

## Röntgengrobstrukturprüfung (XGrob)

### 1 Versuchsziel

Ziel des Versuches ist es, einige technisch wichtige Anwendungsfälle der Röntgengrobstruktur-Durchstrahlungsprüfung kennenzulernen. An Hand der Filmaufnahmen wird die Fehlerdiskussion durchgeführt, die optimale Aufnahmebedingung ermittelt und die Bildgüte verschiedener Röntgenfilme bestimmt.

### 2 Versuchsgrundlagen

Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge von etwa  $10^{-3}$  bis  $10^1$  nm. Mit Hilfe von Röntgenstrahlen lassen sich in Werkstücken und Bauteilen makroskopische Fehlstellen, Einschlüsse, Seigerungen, Gasblasen, Risse und Fügefehler nachweisen, wenn diese eine lokal gegenüber den Grundmaterial veränderte Strahlungsschwächung ergeben.

#### 2.1 Röntgenröhre und Röntgenspektrum

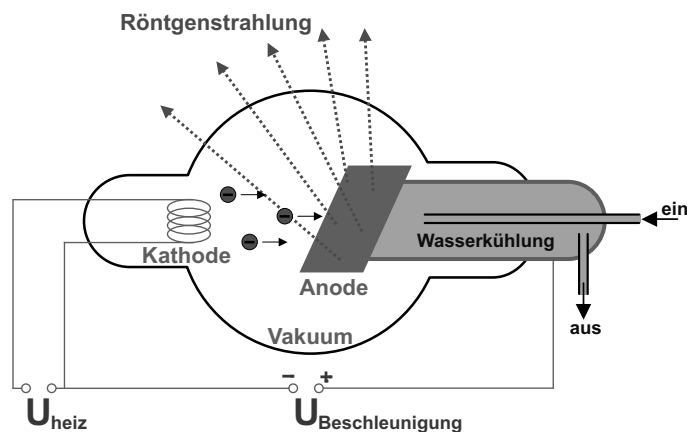


Bild 1: Schema einer Röntgenröhre

Bild 1 zeigt das Schema einer Röntgenröhre. Die durch einen Heizstrom mittels thermische Anregung aus der (Glüh)Kathode austretenden Elektronen, werden durch ein äußeres elektrisches Feld (angelegte Spannung im Bereich  $\approx 20 - 200$  kV) im Vakuum stark in Richtung Anode beschleunigt. Beim Auftreffen der Elektronen auf das Anodenmaterial regen diese durch die Wechselwirkung im Anodenmaterial Röntgenstrahlung an. Die in dieser Röhre umgesetzte elektrische Leistung (oft 1500 W und mehr) wird zu 99 % in Wärme umgewandelt und diese Wärme wird durch eine rück-

seitige Wasserkühlung der Anode abgeführt. Nur 1 % der eingebrachten elektrischen Leistung wird in Röntgenstrahlung umgesetzt.

Der Anodenkörper besteht bei Feinstrukturrohren meist aus Kupfer, aber auch andere Anodenmaterialien wie Cr, Fe, Co und Mo werden eingesetzt. Das eigentliche Anodenmaterial wird meist als dünne Platte in den Anodenkörper eingelassen. Die Röntgenstrahlung tritt durch in den Anodenkörper eingebrachte dünne Fenster aus. Diese Fenster sind gerade so dick ausgeführt, dass sie die Vakuumdichtheit der Röhre garantieren, aber trotz der Absorption von Röntgenstrahlung beim Durchgang durch Materie ein ausreichend niedriges Schwächungsverhalten aufweisen.

Bild 2 zeigt schematisch das entstehende Spektrum der Röntgenstrahlung. Hierbei sind zwei Teilspektren deutlich zu unterscheiden, das *Bremsspektrum* und die *charakteristische Strahlung*.

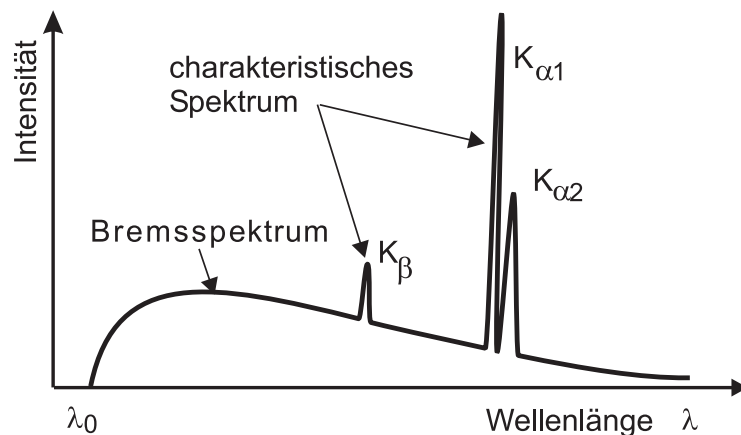


Bild 2: Röntgenspektrum

- a) Das **Bremsspektrum**, das durch das Abbremsen der nach dem Durchlaufen der Anodenspannung  $U_a$  hoch beschleunigten Elektronen im elektrischen Feld der Atome des Anodenmaterials auftritt, umfasst kontinuierlich einen größeren Spektralbereich oberhalb  $\lambda_0$  nach Bild 2. Beim Bremsspektrum gilt für dessen kurzwellige Grenze

$$\lambda_0 = \frac{h \cdot c}{e \cdot U_a} = \frac{1,238}{U_a[kV]} \quad [nm] \quad (1)$$

$h$	$= 6,625 \cdot 10^{-34} Js$	Plancksches Wirkungsquantum
$e$	$= 1,6 \cdot 10^{-19} As$	elektrische Elementarladung
$c$	$= 2,9979 \cdot 10^8 ms^{-1}$	Lichtgeschwindigkeit

- b) Das **charakteristische** oder **Eigenstrahlungsspektrum**. Hierfür ionisieren die auf den Brennfleck treffenden Elektronen die Atome der Anodenoberfläche in ihren innersten Quantenbahnen. Bei der Rekombination äußerer Bahnelektronen auf den oder die freien Terme wird jeweils die Energiedifferenz als Strahlenquant abgestrahlt. Diese Quantenenergien bzw. Wellenlängen sind für das Atom charakteristisch und liefern in der Summe ein diskontinuierliches charakteristisches Spektrum, ein Linienspektrum gemäß Bild 2.

## 2.2 Schwächung von Röntgenstrahlung

Die erzeugte Röntgenstrahlung wird beim Durchgang durch die zu untersuchenden Proben geschwächt. Dem Vorgang der Strahlungsschwächung liegt folgendes Gesetz zugrunde:

$$I = I_o * e^{(-\mu_s \cdot D)} \quad (2)$$

Es beschreibt die in Bild 3 dargestellte Tatsache, bei der  $I_o$  die auf das als quaderförmig angenommene Prüfteil treffende Intensität der Röntgenstrahlung darstellt.  $I$  entspricht der nach Durchtritt der Materialdicke  $D$  noch vorhandene Intensität, welche mittels Film, Zählrohr, Leuchtschirm oder Bildverstärker aufgenommen wird.  $\mu_s$  wird als Schwächungskoeffizient bezeichnet und läßt sich aus folgenden Einzelprozeßwerten angenähert zusammensetzen.

$$\mu_s = \mu_a + \mu_{st} + \mu_p \quad (3)$$

$\mu_a$	=	$C_1 z^4 \lambda^3$	Absorptionskoeffizient
$\mu_{st}$	=	$C_2 z$	Streukoeffizient
$\mu_p$	=	$C_3$	Paarbildungskoeffizient (erst ab 1,02 MeV)
$z$	=		Ordnungszahl des Prüfteilwerkstoffes
$C_n$	=		Konstanten

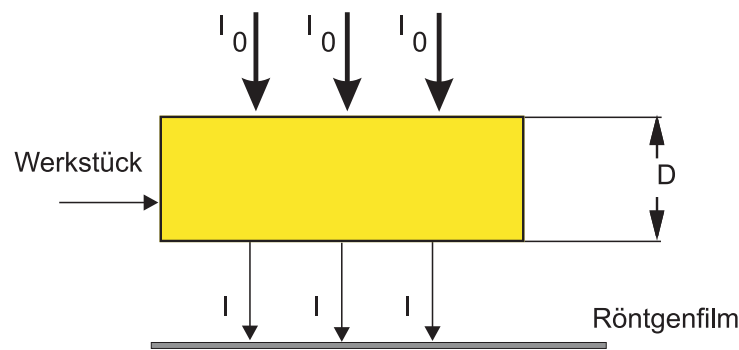


Bild 3: Prinzip der Strahlungsschwächung

## 2.3 Verfahrenstechnische Grundlagen

An einer Röntgenanlage sind folgende Einstellgrößen dem Zweck entsprechend zu wählen:

- die Anodenspannung  $U_a$  (Energie der Röntgenlichtquanten bzw. die Wellenlänge).
- die Stärke des Anodenstroms  $i_a$  (Zahl der Röntgenquanten pro Zeiteinheit, d.h. die Strahlungsintensität).
- die Belichtungszeit  $t$ , (während die Apparatur eingeschaltet ist und strahlt).

In der Aufnahmetechnik spielt die **Belichtungsgröße B** eine wesentliche Rolle. Sie stellt das Produkt aus der Belichtungszeit  $t$  und dem der Strahlungsintensität proportionalen Anodenstrom  $i_a$  (in starker Vereinfachung) dar, Gleichung 4:

$$B = i_a \cdot t \quad [mA \cdot min] \quad (4)$$

Der Nachweis der Intensitätsunterschiede der durch das Prüfstück hindurchtretenden Strahlung wird in der Prüfpraxis meist durch speziell hartarbeitende Emulsionen von Röntgenfilmen geführt.

Wird ein Prüfteil entsprechend Bild 4 durchstrahlt, dann werden die im Prüfteil angedeuteten Fehler die durchgehende Intensität  $I$  beeinflussen. Die Intensitätsunterschiede schwärzen den röntgenografischen Film unterschiedlich.

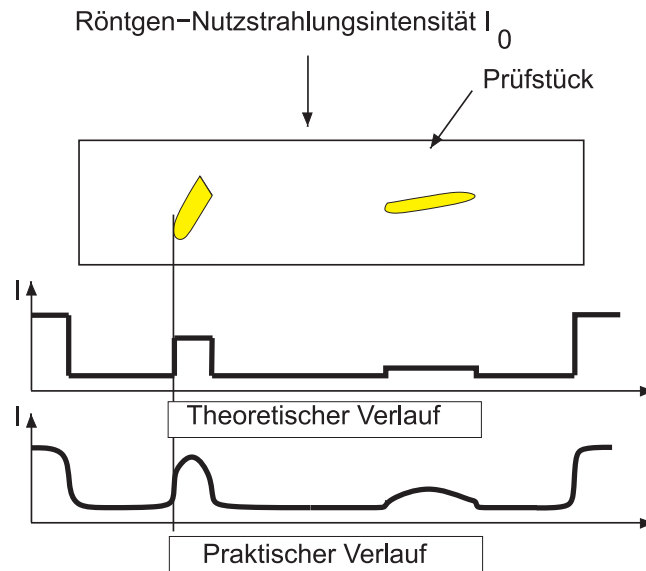


Bild 4: Prinzip des röntgenografischen Fehlernachweises

Unter dem proportionalen Anstieg ( $S_1 - S_2$ ) der Schwärzungskurve, Bild 5, versteht man die Gradation des benutzten Röntgenfilmes.  $S_0$  ist die sogenannte Schleierschwärzung. Je größer die Gradation ist, umso stärker ist bei gegebenen Intensitätsverhältnissen der Schwärzungsunterschied und damit der Kontrast.

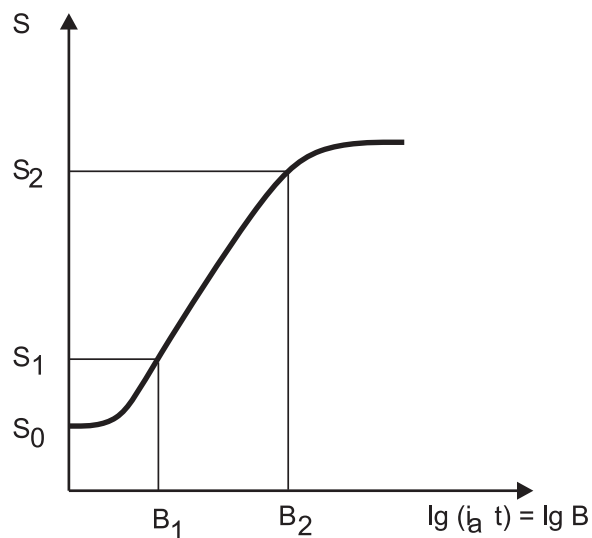


Bild 5: Schwärzungskurve eines Röntgenfilmes

## 2.4 Bildgüte

Die Bildgüte der Röntgenaufnahme wird aus dem erzielten Kontrast (Helligkeit) und der Bildschärfe (geometrische Details) beurteilt und ist maßgebend für die Erkennbarkeitsgrenze von Fehlstellen.

- a) Die Bildschärfe ist Ergebnis der Strahlengeometrie, der sogenannten geometrischen oder äußeren Bildschärfe  $u_g$ , und des Filmmaterials, das die innere Bildschärfe  $u_i$  bestimmt. Sie ist dann am größten, wenn die geometrische Randunschärfe und innere Unschärfe des Filmes (Werte in DIN EN 444) möglichst kleine Werte annehmen und vergleichbare Größen sind. Die geometrische Unschärfe  $u_g$  ist durch die Aufnahmeanordnung und die räumliche Ausdehnung der Strahlenquelle bestimmt. Bild 6 veranschaulicht die Entstehung einer Randunschärfe als Folge der Ausdehnung des Halbschattengebietes rings um einen abzubildenden Fehler. Um eine erforderliche Bildschärfe einer Röntgenaufnahme zu erhalten, soll der Abstand zwischen Röntgenfilm und Brennfleck gemäß Gleichung 5 gewählt werden (üblich  $e = 700$  mm).

$$e_{min} = \frac{b(d_B + u_i)}{u_i} \quad (5)$$

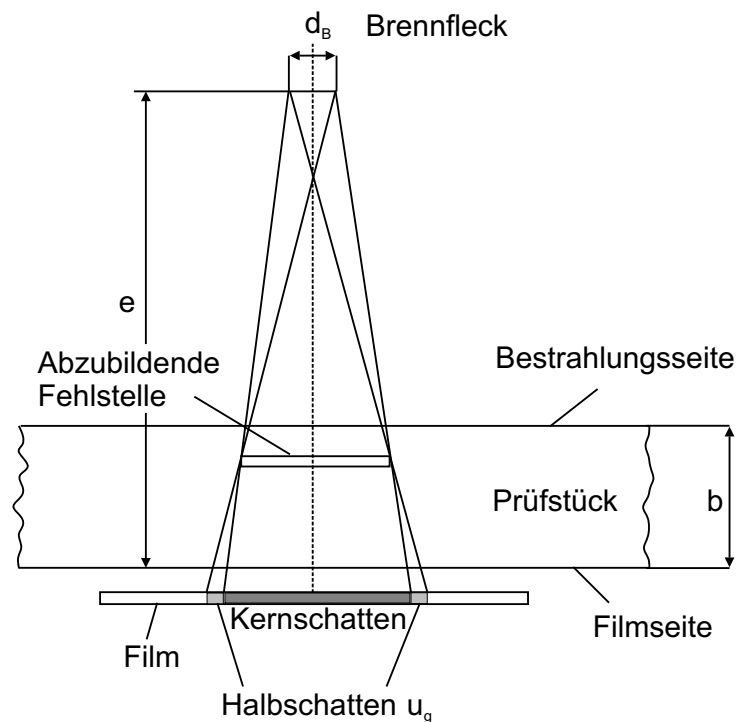


Bild 6: Strahlengeometrie bei der Röntgengrobstrukturprüfung; b=Abstand Bestrahlungsseite - Film;  $d_B$ =Brennfleckabmessung (Focus); e=Abstand Brennfleck - Film

- b) Unter Kontrast versteht man die Größe der Schwärzungsunterschiede, die bei der entwickelten Filmschicht vorliegen. Die Schwärzung wird von der Intensität der Strahlung, der Dauer der Belichtung, von der Empfindlichkeit des Filmmaterials und der Entwicklung bestimmt.

Der Kontrast des Röntgenbildes - hier auf dem Film, das gilt aber auch für den Leuchtschirm, Bildwandler o. ä. - soll in optimalen Schwärzungsunterschieden den Wanddickenunterschied zwischen der fehlerhaften und fehlerfreien Stelle entsprechend Bild 6 bzw. Bild 4 darstellen. Dies ist durch

eine entsprechende Wahl der Anodenspannung  $U_a$  zu erreichen, die den Schwerpunkt der in der Strahlung vorhandenen Wellenlängen gemäß Bild 2 (Bremspektrum) und Gleichung 1 (Härte der Strahlung) bestimmt. Durch Gleichung 2 ist der Zusammenhang zwischen I und D gegeben, der in  $\mu_s$  einen entscheidenden Faktor enthält. Dieser Schwächungskoeffizient ist in Gleichung 3 aufgegliedert, wobei in  $\mu_a$  die Wellenlängenabhängigkeit zum Ausdruck kommt. Die Schlußfolgerung lautet, daß man eine so kleine wie mögliche Anodenspannung wählen sollte, um größtmöglichen Kontrast zu erzielen. Zu kleinen Werten wird  $U_a$  durch die tragbare Länge der Belichtung t begrenzt, was auch in dem Belichtungsdiagramm Bild 7 bzw. 8 zu erkennen ist.

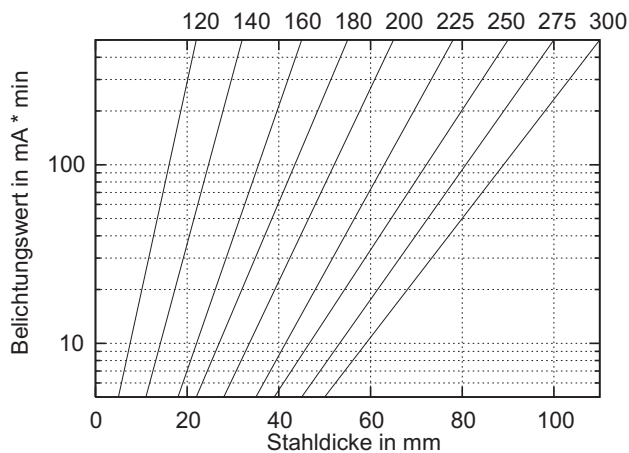


Bild 7: Belichtungsdiagramme für Eisen, Filmschwärzung  $S=1,5$ ; Gleichspannungs-röntgenanlage

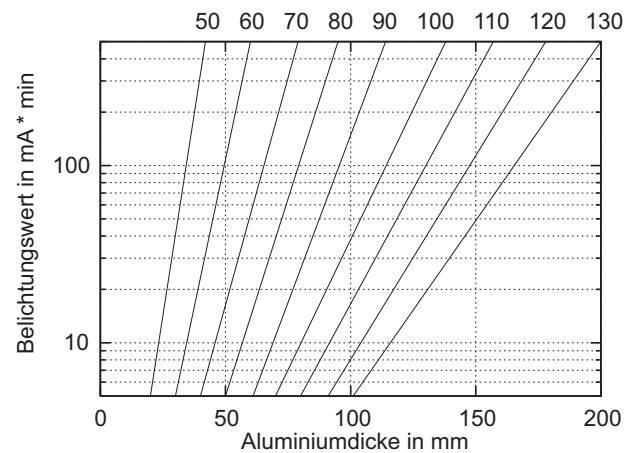


Bild 8: Belichtungsdiagramme für Aluminiumbasislegierungen, Filmschwärzung  $S=1,5$ ; Gleichspannungs-röntgenanlage

Durch Verstärkerfolien wird eine Verstärkung der Filmschwärzung erreicht. Es werden Salz- und Metallverstärkerfolien verwendet, die auf unterschiedliche Weise die Kontraststeigerung herbeiführen. Verstärkungsfaktoren für Salzfolien sind groß und liegen etwa im Bereich von 20 bis 100. Da aber mit der Verstärkung die innere Bildschärfe  $u_i$ , die eine Eigenschaft des Röntgenfiles darstellt, erheblich abnimmt, wird die Bildgüte durch verminderte Zeichenschärfe schlechter. Metallverstärkerfolien haben eine hohe Zeichenschärfe d. h. eine geringere, innere Unschärfe und einen Verstärkerfaktor zwischen 2 und 5.

## 2.5 Kontrolle der Bildgüte

Nach DIN EN 462-2 wird ein Bildgüteprüfkörper BPK (Drahtsteg), Bild 9, bestehend aus 7 im Durchmesser abgestuften Drähten, an der strahlenquellenzugewandten Seite des Prüfstückes befestigt und bei der Aufnahme mit abgebildet. Die Nummer des dünnsten auf dem Film noch erkennbaren Drahtes gibt die Bildgütezahl BZ an. Als erkannt gilt die Abbildung eines Drahtes, wenn er im Bereich gleichmäßiger Schwärzung auf mindestens 10 mm Länge zusammenhängend eindeutig sichtbar ist. Es gibt Bildgüteprüfkörper für Eisen, Aluminium- und Kupferwerkstoffe, die bei einer Aufnahme zur Bestimmung der Bildgütezahl BZ nur für die entsprechenden Metallgruppen verwendet werden dürfen.



DIN EN – Bildgüteprüfkörper  
für Eisenwerkstoffe

geeignet für:

- Bereich durchstrahlte Dicke 2 – 32 mm
- Bildgüteklasse W 10 – W 16
- z.B. W10 =0,4 mm; W16 =0,1mm

Bild 9: Bildgüteprüfkörper nach DIN EN ISO 19232-1

## 2.6 Prüfeinrichtung, Prüfstücke, Hilfsmittel

Zur Durchführung einer Röntgengrobstrukturaufnahme sind folgende Komponenten notwendig.

- Röntgeneinrichtung (Röntgenröhre, Hochspannungsgenerator und Schalteinheit)
- Röntgenfilm (mit hohem Kontrast, mittlerer Granulation und Verstärkerfolien)
- Belichtungsdiagramm für den Röntgenfilm, Bild 7
- verschiedene Prüfstücke
- Bleiabdeckungsblende
- Bleibuchstaben und -zahlen zur Markierung der Aufnahme
- Drahtsteg
- Entwicklungseinrichtung
- Filmbetrachtungsgerät

Die prinzipielle Aufnahmeanordnung zeigt Bild 10.

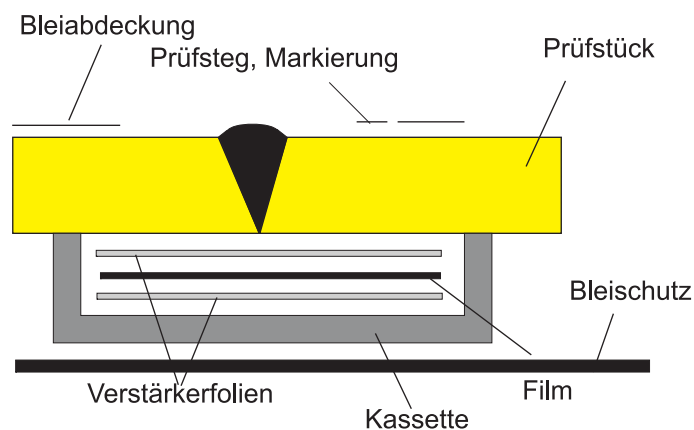


Bild 10: Aufnahmeanordnung einer Röntgengrobstrukturprüfung

## 2.7 Strahlungsgefährdung / Strahlenschutz

Die Röntgenstrahlung wirkt auf den Menschen schädigend ein, indem Gewebe - und damit auch Organe - irreversibel verändert, wenn nicht zerstört werden. Auch das Blut kann geschädigt werden. Verheerend ist die krebserregende und die erbschädigende Wirkung, wobei sich die einzelnen, im

Laufe des Lebens erhaltenen Strahleneinwirkung - Strahlendosen - addieren und sich nach dem heutigen Stand der Medizin nicht beseitigen lassen.

Grundsätzliche Maßnahmen für den Strahlenschutz sind:

- möglichst großer **Abstand** von der Strahlenquelle,
- geeignete **Abschirmung**,
- Begrenzung der **Aufenthaltszeit**.

Infolge der auf den Organismus schädlichen Wirkung der Röntgenstrahlen sind besondere Sicherheitsmaßnahmen einzuhalten, die in der Röntgenverordnung grundlegend festgelegt sind.

### 3 Vorbereitungsaufgaben

1. Welche Wechselwirkungen finden beim Durchgang der Strahlung durch Materie statt?
2. Von welchen Parametern hängt der Schwächungskoeffizient  $\mu$  ab?
3. Welche Werte besitzt die Grenzwellenlänge  $\lambda_0$  für Beschleunigungsspannungen von 80, 100 bzw. 120kV. Welche würde man dabei als härtere Strahlung bezeichnen?
4. Was versteht man unter innerer und äußerer Bildschärfe und wie sind sie zu verändern?
5. Wie lässt sich die genaue Position eines Fehlers in einem Bauteil und nicht nur die Ausdehnung bestimmen?
6. Welche Sicherheitsmaßnahmen sind beim Umgang mit Röntgenstrahlen einzuhalten?

### 4 Praktikumsaufgaben

1. Bestimmung von Schwärzungen auf Röntgenfilmen mittels des Handsonden-Densitometers.
2. Ermittlung des Schwärzungsgrades an einem Stufenkeiles. (1.Stufe: 3 mm, jede weitere Stufe beträgt 1 mm)
3. Bestimmen Sie mit Hilfe der ermittelten Kalibrierkurve die Fehlerdicken der Testproben.
4. Bestimmung von Bildgüten.

**Eine detaillierte Aufgabenstellung liegt am Versuchsplatz im  
Meitnerbau, G.-Kirchhoff-Str. 5, Raum 3.2.308 aus!**

### Literaturliste

- [1] SPIESS, L. ; TEICHERT, G. ; SCHWARZER, R. ; BEHNKEN, H. ; GENZEL, Ch.: *Moderne Röntgenbeugung - Röntgendiffraktometrie für Materialwissenschaftler, Physiker und Chemiker*. 3. Auflage. Springer Nature, 2019. – ISBN 3-8348-1219-3
- [2] HEINE, B.: *Werkstoffprüfung*. 2. Auflage. Leipzig : Hanser Fachbuchverlag, 2011. – 398 S. – ISBN 978-3-446-42553-8
- [3] Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlung (Röntgenverordnung - RÖV). In: *Bundesgesetzblatt 2001 i.d.V.* 2011 (2011), S. 2000–2043
- [4] STEEB, S.: *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung*. 4. Auflage. Expert Verlag, 2011. – ISBN 978-3816928522
- [5] STEGEMANN, D.: *Zerstörungsfreie Prüfverfahren*. 1. Auflage. Teubner Verlag, 1995. – 168 S. – ISBN 978-3519063551
- [6] JOHANNSEN, K.: *Kombination von Ergebnissen unterschiedlicher Verfahren der zerstörungsfreien Materialprüfung*. Dissertaion TU Berlin, 1996



- [7] BLUMENAUER, H.: *Werkstoffprüfung*. 6. korr. Auflage. Weinheim : VCH-Verlagsgesellschaft, 1994. – 426 S. – ISBN 978-3342005476
- [8] MACHERAUCH, E. ; ZOCH, H.-W.: *Praktikum in Werkstoffkunde*. 11. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011. – 602 S. – ISBN 978-3-8348-0343-6
- [9] Zerstörungsfreie Prüfung - Durchstrahlungsprüfung von metallischen Werkstoffen mit Film und Röntgen- oder Gammastrahlen - Grundlagen. In: *Deutsche Norm DIN EN 5579* (2014), S. 20
- [10] Terminologie - Teil 3: Begriffe der industriellen Durchstrahlungsprüfung. In: *Deutsche Norm DIN EN 1330-3* (1997)