch drei Engpässe aufgehoben: Durch die hohe Filmschwärzung von Durchstrahlungsaufnahmen, durch die aufwendige Problemanpassung (Filter) und durch die Schwierigkeiten bei der Weiterverarbeitung. Wegen dieser Probleme und der damit verbundenen Kosten wurde die optische Bildverarbeitung in diesem Vorhaben nicht weiter verfolgt.

Das Vorhaben hat die im Antrag genannten Ziele zur Verbesserung der radiographischen Prüfung von Reaktorkomponenten insgesamt erreicht. Neben einigen Studien und Nebenarbeiten (Optische Bildverarbeitung, Funkenerosion und Bearbeitung aktueller Problemfälle) wurden die Verfahren "Digitale Bildverarbeitung" und "Mehrwinkel-Radiometrie" entwickelt, erprobt und angewendet. Die Bedeutung des Vorhabens für die Reaktorsicherheit ist in der verbesserten und objektivierten Fehleranalyse mit radiographischen und radiometrischen Verfahren zu sehen.

8. Literatur

- [1] A. Rosenfeld, A.C. Kak: "Digital Picture Processing"
- [2] R.C. Gonzalez, P. Wintz: "Digital Imaging Processing"
- [3] A. Rosenfeld: "Digital Picture Analysis"
- [4] M.G. Thomason, R.C. Gonzalez: "Syntactic Pattern Recognition"
- [5] L. Hall: "Computer Image Processing and Recognition"
- [6] R.M. Haralick: "Pictorial Data Analysis"
- [7] K.R. Castleman: "Digital Image Processing"
- [8] T.S. Huang: "Picture Processing and Digital Filtering"
- [9] B.K. Agarwal: "X-Ray Spectroscopy"
- [10] E. Triendl: "Bildverarbeitung und Mustererkennung"
- [11] H. Kazmierczak: "Erfassung und maschinelle Verarbeitung von Bilddaten"
- [12] H. Niemann: "Methoden der Mustererkennung"
- [13] T. Pavlidis: "Structural Pattern Recognition"
- [14] R.M. Haralick: "Edge and Region Analysis for Digital Image Data"
- [15] A. Hoyer, M. Schindwein: "Bildverbesserung durch digitale Nachverarbeitung" [Philips techn. Rundschau 11/12 (1979)]
- [16] H. Brück: "Quantitative Bildanalyse" [Labor Praxis 6 (1978)]
- [17] M.E. Packer: "Application of Image Processing to the Detection of Corrosion by Radiography" (NINTH WORLD CONFERENCE ON NON-DESTRUCTIVE TESTING: 4D-7)
- [18] G. Wittig: "Untersuchung zur funkenerosiven Herstellung von Kontrollfehlern" (Schlußbericht zum Forschungsvorhaben ERP 2351)
- [19] G. Wittig, M. Stadthaus, W. Gehrman: "Untersuchung zur funkenerosiven Herstellung rißartiger Kontrollfehler"
- [20] C. van Osenbrugen: "Mikrofunkenerosion" [Philips Techn. Rundschau 30 (1969/70)]

- [21] Heidt, H.: "Automatische Bestimmung der Tiefenlage von Materialfehlern mittels Radiometrie"  
DGZfP-Tagung Lindau
- [22] Halmshaw, R.: "Physics of Industrial Radiology"  
Heywood Books, London 1966
- [23] Schnitger, D., Weise, H.P. u.a.: "Untersuchung der Energie- und Winkelverteilung der Streustrahlung und ihre Bedeutung für die Durchstrahlungsprüfung"  
Materialprüfung 19, 1977, Nr. 10
- [24] Heidt, H. Schnitger, D.: "Radiometrische Durchstrahlungsprüfung mit Röntgenstrahlen und mit automatischer Fehlererkennung"  
Materialprüfung 21, 1979, Nr. 11
- [25] Wehrmann, W.: "Korrelationstechnik"  
Lexikaverlag, Grafenau 1977
- [26] Oelmayer, R., Filbert, D., Heidt, H.: "Lagebestimmung von Innenfehlern durch Bildverarbeitung radiographischer Aufnahmen"  
DFG Kolloquium Göttingen 1981
- [27] Gellert, W. u.a.: "Kleine Enzyklopädie Mathematik"  
Verlag H. Deutsch, Frankfurt/M., 1972
- [28] Späth, H.: "Algorithmen für elementare Ausgleichsvorgänge"  
Oldenbourg Verlag, München 1973
- [29] Stearns, S.D.: "Digital Signal Analysis"  
Hayden Book, New Jersey, USA 1975
- [30] Filbert, D.: "Stochastische Meßtechnik"  
Vorlesungsbegleitendes Material TU Berlin
- [31] Friese, T.: "Nucleare Elektronik"  
Vorlesungsbegleitendes Material TU Berlin
- [32] Datenunterlagen Harshaw Chemie B.V., De Meern, Holland
- [33] Birks, J.B.: "The Theory and Practice of Scintillation Counting"  
Pergamon Press, London 1964
- [34] Datenunterlagen Nuclear Enterprises Inc., Beenham, England
- [35] Piltingsrud, H.: "The Low Temperature Scintillation Properties of Bismuth Germanate and its Application to High-Energy Gamma Radiation Imaging Devices"  
The Journal of Nuclear Medicine, Vol. 20, 1979, Nr. 12
- [36] Nicholson, P.W.: "Nuclear Electronics"  
John Wiley, London 1974

- [37] Tietze, U., Schenk, C.: "Halbleiterschaltungstechnik"  
Springer Verlag, Berlin 1978, 4. Aufl.
- [38] Schnitger, D., Heidt, H., Weise, H.P.: "Bestimmung von  
Geräteeigenschaften technischer Röntgenanlagen als Bei-  
trag zur Objektivierung der Durchstrahlungsprüfung"  
Materialprüfung 22, 1980, Nr. 5
- [39] Datenunterlagen Burr-Brown
- [40] Frey DEV-8-Manual
- [41] Frey DEV-8-Manual
- [42] HP RTE Fortran-4X Reference Manual
- [43] Frey Graphics Manual
- [44] HP Programmers Reference Manual
- [45] Bendat, J.: "Random Data Analysis and Measurement"  
John Wiley, New York 1971
- [46] Röhler, H.; "Informationstheorie in der Optik"  
Wiss. Verlagsgesellschaft Stuttgart 1967
- [47] Lee, S.H.: "Review of Coherent Optical Processing"  
Appl. Phys. 10, 203 (1976)
- [48] Stroke, G.W.: "Image Improvement and Three-Dimensional  
Reconstruction Using Holographic Image Processing"  
Proc. IEE 65, No. 1, S. 39, 1977
- [49] O'Neill, E.: "Spatial Filtering in Optics"  
IRE Transact. on Inform. Theory, Vol. IT2, 1956, S. 56
- [50] Weiss, H. et al.: "Coded aperture imaging with X-rays  
(flashing tomosynthesis)"  
Optica Acta 24, Nr. 4, 305, 1977
- [51] Casasent, D., Ed.: "Optical Data Processing"  
Springer Verlag, Berlin, 1978
- [52] Pfeiler, M., Theil, G.: "Die präzise Simulation von  
Bildübertragungs-Systemen durch eine optische Faltung  
mit einem rotierenden Spalt vorgeschriebener Form"  
NTZ 9, 405, 1972
- [53] Lohmann, A.W., Paris, D.P.: "Computer Generated Spatial  
Filters for Coherent Optical Data Processing"  
Appl. Optics 7, No. 4, 651, 1968
- [54] Lee, S.H.: Appl. Optics 9, 639, 1970
- [55] Bates, R.H.T. et al.: "Practical Image Processing"  
Phys. Technol. 9, 101, 1978

- [56] Fitzgerald, M.J., Neville, R.J.: "Optical Spatial Frequency Filtering of Radiographs"  
J. Phot. Science 19, 703, 1971
- [57] Minkoff, J.B. et al.: "Optical Filtering to Compensate for Degradation of Radiographic Images Produced by Extended Sources"  
Appl. Optics 7, Nr. 4, 633, 1968
- [58] Hesse, P.W.: "Fourier Transform Enhancement of Radiographs"  
8. Symp. on Nondestr. Evaluation, in Aerospace Weapons Systems and Nucl. Appl., April 21, 1971, S. 155
- [59] Hesse, P.W., Criscuolo, E.L.: "Spatial Frequency Filtering of Radiographs"  
Mat. Eval., März 1973, S. 43
- [60] Becker, H.C. et al.: IEE Transact. on Bio-Medical Engineering, Vol. BME-15, No. 3, 186, 1968

## Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

- Nr. 1/September 1968  
**Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)**  
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft
- Nr. 2/Juli 1970 (vergriffen)  
**Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmessstreifen und Halbleitern**  
von Dr.-Ing. Götz Andraea
- Nr. 3/September 1970 (vergriffen)  
**Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile**  
von Dr.-Ing. Josef Ziebs
- Nr. 4/Dezember 1970 (vergriffen)  
**Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren**  
von Dr. rer. nat. Arno Burmester
- Nr. 5/März 1971  
**Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken**  
von Dr. rer. nat. Norbert Steiner
- Nr. 6/April 1971  
**Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen**  
von Prof. Dr.-Ing. Paul Schneider
- Nr. 7/Juli 1971  
**Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie**  
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Petrowitz
- Nr. 8/November 1971  
**Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung**  
von Dr.-Ing. Helmut Veith
- Nr. 9/November 1971  
**Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen**  
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Möller
- Nr. 10/Januar 1972 (vergriffen)  
**Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode**  
von Dr.-Ing. Dietmar Aurich und Prof. Dr. phil. Erich Martin
- Nr. 11/Februar 1972  
**Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden**  
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Krause
- Nr. 12/Mai 1972  
**Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren**  
von Dir. u. Prof. Dr. rer. nat. Hubert Feuerberg
- Nr. 13/Juni 1972  
**Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und  $2 \cdot 10^{-7}$  Torr**  
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig (Berichter), Prof. Dr.-Ing. Kurt Kirschke, Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig und Dipl.-Phys. Harald Tischer
- Nr. 14/Juli 1972  
**Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz**  
von Eberhard Fischer
- Nr. 15/August 1972  
**Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse**  
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Heinz Pohl
- Nr. 16/August 1972  
**Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer**  
von Dr.-Ing. Erwin Knublauch
- Nr. 17/August 1972  
**Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen**  
von Dr.-Ing. Peter Reimers
- Nr. 18/Januar 1973  
**Das Sprödbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**  
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 19/Januar 1973  
**Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen**  
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. K. Kaffanke und Dr.-Ing. H. Czichos
- Nr. 20/April 1973  
**Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden**  
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi
- Nr. 21/Juli 1973  
**Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung**  
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. D. Klaffke und Dr.-Ing. W. Maennig
- Nr. 22/Juli 1973  
**Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen**  
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi und Dr.-Ing. E. Knublauch
- Nr. 23/November 1973  
**Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin  
Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen**  
von Prof. Dr. rer. nat. habil. Walter Ruske
- Nr. 24/November 1973  
**Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung**  
von Dipl.-Ing. J. Stanke, Ing. grad. E. Klement und Dipl.-Ing. R. Rudolphi
- Nr. 25/Dezember 1973  
**Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen**  
von Dr.-Ing. E. Knublauch
- Nr. 26/August 1974  
**Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen —**  
von Dipl.-Ing. P. Jost, Dr.-Ing. P. Reimers und Dr.-Ing. P. Weise
- Nr. 27/August 1974  
**Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall**  
von Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg
- Nr. 28/August 1974  
**Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern**  
von Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Heinrich
- Nr. 29/August 1974  
**Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall**  
von Prof. Dr.-Ing. P. Schneider
- Nr. 30/September 1974 (vergriffen)  
**The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology**  
von Dr. Horst Czichos und Dr. Geert Salomon
- Nr. 31/August 1975  
**Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechsellastbeanspruchung**  
von Dr.-Ing. Gerhard Fuhrmann
- Nr. 32/September 1975  
**Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen**  
von Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Bernhard Böttcher
- Nr. 33/November 1975  
**Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens**  
von Dipl.-Ing. Armin Wagner, Dipl.-Phys. Gerhard Kieper und Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 34/Januar 1976 (vergriffen)  
**Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoffen**  
von Dipl.-Forsting. Dr. rer. sylv. Hans-Joachim Deppe
- Nr. 35/Januar 1976  
**Der Widerstand von Platten, die als Bepankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren —**  
von Dipl.-Ing. Ernst Limberger
- Nr. 36/Januar 1976 (vergriffen)  
**Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles**  
von Dipl.-Ing. Jürgen Hundt



- Nr. 37/Februar 1976  
**Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren —**  
 von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 38/Juni 1976  
**Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionisiertem Stahl 42 CrMo 4**  
 von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 39/Juni 1976  
**Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newton'schem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung**  
 von Prof. Dr.-Ing. K. Kirschke und Dipl.-Phys. G. Kempf
- Nr. 40/Juni 1976  
**Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren**  
 von Dr. rer. nat. H. Hantsche
- Nr. 41/Okttober 1976  
**Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten**  
 von Dr. rer. nat. Bernhard Böttcher
- Nr. 42/Okttober 1976  
**Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft**  
 von Dr.-Ing. Siegmund Diellen
- Nr. 43/Okttober 1976  
**Das Sprödbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**  
 von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 44/November 1976  
**Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“**  
 von Dipl.-Ing. W. Matthees
- Nr. 45/Dezember 1976  
**Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten**  
 von Dr.-Ing. W. Paatsch
- Nr. 46/Mai 1977 (vergriffen)  
**Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung**  
**Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses**  
 von Dipl.-Ing. Gerald Schickert und Dipl.-Ing. Helmut Winkler
- Nr. 47/Juni 1977  
**Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen**  
 von Dr.-Ing. Arno Plank
- Nr. 48/Okttober 1977  
**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn**  
 von Dr.-Ing. U. Holzlöhner
- Nr. 49/Dezember 1977  
**Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung**  
 von Dr.-Ing. Günther Wittig
- Nr. 50/Juni 1978 (vergriffen)  
**Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern**  
 von Prof. Dipl.-Phys. Norbert Czaika, Dipl.-Phys. Norbert Mayer, Dipl.-Ing. Claus Amberg, Dipl.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Götz Andrae und Dipl.-Ing. Winfried Markowski
- Nr. 51/Juni 1978  
**Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen**  
 von Dr. rer. nat. J. Sickfeld
- Nr. 52/August 1978  
**Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung**  
 von Dr.-Ing. Aleksandar Tomov
- Nr. 53/Okttober 1978  
**Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge**  
 von Rolf Günter Rohrmann und Reinald Rudolphi
- Nr. 54/Okttober 1978  
**Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung**  
 von Dr.-Ing. Herro Sander
- Nr. 55/November 1978  
**Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung**  
 von Dr.-Ing. Dieter Klaffke
- Nr. 56/Januar 1979  
**Stabilität von Sandwichbauteilen**  
 von Dipl.-Ing. W. Brunner und Prof. Dr.-Ing. C. Langlie
- Nr. 57/März 1979  
**Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetspulverprüfung**  
**Investigations on Inspection-Media for Magnetic-Particle-Testing**  
 von Dipl.-Ing. Meinhard Stadthaus
- Nr. 58/März 1979  
**Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau**  
 von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 59/Juli 1979  
**Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl**  
 von Dr.-Ing. Günther Plauk
- Nr. 60/August 1979  
**Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken**  
 von Dr.-Ing. H. Spreckelmeyer, Dr.-Ing. R. Helms und Dr.-Ing. J. Ziebs
- Nr. 61/Dezember 1979  
**Beschreibung von Problemen der höheren Farbmetrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems**  
 von Dr. Klaus Richter
- Nr. 62/Dezember 1979  
**Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle**  
 von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerisch und Prof. Dr. habil. Dr. h. c. Günther Becker
- Nr. 63/Dezember 1979  
**Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase**  
 von Dipl.-Ing. E. Behrend und Dipl.-Ing. J. Ludwig
- Nr. 64/Februar 1980  
**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**  
 von Dr.-Ing. Werner Rücker
- Nr. 65/Februar 1980  
**Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte**  
 von Dr.-Ing. Peter Schmidt, Dr.-Ing. Dietmar Aurich, Dr.-Ing. Rolf Helms, Dr.-Ing. Helmut Veith und Dr.-Ing. Josef Ziebs
- Nr. 66/Mai 1980  
**Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung**  
 von Dr. rer. nat. Martin Hattwig
- Nr. 67/Mai 1980  
**Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung**  
 von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees
- Nr. 68/Mai 1980  
**Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik.**  
**Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisions-Goniometers**  
 von Dr. rer. nat. Dieter Petersohn
- Nr. 69/Juni 1980  
**Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitshüllen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise**  
 von Dr.-Ing. Frank Buchhardt und Dipl.-Ing. Peter Brandl
- Nr. 70/August 1980 (vergriffen)  
**Schwellenwerte beim Betondruckversuch**  
 von Dr.-Ing. Gerald Schickert
- Nr. 71/August 1980  
**Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen**  
 von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees und Dipl.-Ing. Götz Magiera
- Nr. 72/September 1980  
**Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen**  
 von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 73/November 1980

**Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen**  
von Dipl.-Ing. Peter Wegener

Nr. 74/November 1980

**ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz**  
von Dr.-Ing. Reinald Rudolph und Dipl.-Inform. Renate Müller

Nr. 75/November 1980

**Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen**  
von Dir. u. Prof. Dr. Hans-Jürgen Heinrich

Nr. 76/November 1980

**Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop**  
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke und Prof. Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig

Nr. 77/April 1981

**Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen**  
von Dipl.-Ing. Michael Gierloff und Dr.-Ing. Matthias Maultzsch

Nr. 78/September 1981

**Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund**  
von Dr.-Ing. Werner Rücker

Nr. 79/Dezember 1981

**Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflussten Kalttribneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch**  
von Dr.-Ing. Volker Neumann

Nr. 80/Dezember 1981

**Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten**  
von Dr.-Ing. Arno Plank, Dr.-Ing. Werner Struck und Dr.-Ing. Manfred Tzschätzsch

Nr. 81/Dezember 1981

**Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik**  
von Dipl.-Ing. Jürgen Schmidt

Nr. 82/April 1982

**Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches**  
**Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test**  
von Rolf Helms, Hans-Joachim Kühn und Siegmund Ledworuski

Nr. 83/Juli 1982

**Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen**  
— Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen —  
von Prof. Dr.-Ing. Horst Czichos und Dr.-Ing. Paul Feinle

Nr. 84/Juli 1982

**Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)**  
von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolph

Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/Okttober 1982

**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" —  
von Prof. Dr. Horst Czichos

Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/November 1982

**Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale**  
von Dr.-Ing. Konrad Niesel und Dr. rer. nat. Peter Schimmelwitz

Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/Dezember 1982

**Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren**  
von Dr.-Ing. Bernd Isecke und Dr.-Ing. Wolfgang Stichel

Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/Februar 1983

**Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall**  
von Dr.-Ing. Anton Erhard

Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/April 1983

**Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid**  
von Dr. rer. nat. Dietrich Conrad und Dr.-Ing. Siegmund Dietlen

Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/April 1983

**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**

**Konzeption für geregelte Versuche**

**Versuchseinrichtung**  
**Vorversuch an Stahlbetonbalken**  
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter

Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/April 1983

**Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz**  
von Dr.-Ing. Michael Weber

Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/August 1983

**Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden**  
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch

Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/August 1983

**Unterdrückung stick-silb-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen**  
von Dr. rer. nat. Peter Fritsch

Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/August 1983

**Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen**  
von Dr.-Ing. Xian-Quan Dong

Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/August 1983

**Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten**  
von Dr.-Ing. Manfred Römer

Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/Okttober 1983

**Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken**  
von Dr.-Ing. Heinz Eifler

Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/November 1983

**Typische Bruchflächenbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung**  
von Dipl.-Ing. Gerhard Fuhrmann und Prof. Dr. rer. nat. Wolfram Schwarz

Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/Dezember 1983

**Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschenwaren**  
— Stretch- und Erholungsvermögen —  
von Dr. rer. nat. Edmund Schnabel

Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/Dezember 1983

**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
**Versuche an Stahlbetonbalken mit Biegebewehrung aus Betonstahl BSt 420/500 RK und BSt 1080/1320**  
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter

Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/Januar 1984

**Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand**  
von Günter Klamrowski und Paul Neustupny

Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/Februar 1984

**Röntgen- und Gammastrahlen Computer-Tomographie**  
von Dr.-Ing. Peter Reimers, Dr. rer. nat. Jürgen Goebbels, Dr.-Ing. Heinrich Heidt, Dr.-Ing. Hans-Peter Weise und Dipl.-Phys. Kay Wilding

Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/März 1984

**Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens zur Druckspannungsmessung in Beton**  
von Dr.-Ing. Götz Magiera

Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/März 1984

**Radlographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien**  
von Dr.-Ing. Dierk Schnitger

Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/April 1984

**Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen**  
von Dr.-Ing. Michael Gierloff

Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/Juni 1984

**Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen**  
von Dr.-Ing. Bernd Schulz-Forberg

Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/Okttober 1984

**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last**  
von Dr.-Ing. Jan Lehnert

Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/Okttober 1984

**Korrosion von Stahlradiatoren**  
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel und Jörg Ehreke

Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/Okttober 1984

**Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen — Ergebnisse von Modellrechnungen**  
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch

Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/Februar 1985

**Zur Wirkung der Schrumpfbehinderung auf den Schweißeigenspannungszustand und das Sprödbruchverhalten von unterpulverschweißten Blechen aus St E 460 N**

von Dr.-Ing. Mohamed Omar

Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/Februar 1985

**Wasserstoff als Energieträger**

von Dr. Hermann Walde (Mitglied des Kuratoriums der BAM i. R.) und Dr. Bernhard Kropp

Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/Februar 1985

**Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Analex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte**

von Dr.-Ing. Kurt Ziegler

Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/Juli 1985

**Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen**

von Dr.-Ing. Wolfgang Lützw

Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/Juli 1985

**Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungsrißkorrosion von Offshore-Konstruktionen**

von Rolf Helms, Horst Henke, Gerhard Oelrich (BAM, Berlin) und Tetsuya Saito (NRIM, Japan)

Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/Juli 1985

**Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen**

von Dipl.-Ing. Peter Rose, Dipl.-Ing. Peter Raabe, Dipl.-Ing. Werner Daum und Andreas Szameit

Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/Juli 1985

**Farbempfindungsmerkmal Elementarblau und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld**

von Privatdozent Dr. Klaus Richter