

DIN EN ISO 20769-1

ICS 19.100

Entwurf

Einsprüche bis 2017-10-04
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 16407-1:2014-04

**Zerstörungsfreie Prüfung –
Durchstrahlungsprüfung auf Korrosion und Ablagerungen in Rohren mit
Röntgen- und Gammastrahlen –
Teil 1: Tangentiale Durchstrahlungsprüfung (ISO/DIS 20769-1:2017);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 20769-1:2017**

Non-destructive testing –

Radiographic inspection of corrosion and deposits in pipes by X- and gamma rays –

Part 1: Tangential radiographic inspection (ISO/DIS 20769-1:2017);

German and English version prEN ISO 20769-1:2017

Essais non destructifs –

Examen radiographique de la corrosion et des dépôts dans les canalisations, par rayons X et rayons gamma –

Partie 1: Examen radiographique tangentiel (ISO/DIS 20769-1:2017);

Version allemande et anglaise prEN ISO 20769-1:2017

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2017-08-04 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nmp@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP), 10772 Berlin, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 104 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 20769-1:2017) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 135 „Non-destructive testing“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 138 „Zerstörungsfreie Prüfung“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR (Frankreich) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der NA 062-08-22 AA „Industrielle Durchstrahlungsprüfung“ im DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 16407-1:2014-04 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Übernahme der Europäischen Norm EN 16407-1:2014 als Internationale Norm ISO/DIS 20769-1;
- b) Aktualisierung der Begriffe;
- c) Unterabschnitt 7.8, Anhang C und Anhang D wurden neu aufgenommen;
- d) Aktualisierung der Normativen Verweisungen und Literaturhinweise;
- e) redaktionelle Überarbeitung im gesamten Dokument.

Zerstörungsfreie Prüfung — Durchstrahlungsprüfung auf Korrosion und Ablagerungen in Rohren mit Röntgen- und Gammastrahlen — Teil 1: Tangentiale Durchstrahlungsprüfung (ISO/DIS 20769-1:2017)

Essais non destructifs — Examen radiographique de la corrosion et des dépôts dans les canalisations, par rayons X et rayons gamma — Partie 1 : Examen radiographique tangentiel (ISO/DIS 20769-1:2017)

Non-destructive testing — Radiographic inspection of corrosion and deposits in pipes by X- and gamma rays — Part 1: Tangential radiographic inspection (ISO/DIS 20769-1:2017)

ICS:

Deskriptoren:

Dokument-Typ: Europäische Norm
Dokument-Untertyp:
Dokumentstufe: parallele Umfrage
Dokumentsprache: D

STD Version 2.8l

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Vorwort	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	7
4 Klassifizierung der Durchstrahlungstechniken	10
5 Allgemeines	10
5.1 Schutz gegen ionisierende Strahlung	10
5.2 Qualifizierung des Personals	10
5.3 Identifizierung von Durchstrahlungsbildern	11
5.4 Kennzeichnung	11
5.5 Überlappung von Filmen oder digitalen Durchstrahlungsbildern	11
5.6 Typ und Lage der Bildgüteprüfkörper (BPK)	11
5.6.1 Einfach-Draht- oder Stufe/Loch-BPK	11
5.6.2 Doppel-Draht-BPK (digitale Durchstrahlungsbilder)	11
6 Empfohlene Vorgehensweisen für die Aufnahme von Durchstrahlungsbildern	11
6.1 Prüfanordnungen	11
6.1.1 Allgemeines	11
6.1.2 Anordnung der Strahlenquelle in Höhe der Rohrachse	12
6.1.3 Anordnung der Strahlenquelle versetzt zur Rohrachse	14
6.1.4 Ausrichtung von Strahl und Film/Detektor	15
6.2 Wahl der Strahlenquelle	15
6.3 Filmsysteme und Metallfolien	16
6.4 Folien und Abschirmung für Speicherfolien (nur für die Computer-Radiographie)	18
6.5 Verminderung der Streustrahlung	19
6.5.1 Filter und Blenden	19
6.5.2 Vermeidung von Rückstreuung	19
6.6 Abstand Strahlenquelle — Detektor	20
6.7 Axialer Erfassungsbereich und Überlappung	21
6.8 Maßkomparatoren	22
6.9 Bildsättigung und Anwendung von Bleistreifen zur Abbrandvermeidung	23
6.10 Auswahl der Ausrüstung für die digitale Radiographie	24
6.10.1 Allgemeines	24
6.10.2 CR-Systeme	24
6.10.3 DDA-Systeme	24
7 Empfindlichkeit, Güte und Auswertung von Durchstrahlungsbildern/digitalen Bilder	24
7.1 Auswertung der Bildgüte	24
7.1.1 Allgemeines	24
7.1.2 Maximaler Grauwert im freien Strahl (für digitale Durchstrahlungsbilder)	24
7.1.3 Kleinstes normiertes Signal-Rausch-Verhältnis (für digitale Durchstrahlungsbilder)	25
7.2 Optische Dichte der Filmaufnahmen	25
7.3 Filmverarbeitung	26
7.4 Filmbetrachtungsbedingungen	26
7.5 Maßkalibrierung der Durchstrahlungsaufnahmen oder der digitalen Bilder	26

7.5.1	Allgemeines	26
7.5.2	Messung der Abstände in einer radiographischen Prüfanordnung	27
7.5.3	Messung des Rohraußendurchmessers	28
7.5.4	Maßkomparator	28
7.6	Wanddickenmessungen auf Film-Durchstrahlungsaufnahmen	28
7.7	Wanddickenmessungen auf digitalen Durchstrahlungsaufnahmen	29
7.7.1	Interaktive Messungen am Bildschirm.....	29
7.7.2	Verfahren mit Auswertung des Grauwertprofils.....	29
7.8	Messungen der verbleibenden Dicke zur Beurteilung des Abbaus	31
7.8.1	Messungen zur Beurteilung des inneren Abbaus	31
7.8.2	Messungen zur Beurteilung des äußeren Abbaus.....	32
8	Digitale Aufzeichnung, Speicherung, Verarbeitung und Betrachtung der Bilder	34
8.1	Scannen und Auslesen des Bilds	34
8.2	Mehrfach-Durchstrahlungstechnik	34
8.3	Kalibrierung von DDA.....	35
8.4	Interpolation der Bad-Pixel.....	35
8.5	Bildverarbeitung	35
8.6	Aufzeichnung und Speicherung digitaler Bilder	35
8.7	Betrachtungsbedingungen am Monitor	36
9	Prüfbericht.....	36
	Anhang A (normativ) Bestimmung der Basis-Ortsauflösung.....	38
	Anhang B (informativ) Auswahl der Strahlenquelle für unterschiedliche Rohre.....	42
	Anhang C (informativ) Messungen der verbleibenden Dicke zur Beurteilung des inneren Abbaus	43
	Anhang D (informativ) Messungen der verbleibenden Dicke zur Beurteilung des äußeren Abbaus	46
	Literaturhinweise.....	51

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 20769-1:2017) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 135 „Non-destructive testing“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 138 „Zerstörungsfreie Prüfung“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur parallelen Umfrage vorgelegt.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO/DIS 20769-1:2017 wurde von CEN als prEN ISO 20769-1:2017 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung von Nationalen Normungsorganisationen (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird normalerweise von ISO Technischen Komitees durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale Organisationen, staatlich und nicht-staatlich, in Liaison mit ISO, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) bei allen elektrotechnischen Themen zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Im Besonderen sollten die für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten notwendigen Annahmekriterien beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der empfangenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname wird als Information zum Nutzen der Anwender angegeben und stellt keine Anerkennung dar.

Eine Erläuterung der Bedeutung ISO-spezifischer Benennungen und Ausdrücke, die sich auf Konformitätsbewertung beziehen, sowie Informationen über die Beachtung der Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO) zu technischen Handelshemmnissen (TBT, en: Technical Barriers to Trade) durch ISO enthält der folgende Link: www.iso.org/iso/foreword.html.

Das für dieses Dokument verantwortliche Komitee ist ISO/TC 135 *Non-destructive testing*, Unterkomitee SC 5 *Radiographic testing*.

ISO 20769 besteht unter dem allgemeinen Titel *Non-destructive testing — Radiographic inspection of corrosion and deposits in pipes by X- and gamma rays*:

- *Part 1: Tangential radiographic inspection*
- *Part 2: Double wall radiographic inspection*

1 Anwendungsbereich

Diese Europäische Norm legt grundlegende Techniken für die Durchstrahlungsprüfung unter Anwendung von Filmen und der digitalen Radiographie mit dem Ziel fest, auf wirtschaftliche Art und Weise zufriedenstellende und wiederholbare Ergebnisse zu erreichen. Die Techniken basieren sowohl auf allgemein anerkannten Verfahren als auch auf den theoretischen Grundlagen dieses Fachgebiets.

Diese Europäische Norm gilt für die Durchstrahlungsprüfung von Stahlrohren zum Nachweis von Werkstofffehlern, die beim Gebrauch auftreten, z. B. Korrosionsmulden und Fehler durch allgemeine Korrosion und Erosion. Neben der konventionellen Bedeutung sollten in dieser Norm unter der Benennung „Rohr“ (en: pipe) auch andere zylindrische Gegenstände, z. B. Röhren/Schläuche, Druckrohrleitungen, Kesseltrommeln und Druckbehälter, verstanden werden.

In dieser Norm nicht behandelt wird die Überprüfung von Schweißnähten auf die Fehler, die durch die herkömmlichen Schweißverfahren eingebracht werden, behandelt wird dagegen die Prüfung von Schweißverbindungen zum Nachweis von Fehlern durch Korrosion/Erosion.

Bei den Rohren darf es sich um Rohre mit oder ohne Wärmedämmung handeln, die beispielsweise in den Fällen bewertet werden können, in denen vermutet wird, dass durch Korrosion oder Erosion ein Werkstoffverlust an der Innen- oder Mantelfläche des Rohrs entstanden ist.

Dieser Teil von ISO 20769 behandelt das tangentielle Prüfverfahren zum Nachweis einer Verringerung der Dicke der Rohrwand einschließlich:

- a) Anordnung der Strahlenquelle in Höhe der Rohrachse; und
- b) Anordnung der Strahlenquelle versetzt zur Rohrachse.

Teil 2 von ISO 20769 behandelt die Doppelwand-Durchstrahlung, wobei zu beachten ist, dass die Doppelwand-Doppelbild-Technik häufig mit einer tangentialen Durchstrahlung kombiniert wird, bei der die Strahlenquelle in Höhe der Rohrachse angeordnet ist.

Diese Europäische Norm gilt für die tangentielle Durchstrahlungsprüfung unter Anwendung industrieller Röntgenfilmetechniken, computerunterstützter digitaler Radiographie (CR) und digitaler Matrixdetektoren (DDA, en: digital detector arrays).

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 14784-1, *Zerstörungsfreie Prüfung — Industrielle Computer Radiographie mit Phosphor Speicherfolien — Teil 1: Klassifizierung der Systeme*

EN ISO 11699-1, *Zerstörungsfreie Prüfung — Industrielle Filme für die Durchstrahlungsprüfung — Teil 1: Klassifizierung von Filmsystemen für die industrielle Durchstrahlungsprüfung*

EN ISO 11699-2, *Zerstörungsfreie Prüfung — Industrielle Filme für die Durchstrahlungsprüfung — Teil 2: Kontrolle der Filmverarbeitung mit Hilfe von Referenzwerten*

EN ISO 17636-1:2013, *Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen — Durchstrahlungsprüfung — Teil 1: Röntgen- und Gammastrahlungstechniken unter Anwendung von Filmen*

EN ISO 19232-5, *Zerstörungsfreie Prüfung — Bildgüte von Durchstrahlungsaufnahmen — Teil 5: Bestimmung der Bildunschärfezahl mit Doppeldraht-Typ-Bildgüteprüfkörpern*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen Terminologie-Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- IEC Electropedia: verfügbar über <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online Browsing Platform: verfügbar über <http://www.iso.org/obp>

3.1

tatsächliche Wanddicke

t_{act}

tatsächliche Dicke der Rohrwand

3.2

Basis-Ortsauflösung eines digitalen Detektors

$SR_{\text{b Detektor}}$

Hälfte der gemessenen Unschärfe des Detektors auf einem digitalen Bild und entspricht der effektiven Pixelgröße und gibt das kleinste geometrische Detail an, das mit einem digitalen Detektor mit einer Vergrößerung gleich eins aufgelöst werden kann

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei dieser Messung wird der Doppel-Draht-BPK direkt auf den digitalen Matrixdetektor oder auf die Speicherfolie gelegt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Messung der Unschärfe wird in EN ISO 19232-5 beschrieben, siehe auch ASTM E2736 [18] und ASTM E1000 [16].

3.3

axialer Erfassungsbereich am Detektor

L_{d}

gesamte axiale Ausdehnung des bewerteten Abschnitts des Rohr-Durchstrahlungsbildes, gemessen am Detektor

3.4

axialer Erfassungsbereich an der Rohr-Mittelachse

L_{p}

gesamte axiale Ausdehnung des bewerteten Abschnitts des Rohr-Durchstrahlungsbildes, gemessen entlang der Mittelachse des Rohres

3.5

Komparator

C

Referenzobjekt mit festgelegter Größe c und aus festgelegtem Werkstoff zur maßlichen Kalibrierung eines Durchstrahlungsbildes

3.6

Computer Radiographie

CR

Phosphor-Speicherfoliensystem

vollständiges System, das aus einer Phosphor-Speicherfolie (IP) und der zugehörigen Ausleseeinheit (Abtastsystem bzw. Scanner) besteht, mit der die Informationen aus der IP in ein digitales Bild umgewandelt werden

3.7

Detektor

D

Durchstrahlungsbilddetektor, der aus einem ZfP-Filmsystem (siehe EN ISO 11699-1) oder aus einem digitalen Durchstrahlungssystem mit einem Speicherfoliensystem (CR-System) oder mit einem DDA-System besteht

Anmerkung 1 zum Begriff: Filmsysteme und Speicherfolien können als flexible und biegsame Detektoren oder in einer flachen Kassette verwendet werden.

3.8

System mit digitalen Matrixdetektoren

DDA-System

elektronisches Gerät, das ionisierende oder durchdringende Strahlung in eine diskrete Matrix analoger Signale umwandelt, die anschließend digitalisiert und an einen Rechner übertragen werden, um dort als digitales Bild angezeigt zu werden, das dem Muster der radiologischen Energie entspricht, die auf die strahlungsempfindliche Fläche des Geräts wirkt

3.9

abgebildetes Komparatormaß

c'

Nennaußendurchmesser des Rohres, gemessen am Detektor

3.10

abgebildeter Außendurchmesser

$D_{e'}$

Maß des Komparators, gemessen am Detektor

3.11

größte durchstrahlte Dicke

$w_{\max}$

die für eine an die Innenrohrfläche angelegte Tangente größte vorhandene Rohrdicke

3.12

gemessene Wanddicke

t_{meas}

auf dem Durchstrahlungsbild oder dem digitalen Bild gemessene Dicke der Rohrwand

3.13

Nennwanddicke des Rohrs

t

Dicke nur des Rohrwerkstoffs für Fälle, in denen Herstellungsabweichungen nicht berücksichtigt werden müssen

3.14

normiertes Signal-Rausch-Verhältnis

SNR_N

normiertes Signal-Rausch-Verhältnis, SNR, normiert mit der Basis-Ortsauflösung, SR_b , entweder direkt im digitalen Bild gemessen und/oder wie folgt aus dem gemessenen SNR, $SNR_{measured}$, berechnet:

$$SNR_N = SNR_{measured} \frac{88,6 \mu m}{SR_b}$$

3.15

Abstand Prüfgegenstand — Detektor

b

Abstand zwischen der Seite des Prüfgegenstands, die der Strahlenquelle zugewandt ist und der Oberfläche des Detektors, in Richtung des Zentralstrahls gemessen

3.16

Außendurchmesser

D_e

äußerer Nenndurchmesser des Rohrs

3.17

Abstand Rohrachse — Detektor

PDD

(en: pipe centre-to-detector distance)

Abstand zwischen Rohrachse und Detektor

3.18

Pixelgröße

geometrischer Abstand der Mittelpunkte benachbarter Pixel in einer Zeile (horizontaler Pitch) oder Spalte (vertikaler Pitch) des gescannten Bilds

[QUELLE: EN 14096-2:2003, 3.2]

3.19

Signal-Rausch-Verhältnis

SNR

(en: signal-to-noise ratio)

Verhältnis vom Mittelwert der linearisierten Grauwerte zur Standardabweichung der linearisierten Grauwerte (Rauschen) in einem bestimmten interessierenden Objektbereich auf einem digitalen Bild

3.20

Größe der Strahlenquelle

d

Größe des Radioisotops

[QUELLE: EN 12679:1999, 2.1]

3.21

Abstand Strahlenquelle — Detektor

SDD

(en: source-to-detector distance)

Abstand zwischen Strahlenquelle (Fokus) und Detektor, gemessen in Strahlungsrichtung

3.22

Abstand Strahlenquelle — Prüfgegenstand

f

Abstand zwischen Strahlenquelle und der Seite des Prüfgegenstands, die der Strahlenquelle zugewandt ist, gemessen in Richtung des Zentralstrahls

3.23

Abstand Strahlenquelle — Rohrachse

SPD

(en: source-to-pipe centre distance)

Abstand zwischen Strahlenquelle und Rohrmitte (Rohrachse), gemessen in Strahlungsrichtung

3.24

Phosphor-Speicherfolie

IP

(en: image plate)

photo-stimulierbares lumineszierendes Material, das in der Lage ist, ein latentes Durchstrahlungsbild des untersuchten Werkstoffs zu speichern, und das nach Stimulierung durch eine Quelle aus rotem Licht mit angemessener Wellenlänge proportional zur absorbierten Strahlung Lumineszenz erzeugt

4 Klassifizierung der Durchstrahlungstechniken

Die tangentialen Durchstrahlungstechniken werden in zwei Klassen eingeteilt:

- Grundtechnik, TA;
- verbesserte Prüftechnik, TB.

Die Grundtechniken TA sind für die tangentielle Durchstrahlung zum Nachweis des allgemeinen Waddickenverlusts vorgesehen, z. B. infolge von Erosion oder großflächiger Korrosion.

Die verbesserten Prüftechniken TB, die zum Nachweis und zur Größenbestimmung der Fehler im Werkstoff eine höhere Empfindlichkeit erfordern, sollten für die anspruchsvollere tangentielle Durchstrahlung zum Auffinden örtlicher Korrosionsmulden angewendet werden.

Bessere Prüftechniken als Klasse TB sind möglich und dürfen zwischen den Vertragspartnern durch Festlegung aller geeigneten Prüfparameter vereinbart werden.

Die Wahl der Durchstrahlungstechnik muss zwischen den betroffenen Vertragspartnern vereinbart werden.

5 Allgemeines

5.1 Schutz gegen ionisierende Strahlung

WARNUNG — Werden Teile des menschlichen Körpers Röntgen- oder Gammastrahlen ausgesetzt, kann eine schwerwiegende Gefährdung der Gesundheit auftreten. Bei der Anwendung von Röntgenstrahlern oder radioaktiven Strahlern müssen die zutreffenden gesetzlichen Anforderungen beachtet werden. Bei Anwendung ionisierender Strahlung müssen örtliche, nationale oder internationale Sicherheitsvorschriften strikt befolgt werden.

5.2 Qualifizierung des Personals

Die Prüfung muss von fähigem, geeignet geschultem und qualifiziertem Personal durchgeführt und gegebenenfalls von fachkundigem Personal überwacht werden, das benannt wird entweder vom Auftraggeber oder von der die Prüfung durchführenden Institution, falls der Auftraggeber seine Verantwortung an diese Prüfinstitution delegiert hat. Zum Nachweis der geeigneten Qualifikation wird eine

Zertifizierung des Personals nach EN ISO 9712 oder nach einem gleichwertigen formalisierten System empfohlen. Die Autorisierung für qualifizierte Personen muss vom Auftraggeber nach einem schriftlich festgelegten Verfahren erteilt werden. Sofern nicht anders vereinbart, ist für die im Rahmen der ZfP anfallenden Arbeitsgänge die Zustimmung einer vom Auftraggeber anerkannten fachkundigen und qualifizierten ZfP-Aufsichtsperson (Stufe 3 oder ein dieser Stufe entsprechendes Niveau) erforderlich.

Das Personal muss eine zusätzliche Schulung und Qualifizierung für die digitale industrielle Radiologie nachweisen, wenn digitale Detektoren angewendet werden.

5.3 Identifizierung von Durchstrahlungsbildern

Auf jedem Bereich des zu durchstrahlenden Prüfgegenstands müssen Identifizierungszeichen angebracht werden. Nach Möglichkeit müssen die Abbildungen dieser Zeichen auf dem Durchstrahlungsbild außerhalb des interessierenden Bereiches erscheinen und eine eindeutige Identifizierung des Bereichs sicherstellen.

5.4 Kennzeichnung

Zur genauen Lokalisierung der Lage jeder Durchstrahlungsaufnahme sollte auf dem zu untersuchenden Prüfgegenstand eine dauerhafte Kennzeichnung angebracht werden.

Wenn die Art des Werkstoffs und/oder seine Einsatzbedingungen eine dauerhafte Kennzeichnung nicht zulassen, darf die Lage mithilfe genauer Skizzen aufgezeichnet werden.

5.5 Überlappung von Filmen oder digitalen Durchstrahlungsbildern

Werden für die Durchstrahlung eines Bereichs zwei oder mehr Filme oder mehrere separate Detektoren verwendet, muss durch eine ausreichende Überlappung der Filme oder Detektoren sichergestellt werden, dass der gesamte interessierende Bereich durchstrahlt wird. Zum Nachweis dieser Anforderung muss ein hochdichter Marker auf der Oberfläche des Prüfgegenstands so angebracht werden, dass dieser Marker auf jedem Film oder Detektor sichtbar ist. Wenn die Durchstrahlungsbilder nacheinander aufgenommen werden, muss der hochdichte Marker auf jedem der Durchstrahlungsbilder sichtbar sein.

5.6 Typ und Lage der Bildgüteprüfkörper (BPK)

5.6.1 Einfach-Draht- oder Stufe/Loch-BPK

Für die tangentielle Durchstrahlung sind Einfach-Draht-BPK oder Stufe/Loch-BPK nicht anwendbar.

5.6.2 Doppel-Draht-BPK (digitale Durchstrahlungsbilder)

Es sollten BPK nach EN ISO 19232-5 für die Messung der Basis-Ortsauflösung eines CR-/DDA-Systems auf einem Referenz-Durchstrahlungsbild verwendet werden (siehe 7.1.3 und Anhang A). Der Doppel-Draht-BPK ist benachbart zur Speicherfolie oder zu den Matrixdetektoren aufzulegen und mit einer Neigung von einigen Grad (2° bis 5°) gegenüber den digitalen Zeilen oder Spalten des digitalen Bildes anzuordnen.

6 Empfohlene Vorgehensweisen für die Aufnahme von Durchstrahlungsbildern

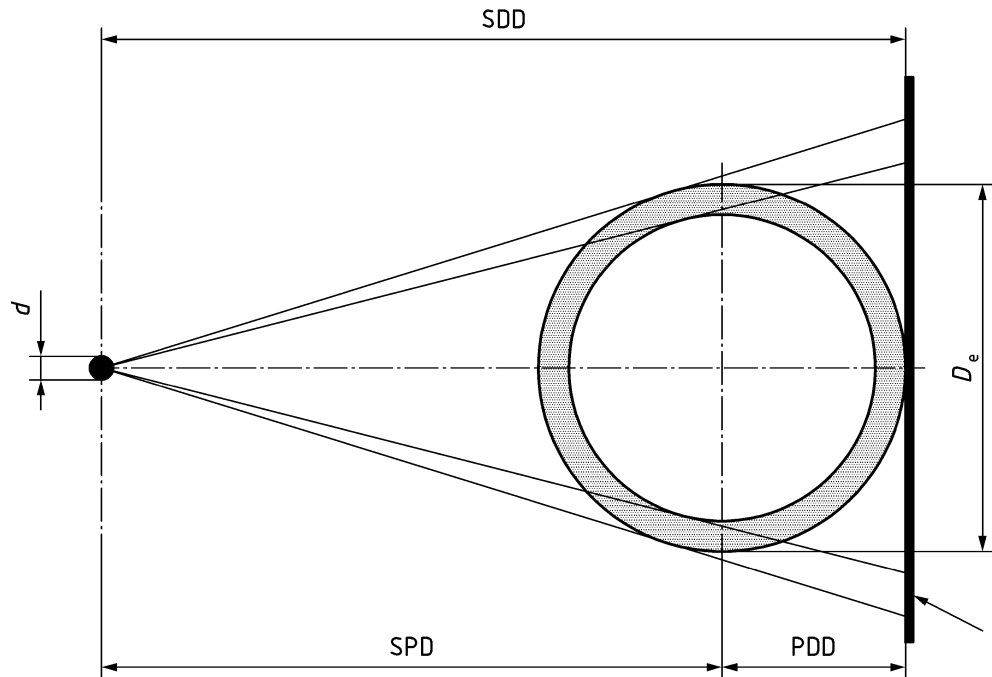
6.1 Prüfanordnungen

6.1.1 Allgemeines

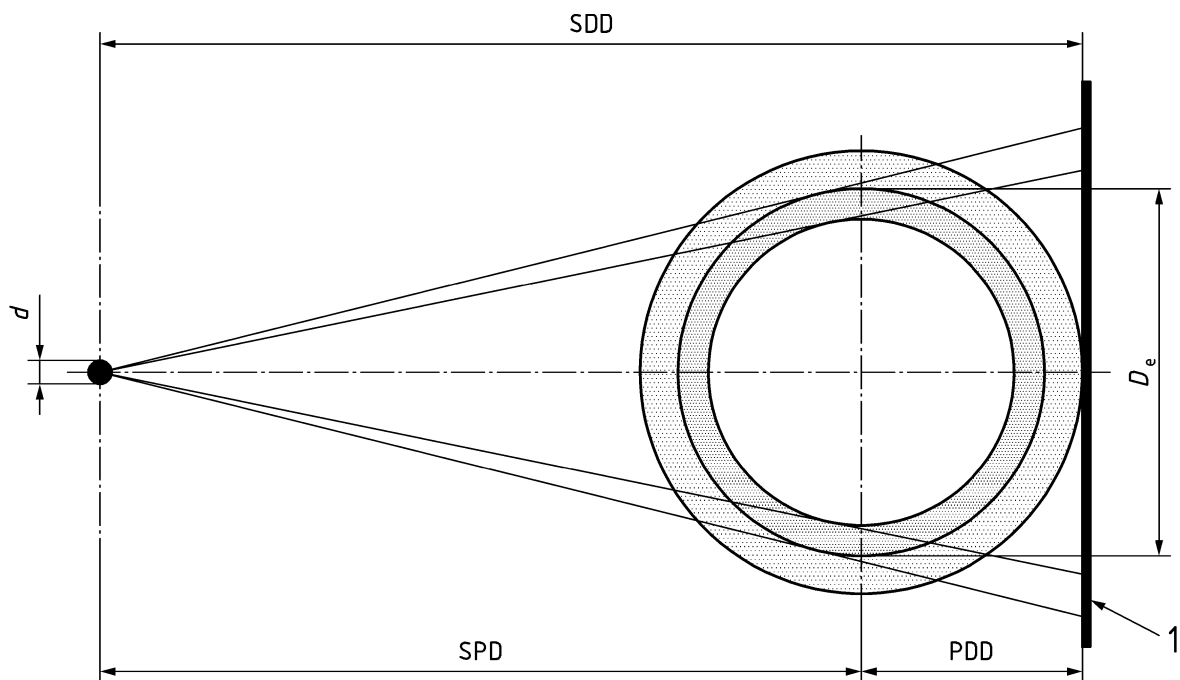
Üblicherweise sind Durchstrahlungstechniken nach 6.1.2 und 6.1.3 anzuwenden. Bei beiden Techniken muss der Film oder der digitale Detektor so dicht wie möglich am Rohr angeordnet werden.

6.1.2 Anordnung der Strahlenquelle in Höhe der Rohrachse

Für diese Anordnung wird die Strahlenquelle vor dem Rohr angebracht, während sich der Film/Detektor auf der gegenüberliegenden Seite des Rohrs befindet, wie in Bild 1 dargestellt. Das Rohr kann ohne Wärmedämmung (Bild 1a)) oder mit Wärmedämmung (Bild 1b)) ausgeführt sein.



a) Rohr ohne Wärmedämmung



b) Rohr mit Wärmedämmung

Legende

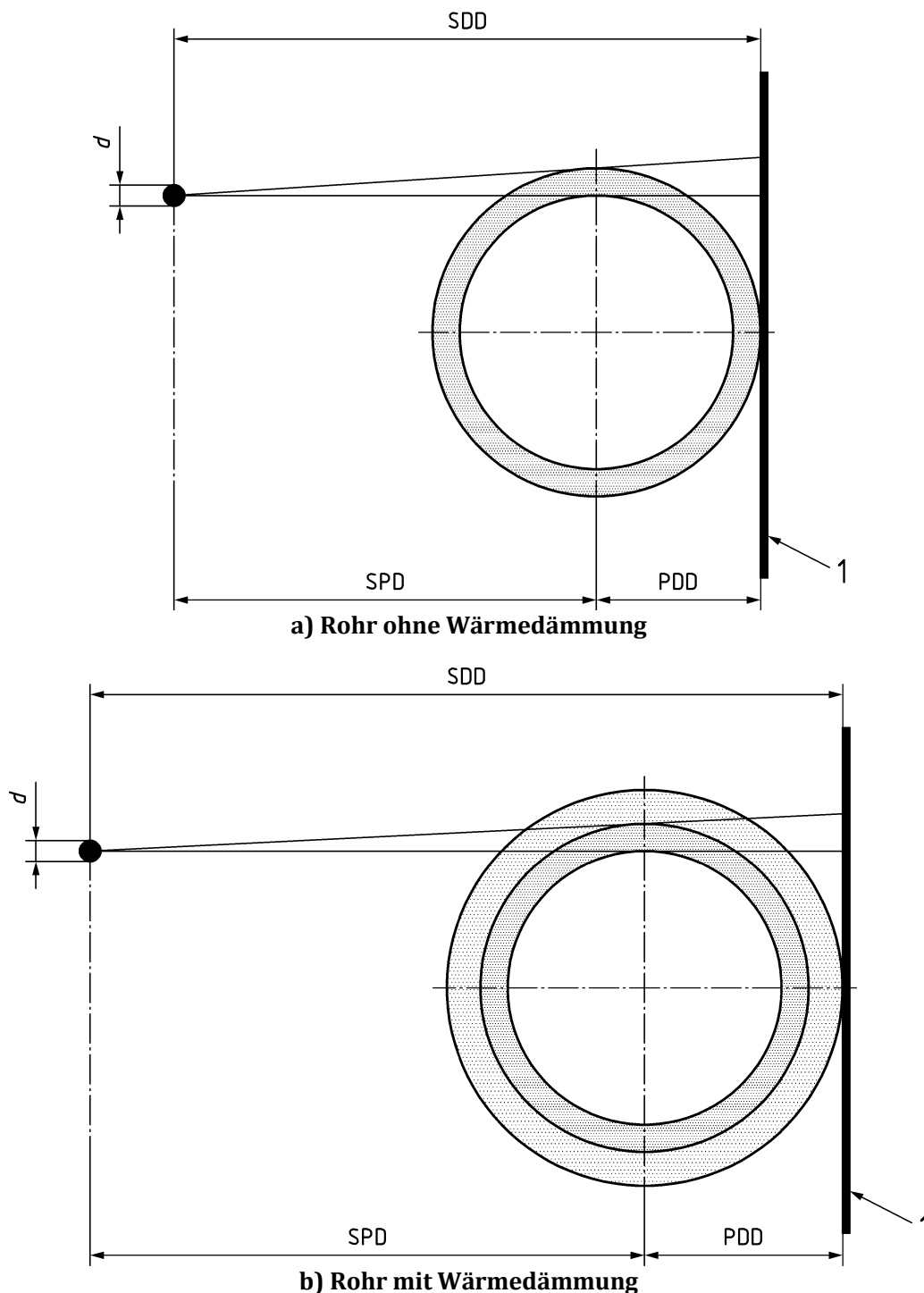
1 Detektor D

Bild 1 — Prüfanordnung und Abstände für die tangentielle Durchstrahlung mit der Strahlenquelle in Höhe der Rohrachse

Es ist zu beachten, dass die Wanddickenverringering entweder am Innendurchmesser des Rohrs, am Außendurchmesser des Rohrs oder an beiden Seiten des Rohrs auftreten kann.

6.1.3 Anordnung der Strahlenquelle versetzt zur Rohrachse

Für diese Anordnung wird die Strahlenquelle vor dem Rohr angeordnet, während sich der Film/Detektor auf der gegenüberliegenden Seite des Rohrs befindet, siehe Bild 2a) (für Rohre ohne Wärmedämmung) und Bild 2b) (für Rohre mit Wärmedämmung).



Legende

1 Detektor D

Bild 2 — Prüfanordnung und Abstände für die tangentielle Durchstrahlung mit der Strahlenquelle versetzt zur Rohrachse

Bei dieser Prüfanordnung ist die Strahlenquelle gegenüber der Rohrachse versetzt; sie wird auf die Mitte der Rohrwand ausgerichtet, wie in Bild 2 dargestellt. Es ist zu beachten, dass die Waddickenverringernng entweder am Innendurchmesser des Rohrs, am Außendurchmesser des Rohrs oder an beiden Seiten des Rohrs auftreten kann.

6.1.4 Ausrichtung von Strahl und Film/Detektor

Der Strahl muss auf die Mitte des Prüfbereichs gerichtet sein.

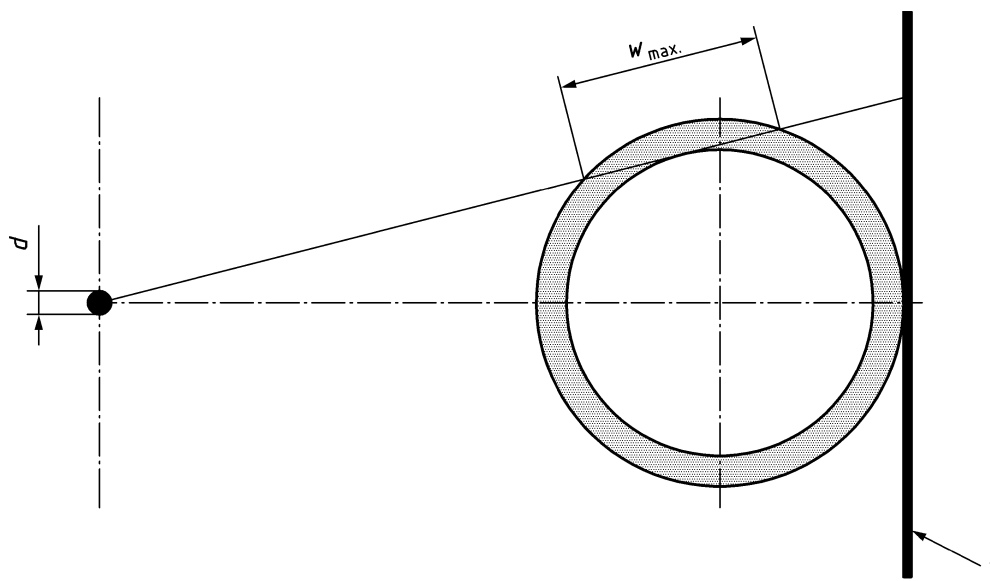
Der Film oder der Detektor sollte orthogonal zum Zentralstrahl ausgerichtet sein.

Änderungen gegenüber diesen Ausrichtungen und gegenüber den in 6.1.2 und 6.1.3 angegebenen Prüfanordnungen sind in besonderen Fällen möglicherweise erforderlich, z. B. wenn Hindernisse vorhanden sind.

Weitere Möglichkeiten der Durchstrahlung dürfen zwischen den Vertragspartnern vereinbart werden.

6.2 Wahl der Strahlenquelle

Für die tangentielle Durchstrahlung sollte die Wahl der Strahlenquelle bestimmt werden durch die größte durchstrahlte Dicke des Rohrs, $w_{\max}$, in dem Strahlengang, den eine Tangente an den Rohrrinnendurchmesser durchläuft; siehe Bild 3.



Legende

1 Detektor D

Bild 3 — Größte durchstrahlte Dicke des Rohrs $w_{\max}$ bei tangentialer Durchstrahlung

Die größte durchstrahlte Dicke $w_{\max}$ ist gegeben durch:

$$w_{\max} = 2\sqrt{t(D_e - t)} \quad (1)$$

Dabei ist

t die Nennwanddicke des Rohrs;

D_e der Rohraußendurchmesser.

In Tabelle 1 sind die empfohlenen Grenzwerte für die größte durchstrahlte Dicke für unterschiedliche Strahlenquellen angegeben.

Einige Arten der Wärmedämmung (z. B. hochabsorbierende) können zu einer Verringerung der Grenzwerte der größten durchstrahlten Dicke, $w_{\max}$, die in Tabelle 1 angegeben sind, führen.

Zwischen den Vertragspartnern darf eine Veränderung dieser Werte vereinbart werden, sofern die Lage des Innendurchmessers auf dem erhaltenen Durchstrahlungsbild/dem digitalen Bild nach den in 7.6 oder 7.7 beschriebenen Verfahren ausreichend genau gemessen werden kann.

Tabelle 1 — Bereich der größten durchstrahlten Dicke für unterschiedliche Strahlenquellen für die Prüfung von Stahl

Strahlenquelle	Grenzwerte für die größte durchstrahlte Dicke	
	$w_{\max}$	
	mm	
	Grundtechnik (bei gleichmäßiger Wanddickenverringerung)	verbesserte Prüftechnik (bei Korrosionsmulden)
Röntgenstrahl (100 kV)	≤ 10	≤ 7
Röntgenstrahl (200 kV)	≤ 30	≤ 20
Röntgenstrahl (300 kV)	≤ 40	≤ 30
Röntgenstrahl (400 kV)	≤ 50	≤ 35
Se 75	≤ 55	≤ 40
Ir 192	≤ 80	≤ 60
Co 60	≤ 120	≤ 85

Für digitale Durchstrahlungsbilder dürfen als Grenzwerte für die größte durchstrahlte Dicke etwas höhere als die in Tabelle 1 angegebenen Werte verwendet werden.

Um die geeignete(n) Strahlenquelle(n) für ein bestimmtes Rohr zu bestimmen, sollte die größte durchstrahlte Dicke $w_{\max}$ nach Gleichung (1) bestimmt und mit den in Tabelle 1 angegebenen Werten verglichen werden. Eine grafische Darstellung dieses Verfahrens ist in Anhang B angegeben.

Um Bewegungsunschärfe zu vermeiden, darf, wenn Durchstrahlungsaufnahmen mit Gammastrahlen erzeugt werden, die Gesamtzeit, in der sich der Strahl von der Quelle bis zur Belichtungsposition bewegt und rückgesetzt wird, 10 % der Gesamtbelichtungszeit nicht überschreiten.

6.3 Filmsysteme und Metallfolien

Für die Durchstrahlungsprüfung sind Filmsystemklassen nach EN ISO 11699-1 zu verwenden.

Die radiographischen Filmsystemklassen und Metallfolien für die Anwendung der Filmtechnik werden für unterschiedliche Strahlenquellen in den Tabellen 2 und 3 angegeben. Siehe auch EN ISO 17636-1:2013, Tabelle 2 und Tabelle 3.

Wenn Metallfolien verwendet werden, ist ein guter Kontakt zwischen Filmen und Folien erforderlich. Diese Anforderung darf durch Anwendung vakuumverpackter Filme oder durch Anwendung eines bestimmten Anpressdrucks erfüllt werden.

Tabelle 2 — Filmsystemklassen und Metallfolien für die tangentielle Durchstrahlung von Rohren aus Stahl, Kupfer und Nickel-Basis-Legierungen

Strahlenquelle	Filmsystemklasse ^a		Art und Dicke der Metallfolien
	Klasse TA	Klasse TB	
Spannung des Röntgenstrahlers ≤ 250 kV	C 5	C 4	0,02-mm- bis 0,15-mm-Vorder- und Hinterfolien aus Blei
Spannung des Röntgenstrahlers > 250 kV bis 500 kV	C 5	C 4	0,1-mm- bis 0,2-mm-Vorderfolien aus Blei ^b 0,02-mm- bis 0,2-mm-Hinterfolien aus Blei
Spannung des Röntgenstrahlers > 500 kV bis 1 000 kV	C 5	C 4	0,25-mm- bis 0,7-mm-Vorder- und Hinterfolien aus Stahl oder Kupfer ^c
Se 75 Ir 192	C 6	C 5	0,02-mm- bis 0,2-mm-Vorder- und Hinterfolien aus Blei ^b
Co 60	C 6	C 5	0,25-mm- bis 0,7-mm-Vorder- und Hinterfolien aus Stahl oder Kupfer ^c
Röntgenstrahl mit Energien von 1 MeV bis 4 MeV	C 6	C 5	0,25-mm- bis 0,7-mm-Vorder- und Hinterfolien aus Stahl oder Kupfer ^c
Röntgenstrahl mit Energien über 4 MeV	C 6	C 5	bis 1-mm-Vorderfolien aus Kupfer, Stahl oder Tantal ^d Hinterfolien aus Kupfer oder Stahl bis 1 mm und aus Tantal bis 0,5 mm ^d
^a Bessere Filmsystemklassen dürfen auch verwendet werden. ^b Herstellerverpackte Filme mit Vorderfolien bis 0,03 mm dürfen verwendet werden, wenn zusätzlich zwischen Prüfgegenstand und Film eine 0,1-mm-Bleifolie angebracht wird. ^c In Klasse TA dürfen auch 0,5-mm- bis 2,0-mm-Bleifolien verwendet werden. ^d In Klasse TA dürfen auf Vereinbarung zwischen den Vertragspartnern 0,5-mm- bis 1-mm-Bleifolien verwendet werden.			

Tabelle 3 — Filmsystemklassen und Metallfolien für die tangentielle Durchstrahlung von Rohren aus Aluminium und Titan

Strahlenquelle	Filmsystemklasse ^a		Art und Dicke der Verstärkungsfolien
	Klasse TA	Klasse TB	
Spannung des Röntgenstrahlers ≤ 150 kV	C 6	C 5	keine oder bis 0,03-mm-Blei-Vorderfolien und bis 0,15-mm-Blei-Hinterfolien
Spannung des Röntgenstrahlers > 150 kV bis 500 kV			0,02-mm- bis 0,2-mm-Vorder- und Hinterfolien aus Blei ^b
Se 75 Ir 192			0,02-mm- bis 0,2-mm-Vorder- und Hinterfolien aus Blei ^b
^a Bessere Filmsystemklassen dürfen auch verwendet werden.			
^b Anstelle einer Bleifolie mit einer Dicke von 0,2 mm dürfen zwei Bleifolien mit einer Dicke von je 0,1 mm verwendet werden.			

Auf Vereinbarung der beteiligten Parteien dürfen andere Filmsysteme verwendet werden, sofern die in 7.2 festgelegten erforderlichen optischen Dichten erreicht werden.

6.4 Folien und Abschirmung für Speicherfolien (nur für die Computer-Radiographie)

Für die Anwendung von Vorderfolien aus Metall ist ein guter Kontakt zwischen der empfindlichen Detektorschicht und den Folien erforderlich. Er darf entweder durch vakuumverpackte Speicherfolien (IPs) oder durch den angewendeten Anpressdruck erreicht werden. Bleifolien, die keinen engen Kontakt mit den IPs haben, können zur Bildunschärfe beitragen. Die durch die Anwendung von Bleifolien in Kontakt mit den Speicherfolien erhaltene Verstärkung ist merklich geringer als bei Anwendung von Filmen.

Viele IPs sind gegenüber energiearmer Rückstreu- und Fluoreszenzröntgenstrahlung von Blei sehr empfindlich. Dieser Effekt trägt wesentlich zur Randunschärfe und zu einer Verringerung des SNR bei und sollte daher auf ein Mindestmaß verringert werden. Empfohlen wird die Anwendung von Stahl- oder Kupferfolien direkt hinter den IPs. Auch Folien aus Stahl oder Kupfer zwischen einer rückstreuenden Bleifolie und der IP können die Bildgüte verbessern. Moderne Ausführungsformen von Kassetten und Detektoren können diese Wirkung berücksichtigen und können so gefertigt sein, dass keine zusätzlichen Abschirmungsfolien aus Stahl oder Kupfer außerhalb der Kassette erforderlich sind.

ANMERKUNG Wegen der Schutzschicht zwischen der Bleifolie und der empfindlichen Schicht der IPs wird der Verstärkungseffekt durch Elektronen bedeutend verringert und tritt erst bei höheren Energien auf. Je nach Strahlungsenergie und Schutzschichtausführung beträgt der Verstärkungseffekt nur zwischen 20 % und 100 % (im Vergleich zum Zustand ohne Folie).

Der durch Bleifolien in Kontakt mit IPs erzeugte geringe Verstärkungseffekt kann, wenn keine Bleifolien verwendet werden, durch eine verlängerte Belichtungszeit bzw. Milliampere Minuten kompensiert werden. Da durch den Kontakt der Bleifolien auf den IPs Kratzer entstehen können, wenn sie beim Scannen nicht sorgfältig voneinander getrennt werden, sollten Bleifolien außerhalb der Kassetten für die Zwischenfilterung von Streustrahlung verwendet werden.

In Tabelle 4 und Tabelle 5 werden die empfohlenen Folienwerkstoffe und ihre Dicken für unterschiedliche Strahlenquellen angegeben. Andere Foliendicken dürfen ebenfalls zwischen den Vertragspartnern vereinbart werden. Die Verwendung von Metallfolien wird an der Vorderseite von IPs empfohlen, und sie können außerdem auch den Einfluss der Streustrahlung vermindern, wenn sie in Verbindung mit DDAs verwendet werden.

Tabelle 4 — Metallvorderfolien für die CR bei der tangentialen Durchstrahlung von Stahl, Kupfer und Nickel-Basis-Legierungen

Strahlenquelle	Art und Dicke von Metallvorderfolien mm
Spannung des Röntgenstrahlers ^b ≤ 250 kV	0 bis 0,1 (Blei)
Spannung des Röntgenstrahlers ^b > 250 kV bis 1 000 kV	0 bis 0,3 (Blei)
Ir 192, Se 75 ^b	Klasse TA: 0 bis 0,3 (Blei) Klasse TB: 0,3 bis 0,8 (Stahl oder Kupfer)
Co 60 ^a	0,3 bis 0,8 (Stahl oder Kupfer) + 0,6 bis 2,0 (Blei)
Spannung des Röntgenstrahlers ^a > 1 MV	0,3 bis 0,8 (Stahl oder Kupfer) + 0,6 bis 2,0 (Blei)
^a Bei Mehrfachfolien (Stahl und Blei) muss die Stahlfolie zwischen der IP und der Bleifolie angeordnet werden. Anstelle von Folien aus Stahl oder aus Stahl und Blei dürfen Folien aus Kupfer, Tantal oder Wolfram verwendet werden, sofern die Bildgüte nachgewiesen werden kann. ^b Bleifolien dürfen vollständig oder teilweise durch Eisen- oder Kupferfolien ersetzt werden. Die äquivalente Dicke der Eisen- bzw. Kupferfolie beträgt das Dreifache der Dicke der Bleifolie.	

Tabelle 5 — Metallvorderfolien für die CR bei der digitalen tangentialen Durchstrahlung von Aluminium und Titan

Strahlenquelle	Art und Dicke von Metallvorderfolien mm
Spannung des Röntgenstrahlers < 500 kV	≤ 0,2 (Blei) ^{a, b}
Se 75 Ir 192	≤ 0,3 (Blei) ^{a, b}
^a Anstelle von z. B. 0,2 mm dickem Blei darf außerhalb der Kassette eine 0,1-mm-Folie mit einem zusätzlichen Filter von 0,1 mm Dicke verwendet werden.	
^b Bleifolien dürfen vollständig oder teilweise durch Eisen- oder Kupferfolien ersetzt werden. Die äquivalente Dicke der Eisen- bzw. Kupferfolie beträgt das Dreifache der Dicke der Bleifolie.	

6.5 Verminderung der Streustrahlung

6.5.1 Filter und Blenden

Um die Wirkung von Streustrahlung zu verringern, muss die direkte Strahlung soweit wie möglich auf den Prüfabschnitt begrenzt werden.

Für die Computer-Radiographie und die Radiographie mit DDAs kann bei Ir 192, Co 60 und anderen MeV-Strahlenquellen oder bei Randüberstrahlung ein zusätzlicher Bleischirm als Filter für energiearme Streustrahlung zwischen dem Rohr und der DDA oder der CR Kassette verwendet werden. Die Dicke dieses Schirms beträgt in Abhängigkeit von der durchstrahlten Dicke 0,5 mm bis 2,0 mm.

Außer Blei können andere Werkstoffe, wie z. B. Zinn, Kupfer, Wolfram oder Stahl, als Filter verwendet werden. Für Bleifilter wird empfohlen, zwischen Bleifilter und Detektor ein zusätzliches Filter aus Stahl oder Kupfer mit einer Dicke von 0,3 mm bis 1,0 mm anzuwenden. Das Filter sollte so dicht wie möglich an der Speicherfolie angeordnet werden.

6.5.2 Vermeidung von Rückstreuung

Das Auftreten von Rückstreuung muss für jede neue Prüfanordnung mit einem unmittelbar hinter jedem Film, jeder CR-Kassette angeordneten Bleibuchstaben „B“ (mit einer Höhe von mindestens 10 mm und einer Dicke von mindestens 1,5 mm) überprüft werden. Wenn dieses Zeichen auf der Durchstrahlungsaufnahme heller abgebildet wird (negative Darstellung), muss die Aufnahme verworfen werden. Die Durchstrahlungsaufnahme ist annehmbar und weist einen guten Schutz gegen Streustrahlung auf, wenn das Zeichen dunkler oder unsichtbar ist.

Bei der digitalen Radiographie muss der Detektor bei Bedarf gegen Rückstreuung abgeschirmt werden, indem Blei mit einer Dicke von mindestens 1 mm oder Zinn mit einer Dicke von mindestens 1,5 mm hinter dem Detektor angewendet wird. Bei einigen Anordnungen ist möglicherweise eine bis zu 6 mm dicke Bleischicht erforderlich. Eine zusätzliche Abschirmung aus Stahl oder Kupfer (etwa 0,5 mm dick) muss zwischen der Bleiabschirmung und dem Detektor angewendet werden, um den Einfluss der Blei-Fluoreszenzröntgenstrahlung zu verringern. In Kontakt mit der Rückseite des Detektors oberhalb von 80 keV dürfen keine Bleifolien verwendet werden.

6.6 Abstand Strahlenquelle — Detektor

Für die tangential Durchstrahlung werden der Abstand Strahlenquelle — Detektor (SDD) und der Abstand Rohrachse — Detektor (PDD) in Bild 1 und Bild 2 dargestellt.

Der Mindestabstand Strahlenquelle — Detektor (SDD) hängt von der Größe d der Strahlenquelle, vom Rohraußendurchmesser D_e und vom Abstand Rohrachse — Detektor (PDD) ab.

Bei der tangentialen Durchstrahlung, bei der die Strahlenquelle in Höhe der Rohrachse angeordnet ist [siehe Bild 1a) und Bild 1b)], müssen die Abstände Strahlenquelle — Rohrachse (SDD), wenn durchführbar, in Übereinstimmung mit folgenden Angaben sein.

Für die grundlegende Technik TA sollte der Abstand Strahlenquelle — Detektor (SDD) der größere der beiden folgenden Werte sein (in mm):

$$SDD \geq PDD + 3,5 \cdot D_e \quad (2)$$

$$SDD \geq \frac{d \cdot PDD}{0,6 \text{ mm}} \quad (3)$$

Für die verbesserte Technik TB sollte der Abstand Strahlenquelle — Detektor (SDD) der größere der durch Gleichung (2) und Gleichung (4) gegebenen Werte sein:

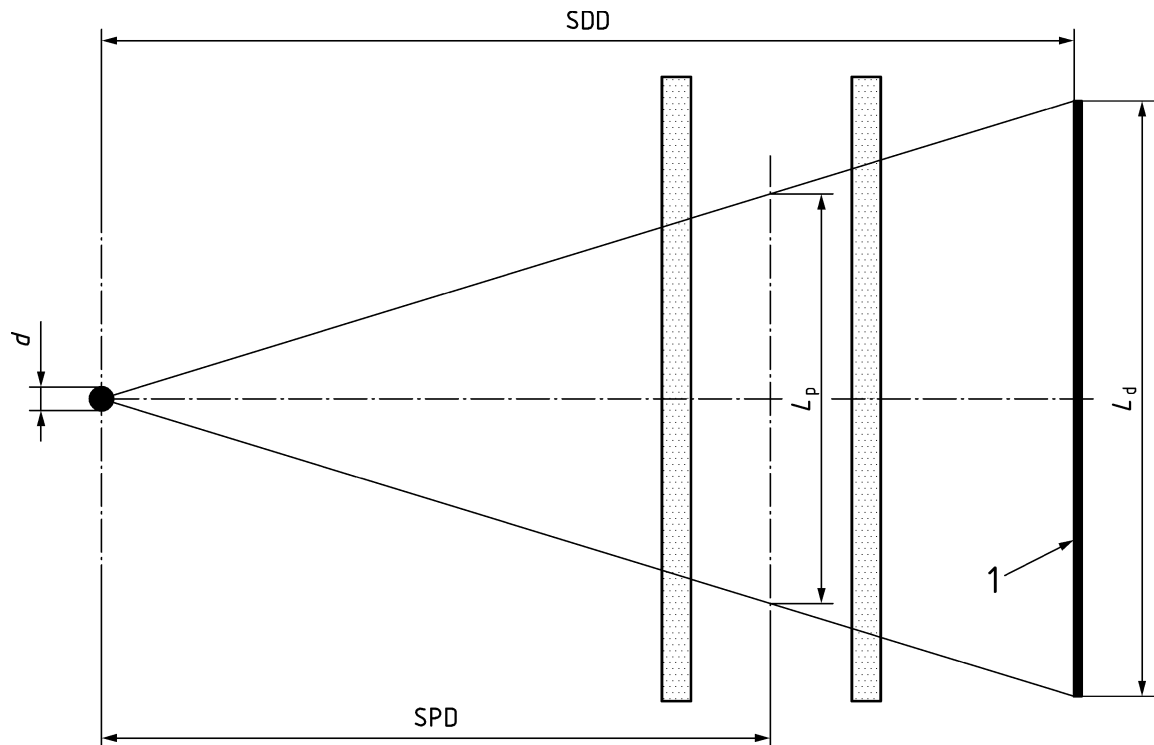
$$SDD \geq \frac{d \cdot PDD}{0,3 \text{ mm}} \quad (4)$$

Bei der tangentialen Durchstrahlung, bei der die Strahlenquelle außerhalb der Rohrachse liegt, siehe Bild 2a) und Bild 2b), kann zur Bestimmung des Mindest-SDD die Gleichung (2) ignoriert werden. Damit ist der SDD für die grundlegende Technik TA nach Gleichung (3) zu ermitteln, während Gleichung (4) den SDD für die verbesserte Technik TB liefert.

ANMERKUNG Die Gleichungen (3) und (4) ergeben geometrische Unschärfewerte von 0,6 mm bzw. 0,3 mm, wenn eine Projektion auf die Rohrmittenebene erfolgt, die dicht an den Stellen liegt, an denen bei der tangentialen Technik die Messungen durchgeführt werden. Wegen der Auswirkungen der auf die Projektion zurückzuführenden Vergrößerung sind die am Detektor gemessenen Unschärfewerte größer als diese Werte.

Wenn die tangential Durchstrahlung mit der Doppelwand-Doppelbild-Technik kombiniert wird, sollte der Abstand Strahlenquelle — Detektormitte auch unter Berücksichtigung der Kriterien bestimmt werden, die für die in ISO 20769-2 beschriebene Doppelwand-Doppelbild-Technik zutreffen. Wenn durchführbar, muss der größere der beiden Werte verwendet werden.

Der größte axiale Erfassungsbereich des Rohres für ein einzelnes Bild oder einen einzelnen Film beruht auf einer Zunahme der durchstrahlten Dicke am Rand des Prüfbereichs von 20 %, wie in Bild 4 dargestellt.



1 Detektor D

Die gesamte axiale Ausdehnung des Prüfbereichs auf dem Detektor L_d sollte nicht größer sein als

$$L_d \leq 1,32 \text{ SDD} \quad (5)$$

Die gesamte axiale Ausdehnung des Prüfbereichs auf dem Rohr L_p sollte nicht größer sein als

$$L_p \leq 1,32 \text{ SPD} \quad (6)$$

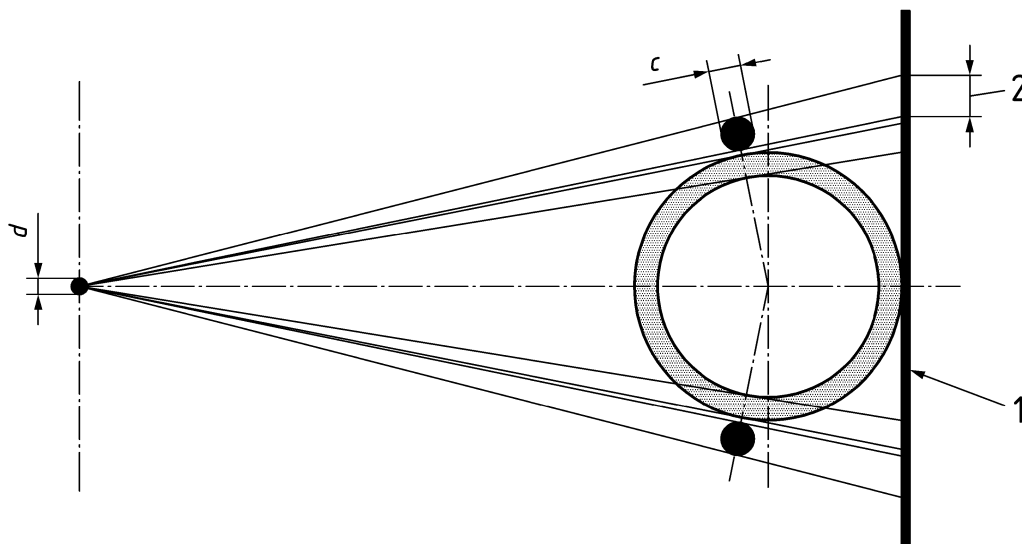
Die einzelnen Filme oder digitalen Bilder müssen durch ausreichende Überlappung sicherstellen, dass alle Bereiche des Bauteils untersucht werden. Sofern nicht anders festgelegt, muss die auf der Seite der Strahlenquelle gemessene axiale Mindestüberlappung zu beiden Seiten des Prüfbereichs 25 mm betragen.

6.8 Maßkomparatoren

Für die Messung der verbleibenden Wanddicke müssen die Film-Durchstrahlungsbilder oder die digitalen Durchstrahlungsaufnahmen maßlich kalibriert werden, um die durch die geometrische Anordnung von Strahlenquelle, Rohr und Detektor verursachte geometrische Vergrößerung (oder das „Blow-up“) zu korrigieren.

Bei einem Verfahren für die maßliche Kalibrierung wird eine Kugellagerkugel oder ein anderer Körper zum Vergleich der Maße angewendet. Dieser Komparator ist ein effektiv strahlungsundurchlässiger Gegenstand (im Allgemeinen kugelförmig) mit einem bekannten Durchmesser und einer bekannten Grenzabweichung, der dicht am Rohr und in derselben Ebene wie die Tangente an die Rohrwand angeordnet wird, wie in Bild 5 dargestellt. Der Durchmesser und die Grenzabweichung des Komparators sind zwischen den Vertragspartnern zu vereinbaren.

Es ist zu beachten, dass für andere Verfahren zur Kalibrierung der Maße (siehe 7.5) keine zusätzlichen Komparatoren benötigt werden.



Legende

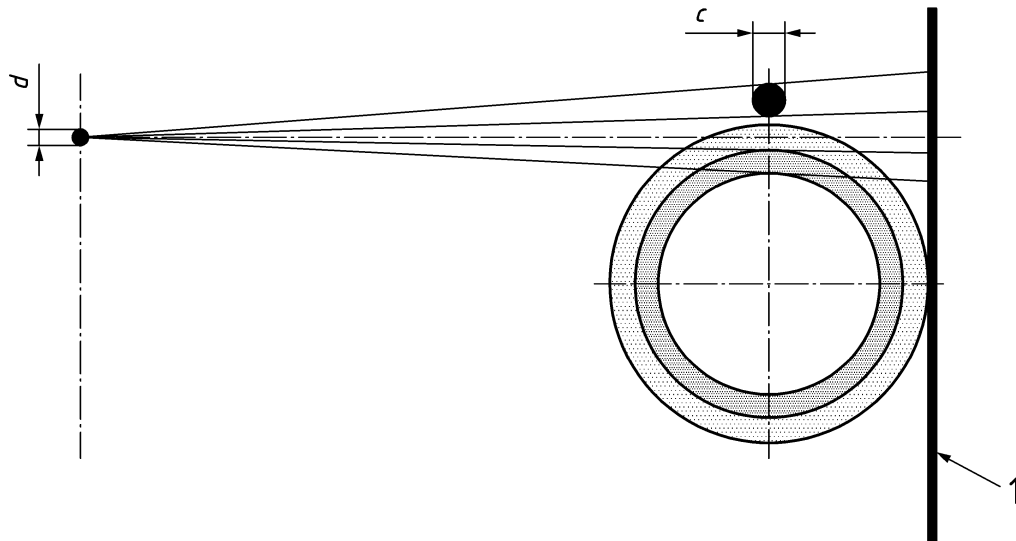
- 1 Detektor
- 2 projiziertes Maß c' des Komparators C

**Bild 5 — Tangentiale Durchstrahlung mit Darstellung von Komparatoren zur Kalibrierung der Maße
(ein zweiter Komparator ist freigestellt)**

Der/die Komparator(en) muss/müssen so dicht wie möglich an der Rohrwand und innerhalb der Tangente an die Rohrwand angeordnet werden, allerdings ohne Überlappung mit der Rohrwand.

Durch Ausmessen der abgebildeten Größe des Komparators ist dann eine Kalibrierung für die Messung der Rohrwanddicke möglich (siehe 7.5).

Wenn der Komparator jedoch nicht benachbart zur Tangente an das Rohr angeordnet werden kann, weil z. B. die Rohraußenwand wärmegeklämt ist, wird eine Ausrichtung der Strahlenquelle fluchtend zur Rohrwand empfohlen, die in Bild 6 gezeigt wird, d. h. eine gegenüber der Rohrachse versetzte Anordnung der Strahlenquelle.



Legende

1 Detektor

Bild 6 — Tangentiale Durchstrahlung mit Darstellung einer versetzten Anordnung der Strahlenquelle und mit einem Komparator zur Kalibrierung der Maße für wärmeisolierte Rohre, wobei der Komparator so dicht wie möglich an der Außenseite der Dämmung anzuordnen ist

Üblicherweise darf der Maßkomparator nicht mit Blei oder ähnlichem Werkstoff umhüllt werden. Wenn das Rohr jedoch wärmeisoliert ist und der freie Strahl gesättigt ist (siehe 6.9), muss der Komparator in Bleifolie eingewickelt werden, um eine fehlerhafte Kalibrierung durch Abbrand der Ränder des Komparators zu vermeiden.

6.9 Bildsättigung und Anwendung von Bleistreifen zur Abbrandvermeidung

Bei der digitalen Radiographie (CR oder DDA) sollten keine Bleistreifen verwendet werden, die dicht an der Rohrkante oder abschließend mit ihr angeordnet werden, um Einflüsse von Bild-Abbrand am Rohraußendurchmesser zu vermeiden. Der Abbrand sollte stattdessen auf ein Mindestmaß verringert werden, indem sichergestellt wird, dass die Belichtungszeit nach 7.1.1 eingestellt wird.

Zudem sollte der Intensitätsbereich zwischen dem freien Strahl und der Durchstrahlungsaufnahme des Rohrs durch Vorfilter (dicht an der Strahlenquelle) oder durch Zwischenfilter (zwischen Rohr und Speicherfolie, siehe 6.4) verringert werden.

Für gedämmte Rohre kann es zulässig sein, dass der freie Strahl außerhalb der Dämmung gesättigt ist, vorausgesetzt, die in der Umgebung der Rohrwand gemessenen Grauwerte sind nicht größer als 90 % des dynamischen Bereichs des digitalen Systems. In diesem Fall müssen die Maßkomparatoren, wenn verwendet, in Blei oder einen ähnlichen Werkstoff eingewickelt werden, um eine Bildsättigung im Umfeld des Komparators zu vermeiden.

6.10 Auswahl der Ausrüstung für die digitale Radiographie

6.10.1 Allgemeines

Die Basis-Ortsauflösung des Detektors geteilt durch die Vergrößerung ($M = \text{SDD}/\text{SPD}$) darf $200\text{ }\mu\text{m}$ für Klasse TA und $130\text{ }\mu\text{m}$ für Klasse TB nicht überschreiten und darf 5 % der Nennwanddicke t nicht überschreiten. Zwischen den Vertragspartnern können andere Werte vereinbart werden.

Wenn die tangentielle Durchstrahlung (TA oder TB) in Verbindung mit den Doppelwand-Doppelbild-Techniken von ISO 20769-2 verwendet wird (DWA oder DWB), dann muss bei der Ermittlung der Basis-Ortsauflösung des Detektors die vorstehende Vergrößerung M gleich eins verwendet werden.

6.10.2 CR-Systeme

Für die Computer-Radiographie darf die Pixelgröße des Scanners für das maßlich kalibrierte Bild (siehe 6.8) $100\text{ }\mu\text{m}$ für Klasse TA und Klasse TB nicht überschreiten. Bei bestimmten radiographischen Durchstrahlungen ergeben sich durch die Vergrößerung der Ausbeute oder der Empfindlichkeit des CR-Scanners höhere Grauwerte, was jedoch eine vernachlässigbare Auswirkung auf die Bildgüte hat, wenn das normierte Signal-Rausch-Verhältnis (SNR_N) gemessen wird. Zur Vergrößerung des SNR_N muss nicht die Ausbeute des Scanners, sondern die Bestrahlungsdosis erhöht werden.

Für Scanner mit linearem Ansprechen zwischen Bestrahlungsdosis und Grauwert verringert eine geringe Ausbeute/Empfindlichkeit die Wahrscheinlichkeit der Bildsättigung. Eine Bildsättigung kann bei höheren Scannerausbeuten besonders in Bereichen mit freiem Strahl bei relativ kurzen Bestrahlungen auftreten, die für das Bild keine so ausreichend hohen SNR_N -Werte ergeben, dass die in 7.1 aufgeführten Bildgütekriterien erfüllt werden.

6.10.3 DDA-Systeme

Die Pixelgröße des maßlich kalibrierten Bilds (siehe 6.8) darf $200\text{ }\mu\text{m}$ für Klasse TA und $130\text{ }\mu\text{m}$ für Klasse TB nicht überschreiten. Zwischen den Vertragspartnern können andere Werte vereinbart werden.

7 Empfindlichkeit, Güte und Auswertung von Durchstrahlungsbildern/digitalen Bilder

7.1 Auswertung der Bildgüte

7.1.1 Allgemeines

Für die tangentielle Durchstrahlung sind die üblichen Draht- oder Stufe/Loch-Bildgüteprüfkörper (BPK) nicht direkt anwendbar, weil sie nicht unmittelbar in der tangentialen Rohrposition angeordnet werden können, und die raschen Änderungen der durchstrahlten Dicke schließen eine sinnvolle Bewertung der Erkennbarkeit des BPK in diesem Teil eines Durchstrahlungsbilds aus.

Die Bewertung der Bildgüte unter Anwendung der folgenden Verfahren ist jedoch erforderlich, um vergleichbare Ergebnisse sicherzustellen.

7.1.2 Maximaler Grauwert im freien Strahl (für digitale Durchstrahlungsbilder)

Die Belichtungsdauer und/oder die Systemempfindlichkeit sollte(n) so eingestellt werden, dass der ungestörte Strahl außerhalb der Rohrwand 90 % der Sättigung des bildgebenden Systems nicht überschreitet.

7.1.3 Kleinstes normiertes Signal-Rausch-Verhältnis (für digitale Durchstrahlungsbilder)

Bei nicht optimalen Durchstrahlungsbedingungen werden die digitalen Durchstrahlungsbilder „verrauscht“ (z. B. wegen kurzer Belichtungszeiten). Ein übermäßiges Bildrauschen kann die Durchführung von Messungen mit einer annehmbaren Messunsicherheit beträchtlich behindern.

Um annehmbare Rauschpegel für ein durch ein CR- und DDA-System generiertes digitales Bild sicherzustellen, muss das normierte Signal-Rausch Verhältnis SNR_N unter Anwendung geeigneter Software und von Verfahren gemessen werden, die in EN 14784-1 in einem Bereich von mindestens 55 (vertikalen) $\times$ 20 (horizontalen) Pixeln festgelegt sind. Aus mindestens vier SNR_N -Werten, die an unterschiedlichen Positionen gemessen werden, ist der Mittelwert zu bestimmen.

Zur Ableitung des normierten SNR_N -Werts muss die Basis-Ortsauflösung SR_b des bildgebenden Systems nach dem in EN ISO 19232-5 beschriebenen Verfahren oder nach einem gleichwertigen Verfahren (Anhang A) unter Anwendung eines Doppel-Draht-BPK gemessen werden. Für diese Messung der Basis-Ortsauflösung des Detektors muss der Doppel-Draht benachbart zur Speicherfolie oder dem Matrix-Detektor angeordnet werden.

Falls nicht bei jeder Bestrahlung ein Doppel-Draht-BPK anzubringen ist, kann die Basis-Ortsauflösung zuvor für dasselbe bildgebende System bestimmt werden, sofern exakt dieselben Systemeinstellungen angewendet werden (für ein CR-System umfassen diese Einstellungen die Anwendung desselben CR-Scanners, derselben Speicherfolie, der gleichen Pixelgröße, derselben Strahlenquelle, der gleichen Abtastgeschwindigkeit und der gleichen Laserintensität des Scanners).

Die mittleren SNR_N -Werte, die in einem Bildbereich mit nicht gesättigtem freiem Strahl außerhalb des Rohrs ermittelt werden, müssen mindestens 70 für die Grundtechnik-Klasse und mindestens 100 für die Klasse mit verbesserten Techniken betragen.

Falls für die Messung der SNR_N -Werte die Rohrmittellinie verfügbar ist (z. B. bei der Kombination auf tangentialer Projektion/Doppelwand-Doppelbild-Durchstrahlung), können Mindest- SNR_N -Werte von 50 bzw. 80 für die herkömmliche bzw. für die bessere Qualität als Alternative zu den vorstehend genannten SNR_N -Werten für den freien Strahl angewendet werden.

Zu beachten ist, dass bei jeder SNR_N -Messung das Bild immer in einer Form vorliegen muss, in der die Grauwerte des Bilds direkt proportional zur Strahlungsintensität sind, anderenfalls sind die Werte ungenau.

7.2 Optische Dichte der Filmaufnahmen

Für die tangentiale Film-Durchstrahlungstechnik muss so weit wie möglich sichergestellt werden, dass Durchstrahlungsbedingungen vorliegen sollten, mit denen für die in Tabelle 2 angegebenen Filmsystemklassen die folgenden Mindestwerte für die optische Dichte erreicht werden.

- optische Dichte an der Rohrachse $\geq 1,5$;
- optische Dichte im nicht behinderten Strahl (außerhalb des Rohrs): 3,5 bis 4 (max.);
- optische Dichte innerhalb der Tangente an der Innenrohrwand $\geq 0,5$.

Wenn die optische Dichte im nicht behinderten Strahl > 4 ist, muss für Messungen an der Rohraußenwand an der äußeren Position der Tangente eine Emulsionsseite entfernt werden. Ist die optische Dichte in der verbleibenden Emulsion ≤ 4 , kann das Durchstrahlungsbild zur Wanddickenmessung angenommen werden.

Eine Messunsicherheit von $\pm 0,1$ ist zulässig.

Um unzulässig hohe Schleierdichten zu vermeiden, die sich durch die Filmalterung, die Filmentwicklung oder die Temperatur ergeben, muss die Schleierdichte an einer nicht bestrahlten Probe, die den verwendeten Filmen entnommen wird, regelmäßig überprüft werden, wobei die Probe unter denselben Bedingungen wie das tatsächliche Durchstrahlungsbild behandelt und verarbeitet werden muss. Die Schleierdichte darf einen Wert von 0,3 nicht überschreiten. Die Schleierdichte wird hier als die optische Gesamtdichte (von Emulsion und Trägermaterial) eines verarbeiteten, nicht bestrahlten Films festgelegt.

Bei Anwendung der Mehrfilmtechnik mit Auswertung einzelner Filme muss die optische Dichte jedes Films den vorstehend angegebenen Anforderungen entsprechen. Wenn eine Doppelfilmbetrachtung gefordert wird, muss die optische Dichte jedes einzelnen Films mindestens 0,8 auf der Rohrmittellinie betragen.

7.3 Filmverarbeitung

Um die ausgewählte Filmsystemklasse zu erreichen, werden die Filme nach den Bedingungen verarbeitet, die von den Herstellern der Filme und der Chemikalien empfohlen werden. Besonders zu beachten sind Temperatur, Entwicklungsdauer und Spüldauer. Die Filmverarbeitung muss regelmäßig nach EN ISO 11699-2 überprüft werden. Die Durchstrahlungsaufnahmen sollten frei von Verarbeitungsfehlern oder anderen Fehlern sein, die die Auswertung beeinträchtigen könnten.

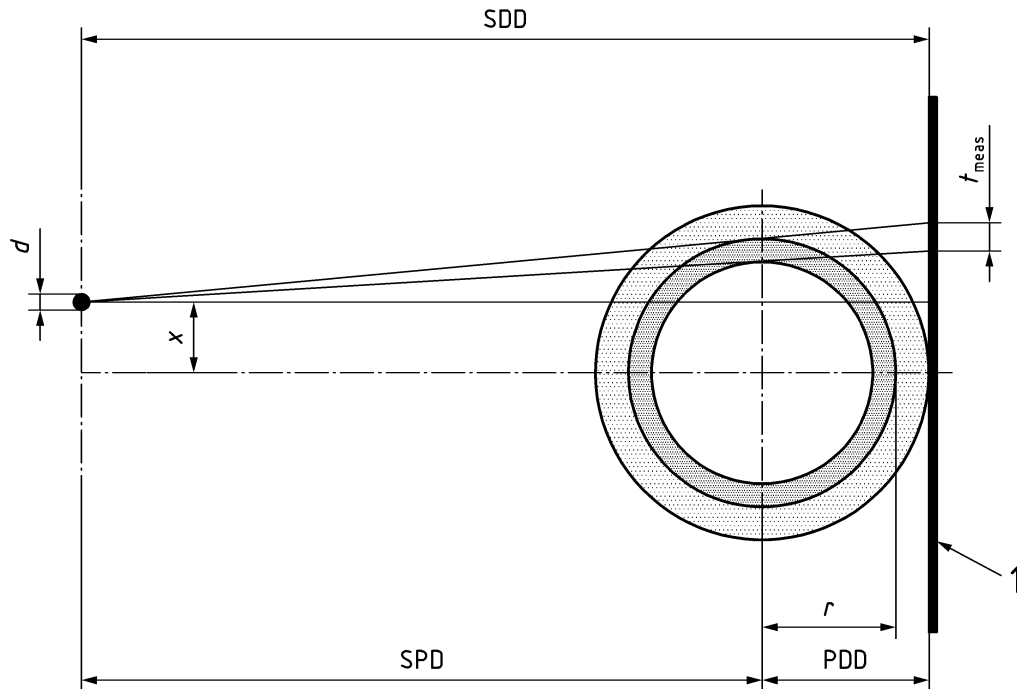
7.4 Filmbetrachtungsbedingungen

Die Durchstrahlungsaufnahmen sollten in einem abgedunkelten Raum auf einer Fläche des Bildschirms mit einstellbarer Leuchtdichte nach EN 25580 untersucht werden. Der Bildschirm sollte bis auf die interessierende Fläche abgedeckt sein.

7.5 Maßkalibrierung der Durchstrahlungsaufnahmen oder der digitalen Bilder

7.5.1 Allgemeines

Bei der tangentialen Durchstrahlung müssen für Messungen der Wanddicke die auf dem Durchstrahlungsbild vorhandenen Abstände kalibriert werden, um eine Vergrößerung des Bilds oder ein „Blow-up“ zu berücksichtigen. Der geometrische Vergrößerungseffekt für die tangentielle Durchstrahlung wird in Bild 7 dargestellt.



Legende

1 Detektor

Bild 7 — Geometrische Vergrößerung bei der tangentialen Durchstrahlung zur Darstellung der gemessenen Wanddicke t_{meas}

Die folgenden Verfahren können für die maßliche Kalibrierung angewendet werden, um die tatsächliche Wanddicke t_{act} aus dem gemessenen Wert t_{meas} zu bestimmen.

7.5.2 Messung der Abstände in einer radiographischen Prüfanordnung

Zu diesem Verfahren gehört die direkte physikalische Messung der wichtigsten auf dem Durchstrahlungsbild vorhandenen Abstände. Für die Kalibrierung nach dem Abstands-Verfahren müssen zwei der folgenden Abstände genau (mit einer Messunsicherheit von nur einigen Prozent) gemessen werden:

- a) Abstand Strahlenquelle — Detektor, SDD;
- b) Abstand Strahlenquelle — Rohrachse, SPD;
- c) Abstand Rohrachse — Detektor, PDD;

Außerdem ist auch der folgende Abstand aufzuzeichnen:

- d) seitlicher Versatz x der Strahlenquelle gegenüber der Rohrachse (falls vorhanden).

Für die tangentielle Durchstrahlung mit versetzter Strahlenquelle (wobei x annähernd r entspricht) kann der wahre Wanddickenwert t_{act} an der tangentialen Rohrposition aus der gemessenen Wanddicke t_{meas} unter Anwendung der folgenden Näherungsgleichung berechnet werden:

$$t_{\text{act}} = \frac{\text{SPD}}{\text{SDD}} \cdot t_{\text{meas}} \quad (7)$$

ANMERKUNG Wenn x annähernd gleich 0 ist, kann die folgende komplexe Gleichung verwendet werden, um die Wanddicke t_{act} von dem gemessenen Wert t_{meas} abzuleiten.

$$t_{\text{act}} = r - \frac{\text{SPD} \left(\frac{r}{\sqrt{\text{SPD}^2 - r^2}} - \frac{t_{\text{meas}}}{\text{SDD}} \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{\sqrt{\text{SPD}^2 - r^2}} - \frac{t_{\text{meas}}}{\text{SDD}} \right)^2}} \quad (8)$$

Dabei ist

r der halbe Rohraußendurchmesser ($= D_e/2$).

Bei der praktischen Durchstrahlung von Rohren während ihres Einsatzes ist es möglicherweise schwierig, genaue physikalische Messwerte der Abstände zu erreichen und diese verlässlich zu dokumentieren. In diesem Fall müssen die nachfolgend beschriebenen alternativen Verfahren angewendet werden.

7.5.3 Messung des Rohraußendurchmessers

Unter der Voraussetzung, dass der Rohraußendurchmesser an der Messposition im Bild oder in der Durchstrahlungsaufnahme genau bekannt ist, kann eine maßliche Kalibrierung durch Messung der abgebildeten Größe des Rohraußendurchmessers D_e' auf der Durchstrahlungsaufnahme oder dem digitalen Bild erreicht werden.

Die tatsächliche verbleibende Wanddicke t_{act} kann dann aus dem gemessenen Wert der verbleibenden Wanddicke t_{meas} unter Anwendung des Verhältnisses des tatsächlichen Rohraußendurchmessers zum gemessenen Rohraußendurchmesser bestimmt werden:

$$t_{\text{act}} = t_{\text{meas}} \cdot \frac{D_e}{D_e'} \quad (9)$$

7.5.4 Maßkomparator

Wenn der Rohraußendurchmesser nicht genau oder nicht zuverlässig bekannt ist, muss das alternative Verfahren für die maßliche Kalibrierung, wie in 6.8 beschrieben, angewendet werden.

Bei diesem Verfahren wird das gemessene Maß c' des Komparators zum Kalibrieren der Abstände benutzt, so dass die tatsächliche verbleibende Wanddicke t_{act} dann aus dem gemessenen Wert der verbleibenden Wanddicke t_{meas} unter Anwendung des Verhältnisses der festgelegten Komparatormaße (c) zu den gemessenen Komparatormäßen (c') ermittelt werden kann:

$$t_{\text{act}} = t_{\text{meas}} \cdot \frac{c}{c'} \quad (10)$$

Zu beachten ist, dass das in 7.5.3 beschriebene Verfahren in den Fällen, in denen der Rohraußendurchmesser genau bekannt ist, vermutlich genauere Messungen ergibt, da die Kalibrierung über einen größeren Abstand erfolgt, der prozentual genauer gemessen werden kann als der kleinere Abstand quer über den Komparator.

7.6 Wanddickenmessungen auf Film-Durchstrahlungsaufnahmen

Zu Kalibrierzwecken können die Maße auf Film-Durchstrahlungsaufnahmen mit einem Messschieber gemessen werden, sowohl für die Wanddicke von Rohren als auch für Vergleichskörper mit einem genau bekannten Maß (d. h. den Kugellager-Komparator oder einen bekannten Rohraußendurchmesser, siehe 7.5.3 und 7.5.4).

7.7 Wanddickenmessungen auf digitalen Durchstrahlungsaufnahmen

7.7.1 Interaktive Messungen am Bildschirm

CR-/DDA-Systeme enthalten Software-Optionen, die eine interaktive Messung der Maße auf dem Bildschirm erlauben, indem den digitalen Bildern ohne Bezug auf die vorhandenen Grauwerte in den Bildern ein Cursor überlagert wird. Der Benutzer bewertet dann visuell die jeweilige Lage der abgebildeten Innen- und Außenkante der Rohrwand.

Bei diesem Verfahren können erhebliche Fehler auftreten, da die scheinbare Wanddicke von den zur Anzeige des Bilds verwendeten Einstellungen für Kontrast und Helligkeit abhängig ist. Diese Fehler sind bei Rohren größer, bei denen sich die größte durchstrahlte Dicke $w_{\max}$ dem für die verwendete Strahlenquelle empfohlenen maximalen Wanddickenwert annähert (siehe Tabelle 1). Um diese Fehler zu verringern, können die folgenden Techniken angewendet werden:

- a) Hochfrequenz-Ortsfilterung (Bildscharfzeichnen) zum Hervorheben der Positionen der Kanten der Rohrwand auf den Bildern und zur Verringerung der Abhängigkeit von den Kontrast- und Helligkeitseinstellungen des Bilds;
- b) bei einigen Bildern lässt sich der Gesamtkontrast des Bilds verringern und die Erkennbarkeit der Lage des Innendurchmessers verbessern, wenn für die Anzeige des Bilds eine logarithmische Beziehung zwischen Strahlungsintensität und Grauwert angewendet wird. Einige CR-Scanner liefern direkt logarithmische Bilder. Für die Scanner und DDA-Systeme, die keine logarithmischen Bilder liefern, kann eine geeignete Wertetabelle (LUT, en: look-up table) angewendet werden, um ein digitales Bild im logarithmischen Maßstab zu erhalten.

Bei Anwendung dieses interaktiven Bildschirm-Messverfahrens ist zuerst zu überprüfen, ob eine annehmbare Genauigkeit erreicht wird, indem die für das angezeigte Bild eingestellten Werte für Kontrast und Helligkeit auf einen Abschnitt des Rohrs mit bekannter Wanddicke angewendet werden (für den z. B. bekannt ist, dass keine Korrosion oder Erosion vorliegt).

7.7.2 Verfahren mit Auswertung des Grauwertprofils

Zusätzlich zu den in 7.7.1 behandelten Messungen am Bildschirm ermöglichen viele CR-/DDA-Systeme auch Wanddickenmessverfahren auf der Grundlage einer Analyse des Grauwertprofils in einer Richtung orthogonal zur Rohrwandachse. Die Software extrahiert ein Grauwertprofil entlang dieser Linie, die dann im Allgemeinen am Bildschirm dem Bild überlagert wird, wie in Bild 8 dargestellt.

a) Automatische Programme

Durch automatische Auswertungsprogramme kann die Zuverlässigkeit der gemessenen Wanddickenwerte erhöht werden, sofern sich die größte tangential durchstrahlte Dicke $w_{\max}$ nicht an die in Anbetracht der verwendeten Strahlenquelle (siehe 7.2) größtmögliche Dicke annähert. Die Genauigkeit dieser automatischen Programme kann außerdem durch weitere Faktoren beeinflusst werden, z. B. das Vorhandensein von externem Zunder, Korrosionsprodukten oder ungleichmäßiger innerer/äußerer Korrosion.

In diesen Fällen gibt es Unsicherheiten bei den automatischen Programmen, und der Anwender sollte die Übereinstimmung der abgeleiteten Werte mit dem Dichteprofil und dem digitalen Durchstrahlungsbild überprüfen.

b) Interaktive Verfahren

Als Alternative zu den automatischen Programmen zur Analyse der Wanddicke kann der Anwender verfügbare interaktive Einrichtungen zur Analyse des Grauwerteprofils anwenden. Die Genauigkeit ist vermutlich besonders für die Rohre mit größeren $w_{\max}$ -Werten zu verbessern, wenn die digitalen Bilder eine logarithmische Empfindlichkeit haben und hochpassgefiltert werden.

Bild 8 zeigt ein Beispiel für eine interaktive Messung der Wanddicke mithilfe von Cursern auf einem quer über die Rohrwand erstellten Grauwertprofil nach Anwendung einer logarithmischen Wertetabelle auf das CR-Bild und einer Hochpassfilterung zur Verbesserung der Details. Die Lage des Außendurchmessers entspricht einem eindeutigen Profilpeak, während die Lage des Innendurchmessers durch den Mindestwert und die ausgeprägte Änderung des Profilgradienten angezeigt wird.

Dieses Verfahren kann in Kombination mit einer visuellen Bewertung des Bilds in einigen Fällen eine höhere Messgenauigkeit ergeben als die vorstehend beschriebenen automatischen Programme.

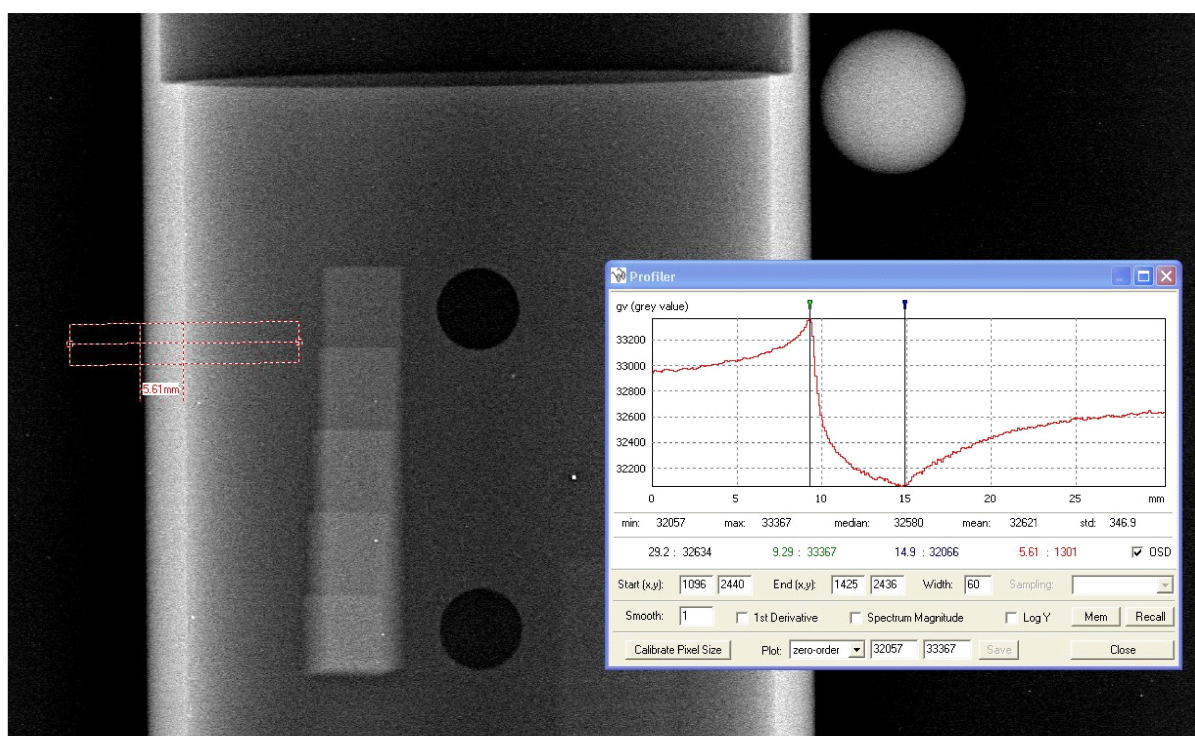


Bild 8 — Beispiel für eine interaktive Wanddickenmessung unter Anwendung von Cursern, die einem quer über die Rohrwand erstellten Grauwertprofil überlagert werden

Die Genauigkeit aller Messverfahren verringert sich, wenn sich die tangential durchstrahlte Dicke $w_{\max}$ dem Höchstwert annähert, der für das verwendete Radioisotop empfohlen wird (siehe Tabelle 1), da eine zuverlässige Bestimmung der Lage der Innenwand wegen des fehlenden Kontrasts und des erhöhten Rauschens immer schwieriger wird.