

Ergebnisse des EMPIR-Projektes NanoXSpot: Methoden für die Brennfleckmessung von Röntgenröhren im Mikro- und Nanometerbereich

Gerd-Rüdiger JAENISCH¹, Uwe EWERT², Benjamin BIRCHER³, Felix MELI³,
Andrii ANDRII SOFIENKO⁴, Jens Peter STEFFEN⁵, Andreas DERESCH⁶,
Virpi KORPELAINEN⁷, Frank POHLENZ⁸, Marius COSTAIN⁹

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

² KOWOTEST Gesellschaft für Prüfausrüstung mbH, Langenfeld

³ ehemals Federal Institute of Metrology METAS, Laboratory for Length, Nano- and
Microtechnology, Bern-Wabern, Schweiz

⁴ Excillum AB, Kista, Schweden

⁵ X-RAY WorX GmbH, Garbsen

⁶ Comet Yxlon GmbH, Hamburg

⁷ Teknologian tutkimuskeskus VTT, Oy, Finnland

⁸ Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

⁹ Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, Paris, Frankreich

Kontakt E-Mail: gerd-ruediger.jaenisch@bam.de

Kurzfassung

Im Rahmen des EMPIR-Projektes NanoXSpot (Nanometre X-Ray Focal Spot Measurement) wurden rückführbare Messverfahren zur Bestimmung der Brennfleckgröße und -form von Röntgenröhren mit Submikrometerauflösung (100 nm – 100 µm) entwickelt, die die Grundlage für die Erarbeitung zweier Standardentwürfe bilden. Dafür wurden folgende Methoden entwickelt: Fit-Prozedur für Strichgruppenkörper und Brennfleck-Rekonstruktion. Eine entsprechende Software einschließlich Referenzbildern, die kostenfrei zur Verfügung gestellt wird, wurde entwickelt. Des Weiteren wurde ein neuer Testkörper, NxS, entwickelt und metrologisch charakterisiert, um die Rückführbarkeit der Brennfleckmessung sicherzustellen. Die Standardentwürfe wurden bei CEN TC 138 (Non-destructive testing) WG 1 (Radiographic testing) eingereicht: prEN12543-6_2022_(E): Part 6: Measurement of the effective focal spot size of micro- and nanofocus X-ray tubes with spot sizes < 100 µm und prEN12543-7_2022_(E): Part 7: Focal spot reconstruction technique from hole images.

DACH-Tagung, Friedrichshafen, 15. – 17. Mai 2023

Ergebnisse des EMPIR-Projektes NanoXSpot: Methoden für die Brennfleckmessung von Röntgenröhren im Mikro- und Nanometerbereich

G.-R. Jaenisch¹, U. Ewert², B. Bircher³, F. Meli³, A. Sofiienko⁴, J. P. Steffen⁵,
A. Deresch⁶, V. Korpelainen⁷, F. Pohlentz⁸ und M. Costin⁹

¹BAM, Berlin, DE, ²KOWOTEST, Langenfeld, DE, ³METAS, Bern, CH, ⁴Excillum, Kista, SWE,
⁵X-RAY WorX, Garbsen, DE, ⁶Comet Yxlon, Hamburg, DE, ⁷VTT, Oy, FIN,
⁸PTB, Braunschweig, DE, ⁹CEA, Gif-sur-Yvette, FR

www.bam.de

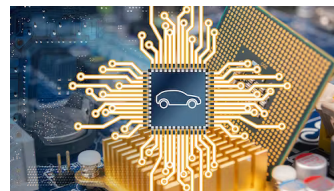
This project 18NRM07 NanoXSpot has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.

Das Project NanoXSpot Motivation

- Neue Generation von Röntgenröhren mit Nanometer-Brennflecken
- Künftige Anforderungen von verschiedenen Industriesektoren: Auflösung von Strukturen bis zu 50 nm
- Keine Norm für die Messung von Brennflecken kleiner 5 µm



Brennfleckgröße
ca. 300 nm



Sicherheitskritische
Elektroniksysteme
in modernen
Fahrzeugen*

EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE
EUROPAISCHE NORM

EN 12543-5

September 2005

ICS 19.100

English version

Non-destructive testing - Characteristics of focal spots in industrial X-ray systems for use in non-destructive testing - Part 5. Measurement of the effective focal spot size of mini and micro focus X-ray tubes

In order to cover also the micro focus systems, a specific method is presented in EN 12543-5.

1 Scope

This European standard specifies a method for the measurement of focal spot dimensions within the range of 5 µm to 300 µm of X-ray systems up to and including 225 kV tube voltage, by means of radiographs of sharp edges.

The image quality and the resolution of X-ray images highly depend on the characteristics of the focal spot. The imaging qualities of the focal spot are based on the two dimensional intensity distribution in the object plane.

For certification purposes the radiographic technique is used.

*Quelle: <https://www.all-electronics.de/automotive-transportation/von-domaenen-zu-zonen-architektur-fuer-autonome-autos-neu-gedacht-197.html>

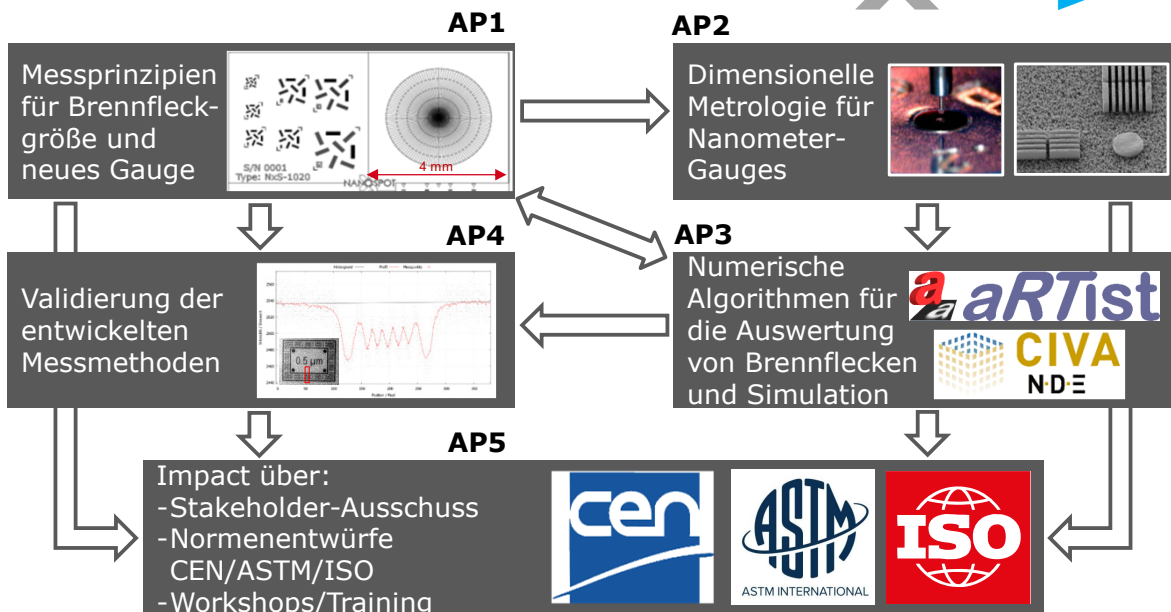
Das Projekt NanoXSpot

Überblick



- Das Konsortium
 - Koordinator: BAM
 - Intern finanzierte Partner: BAM METAS VTT
 - Extern finanzierte Partner: list excillum KOWOTEST X-RAY WorX
 - Nicht finanzierte Partner: comet PIB ZEISS
- Weitere Mitwirkende: Waygate Technologies FMT LEHRSTUHL FÜR FERTIGUNGSMESSTECHNIK
- Der Stakeholder-Ausschuss
 - 18 Stakeholder aus Industrie, Forschungsinstituten und Normungsgremien (insgesamt 28 Mitglieder)
 - Chief-Stakeholder: Waygate Technologies, Digital Solutions, Baker Hughes

Das Projekt NanoXSpot



Annahme über die Brennfleckform Pseudo-Voigt-Profile

- Point Spread Function:

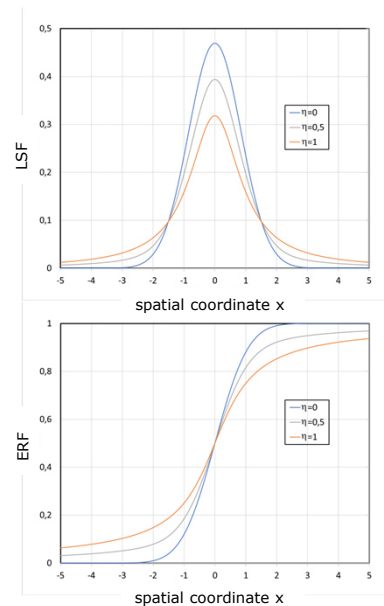
$$p(x, y) = \frac{\eta}{2\pi a^2} \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2 + y^2}{a^2}\right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{(1-\eta) \ln 2}{\pi a^2} \exp\left(-\frac{\ln 2}{a^2}(x^2 + y^2)\right)$$

- Line Spread Function:

$$l(x) = \frac{\eta}{\pi a} \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{a}\right)^2} + \frac{1-\eta}{a} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp\left(-\ln 2 \left(\frac{x}{a}\right)^2\right)$$

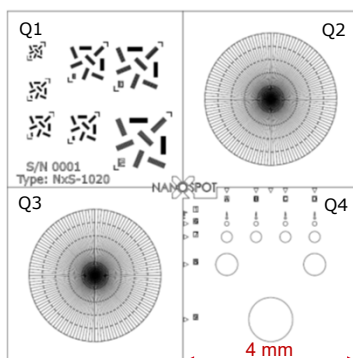
- Edge Response Function:

$$ERF(x) = \frac{\eta}{\pi a} \left(a \arctan \frac{x}{a} + \frac{\pi a}{2} \right) + \frac{1-\eta}{2} \left(\operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{\ln 2} x}{a} \right) + 1 \right)$$

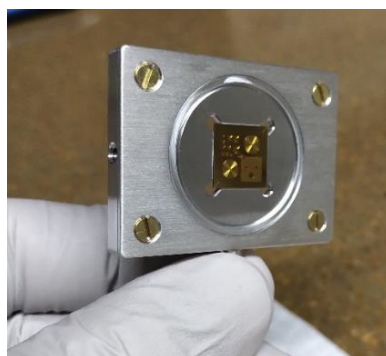


Ergebnis 1 Neues NanoXSpot-Gauge (NxS)

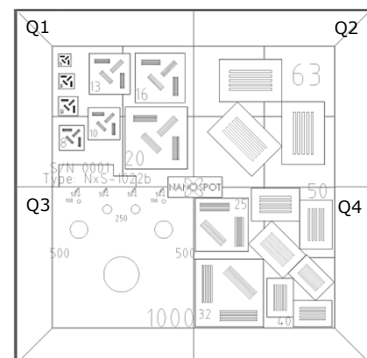
Keine geeigneten Gauges kommerziell verfügbar



Erstes Design



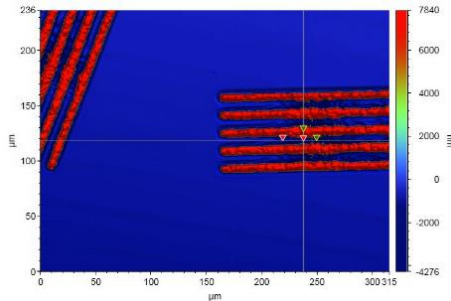
Gauge-Halter



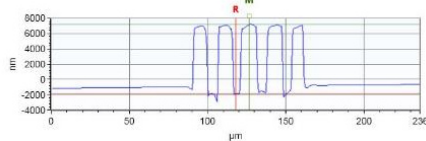
Endgültiges Design

Ergebnis 2

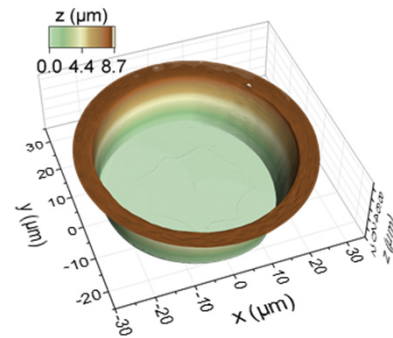
Metrologische Charakterisierung des NxS-Gauge zur Rückführbarkeit



Y Profile: $\Delta X = 8.6233 \mu\text{m}$, $\Delta Z = 9053.2802 \text{ nm}$



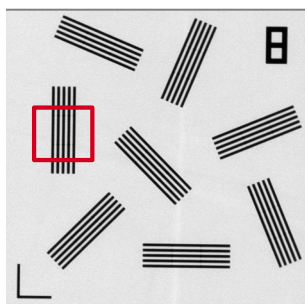
Inspektion mittels Weißlicht-Interferometrie (WLI) für 3 μm Liniengruppe und Y-Profile.



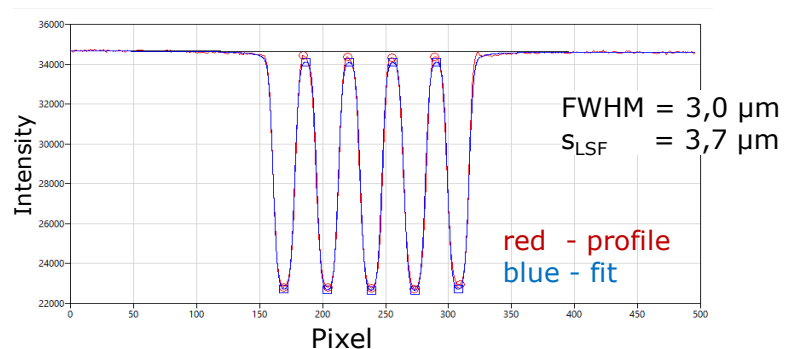
Messergebnisse für die Durchmesserbestimmung am 50 μm Loch mit einem lang-reichweisigem metrologischen Rastersonden-Mikroskop (Met. LR-SPM)

Ergebnis 3

Automatisierte Liniengruppenbewertung: Fit-Prozedur



Radiographische Projektion mit gemitteltem Profil

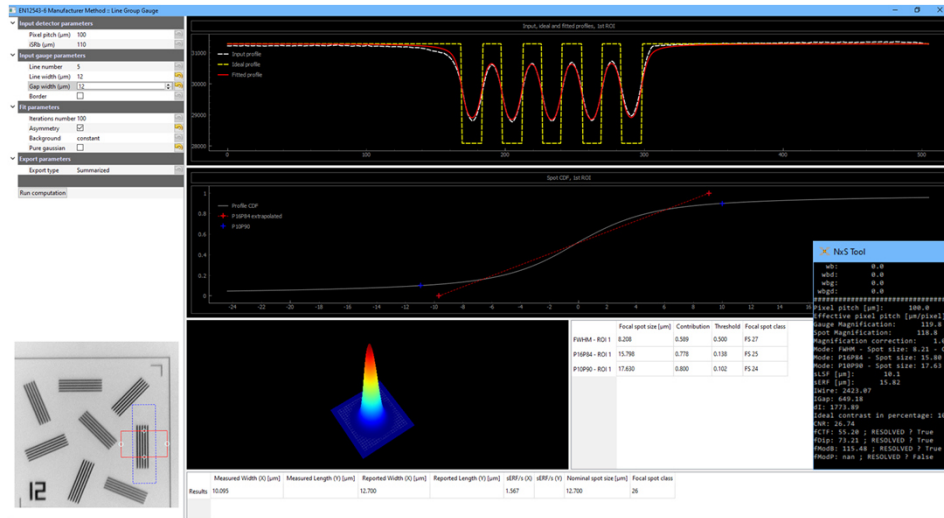


Profil und entsprechender Fit

 **Automatisierte Bestimmung der Brennfleckgröße**

Ergebnis 3

NxS Tool zur Bestimmung des Brennflecks



Implementation der Fit-Prozedur im NxS Tool durch CEA*, frei verfügbar im Internet

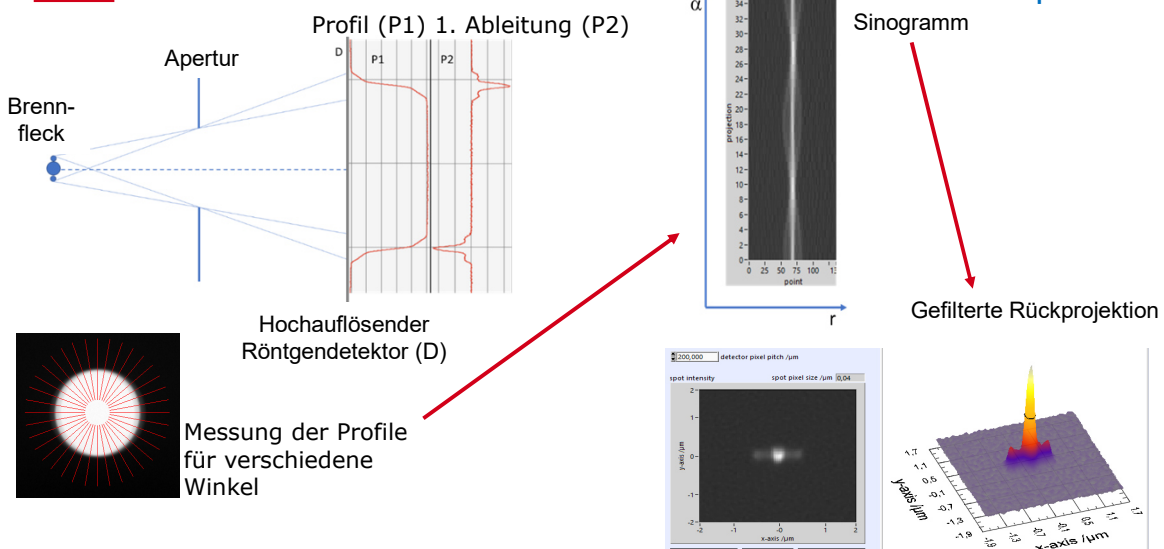
*<https://nanoxspot-project.cea.fr/>

Ergebnis 4

Brennfleck-Rekonstruktion: Prinzip

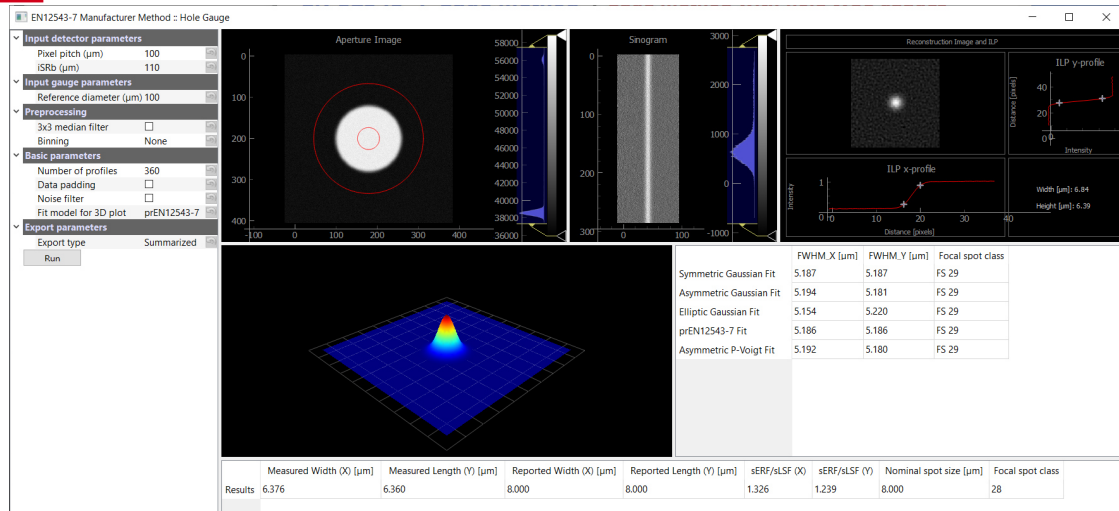


prEN 12543 - 7



Ergebnis 4

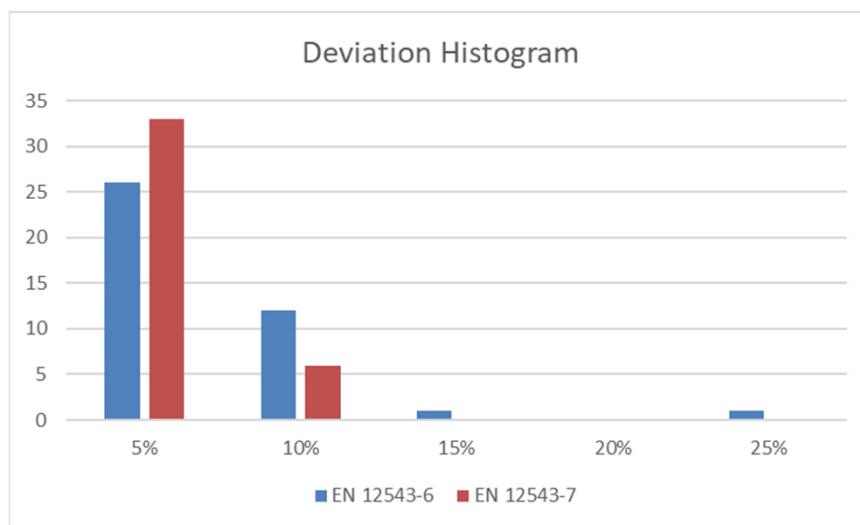
NxS Tool zur Bestimmung des Brennflecks



Implementation der Brennfleck-Rekonstruktion im NxS Tool durch CEA, frei verfügbar im Internet

Ergebnis 5

Round-Robin-Test zum Nachweis der Anwendbarkeit der Normen



Blau:
Liniengruppenauswertung

Rot:
Brennfleckrekonstruktion

Ergebnis:
95% der Liniengruppenauswertung und 100% der Brennfleckrekonstruktion erfüllen die Anforderung, dass die Messunsicherheit 10% oder kleiner sein soll.

Ergebnis 6

Normenentwürfe und Revisionen eingereicht



- **Zwei bei CEN-TC 138 WG 1 eingereichte Normenentwürfe**

- prEN12543-part 6: Brennfleckmessung mit Liniengruppen-Testkörpern
- prEN12543-Part 7: Brennfleckrekonstruktion aus Lochaufnahmen



CEN/TC 138/WG 1 N 682

CEN/TC 138/WG 1 "Radiographic testing"
WG Secretariat: DIN
Convenor: Ewert Uwe Mr Dr. rer. nat.



CEN/TC 138/WG 1 N 686

prEN12543-6_2022_(E)_v10_clean (agenda item 11.1)

Document type	Related content	Document date	Expected action
Project / Draft		2022-10-12	

CEN/TC 138/WG 1 "Radiographic testing"
WG Secretariat: DIN
Convenor: Ewert Uwe Mr Dr. rer. nat.



Draft prEN 12543-7

Document type	Related content	Document date	Expected action
Project / Draft		2022-10-24	

Ergebnis 6

Normenentwürfe und Revisionen eingereicht



- **Vier bei CEN-TC 138, ISO und ASTM eingereichte Revisionen**

- EN 12543-Part 2: Radiographisches Lochkamera Verfahren, eingereicht bei ISO-TC 135 SC 5
- prEN 12543-Part 4: Kantenmethode mit Loch-Prüfkörpern
- prEN 12543-Part 5: Messung der effektiven Brennfleckgröße von Mini- und Mikrofokus-Röntgenröhren
- ASTM E 1165: Standard Test Method for Measurement of Focal Spots of Industrial X-Ray Tubes by Pinhole Imaging



- **Projekt NanoXSpot erfolgreich 2022 abgeschlossen:**
<https://www.ptb.de/empir2019/nanoxspot/project/>
- **Neues NanoXSpot Gauge (NxS) entwickelt und verfügbar**
- **Auswertesoftware und Referenzbilder frei im Internet verfügbar:**
<https://nanoxspot-project.cea.fr/>
- **Zwei bei CEN-TC 138 WG 1 eingereichte Normenentwürfe**
- **Vier bei CEN-TC 138, ISO und ASTM eingereichte Revisionen**
- **Trainingsworkshop frei im Internet verfügbar:**
<https://my.hidrive.com/share/v4b8.ohntc>