

EMPIR-Projekt NanoXSpot: Neue Normentwürfe für die Brennfleckmessung an Röntgenröhren im Makro-, Mikro- und Nanometerbereich für Hersteller und Anwender

Uwe EWERT¹, Gerd-Rüdiger JAENISCH², David SCHUMACHER²,
Benjamin BIRCHER³, Felix MELI³, Andreas DERESCH⁴

¹ KOWOTEST Gesellschaft für Prüfausrüstung mbH, Teltow

² BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

³ Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS, Labor Länge, Nano- und
Mikrotechnik, Bern-Wabern, Schweiz

⁴ YXLON International GmbH, Hamburg

Kontakt E-Mail: uwe@ewert-net.de

Kurzfassung

Im Rahmen des EMPIR-Projektes NanoXSpot (Nanometre X-ray Focal Spot Measurement) werden rückführbare Messverfahren zur Bestimmung der Brennfleckgröße und -form von Röntgenröhren im Bereich von 100 nm bis 10 mm entwickelt, welche die Grundlage für die Erarbeitung mehrerer Normentwürfe bilden. Diese werden 2022 parallel bei ISO TC 135 (NDT) SC 5 (RT) und CEN TC 138 (NDT) WG 1 (RT) eingereicht. Entsprechende Normen werden auch bei ASTM vorgestellt. Die Norm EN 12543-4 (Kantenmethode) wird umgeschrieben für die Messung von Brennflecken von 1 µm – 10 mm durch Auswertung von Loch- oder Scheibenaufnahmen. Der im Rahmen des NanoXSpot-Projektes neu entwickelte NxS-Testkörper ist geeignet für den Bereich von 1 µm – 100 µm. Von 100 µm bis 10 mm können ASTM-Lochtestkörper verwendet werden, die bereits bei ASTM E 1165 beschrieben sind. Neu ist die Anwendung eines CT-Algorithmus zur Rekonstruktion der Brennflecke, um Lochblenden-basierte Brennfleckkameras, insbesondere im Bereich unter 100 µm, zu ersetzen. Ein neuer Normteil, EN 12543-6, wurde entworfen, um die Brennfleckmessung im Bereich 100 nm – 20 µm mit hoher Genauigkeit zu ermöglichen. Verschiedene Strichgruppen-Testkörper kommen hier zum Einsatz. Das sind die JIMA-Prüfkörper, ein neuer Hochkontrast-Strichgruppentestkörper von YXLON (HiCo) und der neu entwickelte Testkörper NxS. Diese werden vorgestellt. Die Messprozedur für Röhrenhersteller wird auf einer numerischen Fit-Prozedur basieren, die über einen Ringversuch im Projekt validiert wurde. Beide Normen benötigen numerische Auswertelgorithmen zur korrekten Anwendung, die als kommerzielle Software und Public Domain – Software verfügbar gemacht werden. Es wird über die zu erwartenden Standardprozeduren und die erforderliche Hardware zur Anwendung der Normen informiert.



EMPIR-Projekt NanoXSpot

23.05.2022, Kassel

NEUE NORMENTWÜRFE FÜR DIE BRENNFLECKMESSUNG AN RÖNTGENRÖHREN IM MAKRO-, MIKRO- UND NANOMETERBEREICH FÜR HERSTELLER UND ANWENDER

Uwe Ewert¹, Gerd-Rüdiger Jaenisch², David Schumacher², Benjamin Bircher³, Felix Meli³, Andreas Deresch⁴

1 KOWOTEST Gesellschaft für Prüfausrüstung mbH, Teltow, Deutschland

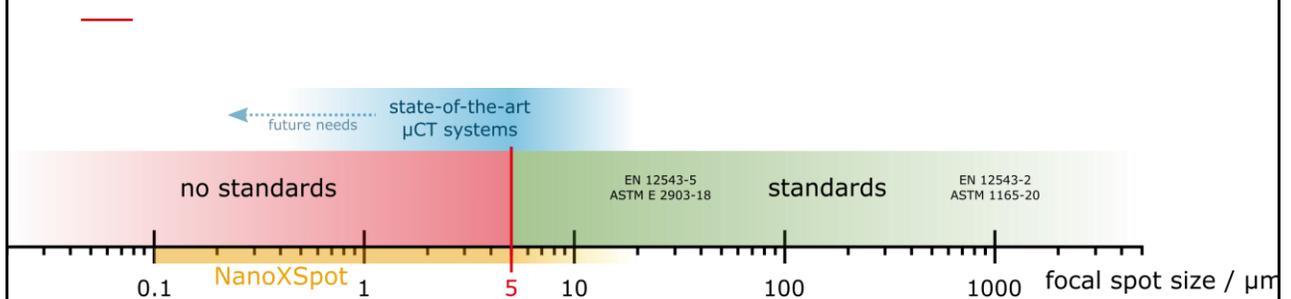
2 BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, Deutschland

3 Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS, Labor Länge, Nano- und Mikrotechnik, Bern-Wabern, Schweiz

4 YXLON International GmbH, Hamburg, Deutschland

This project 18NRM07 NanoXSpot has received funding from the EMPIR programme, co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.

ZfP-Brennfleck-Standards



Im EMPIR-Projekt „NanoXSpot“ werden neue Testkörper, Algorithmen und Standards zur Brennfleckmessung von Mikrofokusröhren mit Brennflecken < 5 µm und Nanofokus-Röhren entwickelt.

ZfP-Brennfleck-Standards

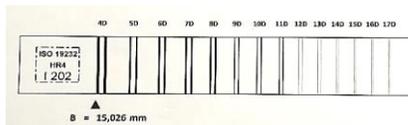
Problemstellung:

- Anwenderstandards erfordern die Einhaltung von genormten Unschärfeanforderungen.
- Wichtig für die **Digitale Radiographie und CT**.
- **ISO 17636-2 (RT-Schweißnahtprüfung) und EN 12681-2 (Gussteilprüfung) fordern die Anwendung des Doppeldraht-Bildgütetestkörpers (DD-BPK).**
- **ASTM/ASME-Standards** geben **eine maximale Bild-Unschärfe** in diversen Anwender-Normen vor.
- Gefordert wird die Messung mit dem **Doppeldraht-Bildgütetestkörper nach ISO 19232-5 oder ASTM E 2002**.
- **Die exakte Brennfleckgröße der Röntgenröhre** wird zur Berechnung der **Bild-Unschärfe** benötigt.

Beispiel: Doppeldraht-Bildgütetestkörper

HR4-Variante für hochauflösende Messungen **ISO 19232-5, ASTM E 2002-21**

Siehe auch
Poster P9



ZfP-Brennfleck-Standards Liniengruppen-Testkörper zur Unschärfe-Messung

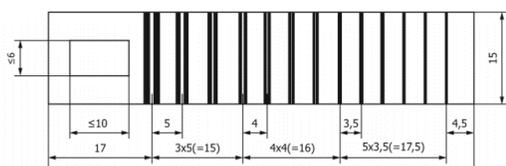
➤ **RT-Anwenderstandards erfordern die Einhaltung von genormten Unschärfeanforderungen.**

Testkörper mit Linienpaaren:

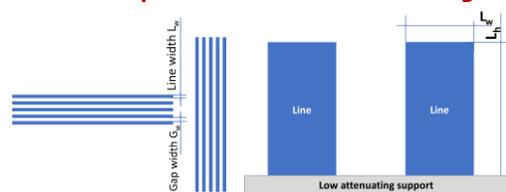
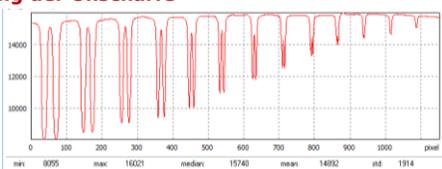
Doppeldraht oder Doppelplatten-BPK (ISO 19232-5)

Liniengruppen-BPK

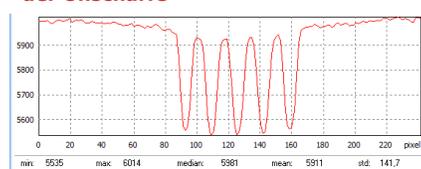
Mehrere Linienpaare verbessern die Genauigkeit



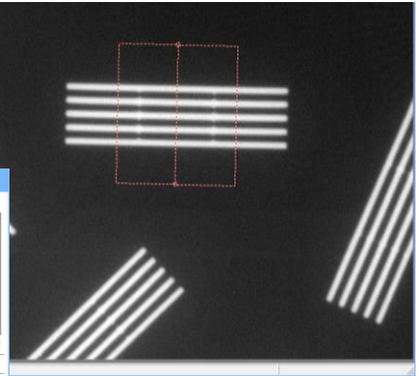
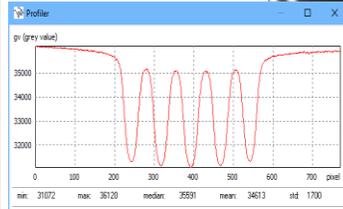
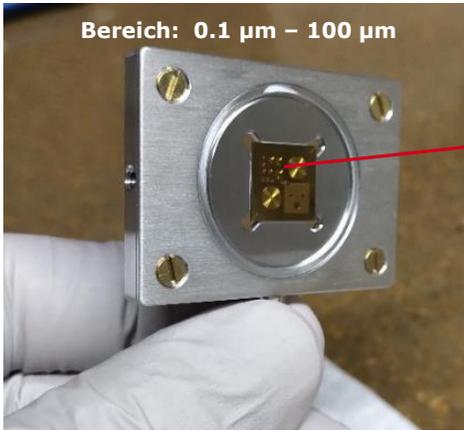
Profil eines Doppeldraht-BPKs (ISO 19232-5) zur Messung der Unschärfe



Liniengruppen-Profil zur Messung (prEN12543-6) der Unschärfe



Neue Liniengruppen-BPKs zur Messung von Brennflecken < 100 µm

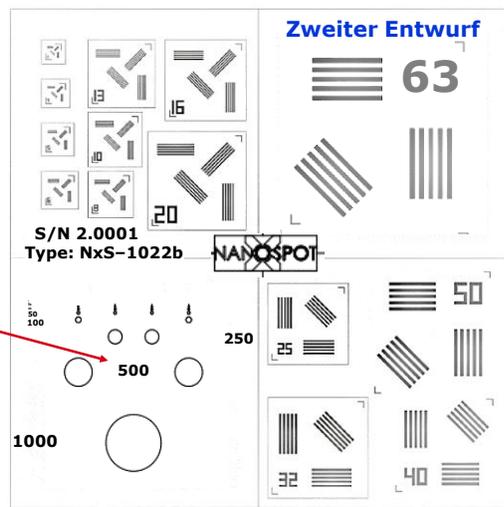
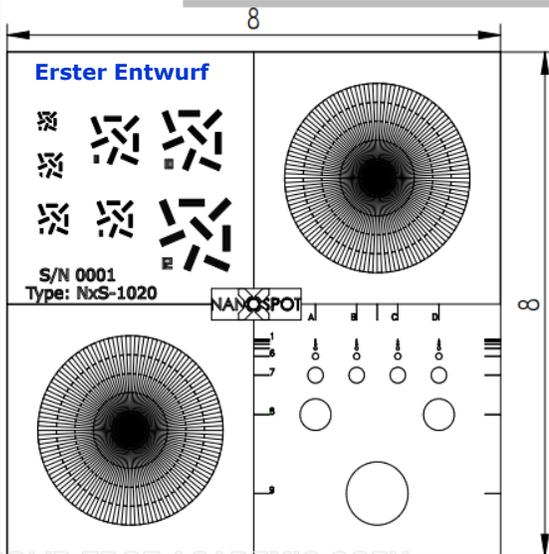


prEN 12543-6

Neuer Testkörper, neue Software

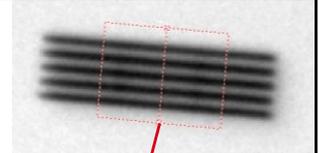
Non-destructive testing — Characteristics of focal spots in industrial X-ray systems for use in non-destructive testing — Part 6: **Line Group Method** for measurement of the effective focal spot size of micro and nano focus X-ray tubes with spot sizes < 100 µm

Brennfleck-Standards – Linien Gruppen Testkörper



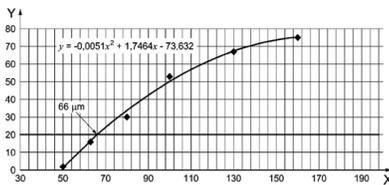
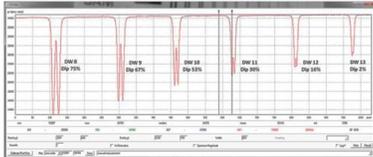
New Design 2.0 b

ZfP-Brennfleck-Standards Anwender-Methode



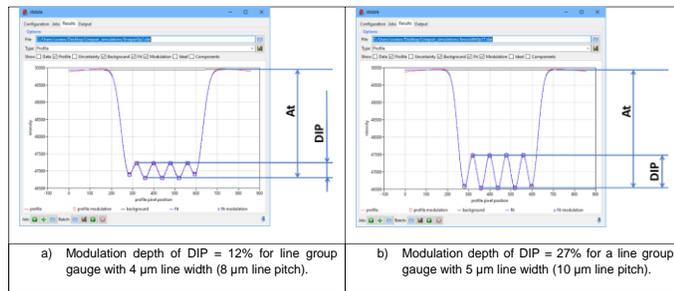
Testkörper mit Linienpaaren

Bestimmung der interpolierten Unschärfe nach ISO 19232-5 mit Doppeldraht-BPK.

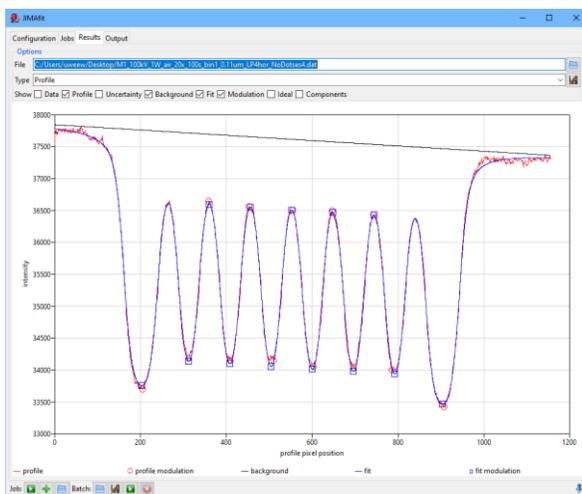
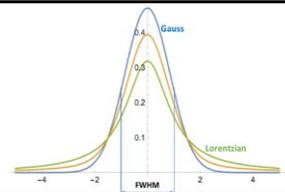


Anwender-Standardentwurf zur Brennfleckmessung (s) aus einer Unschärfe-Messung mit Liniengruppen-BPKs nach neuem Entwurf prEN12543-6 durch interpolierte Unschärfe-Messung.

$$s = \frac{M}{M-1} \cdot \sqrt{\left(iU_{image} (20\%) \right)^2 - \left(\frac{2}{M} iSR_b^{detector} \right)^2}$$



ZfP-Brennfleck-Standards Hersteller-Methode



Numerischer Fit mit Pseudo Voigt-Funktion

Bestimmt wird die Unschärfe aus einer Pseudo Voigt-Fit-Funktion als gewichtete Summe einer Gauss- und Lorentz-Verteilung aus der Profilkfunktion.

Software als Open Public-Version verfügbar:
<https://nanoxspot-project.cea.fr>

Resultat:

Die Brennfleckgröße „s“ der Anwendermethode wird berechnet aus der vollen Breite der gefitteten Brennflecklinien-Funktion in halber Höhe (FWHM) mit:

$$s = 1,24 \cdot FWHM$$

Brennfleck-Standards Messbereiche und Brennfleck-Klassen

Nominale Werte, Brennfleck-Klassen und Messbereichsgrenzen

Der größere der beiden Werte, gemessen in X- und Y-Richtung, muss für die Angabe der Brennfleckgröße verwendet werden.

Tabelle A.1

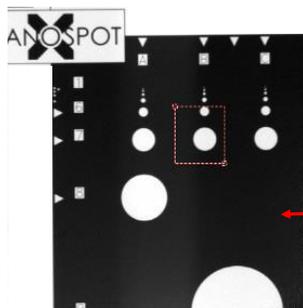
Nominal focal spot size (SS) in μm	Measured focal spot size s in μm		Class number
20	20	$\geq s >$	16
16	16	$\geq s >$	12,7
12,7	12,7	$\geq s >$	10
10	10	$\geq s >$	8
8	8	$\geq s >$	6,3
6,3	6,3	$\geq s >$	5
5	5	$\geq s >$	4
4	4	$\geq s >$	3,2
3,2	3,2	$\geq s >$	2,5
2,5	2,5	$\geq s >$	2
2	2	$\geq s >$	1,6

Brennfleck-Standards Brennfleckrekonstruktion aus Lochaufnahmen

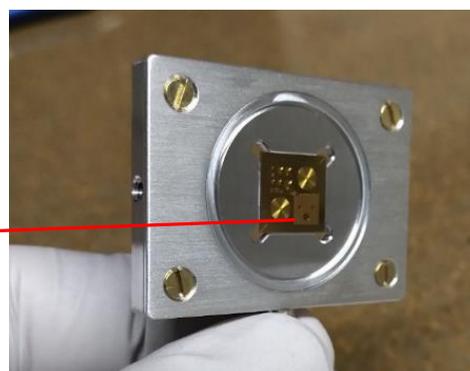
**ASTM E 1165-20,
Annex für Anwender**



Teil 4



Teil 7



prEN 12543-7

Non-destructive testing — Characteristics of focal spots in industrial X-ray systems for use in non-destructive testing — Part 7: Focal spot reconstruction method for measurement of the effective focal spot size of micro and nano focus X-ray tubes < 100 μm

Brennfleck-Standards

Brennfleckrekonstruktion aus Lochaufnahmen

Lochkanten-Methode

Anwendungsbereich:

Die folgenden zwei Dokumente zur Brennfleckmessung sind zur Charakterisierung verschiedener Röhrentypen anzuwenden.

prEN 12543-7 → **Brennfleckrekonstruktion aus Lochaufnahmen** als Alternative/Ergänzung zur Anwendung von Pin-Hole-Kameras

- Nano- and Mikrofokus-Brennfleckgrößen **0,3 µm – 100 µm**

prEN 12543-4 → **Kanten-Methode, analog zu ASTM E 1165, Annex A**

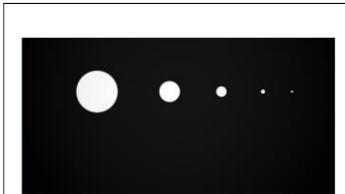
- Mini- and Makrofokus-Brennfleckgrößen **≥ 100 µm**

Achtung: Verschiedene Testkörper werden benötigt für die verschiedenen Anwendungsbereiche.

Brennfleck-Standards

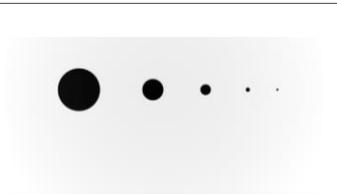
Lochkantenmethode

Löcher



a) Example of a gauge with 5 holes of different diameters from 50-10000 µm in a gold layer.

Scheiben



b) Example of a gauge with 5 disks of gold of different diameters from 50-1000 µm on a silicon layer.

Fig. 1: Scheme of a hole and a disk group gauge.

Testkörper mit Löchern oder Scheiben im Bereich von

Brennfleckgrößen **< 100 µm**

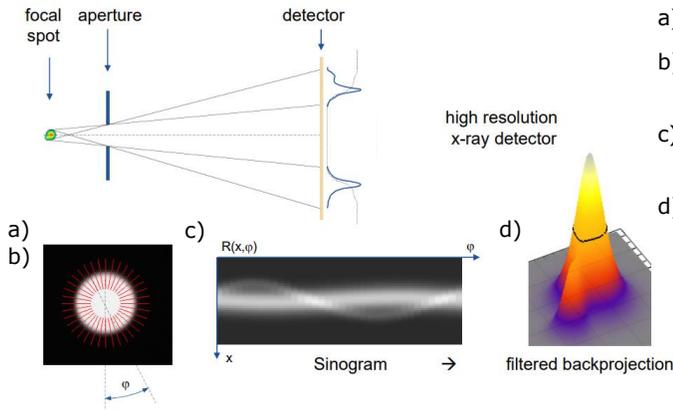
Lochdurchmesser HD

$$15 \cdot afs > HD > 5 \cdot afs$$

afs – geschätzte Brennfleck-Größe

Brennfleck-Standards

Brennfleckrekonstruktion zur Messung der 2D-Verteilung, äquivalent zur Lochkamera-Methode

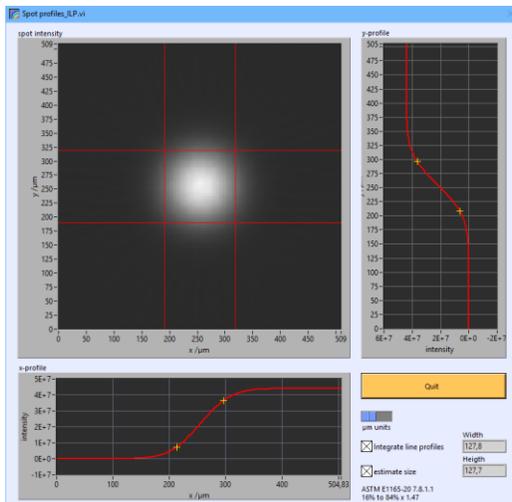


- a) Messung einer Lochradiographie.
- b) Berechnung von Lochkantenprofilen über den Umfang (360°).
- c) Berechnung eines Sinogramms durch 1. Ableitung der Profildfunktionen.
- d) Rekonstruktion der Brennfleckprofile aus dem Sinogramm.

- a) Measurement scheme
- b) Hole image with profiles in different directions
- c) Sinogram as taken from the measured profiles
- d) Reconstructed focal spot shape by filtered backprojection.

Brennfleck-Standards

Bestimmung der Brennfleckgröße in Analogie zur Lochkammermethode nach EN 12543-2 bzw. ASTM E 1165

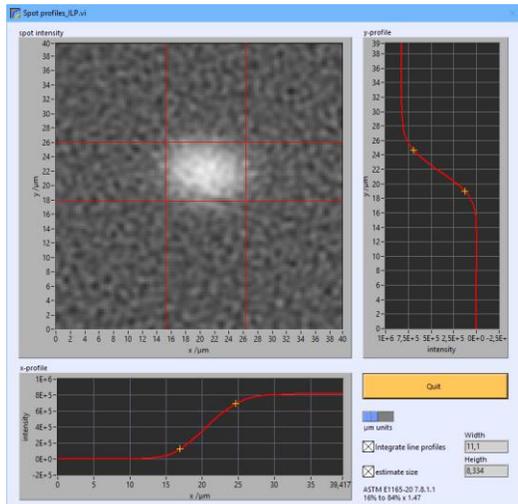


$$S_{ERF} = \frac{M}{M-1} \sqrt{(ERV)^2 - \left(\frac{2}{M} \cdot iSR_b^{detector}\right)^2}$$

- S_{ERF} - Brennfleckgröße, bestimmt aus dem Kantenprofil
- ERV - Wert der Kantenunschärfemessung nach EN 12543-2 aus der Brennfleckrekonstruktion
- M - Vergrößerung der Lochabbildung
- $iSR_b^{detector}$ - interpolierte Basisortsauflösung des Detektors

Brennfleck-Standards

Bestimmung der Brennfleckgröße äquivalent zur Lochkamera-Methode nach ASTM E 1165, Annex



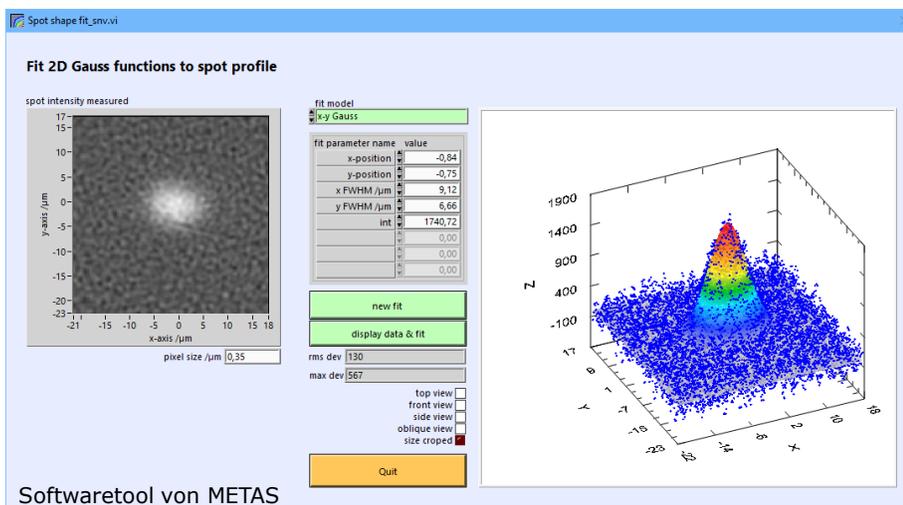
Beispiel einer Messung mit „verrauschem“ Rekonstruktionsresultat.

Durch die Anwendung der „Integrated Line Profil“-Methode nach EN 12543-2 und ASTM 1165 enthalten die Kantenprofile wenig Störungen durch Rauschen.

Horizontal: 11,1 μm
Vertical: 8,3 μm

Brennfleck-Standards

Auswertung durch numerischen Fit mit einer pseudo-Voigt-Funktion zur Rauschunterdrückung



Fitfunktion hier: Linearkombination einer asymmetrischen Gauss- und Lorentz-Funktion (pseudo Voigt-Funktion).

Die Brennfleck-Form und -Größe wird durch numerischen Fit rauschfrei wiedergegeben.

Softwaretool von METAS

Zusammenfassung

- Im **EMPIR-Projekt „NanoXSpot“** wurden genormte Verfahren zur Brennfleckmessung (**EN 12543-Serie und ASTM E 1165 und E 2903**) analysiert und für Brennfleckmessungen **< 5 µm** erweitert.
- **Zwei neue Normteile wurden ausgearbeitet:**
 - Brennfleckmessung mit **Liniengruppen-Testkörpern; prEN 12543-6.**
 - Brennfleckmessung durch **numerische Rekonstruktion von Kantenprofilen** von Loch- oder Scheiben-Testkörpern als **Alternative zu Lochkameraaufnahmen** für Brennflecke < 100 µm; prEN 12543-7.
- **Neue Testkörper mit Liniengruppen und Lochgruppen** wurden entworfen und hergestellt zur Messung von Brennflecken im Bereich von 0,2 µm – 100 µm.
- Die Standardentwürfe und Testkörper werden im Projekt NanoXSpot in einem **Ringversuch** überprüft und die Messgenauigkeit wird ermittelt.
- Zum Jahresende sollen die **Normentwürfe eingereicht** werden.
- Die **Auswertesoftware wird als „Open Public-Software“** bereitgestellt.

ENDE

Fragen... ?



uwe@ewert-net.de