

	DIN EN ISO 15708-3	
ICS 19.100	<div>Entwurf</div>	Einsprüche bis 2024-06-19 Vorgesehen als Ersatz für DIN EN ISO 15708-3:2019-09
<p>Zerstörungsfreie Prüfung – Durchstrahlungsverfahren für Computertomographie – Teil 3: Durchführung und Auswertung (ISO/DIS 15708-3:2024); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 15708-3:2024</p> <p>Non-destructive testing – Radiation methods for computed tomography – Part 3: Operation and interpretation (ISO/DIS 15708-3:2024); German and English version prEN ISO 15708-3:2024</p> <p>Essais non destructifs – Méthodes par rayonnements pour la tomographie informatisée – Partie 3: Fonctionnement et interprétation (ISO/DIS 15708-3:2024); Version allemande et anglaise prEN ISO 15708-3:2024</p> <p>Anwendungswarnvermerk</p> <p>Dieser Entwurf mit Erscheinungsdatum 2024-04-19 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.</p> <p>Weil das beabsichtigte Dokument von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.</p> <p>Stellungnahmen werden erbeten</p> <ul style="list-style-type: none">– 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 oder Am DIN-Platz, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin. <p>Es wird gebeten, mit den Kommentaren zu diesem Entwurf jegliche relevanten Patentrechte, die bekannt sind, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.</p> <p>Gesamtumfang 59 Seiten</p> <p>DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)</p>		

Nationales Vorwort

Das Dokument prEN ISO 15708-3:2024 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 nationale Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss 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.

DIN EN ISO 15708 besteht unter dem allgemeinen Titel *Zerstörungsfreie Prüfung–Durchstrahlungsverfahren für Computertomographie* aus den folgenden Teilen:

- Teil 1: Terminologie
- Teil 2: Grundlagen, Geräte und Proben
- Teil 3: Durchführung und Auswertung
- Teil 4: Qualifizierung

Für die in diesem Dokument zitierten Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 15708-1:2024	siehe	DIN EN ISO 15708-1:2019-09
ISO 15708-2:2024	siehe	DIN EN ISO 15708-2:2019-09
ISO 15708-4:2024	siehe	DIN EN ISO 15708-4:2019-09

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN EN ISO 15708-3:2019-09 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Hinzufügung von ISO 15708-4:2024 zu Abschnitt 2;
- b) Einfügung der Anmerkung in 5.1.4 in den normativen Text;
- c) Korrektur des Titels von Bild 5;
- d) Korrektur und Verschiebung der Diskussion über elektronische und mechanische Nichtlinearitäten und Instabilitäten von 5.5.4 nach 5.5.5;
- e) Korrektur der Definitionen N_C und N_A in Gleichung (A.1);
- f) Korrektur der Definitionen σ in Gleichung (A.2);
- g) redaktionelle Änderungen.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN ISO 15708-1:2019-09, *Zerstörungsfreie Prüfung — Durchstrahlungsverfahren für Computertomographie — Teil 1: Terminologie (ISO 15708-1:2017)*

DIN EN ISO 15708-2:2019-09, *Zerstörungsfreie Prüfung — Durchstrahlungsverfahren für Computertomographie — Teil 2: Grundlagen, Geräte und Proben (ISO 15708-2:2017)*

DIN EN ISO 15708-4:2019-09, *Zerstörungsfreie Prüfung — Durchstrahlungsverfahren für Computertomographie — Teil 4: Qualifizierung (ISO 15708-4:2017)*

– Leerseite –

April 2024

prEN ISO 15708-3

**Zerstörungsfreie Prüfung – Durchstrahlungsverfahren für Computertomographie –
Teil 3: Durchführung und Auswertung (ISO/DIS 15708-3:2024)**

Non-destructive testing – Radiation methods for computed tomography – Part 3: Operation and interpretation
(ISO/DIS 15708-3:2024)

Essais non destructifs – Méthodes par rayonnements pour la tomographie informatisée – Partie 3: Fonction-
nement et interprétation (ISO/DIS 15708-3:2024)

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Vorwort	5
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Verfahrensweise zur Durchführung	7
4.1 Allgemeines	7
4.2 Aufbau des CT-Systems	7
4.2.1 Allgemeines	7
4.2.2 Geometrie	8
4.2.3 Röntgenstrahlenquelle	9
4.2.4 Detektor	9
4.3 Rekonstruktionsparameter	9
4.4 Darstellung	9
4.5 Analyse und Auswertung von CT-Daten	10
4.5.1 Allgemeines	10
4.5.2 Detailprüfung/Fehlerprüfung	10
4.5.3 Maßprüfung	10
5 Anforderungen an zulässige Ergebnisse	13
5.1 Parameter der Bildgüte	13
5.1.1 Kontrast	13
5.1.2 Rauschen	15
5.1.3 Signal-Rausch-Verhältnis	16
5.1.4 Kontrast-Rausch-Verhältnis	16
5.1.5 Räumliche Auflösung	17
5.2 Eignung der Prüfung	19
5.3 Auswertung und Annahmekriterien der CT-Untersuchung	19
5.4 Aufzeichnungen und Berichte	20
5.5 Artefakte	20
5.5.1 Allgemeines	20
5.5.2 Strahlaufhärtingsartefakte	21
5.5.3 Kantenartefakte	21
5.5.4 Streustrahlung	22
5.5.5 Instabilitäten	22
5.5.6 Ringartefakte	23
5.5.7 Artefakte durch Abweichen des Rotationszentrums	23
5.5.8 Bewegungsartefakte	24
5.5.9 Artefakte durch eine unzureichende Anzahl von Projektionen	24
5.5.10 Kegelstrahlartefakte	25
Anhang A (informativ) Messung der räumlichen Auflösung mit Linienpaar-Messschablonen	26
A.1 Linienpaar-Messschablonen	26
A.2 Messprinzip	27
Literaturhinweise	29

Bilder

Bild 1 — Vergleichsobjekte (Hanteln unterschiedlicher Größe)	11
Bild 2 — $\Delta\mu$ als Funktion der Röntgenstrahlenenergie	14
Bild 3 — Bildliche Darstellung des Kontrastes eines Details $\Delta\mu$	15

Bild 4 — CT-Grauwertverteilung in Material und Hintergrund	17
Bild 5 — Verfahren zum Erhalt der Modulationsübertragungsfunktion (MTF) aus dem Querschnitt eines homogenen Zylinders	19
Bild 6 — Beispiel für einen Cupping-Artefakt [1]	21
Bild 7 — Dunkle Streifen zwischen kontrastreichen Kanten aufgrund von Kantenartefakten [1] .	22
Bild 8 — Ringartefakte [1]	23
Bild 9 — Artefakte durch Abweichen des Rotationszentrums [1]	24
Bild 10 — Bewegungsartefakte [1]	24
Bild 11 — Artefakte durch eine unzureichende Anzahl von Projektionen [1]	25
Bild 12 — Kegelstrahlartefakte in einem Stapel von Scheiben [1]	25
Bild A.1 — Beispiel für Vergleichsobjekte zur Messung der räumlichen Auflösung, hergestellt aus unterschiedlichen Materialien (von links nach rechts Aluminium, Plexiglas und Stahl) .	27
Bild A.2 — Messprinzip für den Ansprechfaktor unter Anwendung von Linienpaar-Messschablonen	27

Tabellen

Tabelle 1 — Parameter, deren Aufzeichnung zweckmäßig ist	20
Tabelle A.1 — Korrelation zwischen den Öffnungsgrößen und deren Äquivalenz in Linienpaaren je Zentimeter	26

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 15708-3:2024) 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.

Dieses Dokument wird EN ISO 15708-3:2019 ersetzen.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Liste dieser Institute ist auf den Internetseiten von CEN abrufbar.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO/DIS 15708-3:2024 wurde von CEN als prEN ISO 15708-3:2024 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsinstitute (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO 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 staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Normungsthemen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) 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. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

ISO weist auf die Möglichkeit hin, dass die Anwendung dieses Dokuments mit der Verwendung eines oder mehrerer Patente verbunden sein kann. ISO bezieht jedoch in dieser Hinsicht keinerlei Stellung bezüglich Nachweis, Gültigkeit oder Anwendbarkeit jeglicher beanspruchten Patentrechte. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Dokuments lag ISO keine Mitteilung über ein Patent bzw. mehrere Patente vor, welche/s zur Umsetzung dieses Dokuments erforderlich sein könnte/n. Anwender werden jedoch darauf hingewiesen, dass dies möglicherweise nicht der aktuelle Informationsstand ist. Dieser kann jedoch der Patentdatenbank unter www.iso.org/patents entnommen werden. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Für eine Erläuterung des freiwilligen Charakters von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO, en: World Trade Organization) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT, en: Technical Barriers to Trade) berücksichtigt, siehe www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument wurde vom Europäischen technischen Komitee CEN/TC 138, *Zerstörungsfreie Prüfung*, erarbeitet und mithilfe eines speziellen „Schnellverfahrens“ vom Technischen Komitee ISO/TC 135, *Non-destructive testing*, Unterkomitee SC 5, *Radiographic testing*, angenommen.

Diese zweite Ausgabe ersetzt die erste Ausgabe (ISO 15708-3:2017), die technisch überarbeitet wurde.

Die wesentlichen Änderungen sind folgende:

- Ergänzung von ISO 15708-4:2024 zu Abschnitt 2;
- Aufnahme der Anmerkung in 5.1.4 im normativen Text;
- Korrektur des Titels von Bild 5;
- Korrektur und Verschiebung der Erörterung zu elektronischen und mechanischen Nichtlinearitäten und Instabilitäten von 5.5.4 zu 5.5.5;
- Korrektur der Definitionen für N_C und N_A in Gleichung (A.1);
- Korrektur der Definitionen für σ in Gleichung (A.2);

E DIN EN ISO 15708-3:2024-05
prEN ISO 15708-3:2024 (D)

— redaktionelle Änderungen.

Eine Auflistung aller Teile der Normenreihe ISO 15708 ist auf der ISO-Internetseite abrufbar.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Auflistung dieser Institute ist unter www.iso.org/members.html zu finden.

1 Anwendungsbereich

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

Dieses Dokument gilt für die *industrielle* Bildgebung (d. h. nicht medizinische Anwendungen) und enthält einen einheitlichen Satz von Festlegungen zu CT-Leistungsparametern sowie auch den Zusammenhang dieser Leistungsparameter mit den Spezifikationen des CT-Systems.

Dieses Dokument befasst sich mit der axialen Computertomographie und schließt weitere Arten der Tomographie, wie z. B. Translationstomographie und Tomosynthese, aus.

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).

ISO 15708-1:2024, *Non-destructive testing — Radiation methods for computed tomography — Part 1: Terminology*

ISO 15708-2:2024, *Non-destructive testing — Radiation methods for computed tomography — Part 2: Principle, equipment and samples*

ISO 15708-4:2024, *Nondestructive testing — Radiation methods for computed tomography — Part 4: Qualification*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO 15708-1.

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

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

4 Verfahrensweise zur Durchführung

4.1 Allgemeines

Bei zielgerichteten Untersuchungsverfahren mittels zerstörungsfreier Prüfungen mit Computertomographie (CT) werden die Prüf- und Messaufgaben im Voraus unter Berücksichtigung der Größe und Art der zu verifizierenden Details/Fehler festgelegt, z. B. durch Festlegung 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 beruht auf den Anforderungen der entsprechenden 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 Systemparameter beschrieben und Informationen zur Einstellung eines CT-Systems für die Untersuchung mittels zerstörungsfreier Prüfungen angegeben. Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Systemparametern kann es notwendig sein, die Einrichtungsschritte mehrmals zu durchlaufen, um optimale Daten zu erfassen.

Die optimale Energie ist jene, die das beste Signal-Rausch-Verhältnis ergibt, und nicht zwangsläufig jene, die zum deutlichsten Durchstrahlungsbild führt (die Abhängigkeit der Detektoreffizienz von der Energie muss berücksichtigt werden). 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. Um hohe räumliche Auflösungen zu erhalten, wird die Projektion des Prüfgegenstands auf den Detektor vergrößert. Die Vergrößerung ist gleich dem Verhältnis des Abstandes Strahlenquelle/Detektor zum Abstand Strahlenquelle/Prüfgegenstand. Eine Zunahme des Abstandes Strahlenquelle/Detektor führt zu einer verringerten Strahlungsintensität am Detektor und somit zu einem reduzierten Signal-Rausch-Verhältnis. Dies gilt folglich auch bei der Anwendung von Detektoren mit verbesserter Detektorauflösung, die aufgrund der verringerten Bestrahlungsdosis je Pixel zu einer Reduzierung des Signal-Rausch-Verhältnisses führt. Deshalb wird im Allgemeinen die Minimierung des Abstandes Strahlenquelle/Prüfgegenstand empfohlen.

Um eine hohe Strahlungsintensität am Detektor zu erreichen, sollte der Abstand Strahlenquelle/Detektor unter Berücksichtigung der erforderlichen räumlichen Auflösung so gewählt werden, dass er möglichst klein ist, so dass der Röntgenstrahlenkegel den Detektor dennoch vollständig ausleuchtet. Um derartige rekonstruktionsbedingte Verzeichnungen des 3D-Modells („Feldkamp-Algorithmus [2]“) zu minimieren, sollte im Fall von 3D-CT der (im Allgemeinen vertikale) Gesamtkegelstrahlwinkel parallel zur Rotationsachse üblicherweise weniger als 15° betragen. Außerdem gelten diese Einschränkungen nicht für den senkrechten (im Allgemeinen horizontalen) Strahlwinkel. Bei einer stärkeren geometrischen Vergrößerung muss der Prüfgegenstand möglichst nah an der Strahlenquelle angeordnet werden, wobei die durch die Brennfleckgröße der Röntgenstrahlenquelle bedingte Einschränkung der geometrischen Schärfe zu berücksichtigen ist. Der Prüfgegenstand muss um mindestens 180° zuzüglich des Röntgenstrahlwinkels gedreht werden, wodurch die Datenqualität aufgrund eines größeren Drehwinkels verbessert wird. Aus diesem Grund wird der Prüfgegenstand üblicherweise um 360° gedreht. Die Anzahl von Winkelinkrementen sollte idealerweise mindestens $\pi/2 \times \text{Matrizengröße}$ (ungerade Anzahl von Projektionen je 360°) betragen, wobei die Matrizengröße die Anzahl der Voxel über den Proben-durchmesser oder das größte Maß ist. Weitere Informationen siehe 5.5.

Für die beste Rekonstruktionsqualität sollte die Anzahl der Projektionen $> (\pi \times \text{Matrizengröße})$ betragen (Anzahl von Projektionen je 360°).

Um möglichst vollständige Informationen über den Probekörper zu erhalten, muss der Prüfgegenstand (oder der interessierende Ausschnitt des Prüfgegenstandes) in jeder Projektion vollständig dem Detektor abgebildet werden. Bei großen Bauteilen, die über den Röntgenstrahlenkegel hinausreichen, wird eine sogenannte Messbereichserweiterung angewendet. Diese Erweiterung des Messbereichs wird durch laterale Verschiebung entweder des Prüfgegenstandes oder des Detektors erreicht, wobei die Projektionsdaten der aufeinander folgenden Messungen aufgezeichnet und abschließend verknüpft (verbunden) werden. Unter bestimmten Umständen ist es auch möglich, lediglich einen Teil des Prüfgegenstandes abzutasten (CT des interessierenden Objektbereichs (ROI-CT, en: region-of-interest CT)), was zu einer begrenzten Datenqualität in Form von sogenannten Abschneidungen führt.

Eine mögliche Abweichung der Aufnahmegeometrie (Versatz zwischen der projizierten Rotationsachse und der Mittellinie des Projektionsbildes) muss korrigiert werden, um eine möglichst genaue Rekonstruktion zu

erhalten. Dies kann durch eine sorgfältige Ausrichtung des Systems oder durch Softwarekorrektur erreicht werden.

4.2.3 Röntgenstrahlenquelle

An der Röntgenstrahlenquelle müssen die maximale Energie des Röntgenstrahlenbündels und der Röhrenstrom so eingestellt werden, dass eine hinreichende Durchstrahlung des Prüfgegenstandes und die maximale Röhrenleistung mit einem hinreichend kleinen Brennfleck sichergestellt sind. Die erforderliche Spannung muss durch die maximale Weglänge in dem zu durchleuchtenden Material nach ISO 15708-2:2024, 8.2, bestimmt werden. Für optimale *SNR* der Messergebnisse sollte ein Schwächungsverhältnis von etwa 1 : 10 verwendet werden. Das bedeutet, dass der Grauwert nach der Probe etwa 10 % des Wertes des freien Strahls betragen sollte (beide gemessen in Bezug auf den Schwarzwert). Der optimale Bereich kann durch Verwendung von Vorfiltern an der Röhrenöffnung erreicht werden. Es sollte beachtet werden, dass jedes Vorfilter die Intensität verringert. Vorfilter haben den zusätzlichen Vorteil der Strahlenaufhärtung, durch die die Aufhärtingsartefakte nach der Rekonstruktion verringert werden, obschon weitere Verbesserungen durch Softwarekorrektur erfolgen können.

4.2.4 Detektor

Die folgenden Detektoreinstellungen müssen entsprechend der abzutastenden Probe eingestellt werden:

- Belichtungszeit (Bildrate);
- 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 jeweilige CT-Projektion wird durch die geometrische Auflösung, die Empfindlichkeit, die Dynamik und das Rauschen des Detektors bestimmt. Die Verstärkung und Belichtungszeit können zusammen je nach Strahlungsintensität der Strahlenquelle so angepasst werden, dass die maximale digitalisierte Intensität im freien Strahl 90 % des Sättigungspegels nicht überschreitet.

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

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

4.3 Rekonstruktionsparameter

Der zu rekonstruierende Volumenbereich, die Größe des CT-Volumens (bezogen auf Voxel) und 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 festgelegt.

4.4 Darstellung

Bei Anwendung der Volumendarstellung kann das rekonstruierte CT-Datenbild 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 (Rollen), Abstimmen von Kontrast, Helligkeit, Farbe und Beleuchtung ermöglichen eine optimale Darstellung des CT-Volumens. Außerdem ist es möglich, vom Anwender festgelegte Schnittebenen durch den Prüfgegenstand zu legen, um die innere Struktur zu untersuchen, oder das CT-Volumen interaktiv darzustellen, zum Beispiel durch Drehen und Bewegen des Bildes wie ein 3D-Objekt. Bildverarbeitung kann bei CT-Daten angewendet werden, um die Detailerkennung zu verbessern.

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

4.5 Analyse und Auswertung von CT-Daten

4.5.1 Allgemeines

Typische innenliegende 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.

4.5.2 Detailprüfung/Fehlerprüfung

Details innerhalb der Probe rufen im Allgemeinen Änderungen des CT-Grauwertes in den CT-Daten hervor. Die Analyse von CT-Daten erfolgt mit Software durch qualifiziertes Personal. Es wird ein geeigneter Kontrastumfang oder eine automatische oder manuelle Kalibrierung verwendet. Die Lage, der CT-Grauwert und die Maße von Details können bestimmt werden. Dazu stehen mehrere Geräte zur Verfügung, einschließlich manueller oder automatischer Werkzeuge, wie z. B. Messlinien (en: strobe lines) oder Schablonen (Lehren), die bei Grauwertgrenzen oder -kanten wirksam werden. Zur Untersuchung der Struktur und Lage von zusammengesetzten Bauteilen kann ein qualitativer Vergleich von CT-Volumina ohne Bestimmung der Maße hinreichend sein.

Bei der automatischen Bestimmung unter Anwendung der Werkzeuge einer Darstellungssoftware (z. B. zur Fehlerprüfung) ist im Allgemeinen für das zu messende Probenmaterial eine Kalibrierung mithilfe der Spezifikation eines Grauwertbereichs erforderlich. Die Grauwerte können manuell mit Histogrammen oder interaktiv festgelegt werden.

Die Erkennbarkeit von Details hängt von der Größe des Details bezogen auf die geometrische Auflösung und die Kontrastauflösung im Vergleich zum Kontrastunterschied des Details zum Basismaterial ab sowie von der Bildgüte (Signal-Rausch-Verhältnis usw.) und möglichen Interferenzeffekten zwischen angrenzenden Voxel (Teilvolumen-Effekt). Für die Erkennbarkeit einzelner Poren, Hohlräume oder Risse sollte deren Mindestgröße üblicherweise das Doppelte bis Dreifache der unvergrößerten Pixelgröße des Detektors (bei der Position der Probe) betragen.

4.5.3 Maßprüfung

4.5.3.1 Allgemeines

In Abhängigkeit von der bestehenden Aufgabenstellung werden derzeit verschiedene Verfahren zur Bestimmung geometrischer Merkmale angewendet. Punktabstände können in CT-Schichten manuell bestimmt werden; Informationen über komplexere Merkmale können mithilfe einer Analysesoftware gewonnen werden.

Die Messung der geometrischen Eigenschaften eines Prüfgegenstandes mit CT ist ein indirektes Verfahren, bei dem das dimensionelle Messen in CT-Daten erfolgt oder aus CT-Daten abgeleitet wird. Aus diesem Grund und um genaue Messungen zu ermöglichen, ist die genaue Kenntnis von zwei wichtigen Variablen erforderlich:

- des genauen Abbildungsmaßstabs oder der Voxelgröße und
- der Grenzfläche von zwei Materialien, zum Beispiel der Bauteiloberfläche (Übergang von Material zu Luft), die mithilfe einer CT-Grauwertgrenze im CT-Volumen bestimmt werden kann.

4.5.3.2 Bestimmung des genauen Abbildungsmaßstabs

Der genaue Abbildungsmaßstab oder die Voxelgröße muss durch Messung eines geeigneten Kalibriernormals (zusammen mit der Messung des Prüfgegenstandes und unmittelbar vor/nach der Prüfung des Prüfgegenstandes) oder unter Anwendung einer Vergleichsgeometrie am Prüfgegenstand bestimmt werden. Dazu wird die vom CT-System festgelegte Voxelgröße oder Vergrößerung M mit der tatsächlich verfügbaren und genau (unter Anwendung des Vergleichskörpers/der Vergleichsgeometrie) bestimmten Voxelgröße oder Vergrößerung M^* verglichen. Auf diese Weise kann zum Beispiel die genaue Voxelgröße mit hoher Präzision durch Messungen ohne den störenden Einfluss weiterer Variablen, z. B. der genauen Lage der Bauteiloberfläche (Grauwertgrenze) im CT-Volumen, für die Achsenabstände eines Prüfstücks (z. B. Hanteln, siehe Bild 1) bestimmt werden. Bei dieser Verfahrensweise muss berücksichtigt werden, dass die CT-Grauwerte des Prüfgegenstandes durch die begleitenden Vergleichskörper (z. B. aufgrund von Änderungen der Kontrastverhältnisse, Interferenzen/Störeinflüsse und Artefakte) beeinflusst werden können. Ausgehend von den tatsächlichen, auf diese Weise bestimmten Voxelgrößen kann die Darstellungssoftware entsprechend auf die vom System festgelegte Voxelgröße maßstäblich angeglichen/korrigiert werden.

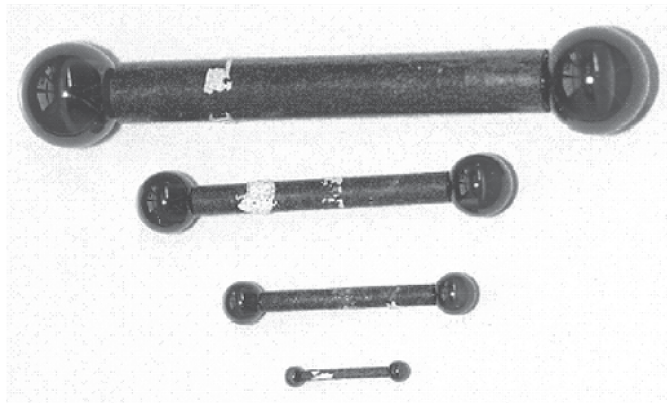


Bild 1 — Vergleichsobjekte (Hanteln unterschiedlicher Größe)

4.5.3.3 Bestimmung des Schwellenwertes

Zur Durchführung des dimensionellen Messens muss die Bauteiloberfläche oder Materialkontaktfläche im CT-Volumen bestimmt werden. Die Bauteiloberfläche ergibt sich üblicherweise aus dem Übergang von einem festen Prüfgegenstand zur umgebenden Luft. Die Grenzfläche wird über einen Schwellenwert festgelegt und ist somit abhängig von den Materialien und den Einstellungen für die Röntgenstrahlung. Dieser Schwellenwert kann global für das gesamte CT-Volumen als gemittelter Grauwert z. B. von Material und Luft festgelegt werden. Dies wird mitunter als „ISO50-Schwellenwert“ bezeichnet (aus dem Griechischen; „isos“ bedeutet „gleich“). Ein globaler Schwellenwert oder eine Kalibrierung nach dem ISO50-Schwellenwert ist für viele Messaufgaben bei Prüfgegenständen geeignet, die aus homogenen Materialien bestehen.

Ein globaler Schwellenwert ist für Prüfgegenstände, die aus unterschiedlichen Materialien bestehen, nicht geeignet. In derartigen Fällen müssen verschiedene Schwellenwerte entsprechend den Materialien auf beiden Seiten der Materialgrenze angewendet werden. Selbst bei Prüfgegenständen, die aus homogenen Materialien hergestellt sind, können Strahlenaufhärtung, Streuung und weitere Artefakte zu örtlichen Abdunkelungen oder Aufhellungen im CT-Volumen führen, was zu einer Verzerrung der Messergebnisse führen würde. Die Grauwertschwelle, z. B. für Flächen innerhalb des Bauteils, unterscheidet sich deshalb häufig von jener für Oberflächen an der Außenseite des Bauteils. Falls notwendig, kann der Schwellenwert lokal aus den Grauwerten zu beiden Seiten der Materialgrenze ermittelt werden. Eine Bestimmung der Gesamtoberfläche eines Bauteils mithilfe der lokal bestimmten Schwellenwerte ist toleranter gegenüber Kontraständerungen und Artefakteinflüssen, jedoch auch zeitaufwändiger.

4.5.3.4 Anpassung geometrisch einfacher Körper

Zusätzlich zu den einfachen Einzelpunkt-Arbeitsschritten (siehe 4.5.3) können auch Verfahren aus der Koordinatenmesstechnik, wie z. B. Anpassung an die Vergleichsgeometrie, angewendet werden. Dabei werden sogenannte geometrisch einfache Körper oder Vergleichselemente (z. B. Ebenen, Zylinder, Kugeln usw.) mit einer Software an die interessierenden Konturen des Prüfgegenstandes innerhalb der entsprechend kalibrierten Daten angepasst. Bei den Vergleichselementen werden die geometrischen Merkmale (z. B. Durchmesser, Abstände, Winkel usw.) direkt oder durch die Kombination von Vergleichselementen bestimmt. Aufgrund der statistischen Mittelwertbildung und der Verringerung des Einflusses des Anwenders führt die Anpassung dieser Elemente an die üblicherweise mehreren Tausend Messpunkte der entsprechenden Daten häufig zu einer deutlich höheren Präzision als anhand der manuellen Messung des Abstandes zweier Punkte.

4.5.3.5 Erzeugung geometrischer Daten

Aus den Voxeln und der kalibrierten Grauwertschwelle können sogenannte Dreiecksmodelle gewonnen werden. Diese Modelle stellen die ISO50-Oberfläche mit kalibriertem Schwellenwert dar, d. h. die Materialoberfläche in Form von vernetzten Dreiecken. Das Dreiecksmodell enthält – als Teil der Präzision des Ableitungsprozesses (siehe nachstehend) – die geometrische Information über die Oberfläche des Prüfgegenstandes. Sie besteht nur aus zwei Arten von Informationen: den sogenannten Eckpunkten (Knoten) und der Information, welche Eckpunkte zu einem Dreieck gehören. Die Eckpunkte sind 3D-Punkte, die auf der Schwellenwert-ISO50-Oberfläche liegen. Die Menge aller Eckpunkte wird auch als Punktwolke bezeichnet. Sie ist am Anfang die verbindende Information, d. h. die Information, welche drei Eckpunkte ein Dreieck bilden, das den Verlauf der Oberfläche des Prüfgegenstandes bestimmt.

Ein Standardformat für den Datenaustausch ist das sogenannte STL-Dateiformat (ASCII oder binär und dimensionslos). Alternativ kann die Punktwolke (Eckpunkte ohne Dreieckinformation) exportiert werden, wobei wichtige Informationen über angrenzende Eckpunkte üblicherweise verloren gehen, und, falls erforderlich, anschließend reproduziert werden sollten.

Die geometrische Qualität der erzeugte Punktwolke oder des Dreiecksmodells hängt lediglich von der Anzahl und Lage der Eckpunkte ab. Da im Dreiecksmodell nur Dreiecke zwischen den Eckpunkten angenommen werden, werden detaillierte Oberflächenstrukturen, die in den Voxeln zwischen den einzelnen Eckpunkten enthalten sind, nicht dargestellt und gehen folglich verloren.

Die Gewinnung einer Punktwolke oder eines Dreiecksmodells aus den Voxeln entspricht einer Abtastung der Oberfläche des Prüfgegenstandes. Die Datenmenge sollte im Allgemeinen zur weiteren Verarbeitung reduziert werden. Die Qualität oder geometrische Präzision des Dreiecksmodells hängt davon ab, wie gut die Dreiecke den tatsächlichen Verlauf der Materialoberfläche reproduzieren können (z. B. Sehnenfehler). Zur Reduzierung der Anzahl an Dreiecken mit minimalem Verlust werden spezielle Software-Anwendungen eingesetzt.

Für jeden dieser Prozessschritte gilt, dass die zugehörigen Verluste bei den nachfolgenden Schritten berücksichtigt werden sollen. Aufgrund der speziellen Prozessbedingungen muss die Qualität der Maßangaben auf Plausibilität und Signifikanz geprüft werden.

4.5.3.6 Soll-Ist-Vergleich

Eine CT-Anwendung für die Maßbestimmung ist der Vergleich des untersuchten Teils (tatsächlichen Prüfgegenstandes) mit der Nenngeometrie aus dem computergestützten Entwurf (CAD) (oder anderen Quellen). Nach der Ausrichtung (Registrierung) des CT-Koordinatensystems in dem CAD-Koordinatensystem ist es möglich, mit geeigneter Software die geometrische Abweichung des mit CT gemessenen tatsächlichen Teils von der CAD-Spezifikation der Nenngeometrie zu vergleichen. Der Soll-Ist-Vergleich kann zwischen dem exportierten STL-Modell oder der Punktwolke der Voxel und den CAD-Daten oder durch direkten Vergleich der Voxel mit den CAD-Daten ohne vorherige Gewinnung von STL oder der Punktwolke erfolgen.

4.5.3.7 Weiterverarbeitung von geometrischen Daten

CT kann auch für die zerstörungsfreie Bestimmung geometrischer Daten (Reverse Engineering), z. B. von Bauteil-Prototypen oder nachfolgenden Bauteilen, eingesetzt werden.

CAD-Modelle basieren üblicherweise nicht auf Dreiecksmodellen, sondern eher auf geometrisch einfachen Körpern (z. B. Zylinder) und sogenannten Freiformflächen. Aus diesem Grund ist eine Weiterverarbeitung der geometrischen Daten in CAD-Systemen, zum Beispiel die Konstruktion der aus den Voxeln bestimmten Oberfläche in einem mit CAD erstellten Modell, erforderlich. Mit geeigneter Software können Dreiecksmodelle in CAD-kompatible Elemente überführt werden (sogenanntes Reverse Engineering), wobei mit CT untersuchte Prüfgegenstände, d. h. reale Geometrien, wieder in den CAD-Prozess einbezogen werden können.

5 Anforderungen an zulässige Ergebnisse

5.1 Parameter der Bildgüte

5.1.1 Kontrast

Die während der Röntgen-CT-Bildgebung rekonstruierte Größe ist der lineare Schwächungskoeffizient μ . Er wird als Kehrwert der Längeneinheit gemessen (z. B. mm^{-1}) und ist annähernd proportional zur Elektronendichte des Materials. Um unterscheidbar zu sein, muss ein Detail einen linearen Schwächungskoeffizienten μ_f haben, der sich ausreichend von dem linearen Schwächungskoeffizienten des Hintergrundmaterials μ_b unterscheidet.

Lineare Schwächungskoeffizienten sind Funktionen der Energie des einfallenden Röntgenstrahls. Zur Vereinfachung dieser Betrachtungen wird angenommen, dass Röntgenstrahlen eine einzige Energie E aufweisen, oder es wird von einem Näherungswert in Form einer bestimmten mittleren Energie $\bar{E}$ ausgegangen, wenn ein Energiespektrum Anwendung findet. Ist dieses nicht bekannt, wird der praktischen Erfahrung entsprechend von einem Drittel der Beschleunigungsspannung ausgegangen, wenn der Prüfgegenstand leicht abschwächend wirkt, oder von $2/3$, wenn der Prüfgegenstand stark abschwächend wirkt.

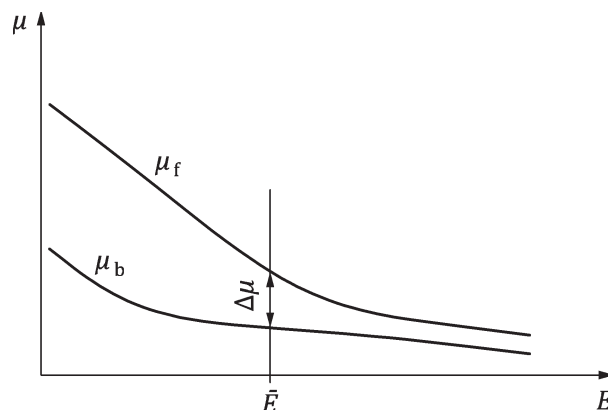
In Bild 2 ist die funktionale Energieabhängigkeit der linearen Schwächungskoeffizienten für Röntgenstrahlen von zwei hypothetischen Materialien, μ_b und μ_f , dargestellt. $\Delta\mu$ ist der Schwächungsunterschied für diese beiden Materialien, der mit Gleichung (1) berechnet wird:

$$\Delta\mu = |\mu_b - \mu_f| \quad (1)$$

Der Kontrast in der CT ist als prozentualer Unterschied eines Details vom Hintergrundmaterial festgelegt und wird mit Gleichung (2) berechnet.

$$\text{Kontrast: } \Delta\mu(\%) = \frac{|\mu_b - \mu_f|}{\mu_b} \times 100 \quad (2)$$

Bei dieser Definition des Kontrastes wird davon ausgegangen, dass das betreffende Detail sich über die gesamte Dicke der CT-Schicht erstreckt. Wenn das Detail eine Dicke h_f hat, jedoch mit einer Schicht mit einer größeren Dicke h_s aufgenommen wird, wird der Kontrast zusätzlich um den Faktor h_f/h_s reduziert, was Teilvolumen-Effekt genannt wird.



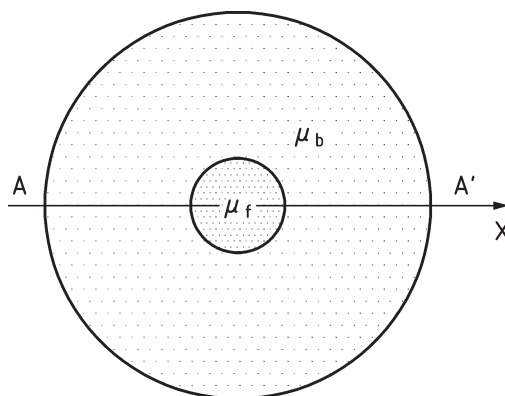
Legende

- E Energie der Röntgenstrahlen, in keV
- $\bar{E}$ mittlere Energie der Röntgenstrahlen, in keV
- μ linearer Schwächungskoeffizient, in mm^{-1}
- μ_b, μ_f linearer Schwächungskoeffizient des Hintergrundes und des Details
- $\Delta\mu$ Unterschied der Dämpfung zwischen Hintergrund und Detail

Bild 2 — $\Delta\mu$ als Funktion der Röntgenstrahlenergie

Dieser Unterschied $\Delta\mu$ und somit der Kontrast hängt in hohem Maße von der Röntgenstrahlenergie ab, die deshalb ein wichtiger Parameter ist. Die Auswahl einer niedrigeren Energie maximiert den Kontrast, wirkt sich jedoch nachteilig auf eine gute Erkennbarkeit aus (Verschlechterung des Signal-Rausch-Verhältnisses). Der optimale Kompromiss hängt eindeutig in großem Maße von der konkreten Anwendung ab.

Wenn das CT-System keine Verschlechterung einbringt, würde ein Profil durch das Zentrum des in Bild 3 a) dargestellten Prüfgegenstandes (ein auf einem Hintergrund zentriertes Detail) die in Bild 3 b) dargestellte genau festgelegte Form aufweisen.



- a) CT-Schicht eines Elements, dessen Schwächungskoeffizient μ_f ist, eingeschlossen in ein Hintergrundelement mit dem Schwächungskoeffizienten μ_b