

Vermessung von COMET MesoFocus-Röhren mit der Brennfleck-Kamera „KOWOSPOT X“

Fritz HÖRAUF¹, Klaus BAVENDIEK¹, Uwe ZSCHERPEL²

¹ KOWOTEST GmbH, Langenfeld

² BAM, Berlin

Kontakt E-Mail: fh@kowotest.de

Kurzfassung. Mit der digitalen KOWOSPOT X Kamera wurden an 3 verschiedenen COMET 225kV MesoFocus-Röhren die Brennflecke nach EN12543-2 / ASTM E1165 vermessen und die Ergebnisse untereinander, sowie mit der Kantenmethode nach EN12543-5 und mit der User-Methode nach ASTM E1165, die bei COMET als Referenz verwendet wird, verglichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Lochkamera-Methode bei ausreichender Vergrößerung, kleinstmöglichem Loch und geeignetem Detektor in der Lage ist, die Brennflecke der neuen MesoFocus-Röhren zuverlässig mit geringer Toleranz zu vermessen – das gilt auch für die 50W Brennflecke. Im Vortrag werden dazu an der BAM aufgenommene Brennfleck-Bilder sowie die Bilder und Ergebnisse der Referenzmessungen der beiden anderen Norm-konformen Methoden gezeigt.

Zusätzlich wurden bei deutlich höheren Energien an einem COMET 450kV MesoFocus-Röhrenprototyp Brennfleck Aufnahmen gemacht. Damit wurde die Frage beantwortet, ob der digitale Detektor - im Gegensatz zum klassischen „Zahnarzt-Film“ - auch bei Röntgenenergien oberhalb von 200keV eingesetzt werden kann und wie sich eine eventuelle Durchstrahlung der Lochblende auswirkt.

Einführung

Als Hersteller von Bildgüte-Prüfkörpern (BPK oder IQI) für die Röntgenprüfung wird KOWOTEST auch von Kunden gefragt, warum die Bildqualität so begrenzt ist – z.B. der von der Norm geforderte Doppeldrahtsteg nicht mehr aufgelöst wird. Da sich die Film- sowie DDA-Auflösung physikalisch bedingt nur selten ändern, liegt das meist am Brennfleck der verwendeten Röntgenröhre. Um den Brennfleck einfach und schnell vermessen zu können, hat KOWOTEST mit der KOWOSPOT X eine Brennfleck Kamera entwickelt, die sehr unkompliziert zu bedienen ist und trotzdem alle gängigen Normen erfüllt.



Abb. 1. Kowospot im Einsatz an 450kV MesoFocus © Customer Solutions Center Ahrensburg, Waygate Technologies.



Mit ein paar Mausklicks erhält man die Brennfleckgröße zusammen mit Bild und Protokolleintrag für den Prüfbericht. Die Brennfleck Kamera wird inzwischen von führenden Herstellern von Röntgenröhren und auch von mehreren Anwendern der Film-Technik und digitaler Detektoren eingesetzt.

Mit der neuen MesoFocus Baureihe hat COMET die Brennfleckgröße von fix-Vakuum Röhren sehr stark verkleinert und bietet mit Doppeldraht-BPK Auflösungen von $<40\mu\text{m}$ eine neue Performance Klasse an, die bisher offenen μ -Fokus Röhren vorbehalten war. Die gängigen Normen mit dem Lochkamera sind ab $100\mu\text{m}$ Brennfleckgröße einsetzbar; die ASTM E1165-20 startet sogar ab $50\mu\text{m}$, allerdings mit Genauigkeits-Einschränkungen. Die hier diskutierte Untersuchungen sollen klären, ob die Brennfleck Kamera KOWOSPOT X auch für die Vermessung solch kleiner Brennflecke noch geeignet ist.

1. Technik der KOWOSPOT Kamera und KowoSpot Software

Die KOWOSPOT X ist als modulare Kamera aus einzelnen Elementen zusammengesetzt.

A: Röhren Adapter

B: Lochblenden Element

C: Verlängerungs-Elemente

D: Aufnahme Element mit Digital-Detektor

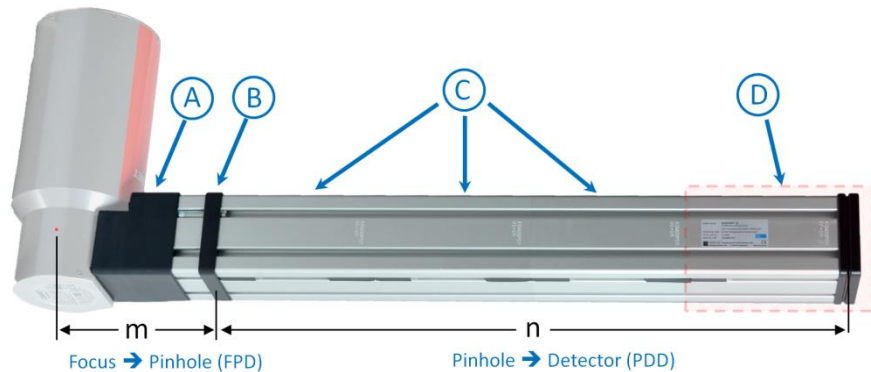


Abb. 2. KOWOSPOT Brennfleck Kamera mit Vergrößerung FPD/PDD von 4:1

Der modulare Aufbau ermöglicht, dass die Kamera passend zur erwarteten Brennfleckgröße normkonform zusammengestellt werden kann.

Tabelle 1. Fokus Klassen nach ASTM E1165-20 / EN12543-2 und notwendige Vergrößerungen

Focal Spot	max.	min.	min.	min.	Tube	Pinhole	Profile Elements "C"			Detector	USB	
Class	Size φ	Pinhole	FPD (m)	PDD (n)	n / m	Adapter	Element	#V1 *	# V1 opt.	# V2 opt.	Element	Ext. Cable
	[μm]	Diam. P	[cm]	[cm]		[AD]	[B μm]	(15cm)	(15cm)	(30cm)	(15cm)	(plus 5m)
FS 20	50	10	15	135	9:1	opt.	B10	2		3	D	opt.
FS 19	63	10	15	120	8:1	opt.	B10	2	1	2	D	opt.
FS 18	80	10	15	120	8:1	opt.	B10	2	1	2	D	opt.
FS 17	100	10	15	105	7:1	opt.	B10	2		2	D	opt.
FS 16	127	10	15	90	6:1	opt.	B10	2	1	1	D	opt.
FS 15	160	10	15	90	6:1	opt.	B10	2	1	1	D	opt.
FS 14	200	10	15	75	5:1	opt.	B10	2		1	D	opt.
FS 13	250	10	15	60	4:1	opt.	B10	2	1		D	opt.
FS 12	320	10	15	45	3:1	opt.	B10	2			D	opt.
FS 11	400	10	15	45	3:1	opt.	B10	2			D	opt.
FS 10	500	30	15	45	3:1	opt.	B30	2			D	opt.
FS 9	630	30	15	45	3:1	opt.	B30	2			D	opt.
FS 8	800	30	15	45	3:1	opt.	B30	2			D	opt.
FS 7	1000	30	15	45	3:1	opt.	B30	2			D	opt.
FS 6	1270	30	15	45	3:1	opt.	B30	2			D	opt.
FS 5	1600	100	15	45	3:1	opt.	B100	2			D	opt.
FS 4	2000	100	15	45	3:1	opt.	B100	2			D	opt.
FS 3	2500	100	15	45	3:1	opt.	B100	2			D	opt.
FS 2	3200	100	30	30	1:1	opt.	B100	2			D	opt.
FS 1	4000	100	30	30	1:1	opt.	B100	2			D	opt.
FS 0	5000	100	30	30	1:1	opt.	B100	2			D	opt.

Um die gesamte Bandbreite an Brennflecken von über 6mm bis hinunter zu 0,05mm Größe mit einem Gerätesatz abbilden zu können, sind 3 verschiedene Lochblenden-Größen **P** der Lochkamera verfügbar.

Die Software ist für einfache Benutzung optimiert und quasi selbsterklärend.

1. Kamera einschalten

2. Bild einziehen

3. Bild auswerten

4. Bild laden

5. Bild speichern

6. Ergebnis in Tabelle und Datei abspeichern

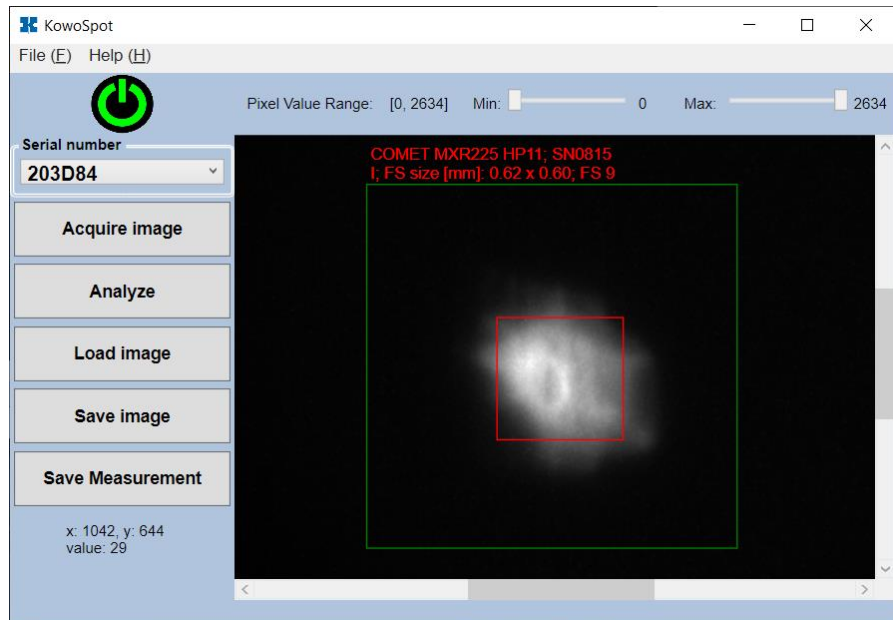
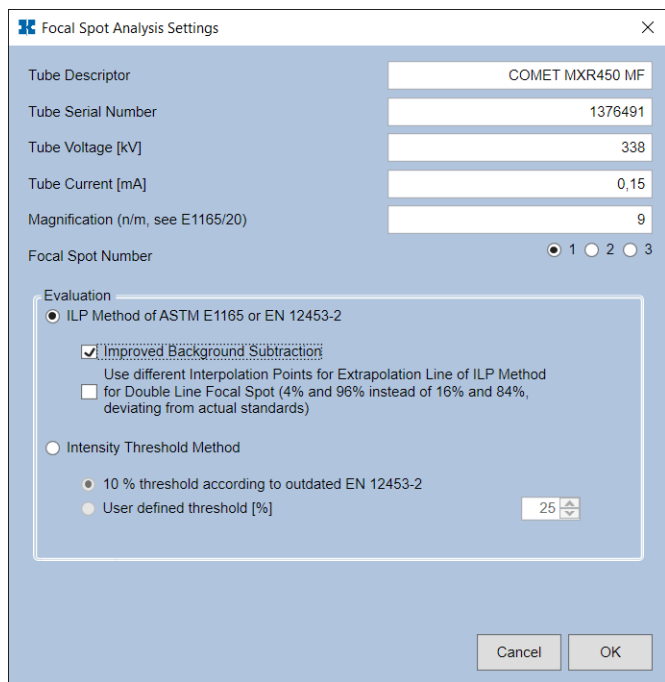


Abb. 3. Bedienoberfläche der KowoSpot Software mit Abbildung eines Brennfleck aus Klasse FS9

Die KowoSpot Software erlaubt die Auswertung nach den aktuellen Normen mittels integrierten Linienprofil als auch nach der Schwellwert-Methode der veralteten EN12543-2:2008 sowie mit beliebigen Schwellwerten, z.B. nach IEC60336.

Die Angaben zur Röhre, die Seriennummer, die verwendete Spannung und der Strom sowie die gewählte Vergrößerung werden in der Ergebnistabelle hinterlegt.

Da alle Daten per Default in dieser Tabelle abgelegt werden, kann später nach dieser einzelnen Röhre einfach gesucht werden. Auch die Degradation über die Zeit kann so einfach für jede getestete Röhre nachverfolgt werden.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
12	Date of Test	Tube Descriptor	Tube Serial	Tube Vol	Tube Curr	Focal Sp	Magni	Measured Wit	Measured Hei	Reported Wid	Reported Hei	Focal Spot Cl	Evaluation Me	Focal Spot SN
13	01.11.2021 14:35	COMET MXC-451MF	1376491	338	1,33	5	9	0,293	0,507	0,32	0,63	FS 9	ASTM 1165	23,119
14	01.11.2021 14:42	COMET MXC-451MF	1376491	338	1,04	4	9	0,227	0,356	0,25	0,4	FS 11	ASTM 1165	33,607
15	01.11.2021 14:49	COMET MXC-451MF	1376491	338	0,74	3	9	0,173	0,24	0,2	0,25	FS 13	ASTM 1165	55,039
16	01.11.2021 14:56	COMET MXC-451MF	1376491	338	0,3	2	9	0,12	0,127	0,127	0,127	FS 16	ASTM 1165	117,187
17	01.11.2021 15:05	COMET MXC-451MF	1376491	338	0,15	1	9	0,076	0,076	0,08	0,08	FS 18	ASTM 1165	226,201

Abb. 4. Beispiel einer Ergebniss-Tabelle einer Auswertung mit der KowoSpot Software

2. Die Auswerte-Methoden nach ASTM E1165⁽²⁾ / E2903⁽³⁾ bzw. EN12543-2 / -5⁽¹⁾

Die Auswerte Methode nach ASTM E1165-20 gleicht der Methode der EN12543-2:2021. Es wird eine kleine Lochblende (Pinhole) verwendet und damit ein Abbild des Brennflecks erzeugt, das von einem Detektor aufgenommen wird (Prinzip der Camera Obscura).

Die Auswerte Methode nach ASTM E2903 gleicht der Methode der EN12543-5. Es wird eine Kante abgebildet und die Brennfleckgröße ergibt sich aus der Unschärfe der Kantenabbildung orthogonal zur Kante. Da jeweils nur eine Richtung vermessen werden kann, muss zweimal gemessen werden oder es sind gekreuzte Kanten in einem Bild.

Eine dritte Methode stellt die „User-Method“ im Anhang der ASTM E1165 dar; dort wird mit einem Loch-BPK die Kantenunschärfe in 360° aufgenommen. Diese Methode soll bei der nächsten Revision der EN12543 als Teil 4 eingebaut werden.

2.1 Die ILP Messmethode in der ASTM E1165 / EN12543-2

Die Methode der Integrierten Linien Profile (ILP) hat die alte 10% Schwellwert Methode abgelöst, da diese zu großen Werten bei den heute verwendeten Brennflecken führt; besonders die Referenzen zur Kantenmethode als auch zu Messungen mit dem Doppeldraht-BPK ergeben kleineren Brennfleckgrößen als die 10% Schwellwertmethode.

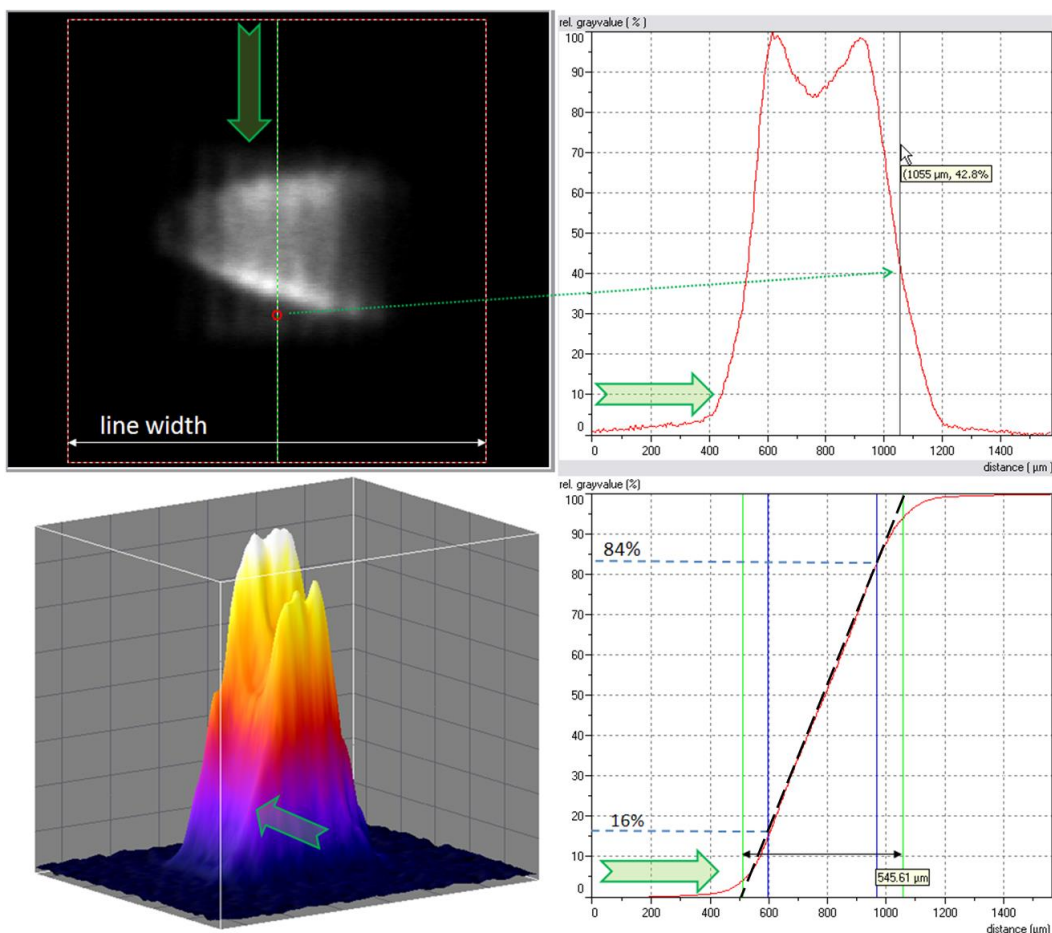


Abb. 5. Prinzip der Methode des Integrierten Linien Profiles (ILP), ASTM E1165 / EN12543-2:2021

Bei der ILP Methode wird senkrecht zum Brennfleck ein breites Linienprofil gezogen (Abb.4. oben). Anschließend wird entlang des Profils aufsummiert, sodass sich ein Verlauf wie in Abb.4. unten rechts ergibt (Integration der Lochabbildung zu einer Kantenabbildung). Eine Gerade wird durch die Schnittpunkte bei 16% und 84% gelegt und die auf 0% bis 100% hochgerechneten Werte (grüne Linien) sind das Ergebnis.

2.2 Die Kantenmethode in der ASTM E2903 / EN12543-5

Bei der Kantenmethode werden die beiden Kanten einer Draht-Abbildung ausgewertet.

Zur Auswertung wird ein Linienprofil senkrecht zum Draht gelegt. Die Abstände der Punkte von 50% und 84% [A -> B] an der steigenden Flanke und von 84% bis 50% [D -> C] an der fallenden Flanke werden addiert und linear auf 100% interpoliert.

Diese Messmethode wird überwiegend für Mikro-Fokus Röhren eingesetzt und ist von 200µm bis runter zu 5µm spezifiziert.

Da die kleinen Brennflecke der Mesofocus Röhre in diesem Größenbereich liegen, liegt ein Vergleich auf der Hand.

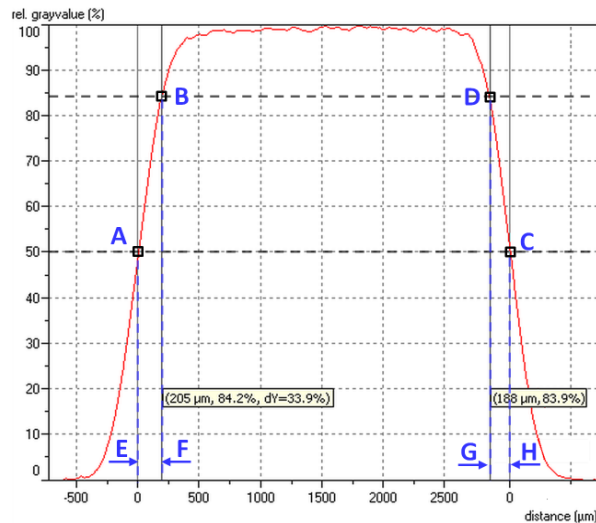


Abb. 6. Prinzip der Auswertung bei der Kantenmethode, ASTM E2903

2.3 Die User-Methode in der ASTM E1165- Anhang A (mit Loch-BPK)

Die User-Methode verwendet auch eine Kantenabbildung und ist damit vergleichbar zu oben – mit dem Unterschied, dass die Abbildung einer Lochkante statt von Drahtkanten ausgewertet wird.

3. Auswertung de COMET 225kV MesoFocus-Röhren

Für die bisher „üblichen“ Brennflecke von ~0,4mm bis 6mm ist der Aufbau der Brennfleckkamera sehr einfach (s. Abb. 2). Etwas schwieriger gestaltet sich die Vermessung des Brennflecks, wenn dieser deutlich kleiner ist. Für eine normkonforme Abbildung eines 50µm Brennfleck wird bereits eine Vergrößerung von 9 gefordert. Trotz des passenden Adapters ist bei der Länge eine mittige Abstützung hilfreich (s. Abb. 1).

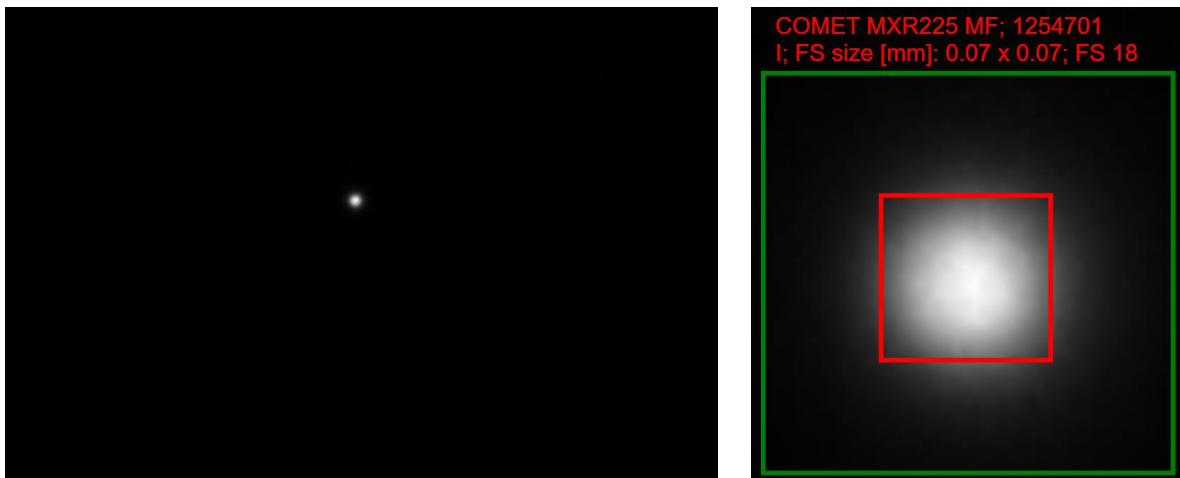


Abb. 7. 60µm Brennfleckaufnahme (links) und Auswertung (rechts)

Trotz der Vergrößerung von 9 ergibt sich immer noch eine recht kleine Brennfleckabbildung auf dem Detektor. Da ist es gut, dass der Detektor in der KOWOSPOT X mit 20µm sehr kleine Pixel hat und dank des strukturierten Szintillators ein scharfes Bild liefert.

Die ersten Ergebnisse mit der neuen COMET 225kV Mesofocus Röhre zeigen sensationell runde und kleine Brennfleck im Bereich von 60µm bei eingestellten 50W Leistung. Auch der Brennfleck bei 100W eingestellter Leistung liegt mit ~130µm sehr deutlich unterhalb dessen, was bisher mit geschlossenen Fix-Vakuum Röhren erreicht werden konnte. Auch dieser Brennfleck ist erfreulich rund und symmetrisch, was für ein gutes Bild wichtig ist. Bei 200W Röhrenleistung ist der Brennfleck immer noch deutlich unterhalb von 250µm und ebenfalls sehr symmetrisch.

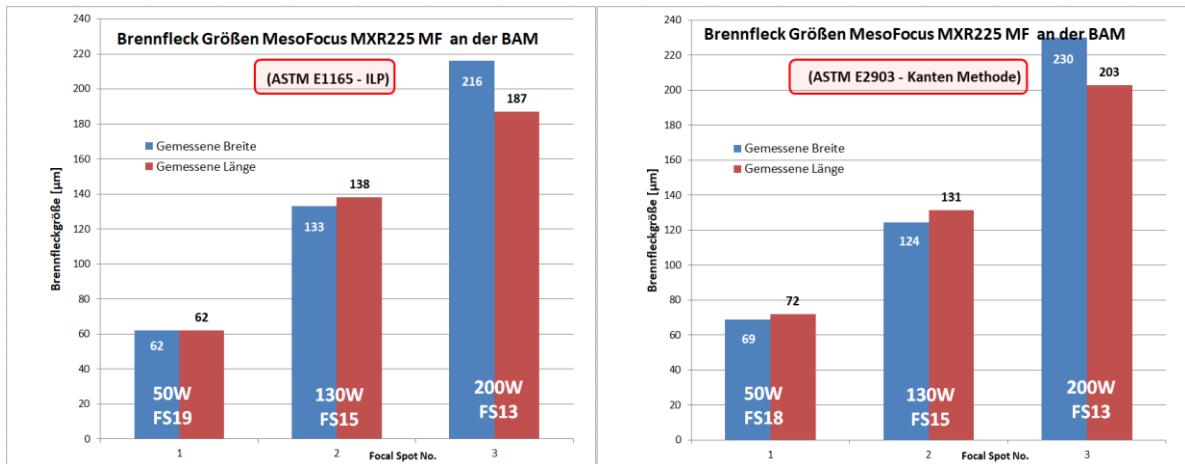


Abb. 8. Messergebnis der Brennfleckgrößen der MXR225 MF (ILP links, Kante rechts)

Diese sehr guten Ergebnisse haben uns motiviert, die Auswertung mit der Kantenmethode zu wiederholen. Abb. 8 zeigt, dass die Ergebnisse vergleichbar sind, also die KOWOSPOT X Kamera hier auch noch unter 100µm Brennfleckgröße vergleichbare Resultate erzielt.

Zusätzlich wurden drei 225kV MesoFocus Röhre bei 3 verschiedenen Firmen vermessen.

Der Brennfleck bei 50W ist bei allen Röhren sehr symmetrisch und liegt zwischen 62µm und 72µm (Focal Spot Klasse FS18). Die als Referenz betrachtete Kantenmethode mit dem Draht ist ganz rechts angegeben.

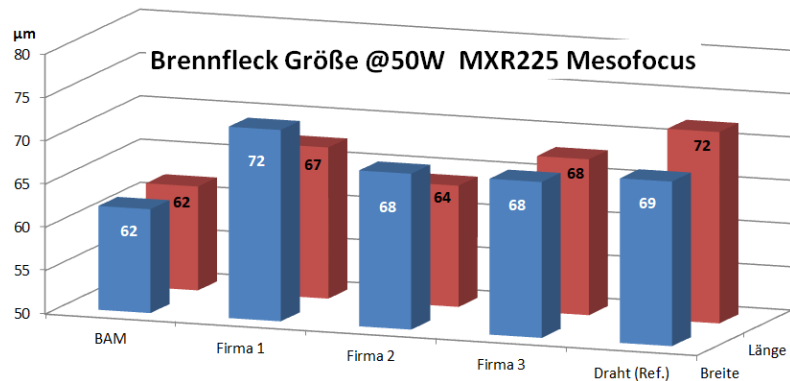


Abb. 9. Vergleich der COMET MXR225 MF Ergebnisse bei 50W (4 verschiedene Röhren und Orte)

Der Brennfleck bei 100W ist bei allen Röhren auch recht symmetrisch und liegt zwischen 122µm und 148µm (Focal Spot Klasse FS15).

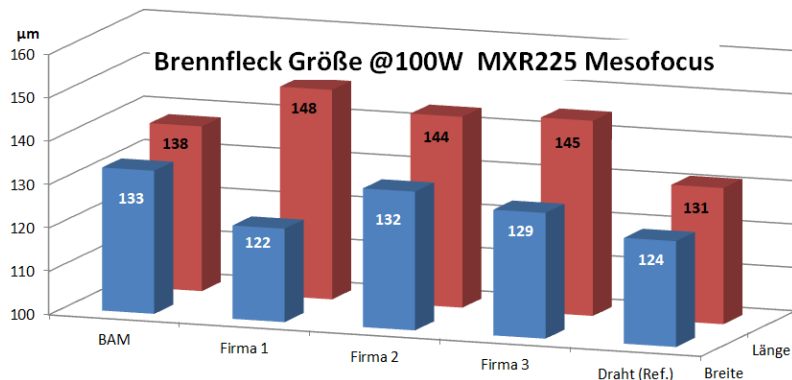


Abb. 10. Vergleich der COMET MXR225 MF Ergebnisse bei 100W (4 verschiedene Röhren und Orte)

Der Brennfleck bei 200W ist bei allen Röhren auch sehr symmetrisch und liegt zwischen $178\mu\text{m}$ und $230\mu\text{m}$ (Focal Spot Klasse FS13).

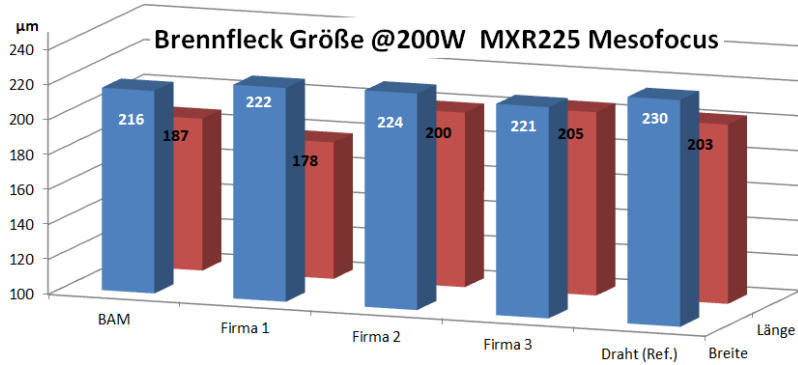


Abb. 11. Vergleich der COMET MXR225 MF Ergebnisse bei 200W (4 verschiedene Röhren und Orte)

4. Auswertung der Messungen mit den COMET 450kV MesoFocus-Röhren

COMET hat die neue MesoFocus Technik auch für höhere Energien ausgelegt und mit einer 450kV Variante ein höchst interessantes Produkt in der Entwicklung. Ein so kleiner Brennfleck wie bei der 225kV MesoFocus Röhre wäre bei 450kV optimal für die Untersuchung von mit der neuen AM Druck Technik hergestellten Objekte aber auch perfekt für die CT Inspektion von Luftfahrtteilen wie z.B. Turbinenschaufeln geeignet, wo $50\mu\text{m}$ Auflösung gewünscht wird.

Einen ersten Prototypen konnten wir bereits im November 2021 an der BAM mit der KOWOSPOT X Kamera vermessen. Da uns der Kopf noch nicht bekannt war, haben wir uns für einen senkrechten Aufbau entschieden, bei dem die Röhre senkrecht nach unten strahlt und die Kowospot Kamera am Boden fixiert ist. Trotz des kompliziert erscheinenden Aufbaus war die Ausrichtung innerhalb weniger Minuten erledigt

Bei den Messungen hat uns auch interessiert, ob sich durch die Durchstrahlung der Lochblende die Auswertung des Brennfleckbilds bei höheren Energien verändert; bisher lag die Grenze für solche Brennfleck-Aufnahmen bei 200kV.



Abb. 12. Ausbau der KOWOSPOT X Kamera mit der COMET 450kV MesoFocus Röhre an der BAM

Bei 450kV kann die Durchstrahlung der Lochblende schon beobachtet werden. Das hat aber keine Auswirkung auf die Auswertung, da der beobachtete Sockel fast durchgehend gleichförmig ist und bei der Auswertung als Offset abgezogen wird. Außerdem beträgt das Signal der Durchstrahlung nur $\sim 6\%$ vom Signal des Brennflecks, so dass dieser Einfluss gering ist. Die KOWOSPOT X Kamera eignet sich deshalb auch für 450kV Aufnahmen.

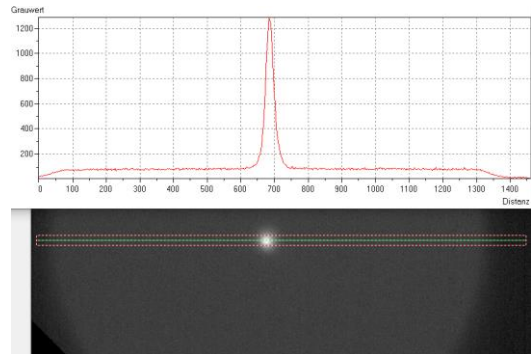


Abb. 13. Durchstrahlung der Lochblende bei 450kV als Sockel im Profil (Effekt verstärkt dargestellt)

Die beiden kleinsten Brennflecke bei 50W und 100W Leistung haben wir mit verschiedenen Spannungen getestet um zu sehen, ob sich die Brennfleck Größe verändert. Die Norm fordert die Messung bei 75% der maximalen Spannung – also 338kV.

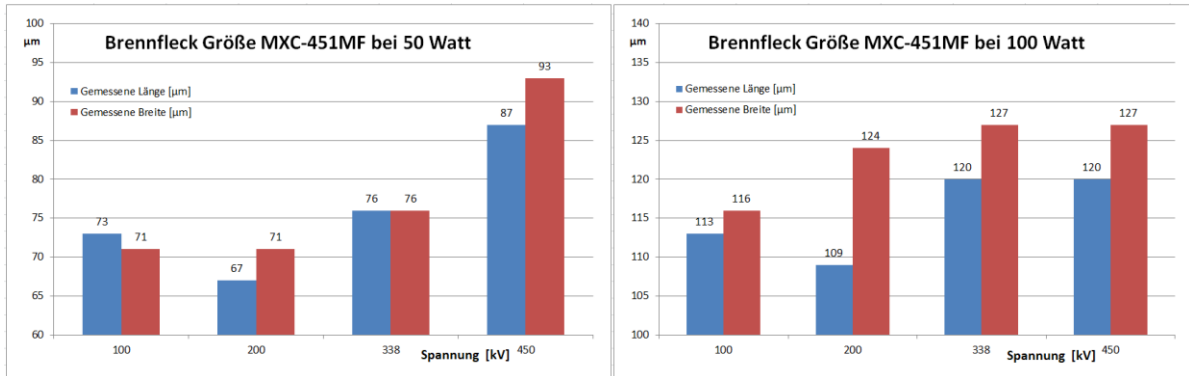


Abb. 14. Ergebnisse der Brennfleckaufnahmen bei 50W und 100W und bei verschiedenen Spannungen

Der Einfluss der Spannung auf die Brennfleckgröße ist moderat; nur beim kleinsten Brennfleck gibt es eine leichte Erhöhung von 338kV zu 450kV.

Die COMET MXC451 MF Röhre besitzt 3 weitere Brennfleck-Einstellungen, die bei 250W, 350W und 450W Leistung betrieben werden. Mit zunehmender Leistung werden die Brennflecke elliptischer; in Relation zur gebotenen Leistung ist der Brennfleck aber noch angenehm zentrisch.

Eine Energieabhängigkeit bei diesen Brennflecken ist kaum messbar.

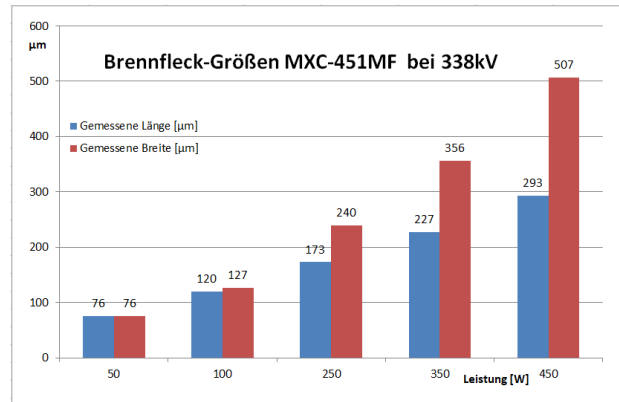


Abb. 15. Die 5 Brennflecke der MXC451 MF bei 338kV (normkonform 75% der max. Spannung)

Schließlich wurde die KOWOSPOT X ILP Auswertung mit der User Methode im Anhang der E1165 (siehe. 2.3) bei 450kV verglichen. Die Bilder für die ILP Auswertung entstanden sowohl an der BAM in Berlin als auch bei Waygate Technologies in Ahrensburg; die Bilder mit dem Loch-BPK für die User-Methode entstanden nur an der BAM in Berlin.

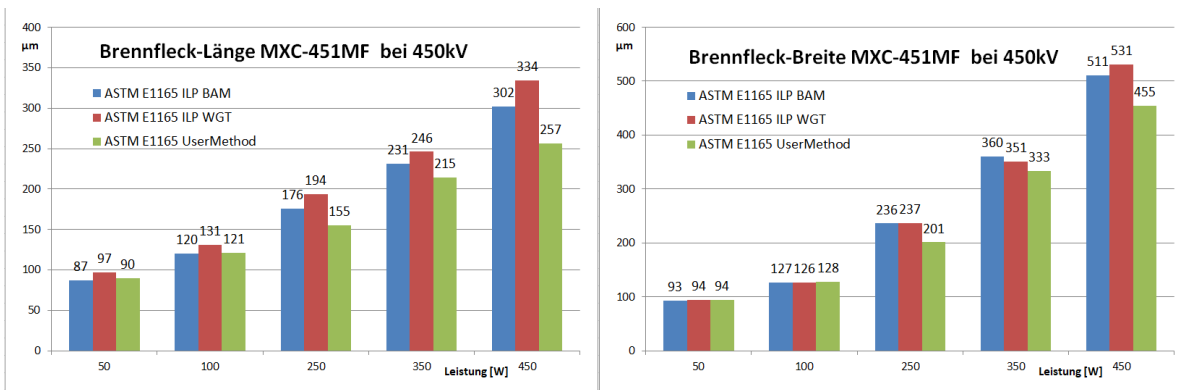


Abb. 16. Vergleich der Auswertung mit ILP und User-Methode (Loch-Penny) der ASTM E1165

Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind sehr konsistent. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die KOWOSPOT X Kamera auch bei diesen hohen Energien zuverlässige Brennfleckvermessungen gestattet.

Referenzen

[1] EN12543-2:2021 Non-destructive testing—Characteristics of focal spots in industrial X-ray systems for use in nondestructive testing
European Committee for Standardization (CEN), Avenue Marnix 17, B-1000, Brussels, Belgium,
<http://www.cen.eu>.

[2] ASTM E1165-20 Standard Test Method for Measurement of Focal Spots of Industrial X-Ray Tubes by Pinhole Imaging
ASTM website, www.astm.org

[3] ASTM E2903-18 Standard Test Method for Measurement of the Effective Focal Spot Size of Mini and Micro Focus X-ray Tubes
ASTM website, www.astm.org