

Simulation von Oberflächendefekten mittels Raytracing zur Bestimmung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (POD)

Markus RAUHUT *, Martin SPIES *, Andreas JABLONSKI *

* Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Kaiserslautern

Kurzfassung

Bei optischen Prüfsystemen entscheidet das Erreichen der vom Endanwender vorgegebenen Detektionsrate und Auffindwahrscheinlichkeit darüber, ob ein solches System in der Praxis einsetzbar ist. Eine Möglichkeit, diese Parameter quantitativ zu bestimmen, bieten α -Analysen zur Bestimmung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (englisch: Probability of Detection, POD). Die POD-Analyse erlaubt, die sicher detektierbaren minimalen Fehlergrößen quantitativ zu berechnen.

Eine Möglichkeit, die POD-Analyse für optische Systeme zu evaluieren, ist die Erstellung von Prüfkörpern mit eingebrachten Soll-Fehlern, z.B. Nuten zur Beschreibung von Rissen. Aufgrund der hohen Vielfalt kann so aber nur ein kleiner Teil von Defekten abgedeckt werden. Wir haben daher mittels Raytracing ein Verfahren zur realistischen Simulation von Oberflächendefekten entwickelt. Die so erzeugten Bilddaten ermöglichen eine POD-Analyse auf Basis einer großen Anzahl von Defekten. Weiterhin vergleichen wir die Ergebnisse der klassischen POD-Analyse nach MIL-HDBK-1823 mit den Erfahrungen gegeben durch die Praxis.

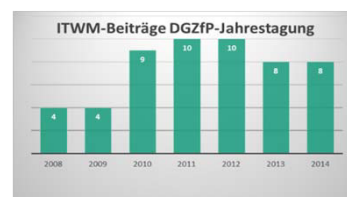


ZfP am Fraunhofer ITWM: Ultraschall, Optik, CT

Optische Oberflächenprüfung:

- Maßgeschneiderte Oberflächeninspektionssysteme
- Video- und Szenenanalyse
- Inline-fähige Algorithmen für die Bildverarbeitung
- ToolIP- Das Entwicklerwerkzeug für Bildverarbeiter
- 3D-Bildverarbeitung für CT-Volumendaten
- Probability of Detection (POD)

- seit Oktober 2007: über 50 Beiträge zu den DGZfP-JT



Unsere Themen dieses Jahr

- | | |
|---|-----------------|
| ■ Online-Prozessüberwachung | Mo.3.A.1 |
| ■ Simulation und POD für Oberflächenfehler | Mo.3.B.4 |
| ■ Schweißnahtprüfung (mit der MPA Stuttgart) | Di.2.B.1 |
| ■ Rohrprüfung (mit Salzgitter-Mannesmann Forschung) | Mi.2.A.4 |
| ■ ZfP für Leichtbauwerkstoffe | Mi.3.C.1 |
| ■ Spannungsmessung an Triebwerkswerkstoffen | P25 |
| ■ Porositätsmessung an gegossenen Bronzen | P28 |
| ■ Schnelle Simulation für komplexe Materialien | P48 |

Kontaktieren Sie uns unter ZfP@itwm.fraunhofer.de

Simulation von Oberflächendefekten mittels Raytracing zur Bestimmung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (POD)

Dach-Jahrestagung 2014, Potsdam
26.– 28. Mai 2014

Fraunhofer Institut
für Techno- und Wirtschaftsmathematik

Markus Rauhut	Simulation, Bildanalyse und Datenauswertung
Martin Spies	POD-Analyse
Andreas Jablonski	POD-Analyse

Simulation von Oberflächendefekten mittels Raytracing zur Bestimmung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit

- **Einleitung/Motivation**
- Werkzeugkasten für die virtuelle Bildverarbeitung
- Die Simulation von Defekten am Beispiel von Rissen
- Raytracing
- Auffindwahrscheinlichkeit (POD)
- Ausblick und Zusammenfassung

Motivation

MASC - Modular Algorithms for Surface Control

- modulares Software- und Hardware-Konzept für spezielle Kundensysteme
- leichte Anpassbarkeit
- komplexe online-fähige Algorithmen
- Schwerpunkt: texturierte Oberflächen



Beispiele:

Metall, Kunststoff, Textilien, Papier,
Holz, Vliesstoffe, Gummi, Leder,
Faserplatten, ...



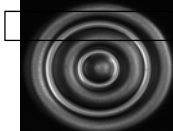
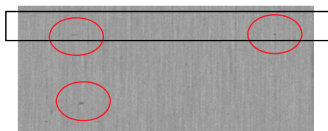
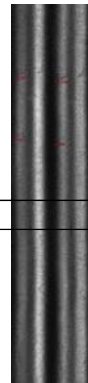
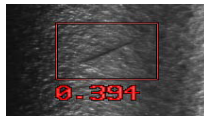
© Fraunhofer ITWM
5

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Motivation

Beispielprojekte



Gebürstete Bleche

Dehnzellen

Gußteile

© Fraunhofer ITWM
6

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Motivation

Die Oberflächeninspektion verwendet eine indirekte Messmethode:

- Je nach Beleuchtung und Kamerawinkel verändert sich die Erscheinung von Defekten und Geometrieabweichungen.
- Im schlimmsten Fall sind bei schlechtem Aufbau von Sensor und Beleuchtung Defekte gar nicht sichtbar.
- Ist der Aufbau der Sensorik perfekt kann es trotzdem noch zu Fehldetektionen kommen (falsch positive). Aufwändige Algorithmen können dieses Problem lösen.

Werden alle Defekte unter den gegebenen Randbedingungen gefunden?

Kann das gesamte Oberflächeninspektionssystem virtuell dargestellt und getestet werden?

Simulation von Oberflächendefekten mittels Raytracing zur Bestimmung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit

- Einleitung/Motivation
- Werkzeugkasten für die virtuelle Bildverarbeitung
- Die Simulation von Defekten am Beispiel von Rissen
- Raytracing
- Auffindwahrscheinlichkeit (POD)
- Ausblick und Zusammenfassung

Werkzeugkasten für die virtuelle Bildverarbeitung

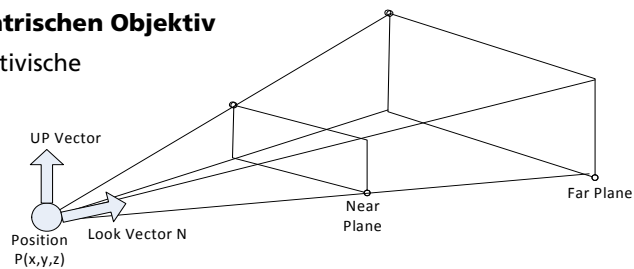
- Virtuelles Kameramodell
- Raytracing – Rendering von Dreiecksnetzen
 - Oberflächenbeschreibung
 - Physikalisch korrektes Rendering
 - Variation von Beleuchtung, Textur
- Algorithmen
 - zur Fehlererkennung
 - zur Konstruktion von Defekten
 - zur Erzeugung der Ground Truth



Werkzeugkasten für die virtuelle Bildverarbeitung

Kameramodell mit entozentrischen Objektiv

Bildsensor wird durch perspektivische Projektion modelliert



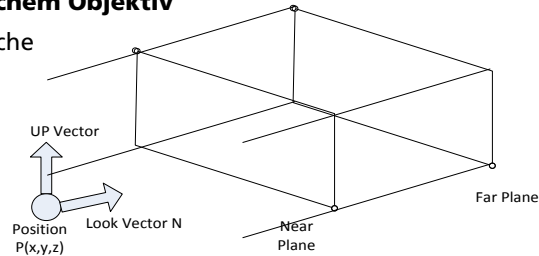
- Der "Hoch-Vektor" U ,
- die Kameraposition P ,
- der Sichtvektor N
- und die Fokus-Entfernung D

beschreiben ein 3D-Volumen (zwischen "Near plane" und "Far plane").

Kameramodell mit telezentrischem Objektiv

Kameramodell mit telezentrischem Objektiv

Bildsensor wird durch orthografische Projektion modelliert:



- Der "Hoch-Vektor" U ,
- die Kameraposition P ,
- der Sichtvektor N

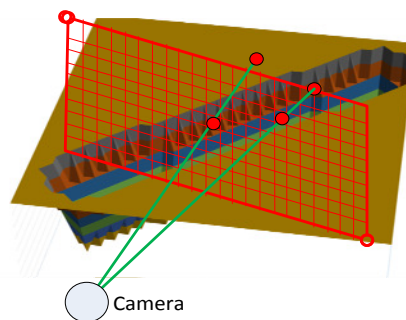
beschreiben einen 3D-Quader. Alle Lichtstrahlen verlaufen parallel.

Werkzeugkasten für die virtuelle Bildverarbeitung

Raytracing

Verfolgung von Strahlen ausgehend von der Kamera in eine 3D-Szene.

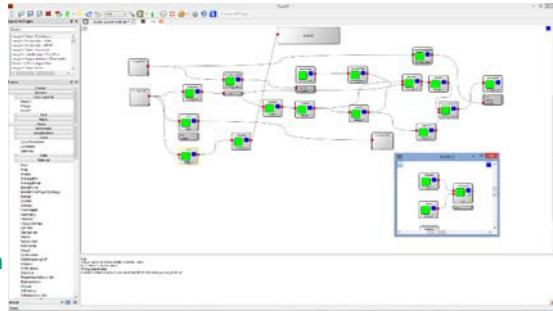
- Die 3D-Szene ist aus Dreiecksnetzen zusammen gesetzt
- Für jeden Bildpixel wird ein Strahl konstruiert und dessen Schnittpunkt mit dem Dreiecksnetz berechnet.
- Von diesem Schnittpunkt wird ein Strahl zu jeder Lichtquelle in der Szene berechnet und somit der Helligkeitswert dieses Bildpixels berechnet.



Werkzeugkasten für die virtuelle Bildverarbeitung

Algorithmen und Ground Truth mit ToolIP

- Grafische Entwicklungsumgebung für die Bildverarbeitung
- Algorithmus zur Fehlererkennung
- Algorithmus zur Konstruktion von Defekten
- Bestimmung der Ground Truth



ToolIP <http://www.itwm.fraunhofer.de/toolip>

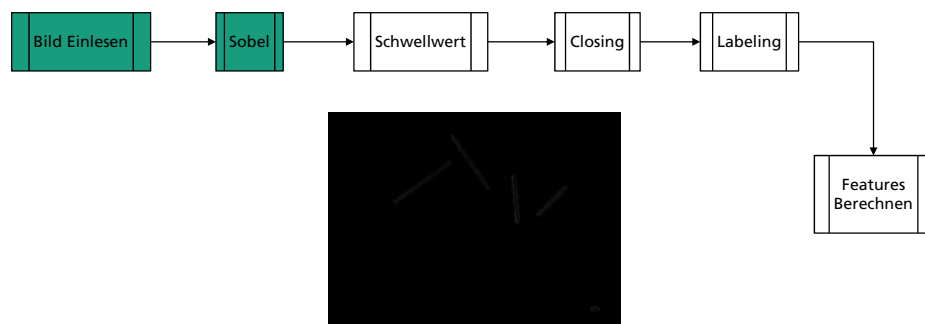
© Fraunhofer ITWM
13

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Werkzeugkasten für die virtuelle Bildverarbeitung

Algorithmus zur Fehlererkennung



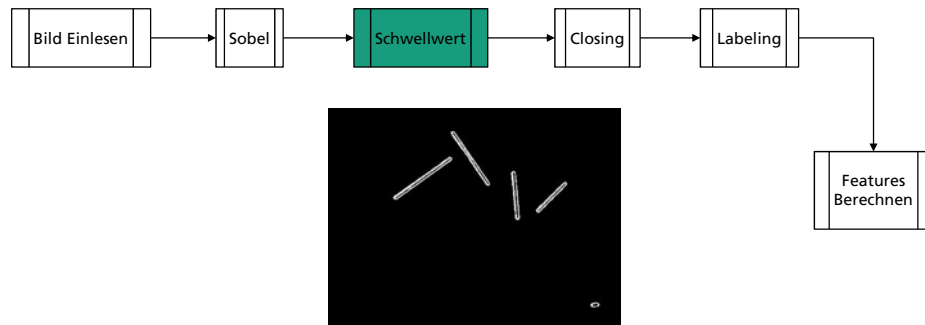
© Fraunhofer ITWM
14

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

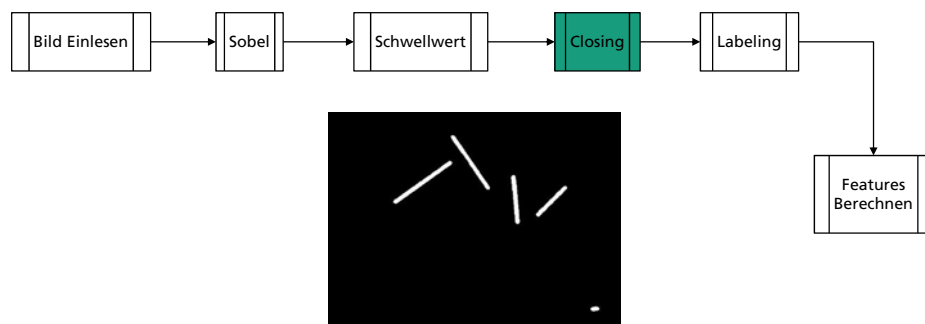
Werkzeugkasten für die virtuelle Bildverarbeitung

Algorithmus zur Fehlererkennung



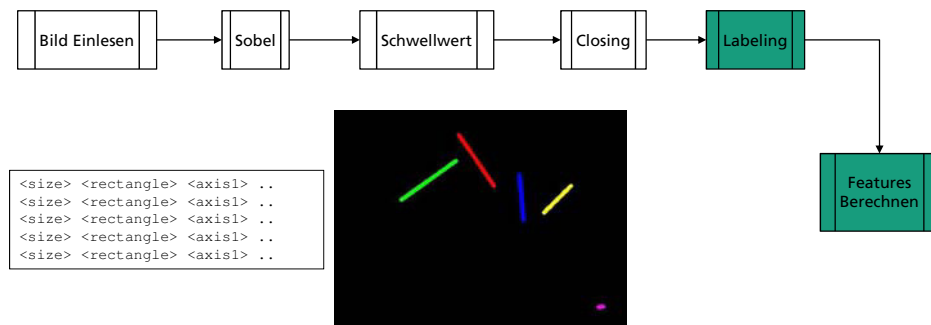
Werkzeugkasten für die virtuelle Bildverarbeitung

Algorithmus zur Fehlererkennung



Werkzeugkasten für die virtuelle Bildverarbeitung

Algorithmus zur Fehlererkennung



Werkzeugkasten für die virtuelle Bildverarbeitung

Nachdem der Werkzeugkasten vollständig ist, können nun verschiedenste Oberflächendefekte simuliert werden.

Am Beispiel von Rissen/Kratzern wird dies auf den nächsten Folien beschrieben.

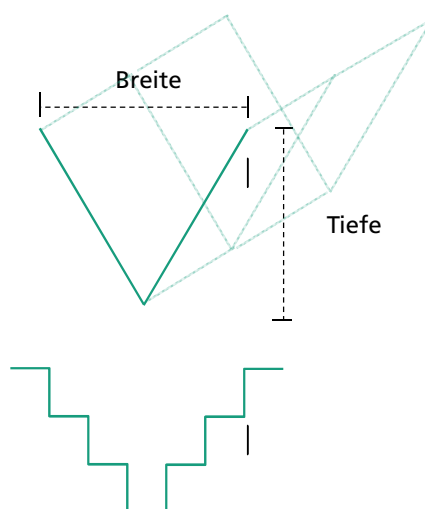
Simulation von Oberflächendefekten mittels Raytracing zur Bestimmung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit

- Einleitung/Motivation
- Werkzeugkasten für die virtuelle Bildverarbeitung
- Die Simulation von Defekten am Beispiel von Rissen
- Raytracing
- Auffindwahrscheinlichkeit (POD)
- Ausblick und Zusammenfassung

Simulation von Defekten

Konstruktion von Rissen

- Basisform für Riss

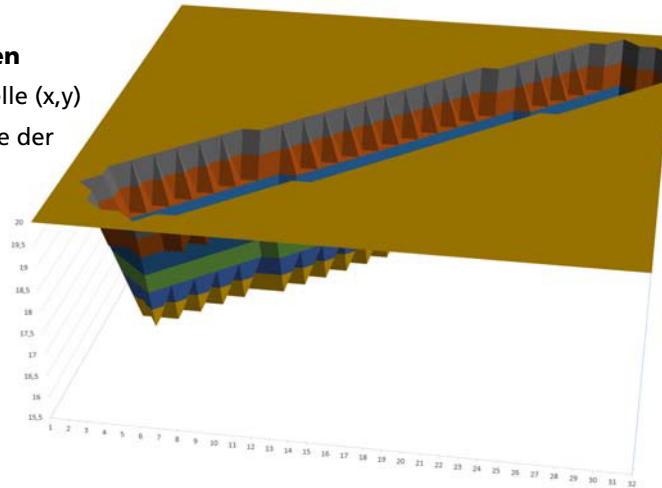


- Diskrete Darstellung

Simulation von Defekten

Höhenkarte erstellen

- Ein Pixel an der Stelle (x,y) beschreibt die Höhe der Karte an der Position (x,y)



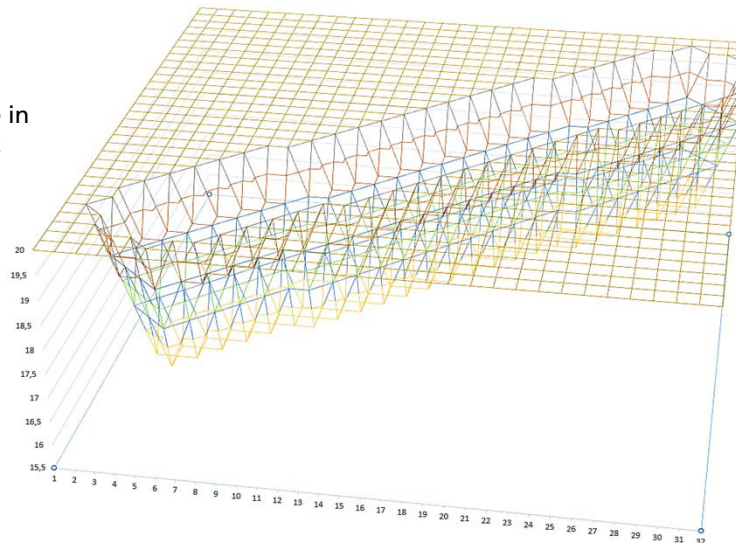
© Fraunhofer ITWM
21

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Simulation von Defekten

- Höhenkarte in Dreiecknetz umwandeln



© Fraunhofer ITWM
22

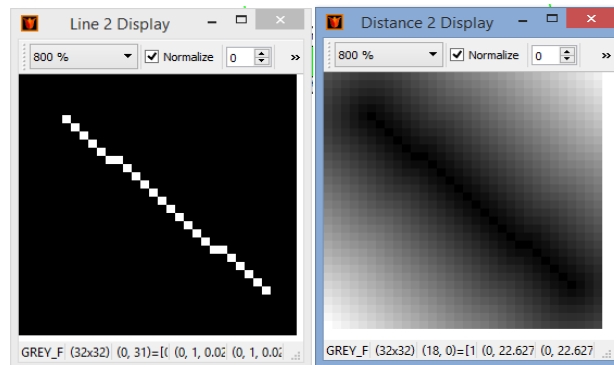
Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Simulation von Defekten

Konstruktion von Rissen

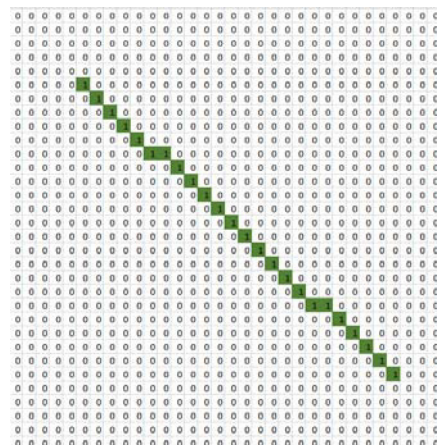
- Zufällige Linien erzeugen
- Distanztransformation



Simulation von Defekten

Konstruktion von Rissen

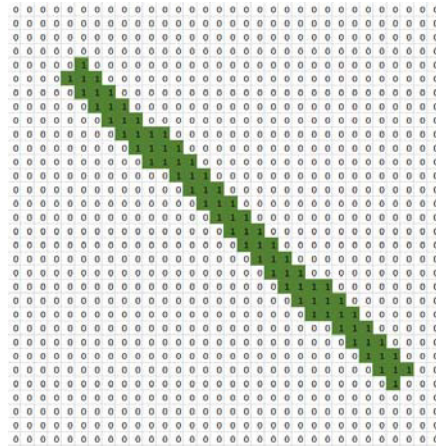
- Zufällige Linien erzeugen
- Distanztransformation
- Schwellwert 0



Simulation von Defekten

Konstruktion von Rissen

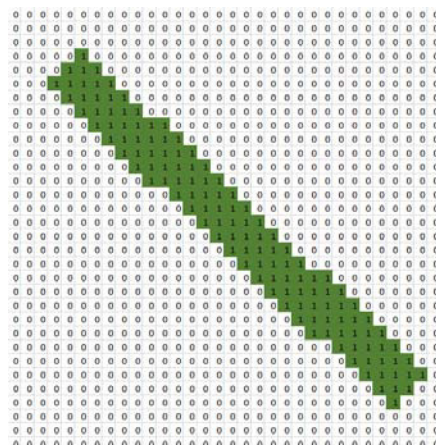
- Zufällige Linien erzeugen
- Distanztransformation
- Schwellwert 1



Simulation von Defekten

Konstruktion von Rissen

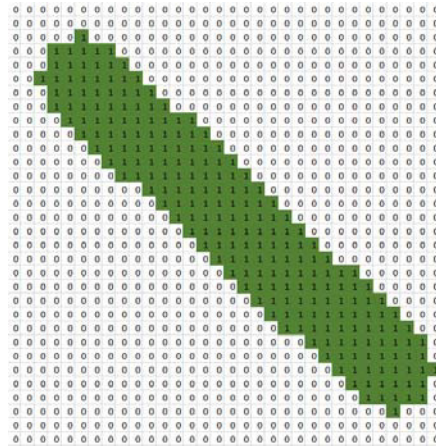
- Zufällige Linien erzeugen
- Distanztransformation
- Schwellwert 2



Simulation von Defekten

Konstruktion von Rissen

- Zufällige Linien erzeugen
- Distanztransformation
- Schwellwert 3



© Fraunhofer ITWM
27

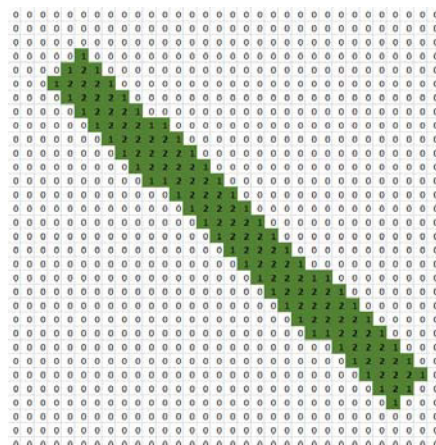
Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Simulation von Defekten

Konstruktion von Rissen

- Zufällige Linien erzeugen
- Distanztransformation
- Schwellwert
- Addition 1



© Fraunhofer ITWM
28

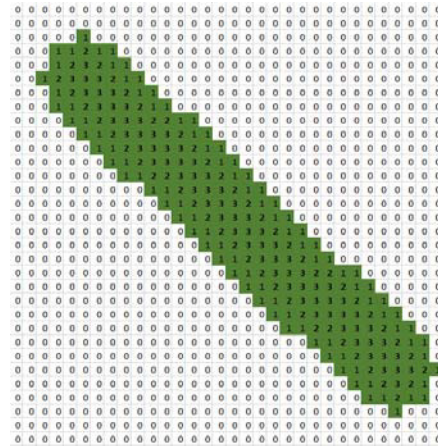
Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Generierung von Rissen/Kratzern

Konstruktion von Rissen

- Zufällige Linien erzeugen
- Distanztransformation
- Schwellwert
- Addition 2



© Fraunhofer ITWM
29

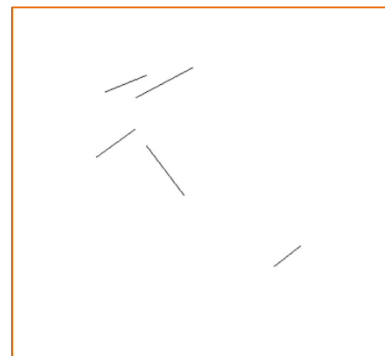
Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Simulation von Defekten

Datenerzeugung/Ground Truth

- Erzeuge zufällig jeweils 5 Risse pro Bild



© Fraunhofer ITWM
30

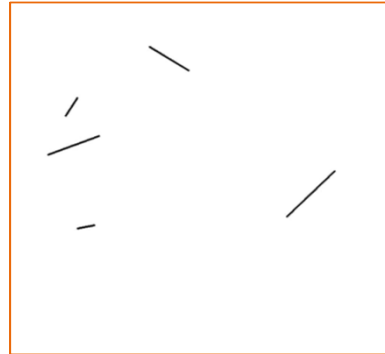
Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Simulation von Defekten

Datenerzeugung/Ground Truth

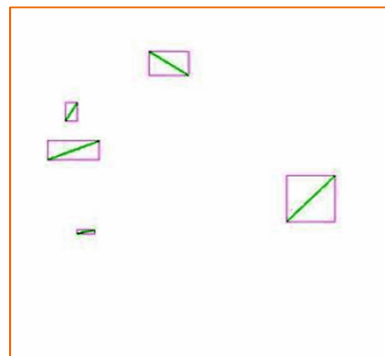
- Erzeuge zufällig jeweils 5 Risse pro Bild
- Variiere Breite und Tiefe



Generierung von Rissen/Kratzern

Datenerzeugung/Ground Truth

- Erzeuge zufällig jeweils 5 Risse pro Bild
- Variiere Breite und Tiefe
- Generiere Ground Truth



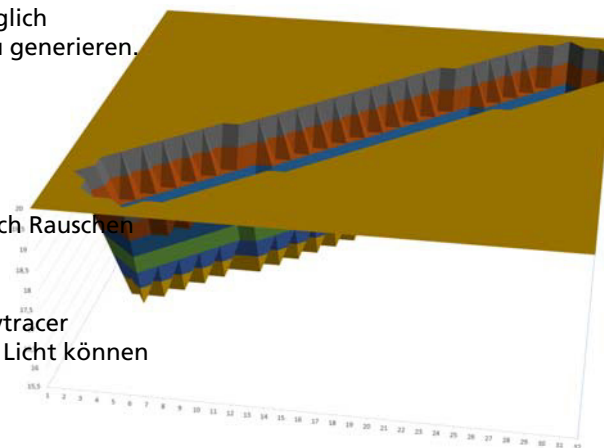
Simulation von Oberflächendefekten mittels Raytracing zur Bestimmung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit

- Einleitung/Motivation
- Werkzeugkasten für die virtuelle Bildverarbeitung
- Die Simulation von Defekten am Beispiel von Rissen
- Raytracing
- Auffindwahrscheinlichkeit (POD)
- Ausblick und Zusammenfassung

Raytracing

Durch Raytracing ist es möglich künstliche Kamerabilder zu generieren.

- Aus den Höhenkarten werden Dreiecksnetze erzeugt
- Die Oberfläche wird durch Rauschen gestört (10% Neigungsstörung)
- Und dann durch den Raytracer dargestellt. Kamera und Licht können dabei variiert werden.



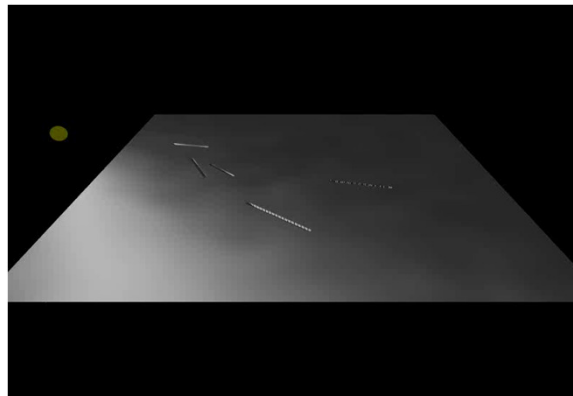
Raytracing

- Je nach Beleuchtung und Kamerawinkel verändert sich die Erscheinung von Defekten und Geometrieabweichungen.
- Ist das Raytracing physikalisch korrekt, dann sollten verschiedene Aufnahmesituationen auch verschiedene Bildqualitäten erzeugen.
 - Risse werden in der Praxis immer im Seitenlicht detektiert, da diese Beleuchtungsart Risse besonders hervorhebt. Dies sollte schon mit dem Auge erkennbar sein. Besonders im Vergleich zu Auflicht.
 - Ebenso sollte die quantitative Beurteilung (z.B. durch die POD) bessere Erkennungsraten im Seitenlicht als im Auflicht aufzeigen.

?

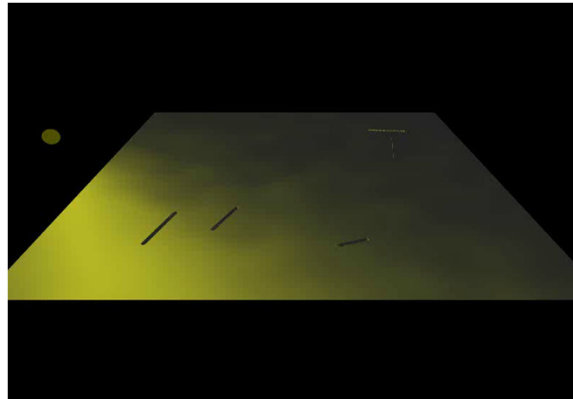
Raytracing

Simulation der
Beleuchtungsrichtung
(Material Titan-6-4)



Raytracing

Änderung der Beleuchtung
(Material Titan-6-4)



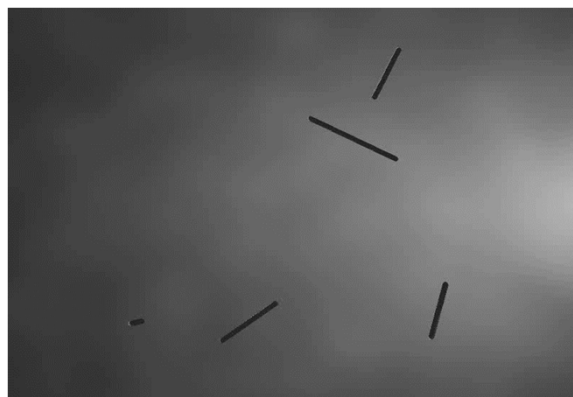
© Fraunhofer ITWM
37

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Raytracing

realistische
Kameraeinstellung
(Material Titan-6-4)



© Fraunhofer ITWM
38

Competence in NDT&E

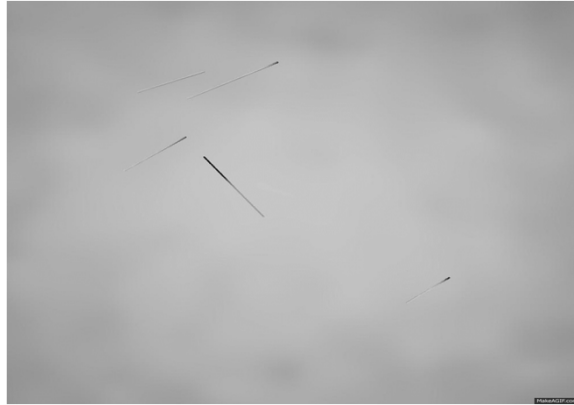
Fraunhofer
ITWM

Raytracing

realistische
Kameraeinstellung

Auflicht

Schon mit dem Auge ist die
schlechte Bildqualität im
Auflicht erkennbar.



© Fraunhofer ITWM
39

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Simulation von Oberflächendefekten mittels Raytracing zur Bestimmung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit

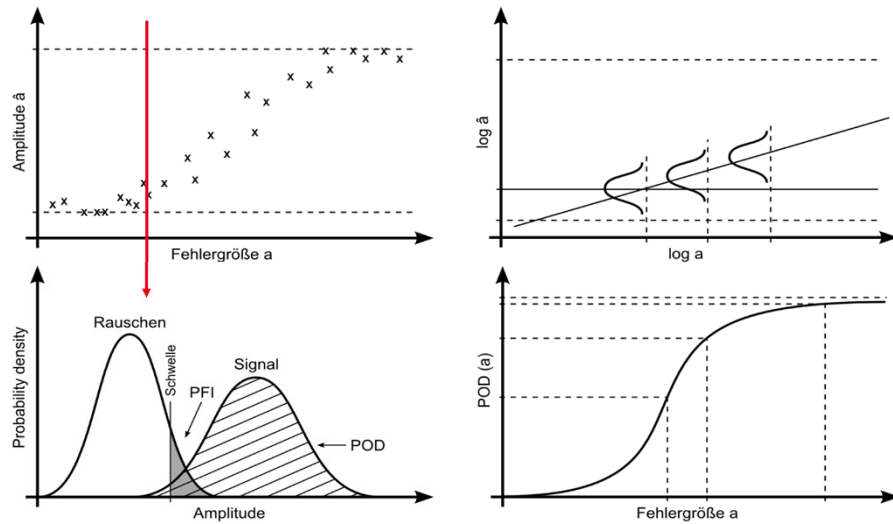
- Einleitung/Motivation
- Werkzeugkasten für die virtuelle Bildverarbeitung
- Die Simulation von Defekten am Beispiel von Rissen
- Raytracing
- Auffindwahrscheinlichkeit (POD)
- Ausblick und Zusammenfassung

© Fraunhofer ITWM
40

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Wie kommt man zu einer POD-Kurve? $\hat{a}$ -vs-a-Analyse

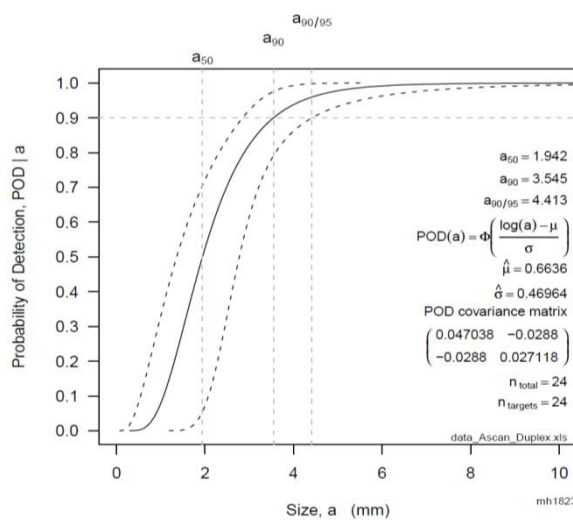


© Fraunhofer ITWM
41

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

MIL-HDBK-1823 – Software mh1823



ticalengineering.com

NOT MEASUREMENT
SENSITIVE

MIL-HDBK-1823A
7 April 2009

SUPERSEDING
MIL-HDBK-1823
14 April 2004

DEPARTMENT OF DEFENSE
HANDBOOK
ONDESTRUCTIVE EVALUATION SYSTEM
RELIABILITY ASSESSMENT



This handbook is for guidance only.
Do not cite this document as a requirement.

AREA NDTI

STATEMENT A. Approved for public release; distribution is unlimited.

© Fraunhofer ITWM
42

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Auffindwahrscheinlichkeit (POD)

Die POD kann quantitative Aussagen zur Qualität einer optischen Prüfung liefern.

Für die $\hat{a}$ vs a bzw. $\log(\hat{a})$ vs $\log(a)$ Analyse ist ein Metrik (die Amplitude) notwendig die beschreibt wie sicher ein Defekt erkannt wurde.

Hier:

Metrik = #Pixel_{Found}

Entspricht dem „normalen“ Verhalten von Bildverarbeitungsalgorithmen, die basierend auf Schwellwerten und Flächen entscheiden.

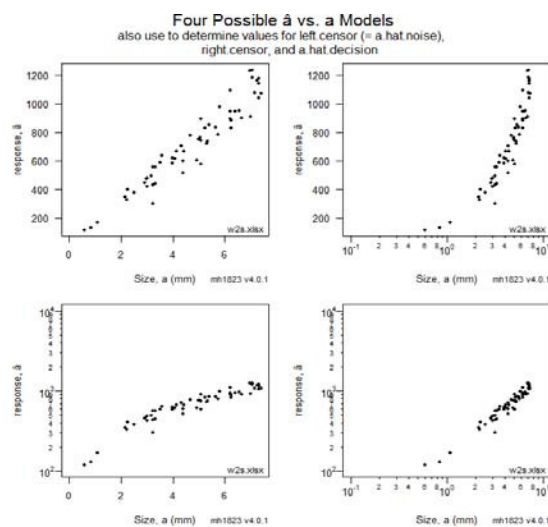
Auffindwahrscheinlichkeit (POD)

Seitenlicht

Risse

Breite 0,15 mm

Modellauswahl



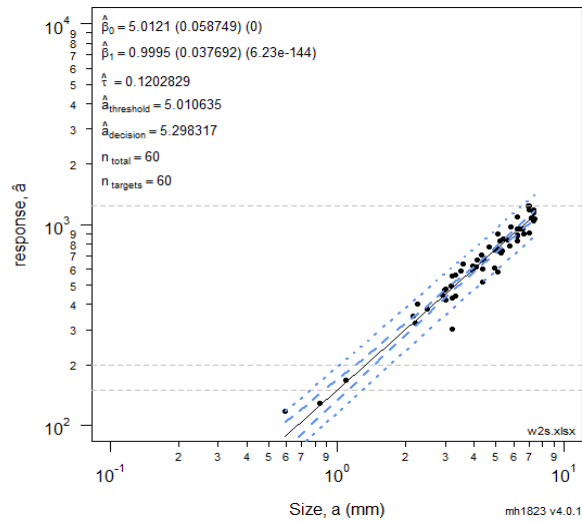
Auffindwahrscheinlichkeit (POD)

Seitenlicht

Risse

Breite 0,15 mm

Diagnoseplot



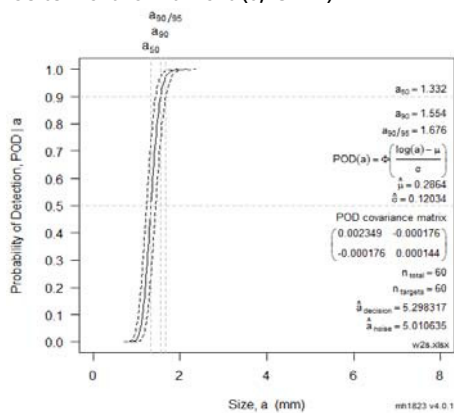
© Fraunhofer ITWM
45

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Auffindwahrscheinlichkeit (POD)

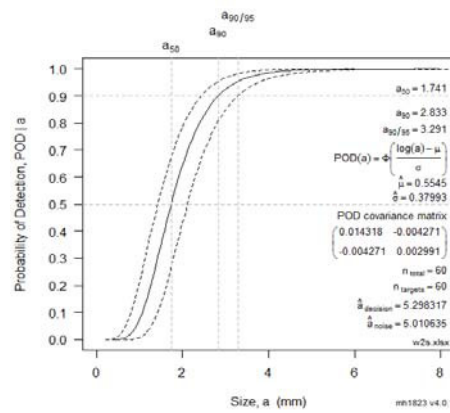
Seitenlicht vs. Aufsicht (0,15mm)



© Fraunhofer ITWM
46

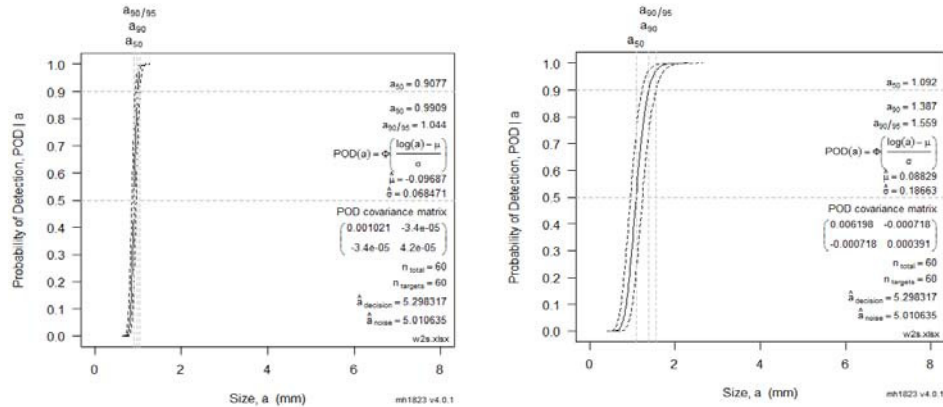
Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM



Auffindwahrscheinlichkeit (POD)

Seitenlicht vs. Auflicht (0,25mm)



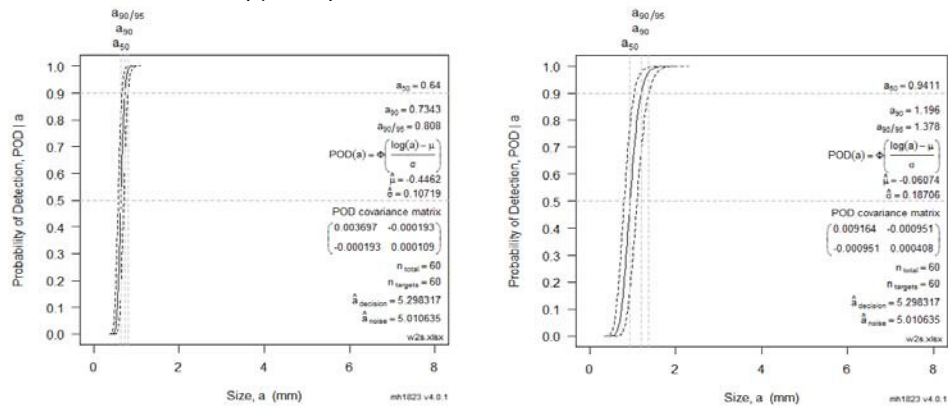
© Fraunhofer ITWM
47

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Auffindwahrscheinlichkeit (POD)

Seitenlicht vs. Auflicht (0,35mm)



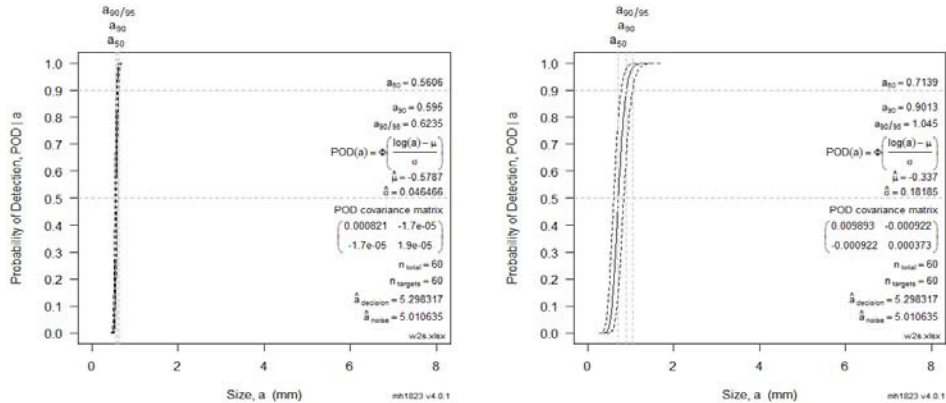
© Fraunhofer ITWM
48

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Auffindwahrscheinlichkeit (POD)

Seitenlicht vs. Auflicht (0,45mm)



© Fraunhofer ITWM
49

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Auffindwahrscheinlichkeit (POD)

Zusammenfassung $A_{90/95}$ Werte

Pixelauflösung 0,05mm
Tiefe 0,01mm – 0,08 mm
Datensätze 480
Risse pro Breite 60

Licht\Breite	0,15 mm	0,25 mm	0,35mm	0,45 mm
Seitenlicht	1,67	1,04	0,8	0,62
Auflicht	3,29	1,56	1,38	1,05

© Fraunhofer ITWM
50

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Simulation von Oberflächendefekten mittels Raytracing zur Bestimmung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit

- Einleitung/Motivation
- Werkzeugkasten für die virtuelle Bildverarbeitung
- Die Simulation von Defekten am Beispiel von Rissen
- Raytracing
- Auffindwahrscheinlichkeit (POD)
- **Ausblick und Zusammenfassung**

Zusammenfassung

- Es wurde ein erster Werkzeugkasten für die virtuelle Bildverarbeitung erstellt.
- Die Ergebnisse entsprechen den Erfahrungen aus der Praxis.
- Die POD ermöglicht eine quantitative Einschätzung von Inspektionsaufgaben.
- Raytracing ist ein probates Mittel zur Erzeugung von virtuellen Kameraaufnahmen.

Ausblick

»Die Herausforderung besteht darin, virtuelle Bilder mit einem Realitätsgrad zu erzeugen, der zur Bildverarbeitung geeignet ist« Quo-Vadis Bildverarbeitung

Fraunhofer-Allianz Vision

Bildverarbeitung - Quo Vadis?

- Realistischere Kameramodelle mit realen Objektiven
- Gekrümmte Oberflächen
- Die Simulation von verschiedenen Defekttypen
- Raytracing verbessern bzw. um andere Verfahren ergänzen

© Fraunhofer ITWM
53

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Simulation von Oberflächendefekten mittels Raytracing zur Bestimmung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit

Anhang

© Fraunhofer ITWM
54

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Auffindwahrscheinlichkeit (POD)¹

- POD: Wahrscheinlichkeit, einen Fehler zu detektieren
- Funktion der Fehlergröße a
- Maximum-Likelihood Schätzer
- POD-Kurve mit Konfidenzintervallen beschreibt Fehlergröße, die mit einer „vernünftigen“ Wahrscheinlichkeit detektiert werden kann
- An $a_{90/95}$ schneidet die untere 95% Konfidenzgrenze das 90% POD-Niveau
- $a_{90/95}$ ist Fehlergröße, die sicher zu detektieren ist
- **$\hat{a}$ versus a -Analyse:**
ein Fehler der Größe a erzeugt ein Signal der Amplitude (Metrik) $\hat{a}$.

¹ Department of Defense Handbook Draft 2007. Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment, MIL-HDBK-1823

Daten

Zusammenfassung $A_{90/95}$ Werte

Pixelauflösung 0,05mm

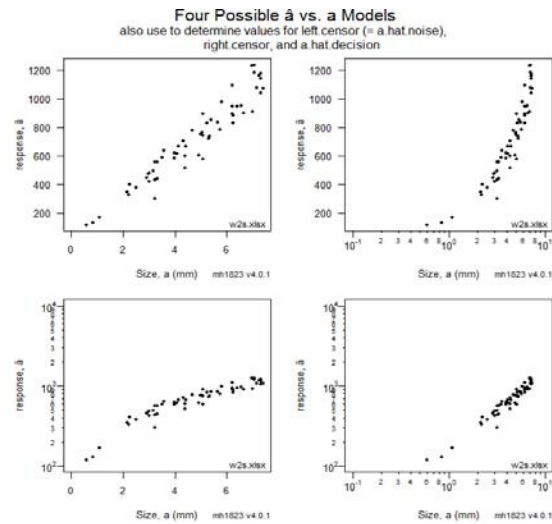
Datensätze 480

Risse pro Breite 60

Licht\Breite	0,15 mm	0,25 mm	0,35mm	0,45 mm
Seitenlicht	1,67	1,04	0,8	0,62
Auflicht	3,29	1,56	1,38	0,9

Daten

Seitenlicht
Risse
Breite 0,15 mm



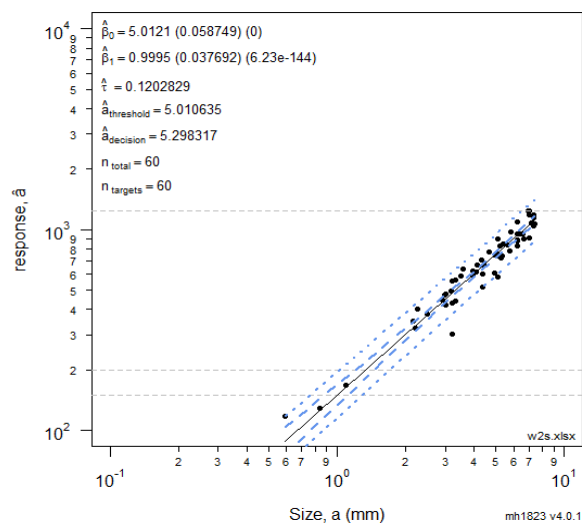
© Fraunhofer ITWM
57

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Daten

Seitenlicht
Risse
Breite 0,15 mm



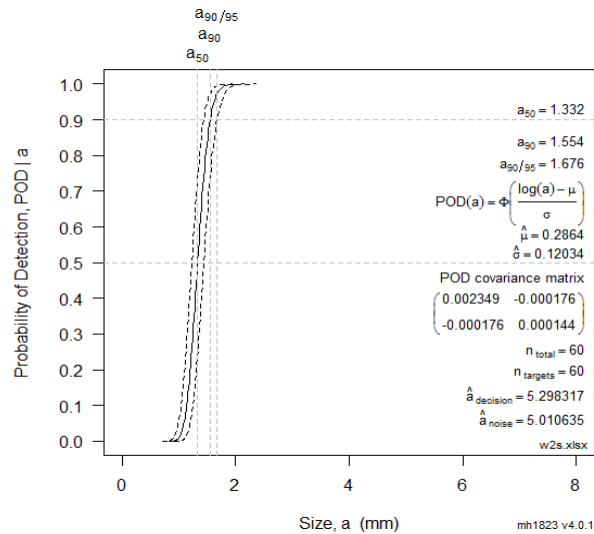
© Fraunhofer ITWM
58

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Daten

Seitenlicht
Risse
Breite 0,15 mm



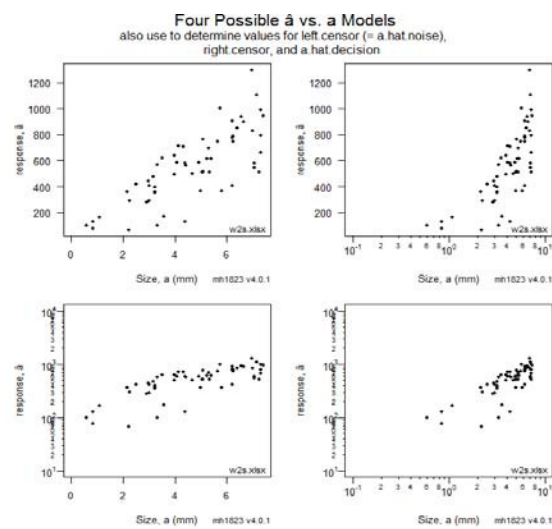
© Fraunhofer ITWM
59

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Daten

Auflicht
Risse
Breite 0,15 mm



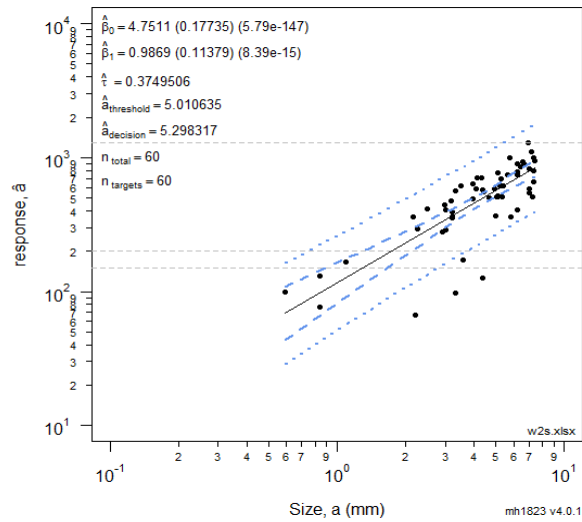
© Fraunhofer ITWM
60

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

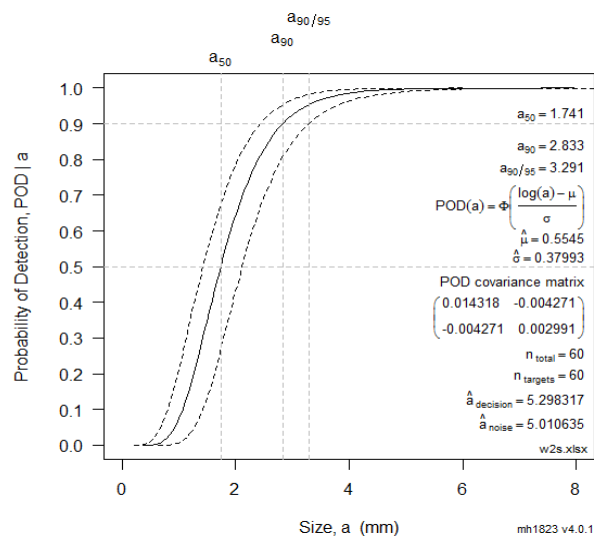
Daten

Auflicht
Risse
Breite 0,15 mm



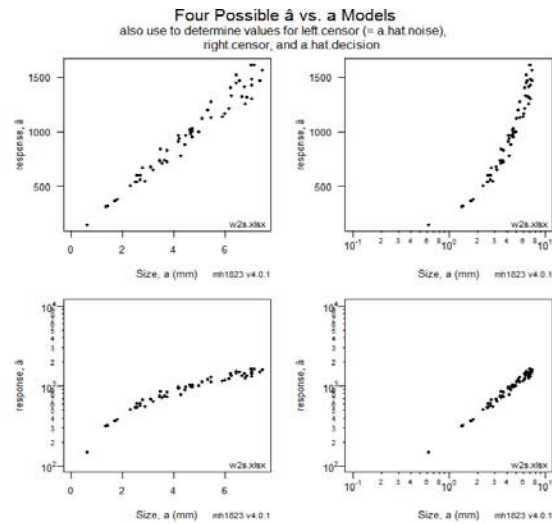
Daten

Auflicht
Risse
Breite 0,15 mm



Daten

Seitenlicht
Risse
Breite 0,25 mm



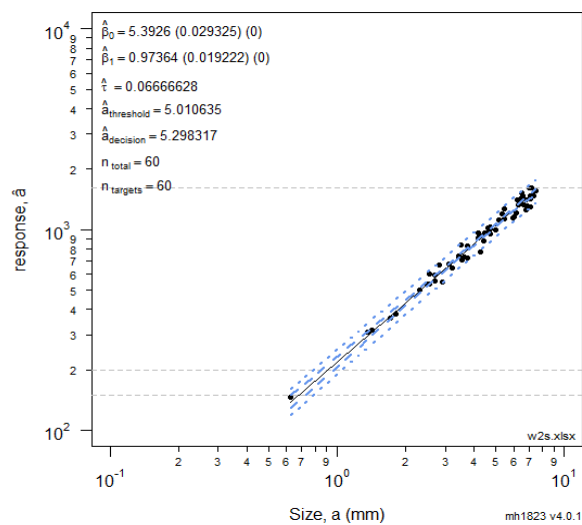
© Fraunhofer ITWM
63

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Daten

Seitenlicht
Risse
Breite 0,25 mm



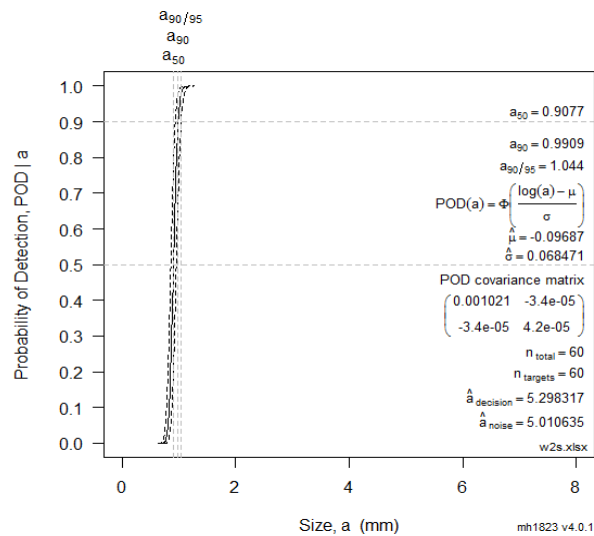
© Fraunhofer ITWM
64

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Daten

Seitenlicht
Risse
Breite 0,25 mm



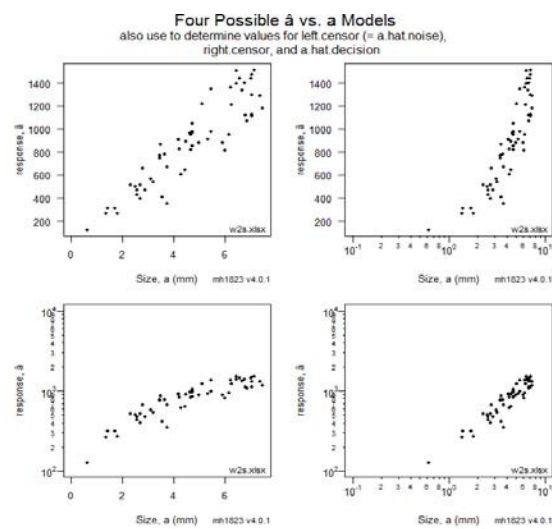
© Fraunhofer ITWM
65

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Daten

Auflicht
Risse
Breite 0,25 mm



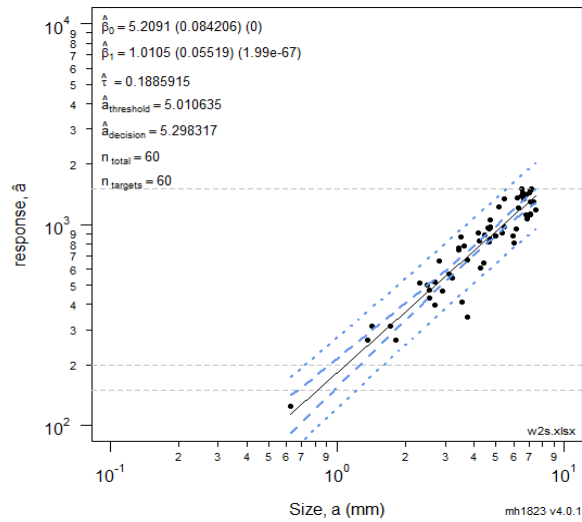
© Fraunhofer ITWM
66

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Daten

Auflicht
Risse
Breite 0,25 mm



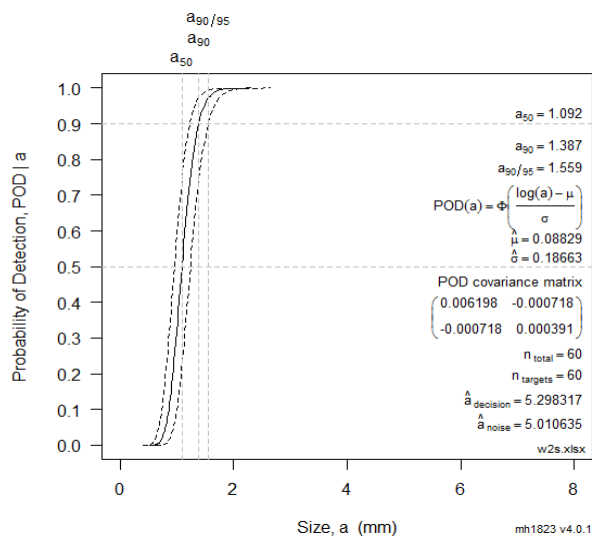
© Fraunhofer ITWM
67

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Daten

Auflicht
Risse
Breite 0,25 mm



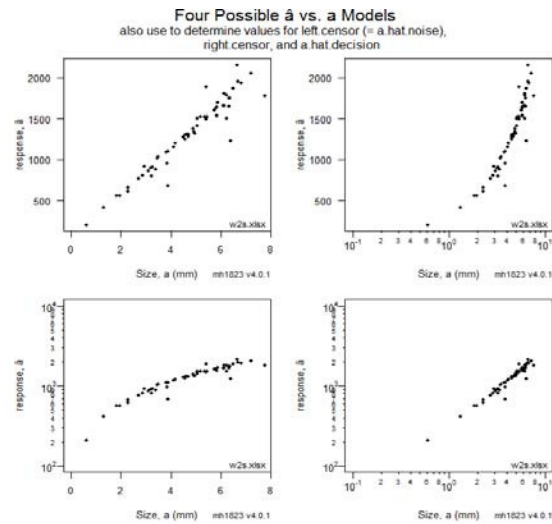
© Fraunhofer ITWM
68

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Daten

Seitenlicht
Risse
Breite 0,35 mm



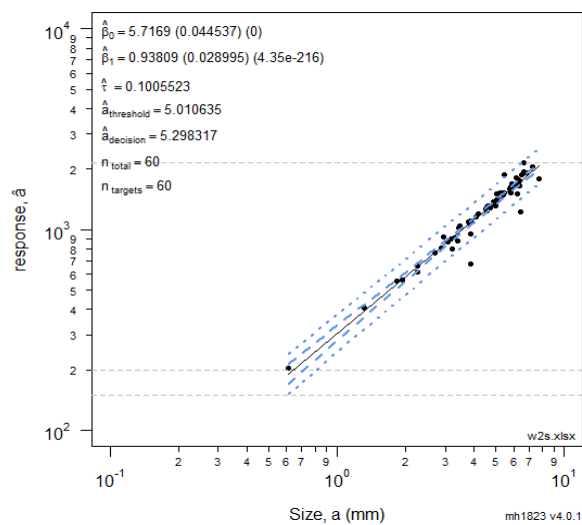
© Fraunhofer ITWM
69

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Daten

Seitenlicht
Risse
Breite 0,35 mm



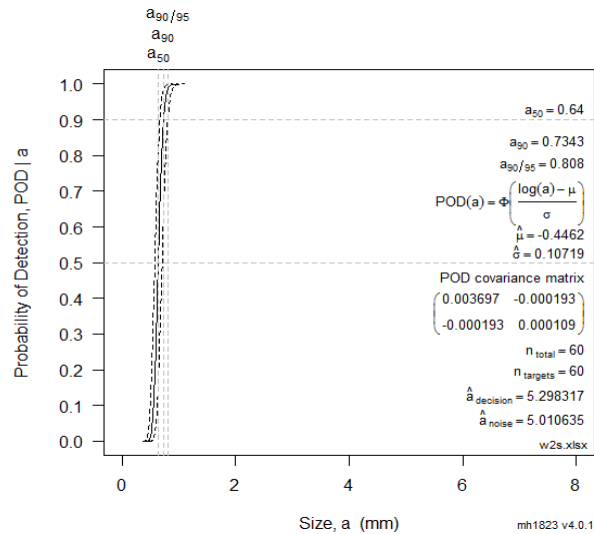
© Fraunhofer ITWM
70

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

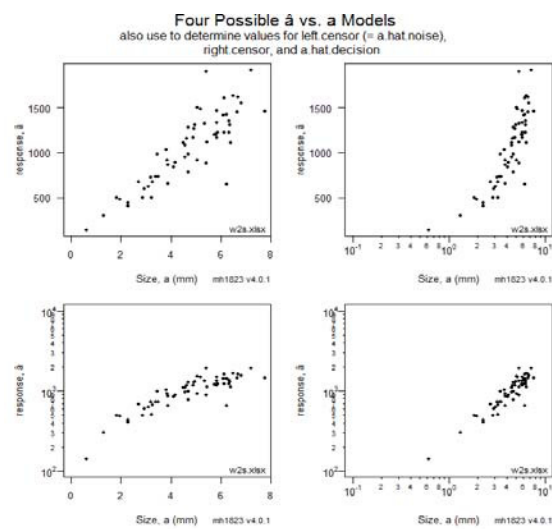
Daten

Seitenlicht
Risse
Breite 0,35 mm



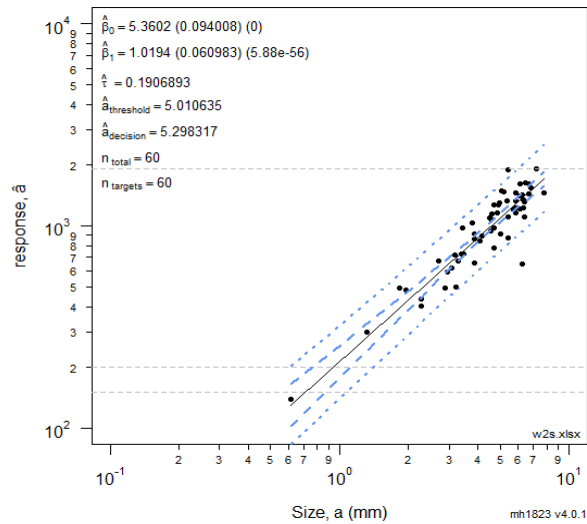
Daten

Auflicht
Risse
Breite 0,35 mm



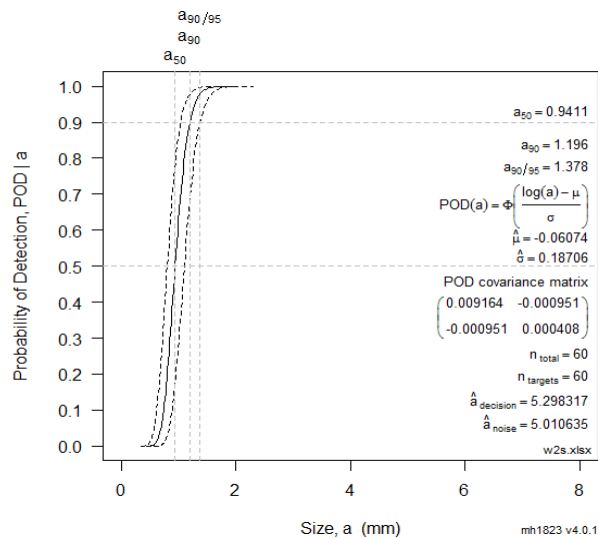
Daten

Auflicht
Risse
Breite 0,35 mm



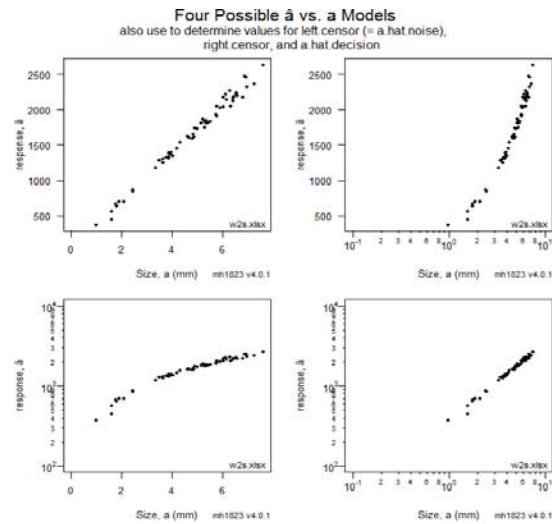
Daten

Auflicht
Risse
Breite 0,35 mm



Daten

Seitenlicht
Risse
Breite 0,45 mm



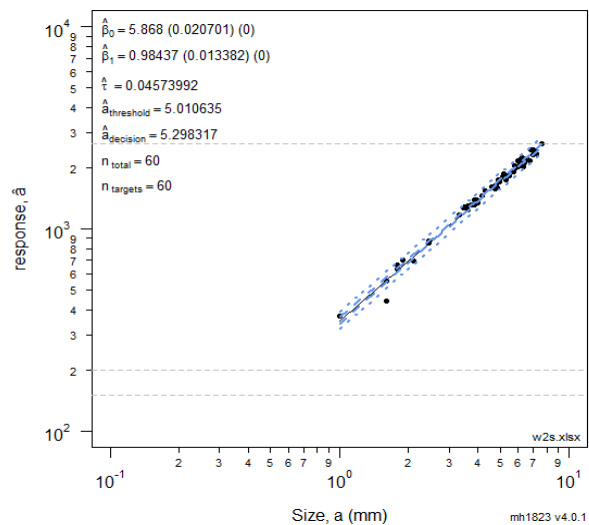
© Fraunhofer ITWM
75

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Daten

Seitenlicht
Risse
Breite 0,45 mm



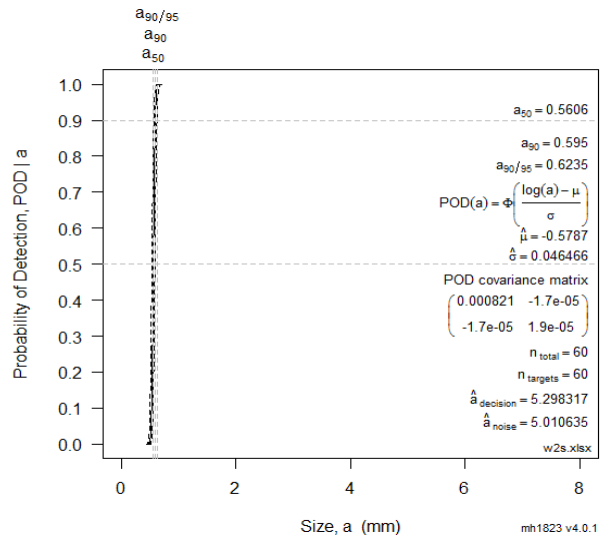
© Fraunhofer ITWM
76

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Daten

Seitenlicht
Risse
Breite 0,45 mm



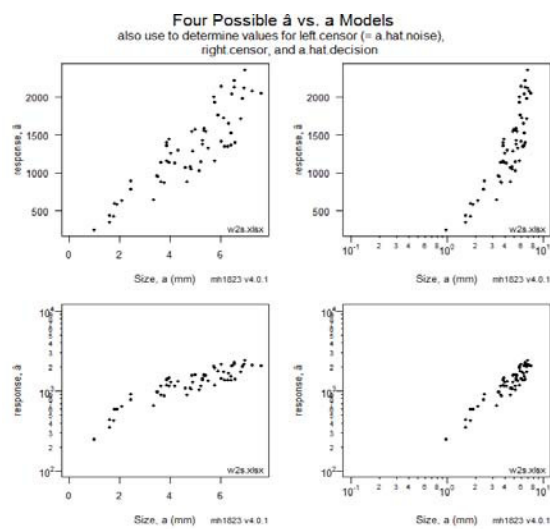
© Fraunhofer ITWM
77

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Daten

Auflicht
Risse
Breite 0,45 mm



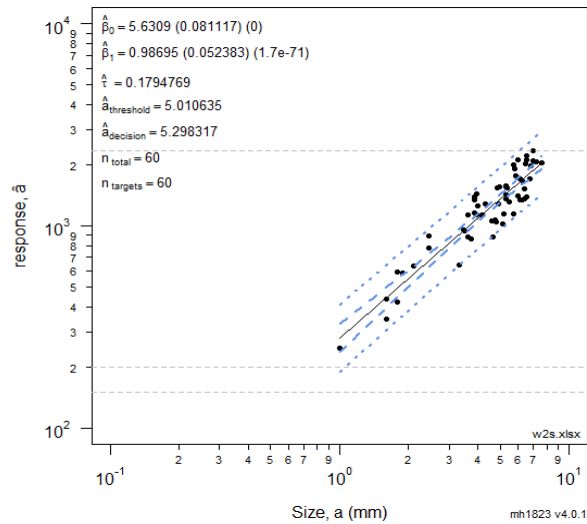
© Fraunhofer ITWM
78

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Daten

Auflicht
Risse
Breite 0,45 mm



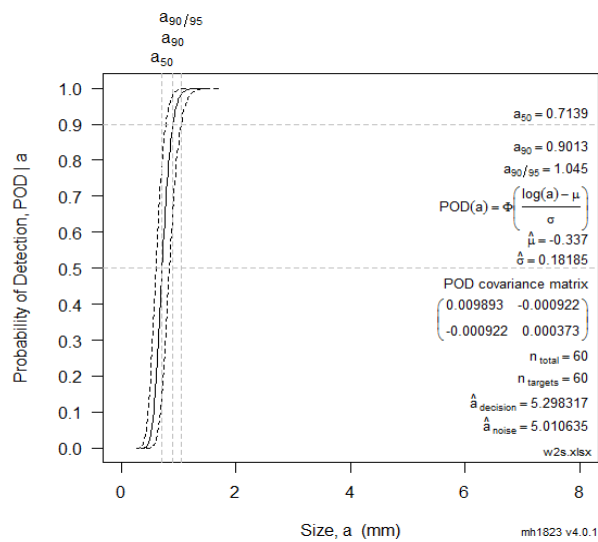
© Fraunhofer ITWM
79

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM

Daten

Auflicht
Risse
Breite 0,45 mm



© Fraunhofer ITWM
80

Competence in NDT&E

Fraunhofer
ITWM