

DIN EN 16016-4

The logo consists of the letters 'DIN' in a bold, sans-serif font, enclosed within a rectangular border that has horizontal lines extending from the top and bottom bars.

ICS 19.100

**Zerstörungsfreie Prüfung –  
Durchstrahlungsverfahren - Computertomografie –  
Teil 4: Qualifizierung;  
Deutsche Fassung EN 16016-4:2011**

Non destructive testing –  
Radiation methods - Computed tomography –  
Part 4: Qualification;  
German version EN 16016-4:2011

Essais non destructifs –  
Méthodes par rayonnements - Tomographie numérisée –  
Partie 4: Qualification;  
Version allemande EN 16016-4:2011

Gesamtumfang 16 Seiten

Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN

## **Nationales Vorwort**

Dieses Dokument (EN 16016-4:2011) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 138 „Zerstörungsfreie Prüfung“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom AFNOR (Frankreich) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Gremium ist der NA 062-08-22 AA „Durchstrahlungsprüfung und Strahlenschutz“ im Normenausschuss Materialprüfung (NMP).

ICS 19.100

Deutsche Fassung

Zerstörungsfreie Prüfung —  
Durchstrahlungsverfahren —  
Computertomographie —  
Teil 4: Qualifizierung

Non destructive testing —  
Radiation methods —  
Computed tomography —  
Part 4: Qualification

Essais non destructifs —  
Méthodes par rayonnements —  
Tomographie numérisée —  
Partie 4: Qualification

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 29. Juli 2011 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN-CENELEC oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG  
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION  
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

## Inhalt

Seite

Vorwort .....	3
Einleitung.....	4
1 Anwendungsbereich .....	5
2 Normative Verweisungen.....	5
3 Begriffe .....	5
4 Qualifizierung der Prüfung .....	5
4.1 Allgemeines .....	5
4.2 Qualifizierung der Fehlerprüfung.....	5
4.2.1 Allgemeines .....	5
4.2.2 Qualitätsmerkmal.....	5
4.2.3 Detailerkennbarkeit/Prüfsystem/Parametrisierung des Systems.....	6
4.2.4 Verifizierung der Eignung .....	7
4.2.5 Konsistenzprüfung .....	7
4.2.6 Dokumentation.....	7
4.3 Qualifizierung der Maßprüfung .....	8
4.3.1 Allgemeines .....	8
4.3.2 Prüf- und Messaufgabe .....	8
4.3.3 Maßprüfung/Prüfsystem/Systemparametrisierung .....	8
4.3.4 Genauigkeitsgrad.....	9
4.3.5 Konsistenzprüfung .....	9
4.3.6 Dokumentation.....	9
5 Qualifizierung des CT-Systems.....	9
5.1 Allgemeines .....	9
5.2 Ganzheitliche Prüfung des Gesamtsystems.....	10
5.3 Überprüfung der Systembauteile .....	10
5.3.1 Allgemeines .....	10
5.3.2 Manipulationssystem .....	10
5.3.3 Abbildungsmaßstab .....	10
5.3.4 Rechtwinkligkeit der Strahlenachse .....	10
5.3.5 Röhrenbrennfleck .....	10
5.3.6 Röhrenstabilität.....	11
5.3.7 Detektor .....	11
5.3.8 Rekonstruktion.....	11
5.3.9 Darstellung .....	11
5.4 Dokumentation.....	11
6 Beispiel für Verfahren zur Bewertung der Auflösung des CT-Systems.....	11
6.1 Präambel.....	11
6.2 Abtastparameter .....	12
6.3 Empfehlungen für die Gestaltung von Vergleichsobjekten .....	12
6.4 Verfahren zur Messung der Dichteauflösung .....	13
6.4.1 Allgemeines .....	13
6.4.2 Vergleichsobjekt für Hochenergieanlagen.....	13
6.4.3 Vergleichsobjekt für Niedrigenergieanlagen .....	13
6.4.4 Versuchsmessungen.....	13

## Vorwort

Dieses Dokument (EN 16016-4:2011) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 138 „Zerstörungsfreie Prüfung“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom AFNOR gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Februar 2012, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Februar 2012 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN [und/oder CENELEC] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

EN 16016 besteht aus den folgenden Teilen:

- *Zerstörungsfreie Prüfung — Durchstrahlungsverfahren - Computertomografie — Teil 1: Terminologie*
- *Zerstörungsfreie Prüfung — Durchstrahlungsverfahren - Computertomografie — Teil 2: Grundlagen, Geräte und Proben*
- *Zerstörungsfreie Prüfung — Durchstrahlungsverfahren - Computertomografie — Teil 3: Durchführung und Auswertung*
- *Zerstörungsfreie Prüfung — Durchstrahlungsverfahren - Computertomografie — Teil 4: Qualifizierung*

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

## **Einleitung**

Dieses Dokument bietet einen Leitfaden zu den allgemeinen Grundlagen der Röntgencomputertomografie (CT), der für die industrielle Bildgebung gilt (industriell bedeutet im Rahmen dieser Norm nicht medizinische Anwendungen); es bietet auch einen einheitlichen Satz von Festlegungen zu CT-Leistungsparametern, einschließlich der Art des Zusammenhangs dieser Leistungsparameter mit den Spezifikationen des CT-Systems. Das vorliegende Dokument befasst sich mit der axialen Computertomografie und schließt andere Arten der Tomografie, wie z. B. Translationstomografie und Tomosynthese, aus.

## 1 Anwendungsbereich

Dieser Teil der EN 16016 legt einen Leitfaden für die Qualifizierung des Leistungsverhaltens eines CT-Systems unter Beachtung verschiedener Prüfaufgaben fest.

## 2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. 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 16016-1:2011, *Zerstörungsfreie Prüfung — Durchstrahlungsverfahren - Computertomografie — Teil 1: Terminologie*

EN 16016-3:2011, *Zerstörungsfreie Prüfung — Durchstrahlungsverfahren - Computertomografie — Teil 3: Durchführung und Auswertung*

## 3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach EN 16016-1:2011.

## 4 Qualifizierung der Prüfung

### 4.1 Allgemeines

Die CT wird in der Industrie sowohl bei der Fehlerprüfung als auch bei der Maßprüfung und dem dimensionellen Messen angewendet. Da die CT keine direkte Messung der gewünschten Größen, wie z. B. Porengröße oder Wanddicke, ermöglicht, müssen diese Größen aus den Daten für die lineare Schwächung von Röntgenstrahlen abgeleitet werden, die in CT-Grauwerten dargestellt werden. Die Detailerkennbarkeit und der erforderliche Genauigkeitsgrad hängen von der Prüfaufgabe, der Spezifikation der vorliegenden Prüfeinrichtung und den angewendeten Analyse- und Bewertungsverfahren ab. Ist die Bestimmung derartiger Größen erforderlich, ist eine spezielle, aufgabenspezifische Qualifizierungsprüfung (Eignungsprüfung) des CT-Systems notwendig. Die Qualifizierungsmaßnahmen sind in 4.2 und 4.3 beschrieben. Die Qualifizierung sollte von geschultem Personal durchgeführt werden.

### 4.2 Qualifizierung der Fehlerprüfung

#### 4.2.1 Allgemeines

Im Rahmen der Qualifizierung einer Prüfung sollte die Eignung der CT-Prüftechnik zur Messung einer Größe mit der geforderten Präzision verifiziert werden. Die nachstehend beschriebenen Schritte sind üblich für die erfolgreiche Verifizierung der Eignung von CT für Industrieanwendungen.

#### 4.2.2 Qualitätsmerkmal

Typische zu messende Größen sind die Größe von Poren, Hohlräumen, Rissen, Einschlüssen, Verunreinigungen sowie Untersuchungen zur Materialverteilung und Anordnung und Einbaulage von Bauteilen. Da die Untersuchungsprobe und die Art, Position und Größe der nachzuweisenden Details die Eigenschaften eines anzuwendenden CT-Systems bestimmen, sollten beispielsweise folgende Angaben bekannt sein:

a) Prüfgegenstand:

- 1) Maße;
- 2) Masse;
- 3) Materialien;
- 4) im Material zu durchdringende Weglänge;

b) zu prüfendes Detail:

- 1) Art;
- 2) Position;
- 3) Größe;
- 4) Verteilung, Häufigkeit;

c) Detailerkennbarkeit:

- 1) limitierender Fehler;
- 2) limitierendes Detail.

Da die Detailerkennbarkeit stark die Spezifikation beeinflusst und folglich die Kosten eines CT-Systems, muss die Festlegung der erforderlichen Nachweisempfindlichkeit der Prüfung besondere Beachtung finden. Wenn auf Grund fehlender Informationen keine Grenzwerte für die Details festgelegt sind, wird empfohlen, die bestmögliche Empfindlichkeit für das konkrete Verfahren und CT-System zu verwenden und die erreichte Detailerkennbarkeit zum Beispiel unter Anwendung von zerstörenden Prüfungen zu verifizieren.

#### **4.2.3 Detailerkennbarkeit/Prüfsystem/Parametrisierung des Systems**

Die Gebrauchstauglichkeit des CT-Systems und die Auswahl der Systemparameter werden durch die Anforderungen an die Detailerkennbarkeit bestimmt. Typische Regelgrößen sind:

a) räumliche Auflösung:

- 1) gesamte räumliche Auflösung des CT-Bilds;
- 2) Aufnahmegeometrie;
- 3) räumliche Auflösung des Detektors;
- 4) Brennfleckgröße der Strahlenquelle;

b) Kontrastauflösung:

- 1) gesamte Kontrastauflösung des CT-Bilds;
- 2) Detektoreinstellungen;
- 3) Röhrenspannung;
- 4) Röhrenstrom;

c) Rekonstruktion/Darstellung:

- 1) Anzahl der Projektionen;
- 2) CT-Grauwertdynamikbereich der Rekonstruktion oder Darstellung;
- 3) Größe des CT-Bildes in Form der  $X$ -,  $Y$ - und  $Z$ -Achse.

Der Aufbau des CT-Systems und die Parameter der Bildgüte sind in EN 16016-3:2011, 4.1 und 5.1, beschrieben.

#### **4.2.4 Verifizierung der Eignung**

##### **4.2.4.1 Allgemeines**

Es muss eine zuverlässige Angabe der Fehlernachweisempfindlichkeit und der Fehlererkennbarkeit des in einer Prüfung eingesetzten CT-Systems erfolgen, unter Angabe des geforderten Genauigkeitsgrades der Prüfung (zulässige Abweichung, Schwankungsbreite). Nachstehend werden verschiedene alternative Verfahren beschrieben.

##### **4.2.4.2 Vergleichsproben mit natürlichen Fehlern**

Wenn eine Vergleichsprobe mit einem bekannten Fehler zur Verfügung steht, wird eine Untersuchung dieser Probe durchgeführt und die Erkennbarkeit wird nach Abschluss der Prüfung angegeben.

Wenn eine Vergleichsprobe mit nicht quantifizierten Fehlern zur Verfügung steht, wird eine Untersuchung dieses Teils durchgeführt und die Fehlererkennbarkeit wird unter Anwendung einer Gegenprüfung ermittelt, zum Beispiel unter Anwendung einer zerstörenden Prüfung nach erfolgter CT-Abtastung.

##### **4.2.4.3 Vergleichsprobe mit künstlichem Fehler**

Kann das zu prüfende Detail mit einem künstlichen Fehler, zum Beispiel einer Bohrung, nachgebildet werden, kann die Verifizierung der Fehlererkennbarkeit wie im vorstehenden Abschnitt beschrieben erfolgen.

##### **4.2.4.4 Vergleichsprobe ohne Spezifikationen**

Wenn für den Zustand der Vergleichsprobe keine Spezifikationen zur Verfügung stehen und eine Gegenprüfung nicht möglich ist, wird die Prüfung unter Anwendung der Systemempfindlichkeit durchgeführt. Probenstrukturen, wie z. B. Wanddicken, und Messungen der Außenmaße können zur Abschätzung der Fehlererkennbarkeit verwendet werden. Alternative Vergleichsproben, wie z. B. Drähte oder Kugeln mit bekannten Maßen, können verwendet werden.

#### **4.2.5 Konsistenzprüfung**

Die CT-Abtastung erfordert mehrere sehr komplexe Prozessschritte, bei denen Fehlerquellen nicht immer ausgeschlossen werden können. Nach der Abtastung kann Folgendes verwendet werden, um den möglichen Fehlerquellen nachzugehen:

- Rekonstruktion: Größe, Position der CT-Schichten, mögliche Artefakte;
- CT-Abbildungsmaßstab;
- Sinogramm (CT-Grauwert und Kurvenverlauf) oder CT-Projektionsabfolge (Vergleich von Projektionen, Bildgüte der Projektionen, Intensitätsänderungen);
- Systemzustand (Fehlermeldungen).

Wenn Fehler auftreten, sind sie entweder zu korrigieren oder ihre Ursachen sind zu beseitigen und die Prüfung ist zu wiederholen.

#### **4.2.6 Dokumentation**

Im Qualifizierungsbericht sind die betreffenden Parameter und Ergebnisse der Qualifizierungsschritte zu beschreiben und darzustellen. Die CT-Bilder sind für einen Zeitraum zu archivieren, der mit dem Endanwender zu vereinbaren ist. Die Prüfparameter sind so zu archivieren, dass im Fall sich wiederholender Prüfteile und zu prüfender Details ein identisches Prüfverfahren möglich ist.

### **4.3 Qualifizierung der Maßprüfung**

#### **4.3.1 Allgemeines**

Die CT-Untersuchung liefert Informationen über die 3D-Struktur einer Probe, aus denen Daten zur Oberfläche und Geometrie abgeleitet werden können. Da diese Daten auf physikalischen Röntgenabsorptionsunterschieden an den Konturübergängen beruhen, können im Vergleich zu klassischen taktilen oder optischen Messverfahren geringe Unterschiede in den gemessenen Werten auftreten. In den folgenden Abschnitten werden die CT-Aufnahmeparameter, die die Ergebnisse beeinflussen, zusammen mit den Prozessschritten, die die Genauigkeit der Ergebnisse beeinflussen, beschrieben.

#### **4.3.2 Prüf- und Messaufgabe**

Dimensionelle Messaufgaben umfassen die Messungen von einzelnen Maßen des Prüfgegenstandes, Messungen der Wanddicke, Oberflächenextraktion, Volumenextraktion oder Soll-Ist-Vergleiche. Die erforderliche Messpräzision ist für jede Aufgabe und, falls erforderlich, für die verschiedenen Teile der Probe festzulegen.

#### **4.3.3 Maßprüfung/Prüfsystem/Systemparametrisierung**

Der erreichbare Genauigkeitsgrad hängt vom Prüfgegenstand, den Grenzen der Röntgenphysik und der anschließenden Datenbehandlung ab. Eine erste Abschätzung des Genauigkeitsgrades einer CT-gestützten dimensionellen Messung kann mit den folgenden Parametern erfolgen:

- a) räumliche Auflösung im Prüfgegenstand:
  - 1) Maße;
  - 2) geometrische Vergrößerung, Voxelgröße;
  - 3) Detektorauflösung;
  - 4) Brennfleck;
- b) Röntgendurchstrahlung des Prüfgegenstandes:
  - 1) Material;
  - 2) maximale zu durchstrahlende Wanddicke;
  - 3) Kontrastauflösung;
- c) 3D-Daten von Bauteilen:
  - 1) Voxelgröße im Original-CT-Bild;
  - 2) Extraktionsschritte und Qualität;
  - 3) Schritte der Weiterverarbeitung und Qualität;
  - 4) Registrierungsverfahren.

Hinsichtlich dieser Abschätzung muss beachtet werden, dass physikalische Röntgenstrahleffekte (wie z. B. Streustrahlung und Strahlaufhärtung) sowie durch Detektor und Rekonstruktionsverfahren bedingte Artefakte zu stark schwankenden Genauigkeitsgraden in verschiedenen Teilen der Probe führen können. Für einen bekannten Messpunkt sollten die lokalen Parameter verwendet werden.

Die Prüfaufgabe ist zurückzuweisen, wenn die Anforderungen außerhalb der Leistungsfähigkeit der Röntgentechnik oder des CT-Systems liegen.

#### **4.3.4 Genauigkeitsgrad**

##### **4.3.4.1 Allgemeines**

Nachstehend werden die Verfahren beschrieben, die es in Abhängigkeit von der Messaufgabe ermöglichen, eine Aussage zum erreichten Genauigkeitsgrad zu machen. Mit den beschriebenen Verfahren wird der Grad der Gesamtgenauigkeit der gesamten Messkette ermittelt.

##### **4.3.4.2 Vergleichsprobe**

Für die Messaufgabe wird ein Vergleichsteil verwendet, das einem Standard-Gegenmessverfahren unterzogen wird, zum Beispiel taktilen oder optischen und bei Bedarf zerstörenden Messverfahren. Durch Vergleich der Messdaten können Aussagen über den Genauigkeitsgrad (der in den verschiedenen Teilen der Probe unterschiedlich sein kann) gemacht werden. Der erreichte Genauigkeitsgrad kann bei denselben CT-Systemparametern und vergleichbaren Prüfgegenständen auf ähnliche Teile übertragen werden.

Typische Spezifikationen sind:

- a) Vergleichsmaße;
- b) Angaben zu den Gegenmessverfahren;
- c) Standardabweichung von Messfehlern für einen Vergleichssatz.

##### **4.3.4.3 Vergleichskörper**

Wenn eine vollständige Gegenmessung nicht möglich ist, kann eine Messung der zugänglichen Probengeometrien mit vergleichbaren Schwächungswerten wie bei der Vergleichsprobe für die Abschätzung des Genauigkeitsgrades herangezogen werden. Die Verwendung von Vergleichskörpern, wie z. B. Kugeln und Hanteln, stellt auch eine Möglichkeit zur Abschätzung des Genauigkeitsgrades dar.

Typische Spezifikationen sind:

- a) Vergleichsmaße;
- b) Angaben zu den Gegenmessverfahren und zu den verschiedenen Prüfzonen innerhalb der Probe;
- c) Standardabweichung des Messfehlers für einen Vergleichssatz.

#### **4.3.5 Konsistenzprüfung**

Siehe 4.2.5 Konsistenzprüfung.

#### **4.3.6 Dokumentation**

Siehe 4.2.6 Dokumentation.

### **5 Qualifizierung des CT-Systems**

#### **5.1 Allgemeines**

Die Fähigkeit eines CT-Systems, stabile und reproduzierbare Ergebnisse von hoher Qualität zu liefern, stützt sich auf die gleiche Leistung von allen Systembauteilen und deren Wechselwirkungen. Um das im täglichen Betrieb sicherzustellen, wird eine regelmäßige Prüfung des Systems nach festgelegten Kriterien empfohlen.

Es sollte zwischen Prüfungen, die in kurzen Abständen (z. B. wöchentlich) mittels einer Prüfung der „Gesamtleistung“ durchgeführt werden, und denen, die in längeren Abständen (z. B. jährlich) für die Beschreibung des

Qualitätsniveaus und bei möglichen Änderungen einzelner Bauteile des Systems erfolgen, unterschieden werden.

## **5.2 Ganzheitliche Prüfung des Gesamtsystems**

Für eine regelmäßige Systemüberwachung sollte eine Vergleichsprobe verwendet werden, die ähnlich der Probe ist, die üblicherweise im CT-System verwendet wird. Es sollte der vollständige Prüfzyklus unter Anwendung ähnlicher Parameter wie bei der Prüfung mit typischen Untersuchungsproben durchgeführt werden.

Zur Bewertung der Systemqualität werden die aktuellen Prüfergebnisse mit Vergleichsmessungen verglichen. Es wird empfohlen, dass die Messwerte unterschiedlicher Objektstrukturen, wie z. B. Materialfehler (Poren, Risse), dünnste und dickste Stelle am Vergleichskörper, Wanddicken usw., als Qualitätskriterien festgelegt werden.

Wenn kombinierte Systeme (zwei Röhren und/oder Detektoren) verwendet werden, sind für die entsprechenden Systemkombinationen (z. B. Anwendung mit Mikrofokus und Minifokus) verschiedene geeignete Vergleichskörper zu verwenden.

Die Prüfergebnisse und der sich daraus ergebende Systemzustand sind zu dokumentieren und zu archivieren.

Wenn Unterschiede festgestellt werden, sind weitere Prüfungen durchzuführen, um die Ursache zu bestimmen (siehe auch 5.3). Die vorstehend erwähnten Prüfungen sollten nach beliebigen Reparaturen und anderen bedeutenden Eingriffen in das Gesamtsystem und vor dem weiteren Einsatz des Systems durchgeführt werden.

## **5.3 Überprüfung der Systembauteile**

### **5.3.1 Allgemeines**

Die folgenden Systembauteile, die möglicherweise beeinträchtigt werden können, sind während der Inbetriebnahme, wenn Änderungen zu vermuten sind (nach Reparaturen und im Fall eines Systemabsturzes) und in regelmäßigen Zeitabständen zu überprüfen.

### **5.3.2 Manipulationssystem**

Die Bahn- und Lagegenauigkeit der Achsen sind zu überprüfen. Es können Messinstrumente verwendet werden, die bei der Überprüfung von Koordinatenmessgeräten (KMG) eingesetzt werden.

### **5.3.3 Abbildungsmaßstab**

Für die Prüfung des CT-Abbildungsmaßstabs werden Sätze von Hochpräzisionskugeln mit bekannter räumlicher Anordnung (z. B. Stäbe mit Kugeln, Hanteln) empfohlen (siehe Bild 1 von EN 16016-3:2011). Derartige Proben haben den Vorteil, dass Unterschiede im angewendeten CT-Grauschwellenwert keinen Einfluss auf das erhaltene Maßergebnis haben.

### **5.3.4 Rechtwinkligkeit der Strahlenachse**

Die Rechtwinkligkeit der Strahlenachse zum Detektor kann mit geeigneten Untersuchungsproben (z. B. Wolframdrähte oder -spitzen, Kugeln) überprüft werden.

### **5.3.5 Röhrenbrennfleck**

Die Position des Röhrenbrennflecks muss mit einem geeigneten Verfahren überprüft werden, mit dem beispielsweise sichergestellt wird, dass die durch CT-Abtastung bei verschiedenen Vergrößerungen erhaltenen Maße kompatibel sind (mit angegebenen Fehlergrenzen).

### 5.3.6 Röhrenstabilität

Die Stabilität der Ausgangsleistung einer Röntgenröhre kann mittels einer Dosisleistungsmessung überprüft werden.

### 5.3.7 Detektor

Die Dynamik des Detektors kann durch einen Vergleich mit dem Lieferzustand überprüft werden, z. B. durch Aufnahme eines gestuften Vergleichskörpers. Es wird empfohlen, den Detektor regelmäßig auf Pixelfehler zu überprüfen.

Die Detektorstabilität kann mit einer Zeitreihe von Intensitätsmessungen überprüft werden.

### 5.3.8 Rekonstruktion

Im Fall einer Neuinstallation, des Austausches von Hardwarebauelementen oder Aktualisierungen (Updates) wird empfohlen, dass ein bekannter Satz von Projektionen eingegeben wird. Das Rekonstruktionsergebnis (CT-Grauwerte und Voxelgröße) ist an Hand der früheren Rekonstruktion dieser Projektionen zu bewerten.

### 5.3.9 Darstellung

Im Fall einer Neuinstallation, des Austausches von Hardwarebauelementen oder Aktualisierungen (Updates) wird empfohlen, dass ein bekanntes CT-Bild geladen wird. Das Darstellungsergebnis und die quantitativen Messungen davon sind an Hand der früheren Darstellung dieses CT-Bildes zu bewerten.

## 5.4 Dokumentation

Das Datum und der Zeitpunkt der Systemüberwachung, die durchgeführten Schritte und das erzielte Ergebnis sind zu dokumentieren und für einen festzulegenden Zeitraum zu archivieren.

## 6 Beispiel für Verfahren zur Bewertung der Auflösung des CT-Systems

### 6.1 Präambel

Die Leistung eines CT-Systems ist mit einer Vielzahl von Kriterien mit mehr oder weniger Einfluss verbunden, in Abhängigkeit von der Art des geprüften Objekts (geringe oder hohe Schwächung), der Art der durchgeführten Charakterisierung (Fehlersuche, Dichtebestimmung usw.). Eine andere Möglichkeit des Umgangs mit dem Problem ist die Anerkennung der Tatsache, dass die Leistung eines CT-Systems immer das Ergebnis eines Kompromisses zwischen verschiedenen Parametern ist, wie z. B.:

- räumliche Auflösung;
- Dichteauflösung;
- Erfassungszeit.

Diese drei Parameter sind voneinander abhängig. Der Versuch, einen dieser Parameter zu verbessern, führt zur Verschlechterung von einem oder beiden anderen Parametern. Es scheint daher nicht sinnvoll, zu versuchen, die „absolute Leistung“ eines CT-Systems zu bewerten. Eine derartige Bewertung muss in jedem Fall im Zusammenhang mit den zu untersuchenden Teilen erfolgen.

Dennoch wird die Leistungsbewertung auf der Grundlage der Qualifizierung der räumlichen Auflösung und Dichteauflösung als Beispiel aufgeführt. Dieses Verfahren gilt für die meisten vorhandenen CT-Systeme und die Ergebnisse sind für die Mehrzahl der durchgeführten Untersuchungen von Nutzen.

Dieses Verfahren versucht nicht, eine Nachweisgrenze für die bewerteten CT-Systeme bereitzustellen, sondern die Leistung zu quantifizieren, um verschiedene Anlagen zu vergleichen oder ein derartiges Leistungsverhalten über die Zeit zu überwachen. Ein derartiges Verfahren kann auch angewendet werden, um die Abtastparameter für einen gegebenen Zusammenhang (Art des geprüften Teils, Dosisstrahlen und Erfassungszeit) zu optimieren.

Die Vergleichsobjekte müssen an die konkreten Anlagen, wie z. B. Mikrofokusanlagen und Hochenergiegeräte, angepasst werden. Im Allgemeinen sollten die zur Bewertung verwendeten Prüfgegenstände in Bezug auf Schwächung und Größe den zu prüfenden Teilen möglichst nah sein. Falls notwendig, können spezifischere Prüfgegenstände gestaltet werden, um die gewünschten Kriterien besser zu erfüllen.

In den nachfolgenden Abschnitten sind die Vergleichsobjekte und ein Verfahren beschrieben, das als Teil eines Vergleichssystems für verschiedene Anlagen, die sich in Ausführung, Herstellungsverfahren und Alter unterscheiden, eingeführt wurde.

Das vorgeschlagene Verfahren sollte in Übereinstimmung mit dem Kontext der Untersuchung angepasst werden. Der Leitfaden für die Gestaltung dieser Prüfgegenstände ist in 6.3 angeführt.

Die in den folgenden Abschnitten angeführten Messungen gelten theoretisch für alle Situationen.

## **6.2 Abtastparameter**

Da jedes CT-System über seine eigenen Eigenschaften bezüglich Bilderfassung und Rekonstruktion verfügt, ist es wichtig, dass für jedes System eine genormte Auflösungsmessung erfolgt, wobei (sofern möglich) eine optimale Spannung, Voxelgröße und ein optimales Winkelinkrement verwendet werden.

## **6.3 Empfehlungen für die Gestaltung von Vergleichsobjekten**

Bei dem vorgeschlagenen Verfahren werden zwei Arten von Vergleichsobjekten verwendet:

- eins für die Messung der räumlichen Auflösung, das aus einem Teil besteht, das eine Reihe kalibrierter Öffnungen enthält, siehe EN 16016-3:2011, Bild A.1;
- ein anderes für die Messung der Dichteauflösung, das aus einem Teil mit Einsätzen besteht, siehe Bild 1.

Da sämtliche Messungen auf die angenommenen Eigenschaften der Vergleichsobjekte bezogen sind, muss bei deren Festlegung und Gestaltung sehr sorgfältig vorgegangen werden.

Die Vergleichsobjekte müssen bestimmte Anforderungen erfüllen, um optimale Messbedingungen sicherzustellen. Um Artefakte durch winkelbedingte Effekte (Kantenartefakt, siehe EN 16016-3:2011) zu vermeiden, wird eine zylindrische Geometrie gewählt.

Zur Messung der Dichteauflösung müssen die Einsätze über einen linearen Schwächungskoeffizienten verfügen, der in der Nähe des Koeffizienten des Materials liegt, das die Matrix darstellt, um Artefakte zu vermeiden, die als „Kantenartefakte“ (siehe EN 16016-3:2011) bekannt sind. Die Schwächungsunterschiede zwischen den Einsätzen müssen gering bleiben, um eine höhere Empfindlichkeit bei der Messung sicherzustellen. Bei der Rekonstruktion des CT-Bildes muss eine geeignete Korrektur der Strahlaufhärtung erfolgen. Außerdem muss das Material der Vergleichsobjekte zur Sicherstellung der Anwendbarkeit chemisch gleichartig und von ähnlicher Dichte wie die Untersuchungsproben sein. Der Grund dafür ist, dass bei einer CT-Aufnahme der lineare Röntgenschwächungskoeffizient gemessen wird, der im Zusammenhang mit der Materialdichte steht, ihr jedoch nicht direkt proportional ist.

Die Materialien, aus denen die Matrix und die Einsätze hergestellt sind, müssen möglichst homogen sein; Schwankungen in der Dichte müssen in jedem Fall mindestens um das Zehnfache geringer sein als die erwartete Präzision des CT-Systems. Die Größe muss hinreichend sein, um ein mittleres Maß in einem IOB (interessierenden Objektbereich) mit einigen Dutzend Quadrat-Pixeln zu ermöglichen.

Bei der Messung der räumlichen Dichte sind kalibrierte künstliche Fehler notwendig. Die Präzision der maschinellen Bearbeitung ist im Allgemeinen wesentlich geringer als die gewünschte räumliche Auflösung, was zu gewissen Problemen bei der Herstellung von Vergleichsteilen, die für Mikrofokussysteme bestimmt sind, führt. Kann bei der Gestaltung des Teils keine hohe Präzision erreicht werden, muss eine derartige Präzision durch eine nachträgliche und genaue Messung der durchgeführten maschinellen Bearbeitung erhalten werden.

## 6.4 Verfahren zur Messung der Dichteauflösung

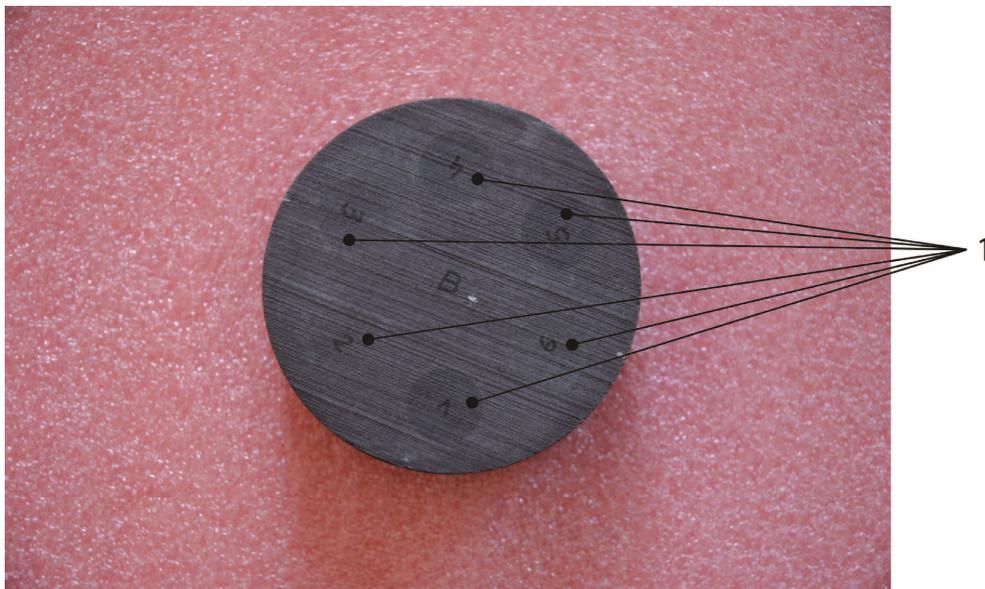
### 6.4.1 Allgemeines

Das folgende Verfahren legt fest, wie die Materialdichteauflösung aus dem CT-Bild unter Anwendung einer in 6.4.4 beschriebenen Kalibrierung zu messen ist. Eine alternative Möglichkeit, die Dichteauflösung zu messen, ist über das Kontrast-Rausch-Verhältnis (KRV).

Der ausgedehnte Bereich angewendeter Energien führt zur Festlegung von zwei unterschiedlichen Vergleichsobjekten: eins für Niedrigenergieanlagen (Beschleunigungsspannung < 200 kV) und ein anderes für Hochenergieanlagen (Beschleunigungsspannung 200 kV und 450 kV).

### 6.4.2 Vergleichsobjekt für Hochenergieanlagen

Ein derartiges Objekt besteht aus einem Zylinder mit einem Durchmesser von 80 mm und einer Dicke von 30 mm, der 6 Einsätze mit einem Durchmesser von 15 mm enthält, siehe Bild 1. Die Matrix und die Einsätze werden aus wärmehärtbarem Polymer, Aluminium und mineralischen Füllstoffen in Form von Kaliumchlorid hergestellt. Die Dichte jedes Einsatzes wird für unterschiedliche Konzentrationen von mineralischen Füllstoffen ermittelt und ist mit einem anderen geeigneten Verfahren zu messen.



#### Legende

1 Einsätze

**Bild 1 — CT-Bild des Vergleichsobjektes für Hochenergieanlagen**

### 6.4.3 Vergleichsobjekt für Niedrigenergieanlagen

Ein Vergleichsobjekt besteht aus einzelnen Medien mit unterschiedlichen Dichten, jedoch nahe 1, und von ähnlicher Zusammensetzung, um den starken Einfluss der Kernladungszahl auf die Schwächung zu vermeiden.

### 6.4.4 Versuchsmessungen

Der Mittelwert der CT-Grauwerte des Einsatzes  $I$ ,  $N_i$ , wird für einen interessierenden Objektbereich (IOB), der sich mittig auf jedem Einsatz befindet und eine Fläche von mindestens 100 Voxel umfasst, berechnet. Der CT-Grauwert des Hintergrunds  $N_b$  wird als Vergleichswert verwendet und mit dem genauen Wert der Dichte des Hintergrunds  $d_b$  abgestimmt.

Die durch Tomografie bestimmte Dichte der Einsätze  $d_i$  ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$d_i = (N_i/N_b) \times d_b \quad (1)$$

Diese Werte werden anschließend mit den genauen Dichtewerten  $d_i$  von jedem Einsatz verglichen.

Das Leistungsverhalten wird unter Anwendung von Kurven bewertet, die den Zusammenhang zwischen den gemessenen CT-Grauwerten  $d_i$  und den Vergleichsdichten  $d_i$  von jedem Einsatz darstellen.

**ANMERKUNG** Da die Abtastparameter sowohl bezüglich der Hochspannung als auch des physikalischen Filters nicht genau identisch sind, ist es möglicherweise erforderlich, die Messwerte durch eine Verschiebung zu korrigieren, das ändert jedoch nicht das Leistungsverhalten des CT-Systems bezüglich der Dichteauflösung.

Für jedes CT-System wird der lineare Korrelationskoeffizient  $k$  der Kurve berechnet.  $\hat{\sigma}$  ist der Schätzwert der Standardabweichung der in jedem IOB gemessenen CT-Grauwerte, die Materialdichteauflösung ergibt sich aus:

$$\Delta d = k \times 3\hat{\sigma} \quad (2)$$

für eine statistische Sicherheit von  $3\hat{\sigma}$ .

Dieser Fehler der Dichte berücksichtigt nicht die Unsicherheit der Wiederholpräzision und die Unsicherheit der Dichte von Vergleichsstandardteilen.

Einige Anlagen mit polychromatischer Strahlenquelle können bei Anwendung einer spezifischen Korrektur des Strahlauhfärtungseffektes den absoluten Dichtewerten der Einsätze nahekommen.