

Detailerkennbarkeit nach ASTM E 1441 im Anwendungsfall

Florian WOHLGEMUTH¹, Daniel SORKALLA¹, Noah WÖRLE¹, Michael JELINEK¹,
Michael FRIEB¹, Christian ABT¹
¹ HEITEC PTS GmbH, Kuchen/Fils

Kontakt E-Mail: florian.wohlgemuth@heitec-pts.de

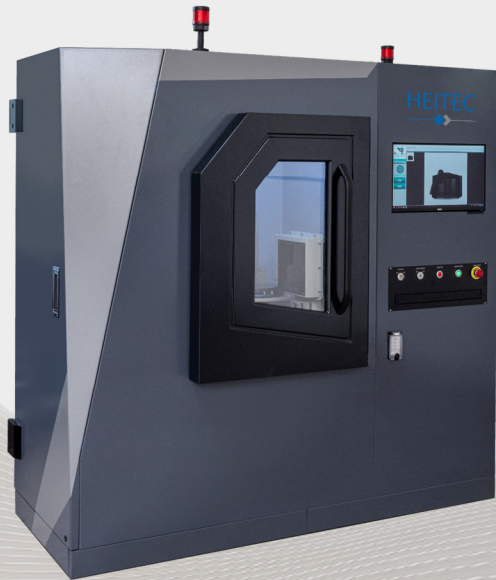
Kurzfassung

Die Messung der modulation transfer function (MTF) sowie der contrast discrimination function (CDF) nach der Richtlinie ASTM E 1695 erlauben nicht nur den Vergleich verschiedener Computertomographie (CT)-Systeme oder -Systemeinstellungen, sondern nach Richtlinie ASTM E 1441 auch die Berechnung des Contrast-Detail-Diagramm (CDD). Das CDD ermöglicht, abhängig vom lokalen Grauwertkontrast eines Defektes, eine Aussage über die größenabhängige Defekterkennbarkeit im Messvolumen und ist damit eine attraktive Vorhersagemöglichkeit für jegliche Anwendungsfälle der CT im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung. Nach unserem Kenntnisstand existieren jedoch momentan noch wenige publizierte Studien zur Anwendung des CDD. Weiterhin enthält die Defekterkennbarkeitsgrenze nach der Richtlinie einen physiologischen Faktor c , dessen Wert mit 2-5 angegeben wird und somit eine gewisse Variabilität erzeugt.

In diesem Beitrag werden Messungen eines defektbehafteten Aluminium-Gussteils an einem HEITEC PTS GmbH „HeiDetect Valu“ CT-System vorgestellt, bei denen die Defekterkennbarkeit bei verschiedenen Systemeinstellungen mit dem bei diesen Einstellungen gemessenen CDD korreliert wird. Das „HeiDetect Valu“ CT-System der HEITEC PTS GmbH ist ein kostengünstiges und kompaktes Einsteigergerät, das perfekt für die Prüfung kleiner und mittelgroßer Aluminium- und Polymerbauteile geeignet ist und sowohl röntgencomputertomographische Aufnahmen als auch digitale Radiographie ermöglicht. Ziel der Studie ist es, die Anwendungstauglichkeit der ASTM E 1441-Richtlinie zu überprüfen und auf Komplikationen bei der Anwendung hinzuweisen. Dabei soll auch untersucht werden, inwiefern die durch den physiologischen Faktor c entstehende Variabilität Relevanz im Anwendungsfall besitzt.

Detailerkennbarkeit nach ASTM E 1441 im Anwendungsfall

FLORIAN WOHLGEMUTH, DANIEL SORKALLA, NOAH WÖRLE,
MICHAEL JELINEK, MICHAEL FRIEB, CHRISTIAN ABT



THEMENÜBERBLICK

- HEITEC PTS GmbH
- Motivation
- ASTM E 1695 / ASTM E 1441
- Anwendungsfall
- Ergebnisse
- Fazit

● HEITEC PTS



- Kernkompetenz in der industriellen Röntgentechnik, Robotik und Handhabungstechnik
- Schlüsselfertige Automationslösungen aus einer Hand
- 70 Mitarbeiter
- Circa 14 Millionen Euro Umsatz
- 3.500 m² Produktions- und Bürofläche
- Über 500 weltweit installierte Robotersysteme
- Fokussierung auf die Branchen:
 - Gießereien
 - Automotive

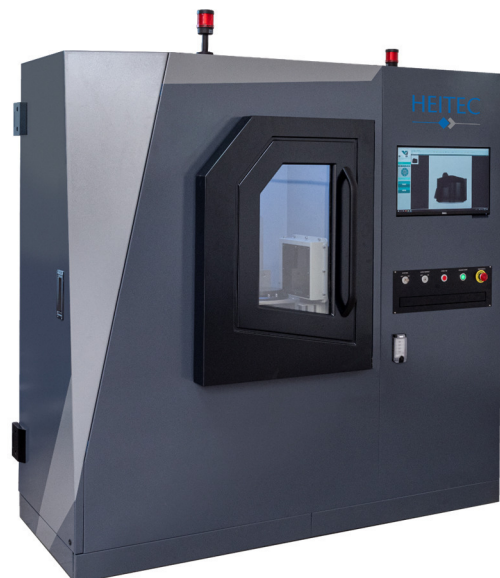
Motivation

HeiDetect Valu

- Kompaktes Laborsystem für CT und DR
- Einfache Bedienung → Keine Röntgenerfahrung notwendig
- Kleine/mittelgroße Polymer- & Alu-Bauteile

Kundenfrage:

- Was kann ich mit dem Gerät auflösen?
- Sehe ich meinen Defekt?
- Nach welcher Norm/Richtlinie bewerte ich Erkennbarkeit?



ASTM E 1441

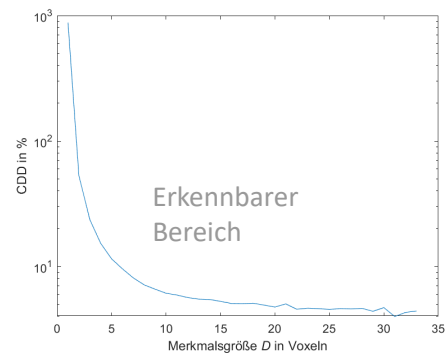
- „Contrast-Detail-Diagram“ CDD:

$$CDD(D) = c \cdot \frac{CDF(D)}{MTF(1/2D)}$$

- Mit Merkmalsgröße D in Voxeln und MTF , CDF nach ASTM E1695 und c einem physiologischen Faktor
- Abhängig u.a. von Material, Durchstrahlungsdicke und Messposition
- Defekte sind erkennbar falls:

$$\frac{|\mu_f - \mu_b|}{\mu_b} = \Delta\mu_f \geq CDD(D, c)$$

- Mit μ_f Grauwert des Defekts und μ_b Grauwert des Materials



ASTM E 1441

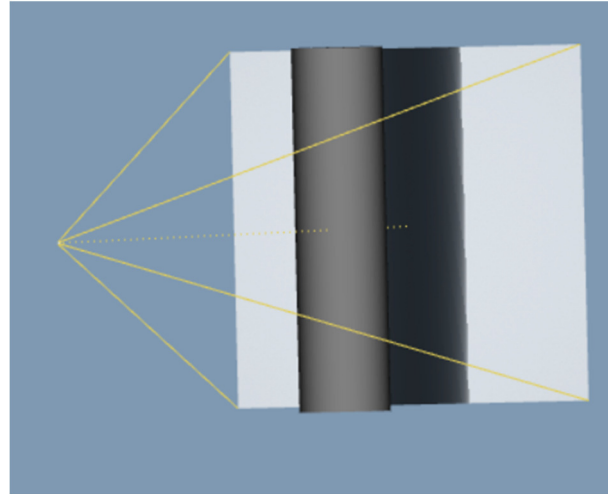
- Defekte sind erkennbar falls:

$$\frac{|\mu_f - \mu_b|}{\mu_b} = \Delta\mu_f \geq CDD(D, c)$$

- Komplikationen als Anwender
 - Wert für relativen Grauwertkontrast $\Delta\mu_f$?
 - Wert für physiologischen Faktor c ?
 - ASTM E 1441: Werte von 2-5; Ausmessen mit Bohrungsphantom
 - Zylinderdurchmesser: mindestens 250 Voxel und „approximates attenuation range“ (ASTM E 1695)
 - Bei großen, dünnwandigen Bauteilen z.T. schwierig

ASTM E 1695

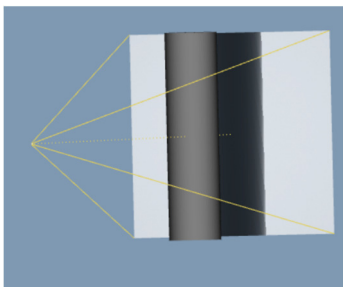
- E1441: $CDD(D) = c \cdot \frac{CDF(D)}{MTF(1/2D)}$
- *MTF*: „modulation transfer function“
 - MTF charakterisiert Volumen-Auflösung (Übertragungsfunktion)
- *CDF*: „contrast discrimination function“
 - CDF charakterisiert Einfluss des Grauwert-Rauschen auf Erkennbarkeit
- Bestimmung MTF und CDF material-, positions- und durchstrahlungslängenspezifisch
- Bestimmung durch Messung eines Vollzylinders



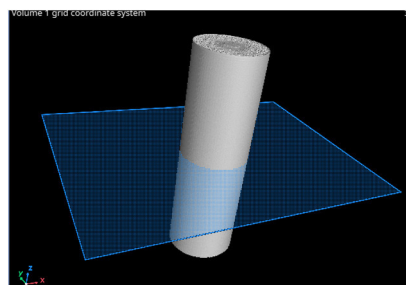
Messaufbau MTF/CDF-Messung:

Vollzylinder, zentral auf Detektor projiziert

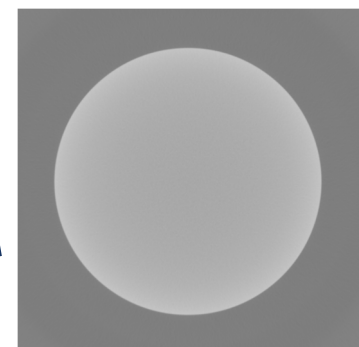
ASTM E 1695 – Verfahren CDF/MTF-Messung



CT-Messung

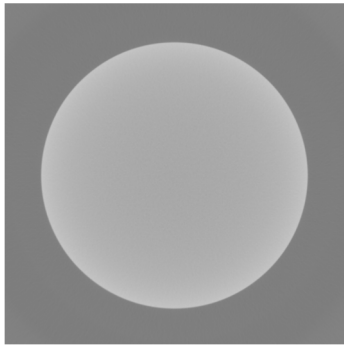


Rekonstruiertes Volumen

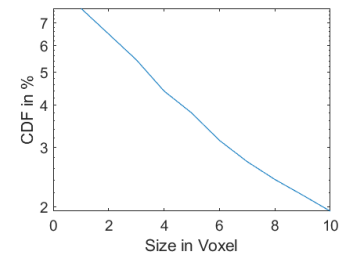


2D Slice

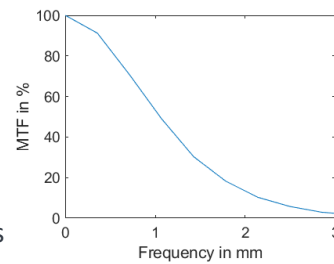
ASTM E 1695 – Verfahren CDF/MTF-Messung



➔ Rauschsampling im Inneren



➔ Kantensampling



➔ Unkompliziertes Verfahren, einfacher Prüfkörper ➔ attraktives Bestimmungsverfahren für praktische Anwender

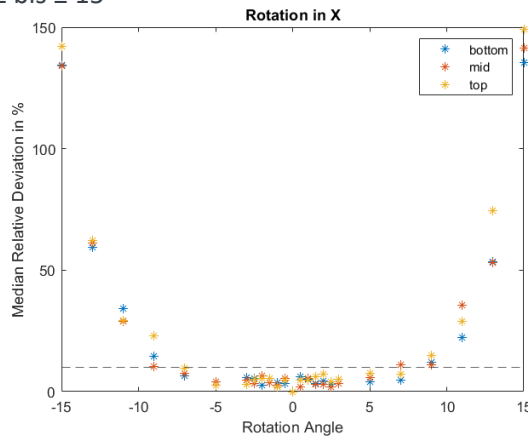
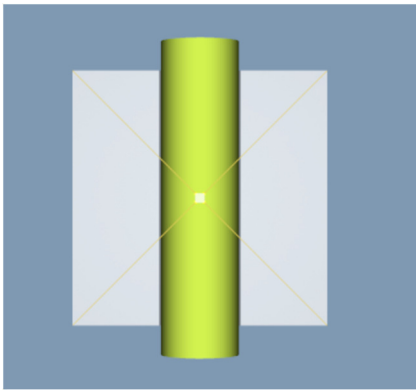
Plausibilitätschecks und Messungen für CDD-Verläufe der HeiDetect Valu

- aRTist-Simulationen zu Positionierpräzision
- Messungen an HeiDetect Valu mit Alu-Zylinder:
 - Zylinderradius 12.5 mm, 25.0 mm, 37.5 mm, 50.0 mm, 62.5 mm
 - 12.5 mm unterhalb 250 Voxel \varnothing
 - 3 Messeinstellungen (keine Streu- oder Strahlaufhärtungskorrektur)
 - Hohe Qualität
 - Mittlere Qualität
 - Niedrige Qualität
 - Niedrige Qualität: 5 Wiederholungen
 - Alle Messeinstellungen: bis zu 3 Messhöhen
- Folgende Folien: Schnelle Ergebniszusammenfassung



ASTM E 1695: Zylinder so parallel zur Rotationsachse, dass Messung nicht beeinflusst wird → simulative Vorstudie (BAM aRTist 2)

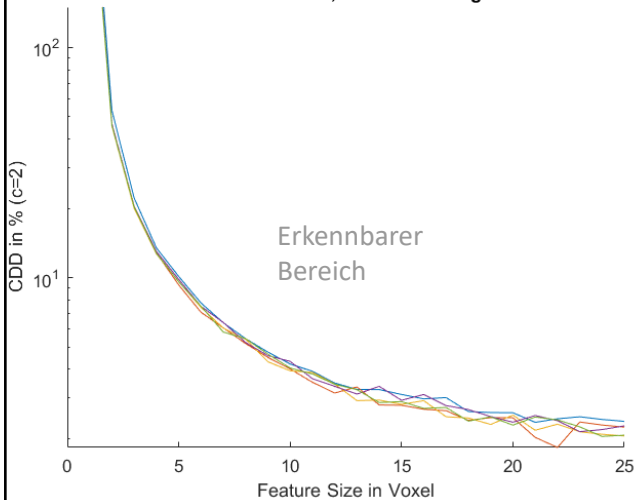
- Monochr. Strahlung, linearer Detektor, Projektions-SNR ca. 100 / 200
- Verkippung Zylinderachse um X/Z bis ± 15°



→ ± 3° geringer als Rauschen, selbst ca. ± 5° geringer als Unsicherheit der CDD nach E1695

- Ergebnisse Wiederholbarkeit – 5 Messungen bei Niedriger Messqualität

Radius 37.5 mm, 5 Wiederholungen

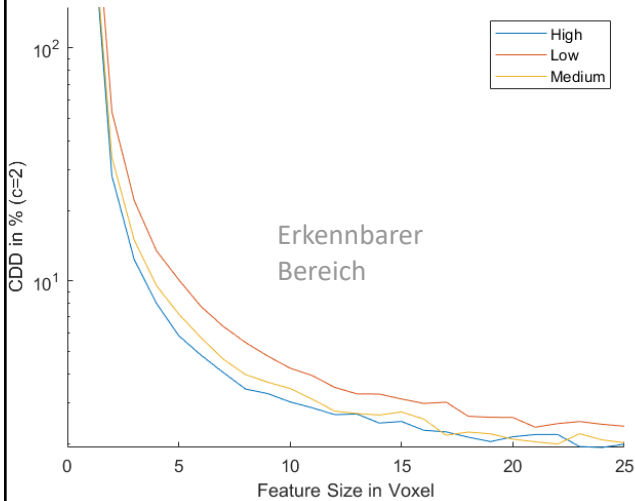


Radius	Maximum relative Abweichung/ %	Median relative Abweichung/ %
12.5 mm	37.1	14.5
25.0 mm	35.2	9.1
37.5 mm	33.2	9.2
50.0 mm	37.3	4.3
62.5 mm	36.8	8.5

- Streuung erkennbar
- Bei $D < 2$ und $D > 15$ schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis der CDD

• Ergebnisse Unterschiede Messqualität

Radius 37.5 mm

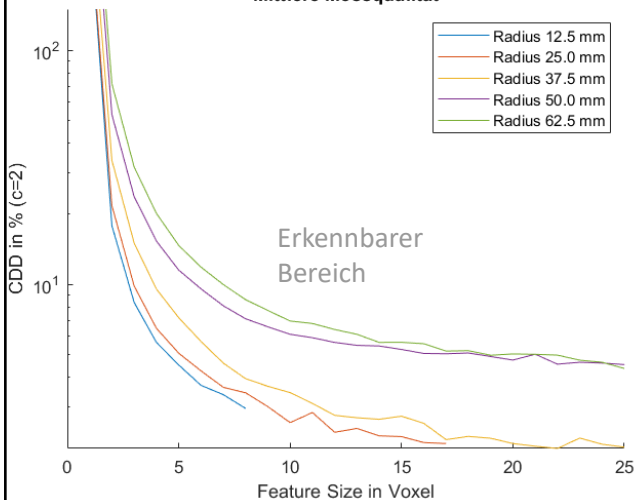


Radius	Maximum relative Abweichung/ %	Median relative Abweichung/ %
12.5 mm	< 42	< 19
25.0 mm	< 80	< 34
37.5 mm	< 88	< 33
50.0 mm	< 112	< 10
62.5 mm	< 78	< 12

- Messqualitäten sind in ‚vernünftiger‘ Ordnung
- Unterschiede oberhalb der Wiederholstreuung (außer 12.5mm)

• Ergebnisse Durchstrahlungslängenabhängigkeit (in Mittelstrahlebene)

Mittlere Messqualität

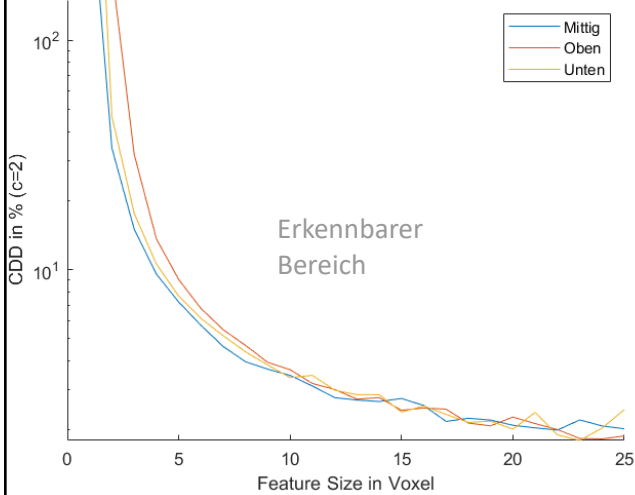


Radien in mm	Maximum relative Abweichung/ %	Median relative Abweichung/ %
12.5 & 25	< 37	< 26
12.5 & 37.5	< 120	< 100
12.5 & 50.0	< 254	< 213
12.5 & 62.5	< 352	< 306
25 & 37.5	< 68	< 43
25 & 50.0	< 186	< 146
25 & 62.5	< 252	< 193
37.5 & 50.0	< 147	< 105
37.5 & 62.5	< 150	< 118
50.0 & 62.5	< 48	< 10

→ Sehr deutliche Abhängigkeit von Durchstrahlungslängen (Prüfkörperradius)

• Ergebnisse Positionsabhängigkeit

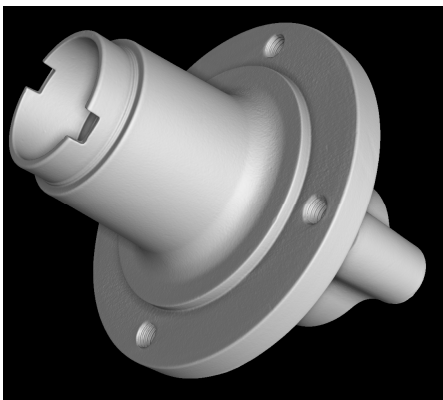
Radius 37.5 mm, Mittlere Messqualität



Radius	Maximum relative Abweichung/ %	Median relative Abweichung/ %
12.5 mm	< 1000%	< 8%
25.0 mm	< 1500%	< 18%
37.5 mm	< 700%	< 43%
50.0 mm	< 1500%	< 9%
62.5 mm	< 2400%	< 55%

- Einfluss deutlich über Wiederholstreuung
- Einfluss konsistent mit Erwartung (Kegelstrahl-Artefakte)

Erinnerung: Motivation



CT-Volumen des Bauteils

Kundenfrage:

- Was kann ich mit dem Gerät auflösen?
- Sehe ich meinen Defekt?
- Nach welcher Norm/Richtlinie bewerte ich Erkennbarkeit?

Erwartung:

- Antwort mit ASTM E1441
 - Detail erkennbar falls $\Delta\mu_f \geq CDD(D)$

→ Überprüfung an Beispielbauteil

Anwendungsfall

Messung an Beispielbauteil

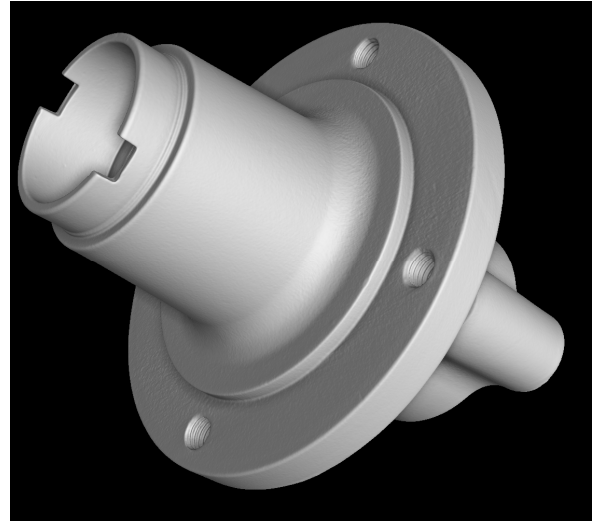
- Aluminium

3 Messeinstellungen aus ASTM-Messungen

- Hohe Qualität
- Mittlere Qualität
- Niedrige Qualität

Auswertung auf Poren mit VGStudioMax VGDefX

- Standardparametrisierung
- „Objektive“ Erkennbarkeit



CT-Volumen des Bauteils

17

Anwendungsfall

Messung an Beispielbauteil

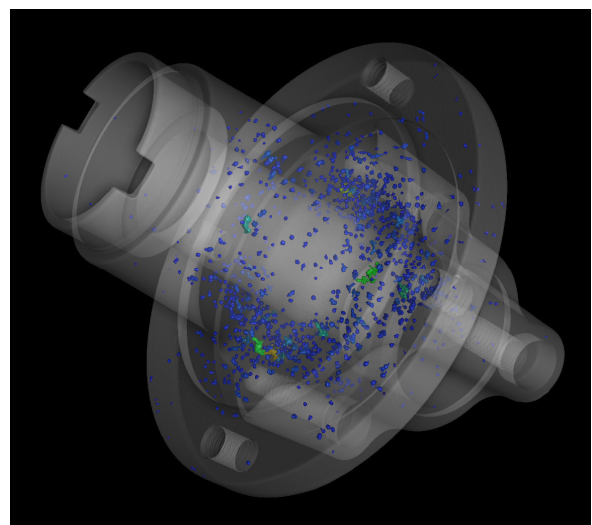
- Aluminium

3 Messeinstellungen aus ASTM-Messungen

- Hohe Qualität
- Mittlere Qualität
- Niedrige Qualität

Auswertung auf Poren mit VGStudioMax VGDefX

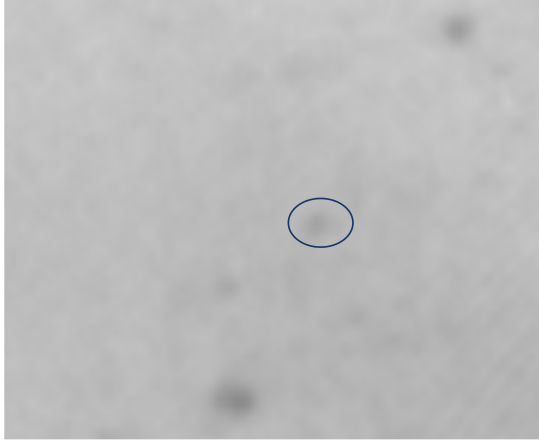
- Standardparametrisierung
- „Objektive“ Erkennbarkeit



CT-Volumen des Bauteils
mit detektierten Poren

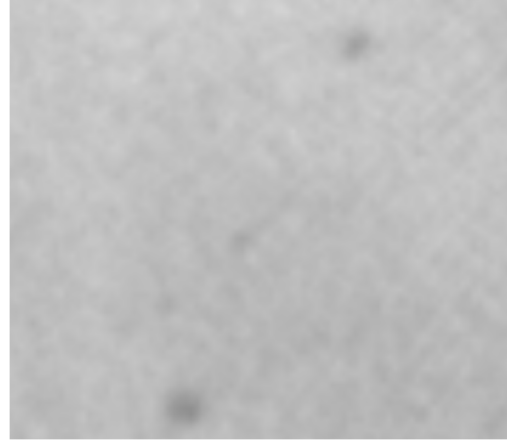
18

- Rein visuell – mehr Detektionen bei höherer Datenqualität



Hohe Messqualität:

Pore hebt sich schwach vom Hintergrund ab



Niedrige Messqualität:

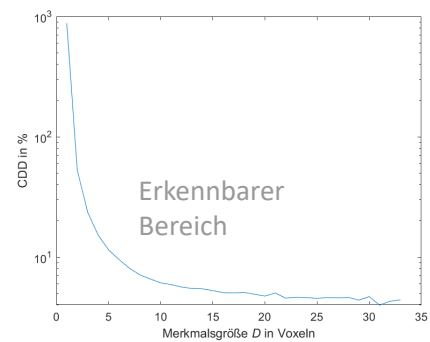
Pore wegen starkem Rauschen nicht mehr sicher erkennbar

19

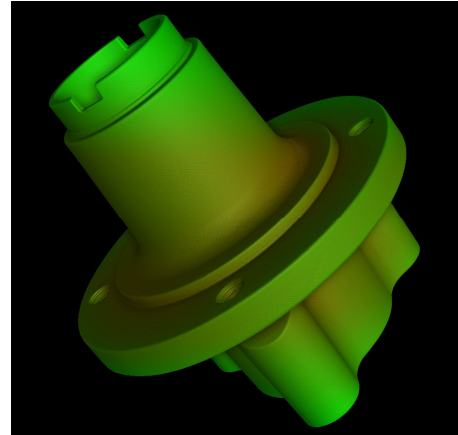
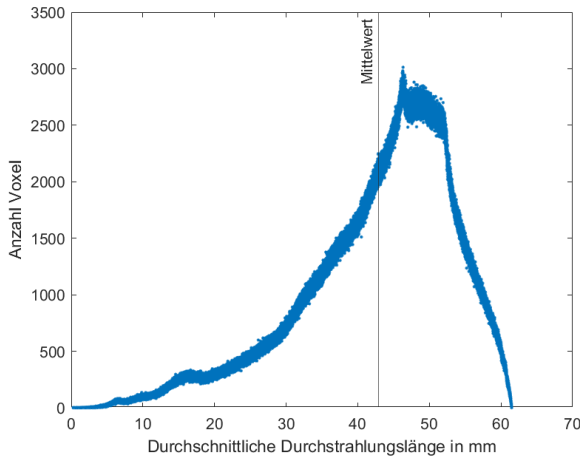
Auswertung?

- Manuell
 - Aufwand unrealistisch
- Ansatz
 - Plot der Datenpunkte in $\Delta\mu_f - D$ Raum
 - Bestimmung $\Delta\mu_f$ pro Defekt
 - Vergleich mit CDD-Vorhersage
 - „globaler Eindruck“
- Erwartung
 - Höhere Messqualität → Detektionen weiter „links unten“

Messeinstellung	Gefundene Defekte
Niedrig	0691
Mittel	0939
Hoch	1052



Welche CDD ist die richtige? → Durchstrahlungslängen:



Verteilung der Durchstrahlungslängen

→ Relevant: CDD für Zylinderradius < 30 mm

- Wie $\Delta\mu_f$ berechnen?

$$\frac{|\mu_f - \mu_b|}{\mu_b}$$

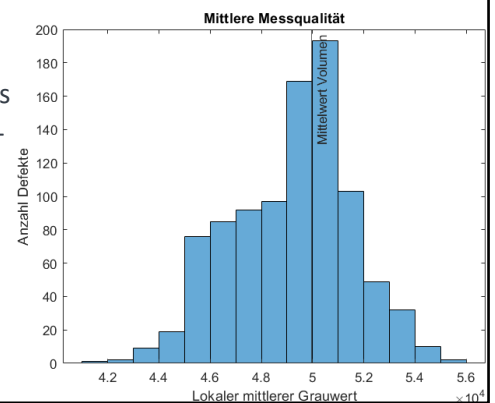


2D-Schnitt: Auswerteregion für μ_b

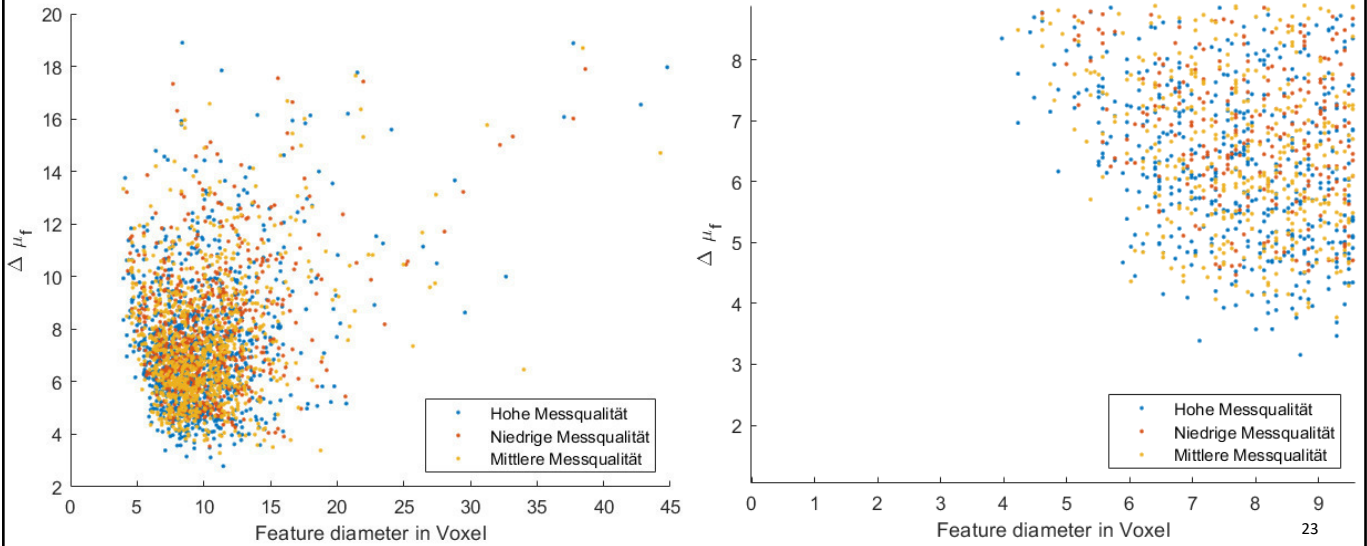
Vorschlag:

- μ_f → direkt aus VG Ergebnistabelle als Mittelwert
 - Wertespanne in Defekt z.T. > 10.000
- μ_b als mittlerer Grauwert der Hüllschale mit 1-2,5 fachem Hüllradius nach ISO50-Oberflächenbestimmung (mittleres μ_b aus Gesamtgrauwertanalyse VG ist keine gute Näherung)

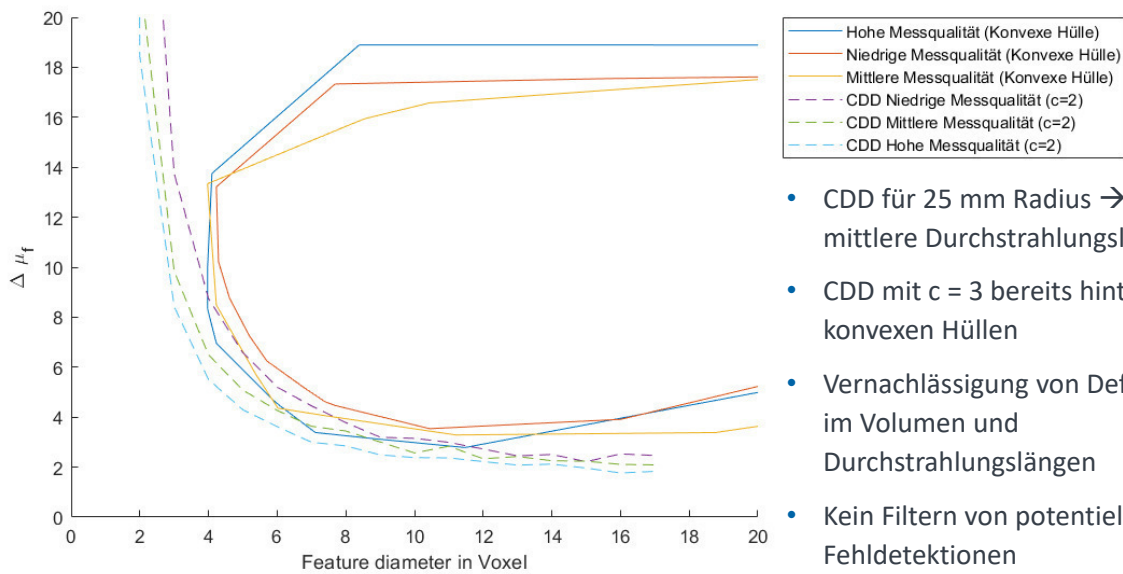
Messeinstellung	μ_b (VG Mittelwert)
Niedrig	50751.3
Mittel	49943.6
Hoch	50297.8



Gefundene Defekte



Konvexe Hülle der gefundenen Defekte und CDD



- CDD für 25 mm Radius → ca. mittlere Durchstrahlungslänge
- CDD mit c = 3 bereits hinter konvexen Hüllen
- Vernachlässigung von Defekthöhe im Volumen und Durchstrahlungslängen
- Kein Filtern von potentiellen Fehldetektionen

Fazit

- CDD nach ASTM E 1441 / E 1695 erlaubt grundsätzlich eine Abschätzung der Erkennbarkeit
 - $\Delta\mu_f - D$ Parameterraum relevant für Erkennbarkeit
 - Abschätzung wird erschwert durch
 - Vorhersage und Bestimmung des korrekten Grauwertkontrast des Defektes
 - Streuung des CDD-Wertes
 - Unklarheit bzgl. Wert von c
 - Ergebnisse dieser Studie sind ...
 - Nicht Pseudo-Detektions-bereinigt
 - Nicht mit Durchstrahlungslänge oder Höhe im Volumen korreliert ($\Delta\mu_f - D - h - d$ -Parameterraum)
- Forschungsaufgabe

25

Fazit: Kundenfragen

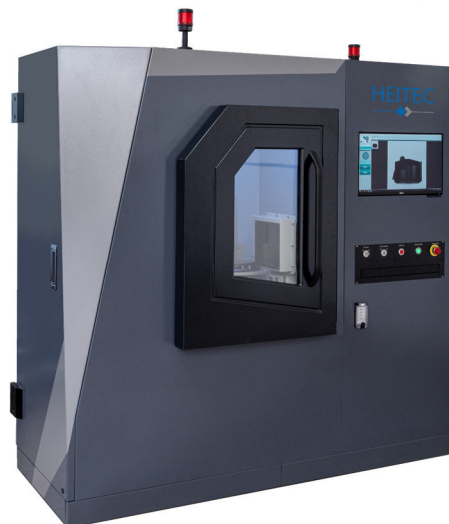
Kundenfrage:

- Was kann ich mit dem Gerät auflösen?
- Sehe ich meinen Defekt?
- Nach welcher Norm/Richtlinie bewerte ich Erkennbarkeit?

Antwort nach ASTM E 1441:

- Mit Ihrem CAD (für Durchstrahlungslängen)
- Ihrem Material
- Ihrer erwarteten Defektgröße

Ist eine erste Abschätzung bereits möglich – ganz ohne Probemessungen am Bauteil!



26



Florian Wohlgemuth
Bildgebende Systeme
/ Simulation

[florian.wohlgemuth@
heitec-pts.de](mailto:florian.wohlgemuth@heitec-pts.de)

+49 (7331) 3046 – 61

HEITEC PTS GmbH

Hauptstraße 49
D- 73329 Kuchen/Fils
Tel: +49 (7331) 3046-0

Wir bieten Ihnen Kompetenzen im
Bereich Standardautomatisierung,
Softwareentwicklung und der
industriellen Röntgentechnik sowie im
Roboterhandling und Anlagenbau