

DIN EN 16016-3

ICS 19.100

Ersatz für
DIN EN 16016-3:2012-01**Zerstörungsfreie Prüfung –
Durchstrahlungsverfahren — Computertomografie –
Teil 3: Durchführung und Auswertung;
Deutsche Fassung EN 16016-3:2011**

Non destructive testing –
Radiation methods — Computed tomography –
Part 3: Operation and interpretation;
German version EN 16016-3:2011

Essais non destructifs –
Méthode par rayonnements — Tomographie numérisée –
Partie 3: Fonctionnement et interprétation;
Version allemande EN 16016-3:2011

Gesamtumfang 28 Seiten

Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 16016-3:2011) 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).

Änderungen

Gegenüber DIN EN 16016-3:2012-01 wurde folgende Korrektur vorgenommen:

- a) In A.2 Erläuterungen zu N_A und N_C korrigiert.

Frühere Ausgaben

DIN EN 16016-3: 2012-01

Deutsche Fassung

Zerstörungsfreie Prüfung —
Durchstrahlungsverfahren —
Computertomografie —
Teil 3: Durchführung und Auswertung

Non destructive testing —
Radiation methods —
Computed Tomography —
Part 3: Operation and interpretation

Essais non destructifs —
Méthodes par rayonnements —
Tomographie numérisée —
Partie 3: Fonctionnement et interprétation

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 Verfahrensweise zur Durchführung.....	5
4.1 Allgemeines	5
4.2 Aufbau des CT-Systems	5
4.2.1 Allgemeines	5
4.2.2 Geometrie	6
4.2.3 Röntgenstrahlenquelle	6
4.2.4 Detektor	7
4.3 Rekonstruktionsparameter	7
4.4 Darstellung	7
4.5 Analyse und Auswertung von CT-Bildern.....	7
4.5.1 Allgemeines	7
4.5.2 Detailprüfung/Fehlerprüfung	8
4.5.3 Maßprüfung	8
5 Anforderungen an zulässige Ergebnisse	11
5.1 Parameter der Bildgüte	11
5.1.1 Kontrast	11
5.1.2 Rauschen	12
5.1.3 Signal-Rausch-Verhältnis	13
5.1.4 Kontrast-Rausch-Verhältnis	13
5.1.5 Räumliche Auflösung	14
5.2 Eignung der Prüfung	16
5.3 Auswertung und Annahmekriterien der CT-Untersuchung	16
5.4 Aufzeichnungen und Berichte	16
5.5 Artefakte	17
5.5.1 Allgemeines	17
5.5.2 Strahlaufhärungsartefakte	17
5.5.3 Kantenartefakte	18
5.5.4 Streustrahlung	19
5.5.5 Instabilitäten	19
5.5.6 Ringartefakte	20
5.5.7 Artefakte durch Abweichen des Rotationszentrums	20
5.5.8 Bewegungsartefakte	21
5.5.9 Artefakte durch eine unzureichende Anzahl von Projektionen	22
5.5.10 Kegelstrahlartefakte	22
Anhang A (informativ) Messung der räumlichen Auflösung mit Linienpaar-Messschablonen	23
A.1 Linienpaar-Messschablonen	23
A.2 Messprinzip	24
Literaturhinweise	26

Vorwort

Dieses Dokument (EN 16016-3:2011) 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

Dieses Dokument legt einen Überblick über den Betrieb eines CT-Systems und die Auswertung der Ergebnisse fest, um dem Anwender technische Informationen zur Auswahl geeigneter Parameter zur Verfügung zu stellen.

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 16016-2:2011, *Zerstörungsfreie Prüfung — Durchstrahlungsverfahren - Computertomografie — Teil 2: Grundlagen, Geräte und Proben*

3 Begriffe

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

4 Verfahrensweise zur Durchführung

4.1 Allgemeines

Bei zielgerichteten CT-Untersuchungsverfahren werden die Prüf- und Messaufgaben im Voraus unter Berücksichtigung der Größe und Art der zu verifizierenden Details/Fehler festgelegt; zum Beispiel durch die Spezifikation geeigneter Zulässigkeitsgrenzen und geometrischer Abweichungen. Im Folgenden werden die Prozessschritte einer CT-Anwendung beschrieben und Informationen zu deren Umsetzung gegeben.

4.2 Aufbau des CT-Systems

4.2.1 Allgemeines

Der Aufbau des CT-Systems orientiert sich an den Anforderungen einer bestimmten Aufgabe. Aus diesen Anforderungen können die erforderliche räumliche Auflösung (unter Berücksichtigung der Röhrenbrennfleckgröße), Kontrastauflösung, Voxelgröße und Güte des CT-Bildes abgeleitet werden. Die Güte des CT-Bildes wird durch unterschiedliche Parameter bestimmt, die unter bestimmten Umständen einander entgegenwirken.

Im Folgenden werden die Systemparameter beschrieben und Informationen zur Einstellung eines CT-Systems für die Untersuchung gegeben. Auf Grund der Wechselwirkungen der verschiedenen Systemparameter kann es notwendig sein, die Einrichtungsschritte mehrmals zu durchlaufen, um optimale Daten zu erfassen.

Die optimale Energie ist die Energie, die das beste Signal-Rausch-Verhältnis ergibt, und nicht unbedingt die, die zum deutlichsten Durchstrahlungsbild führt (die Abhängigkeit der Detektoreffizienz von der Energie ist zu berücksichtigen). Um jedoch zwischen Materialien unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung unterscheiden zu können, ist es möglicherweise notwendig, die Beschleunigungsspannung anzupassen, um den Unterschied zwischen den linearen Schwächungskoeffizienten zu maximieren.

4.2.2 Geometrie

Die Abstände Strahlenquelle/Detektor und Strahlenquelle/Prüfgegenstand und dementsprechend auch der verwendete Öffnungswinkel (Strahlwinkel) sollten festgelegt werden. Zum Erreichen hoher Auflösungen kann die Projektion auf den Detektor vergrößert werden. Die Vergrößerung ist gleich dem Verhältnis des Abstandes Strahlenquelle/Detektor zum Abstand Strahlenquelle/Prüfgegenstand. Eine Zunahme des Abstandes Strahlenquelle/Detektor führt zu einer verringerten Intensität am Detektor und somit zu einem reduzierten Signal-Rausch-Verhältnis. Das gilt folglich auch bei der Anwendung von Detektoren mit verbesserter Detektorauflösung, was zu einer Reduzierung des Signal-Rausch-Verhältnisses auf Grund der verringerten Intensität je Pixel führen kann. Im Allgemeinen ist aus diesem Grund eine Minimierung des Abstands Strahlenquelle/Prüfgegenstand zu bevorzugen.

Um hohe Strahlungsintensität am Detektor zu erreichen, sollte der Abstand Strahlenquelle/Detektor unter Berücksichtigung der erforderlichen Auflösung so gewählt werden, dass er möglichst klein ist, so dass der Röntgenstrahlenkegel dennoch den Detektor vollständig ausleuchtet. Um rekonstruktionsbedingte (Feldkamp-) Verzeichnungen des 3D-Modells zu minimieren, sollte im Fall von 3D-CT der (im Allgemeinen vertikale) Gesamtkegelstrahlwinkel parallel zur Rotationsachse üblicherweise weniger als 15° betragen, das ist jedoch probenabhängig. Außerdem gelten diese Einschränkungen nicht für den senkrechten (im Allgemeinen horizontalen) Strahlwinkel. Für eine stärkere geometrische Vergrößerung muss der Prüfgegenstand möglichst nahe an der Strahlenquelle angeordnet werden, wobei die durch die Brennfleckgröße bedingte Einschränkung der geometrischen Schärfe zu berücksichtigen ist. Die Drehung des Prüfgegenstandes muss mindestens um 180° zuzüglich des Öffnungswinkels des Röntgenstrahls erfolgen, wobei eine verbesserte Datenqualität das Ergebnis einer zunehmenden Anzahl von Winkelinkrementen ist. Aus diesem Grund wird der Prüfgegenstand üblicherweise um 360° gedreht. Die Anzahl von Winkelinkrementen sollte idealerweise mindestens $\pi/2 \times \text{Matrizengröße}$ betragen, wobei die Matrizengröße die Anzahl der Voxel über den Probendurchmesser oder das größte Maß ist. Zu weiteren Informationen siehe 5.5.

Um möglichst vollständige Angaben über den Probekörper zu erhalten, besteht die Anforderung an eine CT im Allgemeinen darin, dass der Prüfgegenstand (oder der interessierende Ausschnitt des Prüfgegenstandes) in jeder Projektion vollständig auf den Detektor abgebildet wird. Bei großen Bauteilen, die über den Röntgenstrahlenkegel hinausreichen, wird eine sogenannte Messbereichserweiterung angewendet. Diese Messbereichserweiterung erfolgt durch laterale Verschiebung entweder des Prüfgegenstandes oder des Detektors, wobei die Projektionsdaten der aufeinander folgenden Messungen aufgezeichnet und abschließend verknüpft (verbunden) werden. Unter bestimmten Umständen ist es auch möglich, nur einen Teil des Prüfgegenstandes abzutasten (Ausschnitt-CT), was zu einer eingeschränkten Datenqualität in Form von sogenannten Abschneidungen führen kann.

Eine mögliche Abweichung der Aufnahmegeometrie (Versatz zwischen der projizierten Rotationsachse und der Mittellinie des Bildes) muss korrigiert werden, um eine Rekonstruktion zu erhalten, die möglichst präzise ist. Das kann durch sorgfältige Neuausrichtung des Systems oder durch Korrektur unter Anwendung der Software erreicht werden.

4.2.3 Röntgenstrahlenquelle

An der Röntgenstrahlenquelle sind die maximale Energie des Röntgenstrahlenbündels und der Röhrenstrom so einzustellen, dass eine hinreichende Durchstrahlung des Prüfgegenstandes und eine Röhrenleistung mit einem hinreichend kleinen Brennfleck sichergestellt sind. Die erforderliche Spannung wird durch die maximale Weglänge in dem zu durchleuchtenden Material nach EN 16016-2:2011, 8.2, bestimmt. Für die besten Messergebnisse sollte ein Schwächungsverhältnis von etwa 1:10 verwendet werden. Das bedeutet, dass der Grauwert durch die Probe etwa 10 % des Weißwertes betragen sollte (beide gemessen in Bezug auf den Schwarzwert). Der optimale Bereich kann durch die Anwendung von Vorfiltern erreicht werden. Es sollte beachtet werden, dass jedes Vorfilter die Intensität verringert. Vorfilter haben den zusätzlichen Vorteil, die Strahlenaufhärtung zu verringern, obwohl weitere Verbesserungen durch Softwarekorrektur erfolgen können.

4.2.4 Detektor

Die folgenden Detektoreinstellungen müssen entsprechend der abzutastenden Probe eingestellt werden:

- Belichtungszeit (Messfrequenz);
- Anzahl der Integrationen je Projektion;
- Verstärkung und Untergrund bei der Digitalisierung;
- Zusammenfassung von Pixeln/Voxeln (Binning).

Falls notwendig, sollten Untergrundkorrektur, Verstärkungskorrektur und Korrektur fehlerhafter Pixel (die von den Einstellungen für die Röntgenstrahlung abhängen können) angewendet werden.

Die einzelne CT-Projektion wird durch die Detektoreigenschaften bestimmt: seine geometrische Auflösung, Empfindlichkeit, Dynamik und Rauschen. Die Verstärkung und Belichtungszeit können zusammen mit der Strahlungsintensität der Strahlenquelle so angepasst werden, dass die maximale digitalisierte Intensität 90 % des Sättigungspegels nicht überschreitet.

Zur Verringerung der Streustrahlung können direkt vor dem Detektor ein dünnes Filter, Raster oder Lamellen angewendet werden (Nachfilterung).

Die ideale Erfassungszeit hängt von der geforderten Güte des CT-Bildes ab und ist oft durch die für die Untersuchung zur Verfügung stehende Zeit begrenzt.

4.3 Rekonstruktionsparameter

Der zu rekonstruierende Volumenbereich, die Größe des CT-Bildes (bezogen auf Voxel) sowie der zugehörige dynamische Bereich (bei dem der dynamische Bereich des Detektors berücksichtigt werden sollte) müssen festgelegt werden. Um eine hinreichende Güte des CT-Bildes zu erreichen, sollten die Einstellungen für den Bildberechnungsalgorithmus oder die Korrekturen optimiert werden.

Der Volumenbereich wird durch die Anzahl der Voxel entlang der X-, Y- und Z-Achsen definiert.

4.4 Darstellung

Bei Anwendung der Volumendarstellung kann ein CT-Bild als ein 3D-Objekt dargestellt werden. Einzelnen Grauwerten können bestimmte Farb- oder Opazitätswerte zugeordnet werden, um Materialien mit unterschiedlicher röntgenografischer Dichte hervorzuheben oder auszublenden. Bildvergrößerung, Verschieben (Rollern), Abstimmen von Kontrast, Helligkeit, Farbe und Beleuchtung ermöglichen eine optimale Darstellung des CT-Bildes. Außerdem ist es möglich, vom Anwender festgelegte Schnittebenen durch den Prüfgegenstand zu legen, um die innere Struktur zu untersuchen, oder das CT-Bild interaktiv darzustellen, zum Beispiel durch Drehen und Bewegen des Bildes wie ein 3D-Objekt. Bildverarbeitung kann bei CT-Bildern angewendet werden, um die Detailerkennung zu verbessern.

Es ist eventuell nicht möglich, das gesamte CT-Bild bei voller Auflösung auf einmal in den Speicher zu laden.

4.5 Analyse und Auswertung von CT-Bildern

4.5.1 Allgemeines

Typische Details für die Untersuchung sind Poren, Hohlräume, Risse, Einschlüsse, Verunreinigungen oder inhomogene Materialverteilungen.

Typische Messaufgaben bestehen in der Ermittlung von Maßangaben (wie z. B. Länge oder Wanddicke) oder in der Berechnung der Objektmorphologie.