

Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz

Entwicklung von Verfahren zur zerstörungsfreien Qualitätskontrolle von Prüfkörpern, die im Rahmen von Prüfungen zur Qualitätssicherung nach §16 Abs. 2 und 3 der Röntgenverordnung bei Röntgeneinrichtungen zur Untersuchung von Menschen verwendet werden - Vorhaben 3608S20001

Auftragnehmer:
Städtisches Klinikum Braunschweig gGmbH

M. Borowski ¹⁾
S. Wrede ¹⁾
U. Neuschaefer-Rube ²⁾
L. Büermann ²⁾
H.-U. Danzebrink ²⁾
M. Krumrey ²⁾
J. Goebbels ³⁾
J. Noetel ³⁾
Y. Onel ³⁾
J. Feldmann ⁴⁾
H. Kreienfeld ⁴⁾

¹⁾ *Klinikum Braunschweig*

²⁾ *Physikalisch-Technische Bundesanstalt*

³⁾ *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung*

⁴⁾ *TÜV NORD Ensvs Hannover GmbH*

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMU (UFOPLAN) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

BfS-RESFOR-72/12

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de: 0221-2012111310226

Salzgitter, November 2012

Beteiligte Gruppen und Personen

Klinikum Braunschweig (Projektleitung):

Dr. Markus Borowski
Sarah Wrede

Physikalisch-Technische Bundesanstalt:

Abteilung 5 – Fertigungsmesstechnik:

Arbeitsgruppe 5.25 - Rastersondenmetrologie

Dr. Hans Ulrich Danzebrink

Arbeitsgruppe 5.34 - Multisensor-Koordinatenmesstechnik

Dr. Ulrich Neuschaefer-Rube

T. Birth

Fachbereich 6 – Ionisierende Strahlung:

Arbeitsgruppe 6.25 – Dosimetrie für die Röntgendiagnostik

Dr. Ludwig Büermann

Fachbereich 7 – Temperatur und Synchrotronstrahlung:

Arbeitsgruppe 7.11 – Röntgenradiometrie

Dr. Michael Krumrey

Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung / Fachbereich 8.5

Mikro-ZfP:

Dr. Jürgen Goebbels
Jörg Noetel / Yener Onel

TÜV NORD Ensys Hannover GmbH / Arbeitsgruppe TÜV NORD Röntgentechnik:

Helmut Kreienfeld
Jürgen Feldmann

Kurzzusammenfassung

Entsprechend der Anforderungen der Röntgenverordnung und abgeleiteter Richtlinien unterliegen Röntgeneinrichtungen zur Untersuchung von Menschen einer regelmäßigen technischen Qualitätssicherung. Vor der Inbetriebnahme erfolgt eine Abnahmeprüfung der Einrichtungen, danach in regelmäßigen Abständen Konstanzprüfungen. Prüfkörper nehmen bei diesen Prüfungen eine zentrale Rolle ein.

Die bei den Prüfungen zu verwendenden Prüfkörper sind in den zugehörigen Normen spezifiziert. Eine relevante Abweichung der Prüfkörper von ihrer Spezifikation kann primär zwei Folgen nach sich ziehen: Röntgeneinrichtungen, welche potentiell geeignet sind, fallen fälschlich durch Prüfungen, was zur Folge hat, dass die Einrichtungen stillgelegt oder zumindest kostenträchtig korrigiert werden müssen. Röntgeneinrichtungen, welche potentiell nicht geeignet sind, bestehen Prüfungen und werden weiterhin zur Diagnostik am Menschen eingesetzt. Beides sollte nach Möglichkeit verhindert werden.

Aktuell gibt es keine Hersteller unabhängige Prüfung der Übereinstimmung eines Prüfkörpers mit der zugehörigen Norm-Spezifikation. Es gibt gleichwohl aus vorherigen Untersuchungen des Normenausschusses Radiologie (NAR) sowie Beobachtungen von Nutzern der Prüfkörper Hinweise darauf, dass nicht alle Exemplare der auf dem Markt erhältlichen Prüfkörper ihren Norm-Spezifikationen genügen.

Innerhalb des vorliegenden Vorhabens wurden Methoden zur zerstörungsfreien Prüfung besagter Prüfkörper entwickelt und an einer Stichprobe dieser Prüfkörper praktisch angewandt. Es wurden dabei die Prüfkörper nach DIN 6868-4 (inkl. Digitaler Subtraktionsangiographie (DSA)), DIN 6868-13 und DIN EN 60601-2-44 sowie die Mammographie-Prüfkörper CDMAM und Testeinsatz AP zusammen mit den zugehörigen Schwächungskörpern betrachtet.

In den meisten Fällen liegen die für die Prüfungen relevanten Komponenten, z.B. Dynamiktreppe oder Niedrigkontrastobjekte, im Inneren der Prüfkörper. Eine taktile Untersuchung der Objekte ist damit nicht zerstörungsfrei möglich. Innerhalb des Vorhabens wurden Methoden entwickelt, bei welchen die Bilddaten von Röntgen-Durchstrahlungsaufnahmen quantitativ ausgewertet werden. Durch diese Herangehensweise wird eine zerstörungsfreie Prüfung der im Inneren von Prüfkörpern liegenden Komponenten ermöglicht. Einzig die Prüfung der CTDI-Prüfkörper nach DIN EN 60601-2-44 soll entsprechend der entwickelten Prüfmethode mittels Koordinatenmesstechnik, d.h. taktil, erfolgen.

Die innerhalb des Vorhabens primär verwendete Untersuchungsmethode basiert auf dem quantitativen Vergleich der Röntgenabbildungen unbekannter Prüfkörper, die für den Einsatz an klinischen Röntgeneinrichtungen, d.h. für die entsprechenden Abnahme- bzw. Konstanzprüfungen gedacht sind, mit Aufnahmen von Referenz-Prüfkörpern bekannter Geometrie. Für jeden der betrachteten Prüfkörper wurden hierzu Referenz-Prüfkörper definiert. Die Geometrie der Referenzprüfkörper wurde mit ausreichend kleiner Unsicherheit untersucht. Die Messungen erfolgten vielfach an Messeinrichtungen der Koordinatenmesstechnik. Für die Mammographie-Prüfkörper wurden Röntgenfluoreszenzmessungen sowie Rasterkraftmikroskopie eingesetzt. Die Röntgenbildgebung der Mammographie-Prüfkörper erfolgte an einer Mikrofokus-Röntgenanlage, die Untersuchungen der Prüfkörper nach DIN 6868-4 (inkl. DSA) sowie DIN 6868-13 an einer klinischen Röntgenanlage unter jeweils zuvor optimierten und reproduzierbaren Bedingungen. Auf Basis der Röntgenaufnahmen der Referenz-Prüfkörper wurden Korrelationsfunktionen entwickelt, die es erlauben, aus den

Signalwerten einer Durchstrahlungsabbildung eines unbekanntes Prüfkörpers auf dessen Zusammensetzung zu schließen.

In den meisten Fällen ist die erweiterte Messunsicherheit für ein untersuchtes Objekt kleiner als 5%, in vielen Fällen sogar kleiner 2,5%. Sie ist allgemein ausreichend klein, um eine relevante Abweichung von Komponenten eines Prüfkörpers von deren Norm-Spezifikation festzustellen. Mit Hilfe der entwickelten Methoden ist eine Konformitätsprüfung der innerhalb des Vorhabens betrachteten Prüfkörper der Röntgendiagnostik mit vertretbarem Aufwand möglich.

Die entwickelte Prüfmethode wurde im Rahmen einer Stichprobenprüfung an auf dem Markt verfügbaren Prüfkörpern der betrachteten Prüfkörpertypen getestet.

Es zeigte sich, dass aktuell, mit Ausnahme der Prüfkörper nach DIN 60601-2-44, ein relevanter Anteil an Prüfkörpern in zumindest jeweils einigen der beinhalteten Komponenten um mehr als 10% von den zugehörigen Norm-Spezifikationen abweicht. Hierbei wurden einerseits Hersteller spezifisch systematische Abweichungen von der Norm-Spezifikation festgestellt. Andererseits besteht bei einigen Herstellern eine große Fertigungsstreuung zwischen Prüfkörpern gleichen Typs. Darüber hinaus wurden in Einzelfällen auch offensichtliche Fehler in der Endfertigung einzelner Exemplare festgestellt. Vor dem Hintergrund der Resultate der Stichprobenuntersuchung erscheint es wichtig, Prüfkörper in Zukunft durch eine unabhängige Stelle auf ihre Norm-Konformität hin untersuchen zu lassen.

Unabhängig von der Übereinstimmung der Prüfkörper mit deren Norm-Spezifikation wurde festgestellt, dass an etlichen Stellen die Spezifikation der Prüfkörper in den zugehörigen Normen nicht eindeutig bzw. im Hinblick auf den Einsatzzweck des Prüfkörpers ggf. nicht optimal ist. Es ist zu empfehlen, die Definition der Prüfkörper in den zugehörigen Normen vor dem Hintergrund der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zu überdenken und nachfolgend zu modifizieren.

In der vorliegenden Studie wurde, der Zielstellung entsprechend, nur ein kleiner Teil der aktuell verwendeten Prüfkörpertypen untersucht. Vor dem Hintergrund der Ergebnisse des Vorhabens erscheint es sinnvoll und angemessen, entsprechende Arbeiten auch für die anderen, auf dem Markt verfügbaren Prüfkörpertypen durchzuführen.

Abstract

According to German radiation protection legislation medical x-ray units are subject to recurring technical quality assurance tests. The acceptance test, performed before the first use of any X-ray unit, is followed by constancy tests at routine intervals. Crucial for both tests are the phantoms used.

Their composition as well as the geometry and material of their various components are specified in standards. A relevant deviation of a phantom from its normative specifications can essentially have two effects: potentially suited x-ray units wrongfully fail the tests and have to be shut down or expensively upgraded or the results of the tests lead to the continued use of potentially unsuitable x-ray units in the diagnostics of humans. Both scenarios should by all means be avoided.

At present there are no impartial procedures available to check the conformance of the components of a given phantom with its normative specifications. However, phantom-users' observations as well as the results of former studies performed by the "Normenausschuss Radiologie (NAR)" suggest that not all specimen of the available phantoms comply with their normative specifications.

In the course of the presented work, non-destructive phantom check procedures have successfully been developed and applied to a random sample of available phantoms. The phantoms investigated in this study were those specified in DIN 6868-4 (including DSA), DIN 6868-13 (conventional radiography) and DIN EN 60601-2-44 (computed tomography) as well as the mammography phantoms CDMAM and "Testeinsatz AP" with their respective attenuation elements.

In most cases the components that are subject to the testing procedure (such as the step wedge for dynamic range or low contrast objects for contrast resolution) are located inside the actual phantom. A tactile analysis of the dimensions of those objects can therefore not be performed non-destructively. In the course of the actual project a non-destructive testing method for phantoms has been developed, which is based on quantitative x-ray imaging. Only the CTDI phantom for computed tomography was tactilely analyzed by coordinate measuring technology.

The examination method applied within the presented work is based on the quantitative comparison of x-ray images of unknown phantoms, dedicated for constancy tests and x-ray images of reference objects with a defined geometry. Therefore, a reference phantom was defined for every analyzed phantom type and its geometry was analyzed with an appropriate uncertainty. Most of those investigations were performed with coordinate measuring technology devices. The mammography phantoms, however, were analyzed using x-ray fluorescence and atomic force microscopy. The x-ray imaging of the phantoms dedicated for mammography units was performed at a micro focus x-ray unit. Imaging of the conventional radiography phantoms was performed at a clinically used x-ray unit under optimized reproducible conditions. With the aid of images of the reference phantoms, correlation functions were developed that relate the signals of the radiographic image of an unknown phantom to its composition.

In most cases the expanded measurement uncertainty is smaller than 5%, in many cases even smaller than 2.5%. The accuracy of the developed procedures is sufficient to detect relevant deviations of a phantom from its normative specifications. With the developed methods the test can be performed with an acceptable effort, after possibly refining the procedure before implementing it in routine procedures.

The developed procedures have been tested on a random sample of phantoms for every phantom type under inspection.

The sample of the phantom defined in the DIN EN 60601-2-44 did not show any conspicuous results at all. However, more than 10% of the specimens of all other phantom types under inspection showed relevant deviation from their normative specification within the corresponding standard. Three types of deviation were most prominent:

1. systematic deviation of components from their specification
2. large variation in the manufacturing process
3. individual cases of faulty completion

Against the background of the results of the sample testing it appears to be important that in the future phantoms undergo an impartial inspection towards their norm-conformance.

Regardless of manufacturing problems of the investigated phantoms, it became obvious that in some cases even the phantoms' normative specifications lead to certain problems. On the one hand some normative specifications are not undoubtedly. Thus there exist different models of phantoms because of a certain margin for interpretation. On the other hand the actual specifications in some cases lead to certain artefacts. The results of the presented work suggest a review of the phantoms' normative specifications possibly resulting in their modification.

Following its objective target only a small fraction of presently used phantoms was analyzed in the presented work. Against the background of the presented results further testing of all available phantoms seems appropriate.

Inhaltsverzeichnis

1.	Motivation	1
2.	Zielstellung	2
3.	Rahmenbedingungen	3
4.	Die untersuchten Prüfkörper	3
4.1.	Der CDMAM-Prüfkörper 3.4	4
4.2.	Der Testeinsatz AP nach PAS1054 (Erläuterungen zur Anwendung – 10/2005)	5
4.3.	Der Prüfkörper nach DIN 6868-13	6
4.4.	Der Prüfkörper nach DIN 6868-4	9
4.5.	Der DSA-Prüfkörper nach DIN 6868-4	11
4.6.	Der CTDI-Prüfkörper nach DIN EN 60601-2-44	13
5.	Theoretische Vorüberlegungen	14
5.1.	Die Prüfkörper nach DIN 6868-4 und DIN 6868-13	14
5.2.	Der CTDI-Prüfkörper nach DIN EN 60601-2-44	18
6.	Entwicklung der Prüfmethode	18
6.1.	Prämissen / Ausgangslage	18
6.2.	Die Strukturkörper des CDMAM 3.4 sowie der Testeinsatz AP nach PAS1054 (Erläuterungen zur Anwendung – 10/2005)	20
6.2.1.	Taktile Untersuchungen	21
6.2.2.	Röntgenfluoreszenzuntersuchungen des Referenz-Prüfkörpers	28
6.2.3.	Entwicklung der Messprozedur zur Untersuchung von auf dem Markt erhältlichen Prüfkörpern der Typen CDMAM 3.4 und Testeinsatz AP	33
6.2.3.1.	Das Detektorverhalten und dessen Korrektur	34
6.3.	Die Strukturkörper der Normen DIN 6868-13 und DIN 6868-4 (inkl. DSA-Prüfkörper) sowie die zugehörigen Schwächungskörper	37
6.3.1.	Geometrische Untersuchung der Referenz-Prüfkörper	39
6.3.2.	Entwicklung der Messprozedur zur Untersuchung von auf dem Markt erhältlichen Prüfkörpern nach DIN 6868-4 (inkl. DSA-Prüfkörper) sowie DIN 6868-13	47
6.4.	Der CTDI-Prüfkörper nach DIN EN 60601-2-44	60
6.4.1.	Allgemeine Bemerkungen zur Entwicklung einer Messprozedur für auf dem Markt verfügbare Prüfkörper	60
6.4.2.	Geometrische Untersuchungen der Referenz-Prüfkörper	61
6.4.3.	Resultate der geometrischen Untersuchungen der Referenz-Prüfkörper	63
6.4.4.	Computertomographische Untersuchungen der Referenz-Prüfkörper	63
6.4.4.1.	Datenaufbereitung, Korrektur der Aufhärungsartefakte	64
6.4.4.2.	Kalibrierung der Messdaten	66
6.4.4.3.	Langzeitstabilität	68
6.4.4.4.	Überprüfung der Materialhomogenität	68
7.	Unsicherheit der Messprozeduren	70
7.1.	Der Strukturkörper des CDMAM 3.4 sowie der Testeinsatz AP nach PAS1054 (Erläuterungen zur Anwendung – 10/2005)	70
7.2.	Die Strukturkörper der Normen DIN 6868-13 und DIN 6868-4 (inkl. DSA-Prüfkörper) sowie die zugehörigen Schwächungskörper	70
7.2.1.	Messunsicherheit der Untersuchung der Prüfkörpergeometrie	70
7.2.2.	Messunsicherheit der Untersuchung auf Basis der Röntgenbildgebung	71
7.3.	Der CTDI-Prüfkörper nach DIN EN 60601-2-44	76
7.3.1.	Messunsicherheit der Untersuchung der Prüfkörpergeometrie	76

7.3.2.	Messunsicherheit der Untersuchung der Materialdichte	78
8.	Untersuchung von auf dem Markt erhältlichen Prüfkörpern	79
8.1.	Allgemeines / Vorbemerkungen	79
8.2.	Strukturkörper des CDMAM 3.4 sowie Testeinsatz AP nach PAS1054 (inkl. Erläuterungen zur Anwendung – 10/2005)	79
8.2.1.	Qualitative Resultate	79
8.2.2.	Quantitative Resultate	84
8.2.2.1.	Resultate der Dickenmessung	84
8.2.2.2.	Resultate der Objektgrößenmessung	87
8.3.	Die Strukturkörper der Normen DIN 6868-13 und DIN 6868-4 (inkl. DSA-Prüfkörper) sowie die zugehörigen Schwächungskörper	91
8.3.1.	Resultate zur Prüfung des Strukturkörpers nach DIN 6868-4	91
8.3.1.1.	Qualitative Resultate	91
8.3.1.2.	Prüfung der Niedrigkontrastbohrungen im Innenbereich	93
8.3.1.3.	Prüfung der Niedrigkontrastbohrungen im Bereich der Kupfertreppe	94
8.3.1.4.	Prüfung der Kupfer-Dynamiktreppe	96
8.3.1.5.	Prüfung der Rasterlinien	99
8.3.1.6.	Prüfung des Bleistrichrasters	100
8.3.1.7.	Prüfung der Strukturkörperdicke	101
8.3.2.	Resultate der Prüfung des DSA-Prüfkörpers nach DIN 6868-4	102
8.3.2.1.	Qualitative Resultate	102
8.3.2.2.	Prüfung der Aluminium-Niedrigkontrastobjekte	103
8.3.2.3.	Prüfung der Kupfer-Dynamiktreppe	104
8.3.3.	Resultate der Prüfung des Strukturkörpers nach DIN 6868-13	106
8.3.3.1.	Qualitative Resultate	106
8.3.3.2.	Prüfung der Aluminium-Niedrigkontrastobjekte	107
8.3.3.3.	Prüfung der Kupfer-Dynamiktreppe	108
8.3.3.4.	Prüfung der Rasterlinien	110
8.3.3.5.	Prüfung des Bleistrichrasters	110
8.3.3.6.	Prüfung der Strukturkörperdicke	111
8.3.4.	Resultate der Prüfung der Schwächungskörper	111
8.3.4.1.	Qualitative Resultate	112
8.3.4.2.	Prüfung der PMMA-Schwächungskörper	112
8.3.4.3.	Prüfung der Aluminium-Schwächungskörper	114
8.3.4.4.	Prüfung der Kupfer-Schwächungskörper	115
8.3.4.5.	Prüfung der Kupfer-PMMA-Kombinationsschwächungskörper	115
8.4.	Der CTDI-Prüfkörper nach DIN EN 60601-2-44	115
8.4.1.	Resultate der Prüfung der Geometrie	115
8.4.2.	Resultate der Prüfung der Materialeigenschaft	117
9.	Aufwand der Messprozeduren sowie bestehende Optimierungsmöglichkeiten	118
9.1.	Die Strukturkörper des CDMAM 3.4 sowie der Testeinsatz AP nach PAS1054 (Erläuterungen zur Anwendung – 10/2005)	118
9.1.1.	Aufwand der Messprozedur unter Studienbedingungen	118
9.1.2.	Bestehende Optimierungsmöglichkeiten	118
9.2.	Die Strukturkörper der Normen DIN 6868-13 und DIN 6868-4 (inkl. DSA-Prüfkörper) sowie die zugehörigen Schwächungskörper	119
9.2.1.	Aufwand der Messprozedur unter Studienbedingungen	119
9.2.2.	Bestehende Optimierungsmöglichkeiten	120
9.3.	Der CTDI-Prüfkörper nach DIN EN 60601-2-44	120
9.3.1.	Aufwand der Messprozedur unter Studienbedingungen	120
9.3.2.	Bestehende Optimierungsmöglichkeiten	121

10.	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	122
10.1.	Allgemeines	122
10.2.	Empfehlungen, welche mehrere Prüfkörper betreffen	122
10.3.	Die Strukturkörper des CDMAM 3.4 sowie der Testeinsatz AP nach PAS1054 (gemäß der Erläuterungen zur Anwendung – 10/2005)	123
10.3.1.	Grundlegende Eignung der Messprozedur	123
10.3.2.	Norm-Konformität und Fertigungstoleranzen	124
10.3.3.	Allgemeine Hinweise	125
10.4.	Die Strukturkörper der Normen DIN 6868-13 und DIN 6868-4 (inkl. DSA- Prüfkörper) sowie die zugehörigen Schwächungskörper	127
10.4.1.	Grundlegende Eignung der Messprozedur	127
10.4.2.	Norm-Konformität und Fertigungstoleranzen	127
10.4.3.	Allgemeine Hinweise	128
10.5.	Der CTDI-Prüfkörper nach DIN EN 60601-2-44	129
10.5.1.	Grundlegende Eignung der Messprozedur	129
10.5.2.	Norm-Konformität und Fertigungstoleranzen	129
10.5.3.	Allgemeine Hinweise	129
11.	Zusammenfassung und Ausblick	130
12.	Danksagung	134
13.	Literatur	134
Anlage A.	Spezifikation der Prüfkörper in den entsprechenden Normen	136
A.1.	Spezifikation des CDMAM-Prüfkörpers 3.4 (aus [1])	136
A.2.	Spezifikation des Testeinsatzes AP nach PAS1054 (Erläuterungen zur Anwendung – 10/2005) (aus [2] und [3])	136
A.3.	Spezifikation des Prüfkörpers nach DIN 6868-13 (aus [4])	137
A.4.	Spezifikation des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 (aus [5])	138
A.5.	Spezifikation des DSA-Prüfkörpers nach DIN 6868-4 (aus [5])	140
A.6.	Spezifikation des CTDI-Prüfkörpers nach DIN EN 60601-2-44 (aus [7])	141
Anlage B.	An den Referenz-Prüfkörpern gemessene Materialdicken	142
B.1.	Strukturkörper nach DIN 6868-4	142
B.1.1.	Kupferplatte des Grundkörpers sowie Kupfer-Stufen der Dynamiktreppe	142
B.1.2.	Niedrigkontrastbohrungen im PMMA	143
B.1.3.	Dicke des PMMA in dem Grundblock des Prüfkörpers	144
B.1.4.	Dicke des Bleistrichrasters	145
B.1.5.	Abstand der Linien im Bleistrichraster	146
B.1.6.	Linienabstand Rasterplatte	147
B.2.	Strukturkörper nach DIN 6868-13	147
B.2.1.	Kupfer-Stufen der Dynamiktreppe	147
B.2.2.	Niedrigkontrastobjekte aus Aluminium	149
B.2.3.	Dicke des Bleistrichrasters	149
B.2.4.	Abstand der Linienpaare im Bleistrichraster	150
B.2.5.	Linienabstand Rasterplatte	151
B.2.6.	Kupfer des Grundkörpers	151
B.2.7.	PMMA-Grundkörper	152
B.3.	DSA-Prüfkörper nach DIN 6868-4	152
B.3.1.	Kupfer-Platten	152
B.3.2.	Aluminium-Niedrigkontraststreifen	153
B.3.3.	PMMA-Grundkörper	153
B.4.	Schwächungskörper	155
B.4.1.	PMMA-Schwächungskörper	155
B.4.2.	Kupfer-Schwächungskörper (Dicke in Millimetern)	156

B.4.3.	Aluminium-Schwächungskörper	157
Anlage C.	Auswerteregionen, ROI, für die Komponenten der Prüfkörper nach DIN 6868-4, DIN 6868-13 sowie dem DSA-Prüfkörper	158
Anlage D.	Resultate der Vergleichsmessungen an den CTDI-Referenzprüfkörpern	163
D.1.	Resultate der Vergleichsmessung an dem CTDI-Prüfkörper der Firma PTW	163
D.2.	Resultate der Vergleichsmessung an dem CTDI-Prüfkörper der Firma iba-dosimetry	164
D.3.	Statistische Größen zu den Messungen an den CTDI-Referenzprüfkörpern	165
Anlage E.	Resultate der Überprüfung der Konformität bei auf dem Markt erhältlichen CTDI-Prüfkörpern	167
E.1.	Resultate der Überprüfung der Konformität von Exemplaren des CTDI-Prüfkörpers der Firma PTW	167
E.2.	Resultate der Überprüfung der Konformität von Exemplaren des CTDI-Prüfkörpers der Firma iba dosimetry	168

1. Motivation

Entsprechend den Anforderungen der Röntgenverordnung (RöV) und abgeleiteter Richtlinien muss an Röntgeneinrichtungen zur Untersuchung von Menschen sichergestellt sein, dass die erforderliche Bildqualität mit möglichst geringer Strahlenexposition erreicht wird (§16 Abs. 2 Satz 1 RöV). Hierzu ist vor der Inbetriebnahme einer Röntgeneinrichtung sowie nach jeder Änderung der Einrichtung oder ihres Betriebes, welche die Bildqualität oder die Höhe der Strahlenexposition beeinflussen kann, eine Abnahmeprüfung durchzuführen (§16 Abs. 2 Satz 2 RöV). Im laufenden Betrieb von Röntgeneinrichtungen sind in regelmäßigen Zeitabständen Konstanzprüfungen durchzuführen, durch die festzustellen ist, ob die Bildqualität und die Höhe der Strahlenexposition noch den Angaben der letzten Abnahmeprüfung entsprechen (§16 Abs. 3 RöV). Röntgenaufnahmen von Prüfkörpern nehmen bei Abnahme- und Konstanzprüfungen eine zentrale Rolle ein.

Der geometrische Aufbau der Prüfkörper sowie die zu verwendenden Materialien sind neben den Prüfverfahren in den für eine Röntgeneinrichtung spezifischen DIN-Normen der Normenreihe DIN 6868 festgelegt. Prüfkörper werden von Firmen auf Basis der in den Normen enthaltenen Spezifikationen im Rahmen der firmeneigenen Qualitätssicherung hergestellt und in den Verkehr gebracht.

In der Vergangenheit gab es in einigen Fällen Hinweise darauf, dass die aktuelle Qualitätssicherungskette unvollständig ist. Vom Normenausschuss Radiologie (NAR) wurden hierzu insbesondere der Testeinsatz AP für Prüfungen an Mammographieeinrichtungen sowie der Prüfkörper nach DIN 6868-4 untersucht. Auch aus dem organisierten Mammographiescreening gibt es Hinweise auf relevante Unterschiede zwischen den dort verwendeten CDMAM-Prüfkörpern für Prüfungen an Mammographieeinrichtungen. Es schienen Probleme sowohl auf der Seite der Normen selber, d.h. in der Definition der Prüfkörper, als auch bei der Sicherstellung einer Norm-konformen Fertigung zu bestehen. Entsprechende Probleme fielen stets durch Zufall auf, da es bislang keine externe Überprüfung der Endprodukte gibt, durch welche Unterschiede in den dosimetrischen oder Abbildungseigenschaften der Prüfkörper unterschiedlicher Hersteller oder Chargen erkannt werden können.

Entsprechende Fertigungstoleranzen oder systematische Unterschiede zwischen den Prüfkörpern unterschiedlicher Hersteller sind nicht unkritisch. Sie führen zu Problemen in der oben bereits erwähnten, rechtlich geregelten technischen Qualitätssicherung von Röntgeneinrichtungen. Der Grund ist, dass potentiell die Optimierung einer Röntgeneinrichtung im Hinblick auf Bildqualität und Strahlenexposition allein in Abhängigkeit des verwendeten Prüfkörpers unterschiedlich weit geführt wird. Es ist faktisch sogar möglich, dass durch die Wahl des verwendeten Prüfkörpers eine Röntgeneinrichtung für die Verwendung am Menschen zugelassen oder nicht zugelassen wird. Derart relevante Entscheidungen greifen neben der Auswirkung auf den Strahlenschutz auch in potentiell bedeutendem Umfang in das Marktgeschehen des Medizinsektors ein. Beides muss auf jeden Fall verhindert werden.

2. Zielstellung

Im Jahr 2008 wurde vom Bundesamt für Strahlenschutz ein Vorhaben initiiert, in welchem insbesondere Prüfmethode entwickelt werden sollten, die es ermöglichen, die Normkonformität von Prüfkörpern festzustellen. Folgende Grundanforderungen wurden an die zu entwickelnden Prüfverfahren gestellt:

1. Das Verfahren soll eine zerstörungsfreie Kontrolle der Prüfkörper ermöglichen.
2. Das Verfahren soll in der Praxis, d.h. auch außerhalb von Studiumgebungen realisierbar sein.
3. Das Verfahren soll vom Zeit- und Kostenaufwand her vertretbar sein.
4. Die Unsicherheit des Messprozesses muss ausreichend klein sein, um es zu ermöglichen, belastbar zwischen Norm-konformen und nicht Norm-konformen Prüfkörpern zu unterscheiden.

Innerhalb des Vorhabens sollten exemplarisch Prüfkörper der Normen DIN 6868-13 [4], DIN 6868-4 (inkl. DSA-Prüfkörper) [5], der CTDI-Prüfkörper nach DIN EN 60601-2-44 [6] sowie das CDMAM-Phantom 3.4 [1] und der Testeinheit AP nach PAS1054 [2], inkl. der Erläuterungen zur Anwendung von PAS1054 aus 10/2005 [3], untersucht werden.

Die entwickelten Messverfahren sollten an einer Stichprobe von auf dem Markt verfügbaren Prüfkörpern auf ihre praktische Anwendbarkeit hin überprüft werden. Die Resultate dieser Stichprobe sollten einen Einblick darin ermöglichen, inwieweit die auf dem Markt verfügbaren Prüfkörper den in den Normen geforderten Spezifikationen entsprechen.

Neben der Entwicklung und Anwendung der Messverfahren sollten innerhalb des Vorhabens mögliche Defizite in der Spezifikation der Prüfkörper innerhalb der Normen benannt werden.

Im Folgenden werden die im Rahmen des oben benannten Vorhabens durchgeführten Arbeiten und deren Resultate vorgestellt und kritisch diskutiert. Der Aufbau des Berichtes ist dabei wie folgt:

In Abschnitt 3 werden die Rahmenbedingungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde, umrissen.

In Abschnitt 4 werden die untersuchten Prüfkörper vorgestellt.

In Abschnitt 5 werden theoretische Vorüberlegungen zusammengefasst. Diese dienen unter anderem dazu, die Auswirkung der Abweichung eines Prüfkörpers von seiner Spezifikation auf seine dosimetrischen und Abbildungseigenschaften abzuschätzen.

In Abschnitt 6 werden die Methoden vorgestellt, welche innerhalb des Vorhabens als für die Untersuchung geeignet identifiziert wurden. In vielen Fällen ist dabei zwischen einer Prüfmethode zu unterscheiden, mit der Referenz-Prüfkörper untersucht wurden und einer zweiten, weniger aufwändigen Methode, mit welcher in der Routine auf dem Markt erhältliche Prüfkörper untersucht werden können.

In Abschnitt 7 werden die Einflussfaktoren, welche sich auf die Unsicherheit der Messprozedur auswirken, beleuchtet und eine Gesamtunsicherheit der Messprozedur angegeben.

In Abschnitt 8 werden die Anwendung der entwickelten Messprozeduren an einer Stichprobe von auf dem Markt verfügbaren Prüfkörpern vorgestellt sowie die Resultate der Erhebung präsentiert.

In Abschnitt 9 wird eine Abschätzung des Aufwands vorgestellt, mit dem Untersuchungen an auf dem Markt verfügbaren Prüfkörpern unter Anwendung der entwickelten Messmethoden möglich sind. Dabei werden auch bestehende Optimierungsmöglichkeiten genannt, die bei einer möglichen Überführung der Prüfungen in die Routine möglich und empfehlenswert wären, im Rahmen der Studienumgebung jedoch nicht realisiert wurden.

In Abschnitt 10 erfolgt eine Schlussbewertung der einzelnen, betrachteten Prüfkörpertypen. Neben der Prüfmethode werden dabei die Resultate der Stichprobenerhebung diskutiert sowie Hinweise auf bestehende Optimierungspotentiale der zugehörigen Normen gegeben.

In Abschnitt 11 werden die Arbeiten und Resultate noch einmal zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere, potentiell sinnvolle Schritte gegeben.

Vor der konkreten Beschreibung der innerhalb des Vorhabens durchgeführten Arbeiten seien an dieser Stelle zwei Definitionen gegeben, damit die nachfolgenden Beschreibungen einwandfrei verständlich sind:

Komponente: Als „Komponente“ wird im Folgenden eine strukturelle Einheit eines Prüfkörpers bezeichnet, welche für Prüfungen verwendet wird, z.B. die Kupfer-Dynamiktreppe der Prüfkörper nach DIN 6868-13.

Objekt: Als „Objekt“ wird im Folgenden ein untersuchtes Detail eines Prüfkörpers bezeichnet; dieses kann auch ein Teil einer Komponente sein, z.B. eine Stufe innerhalb der oben benannten Kupfer-Dynamiktreppe.

3. Rahmenbedingungen

Das Vorhaben wurde einem Konsortium zur Realisierung übertragen, dem mehrere Arbeitsgruppen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), das Klinikum Braunschweig, die Arbeitsgruppe Röntgentechnik des TÜV NORD sowie die Arbeitsgruppe Computertomographie der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) angehörten. Die Projektleitung lag beim Klinikum Braunschweig. Das Vorhaben wurde im Oktober 2009 gestartet. Es war auf eine Laufzeit von 24 Monaten ausgerichtet, wurde jedoch in der Laufzeit um sechs Monate verlängert.

4. Die untersuchten Prüfkörper

In den folgenden Abschnitten werden die untersuchten Prüfkörper vielfach zusammen mit einer Aufbauzeichnung des jeweiligen Prüfkörpers vorgestellt. Die Aufbauzeichnungen wurden den entsprechenden Normen sowie für den CDMAM-Prüfkörper dem Datenblatt des Herstellers entnommen [1-6]. Die in den Normen bzw. im Datenblatt enthaltenen Spezifikationen der Prüfkörper sowie der enthaltenen Komponenten sind als Anlage A beigefügt.

4.1. Der CDMAM-Prüfkörper 3.4

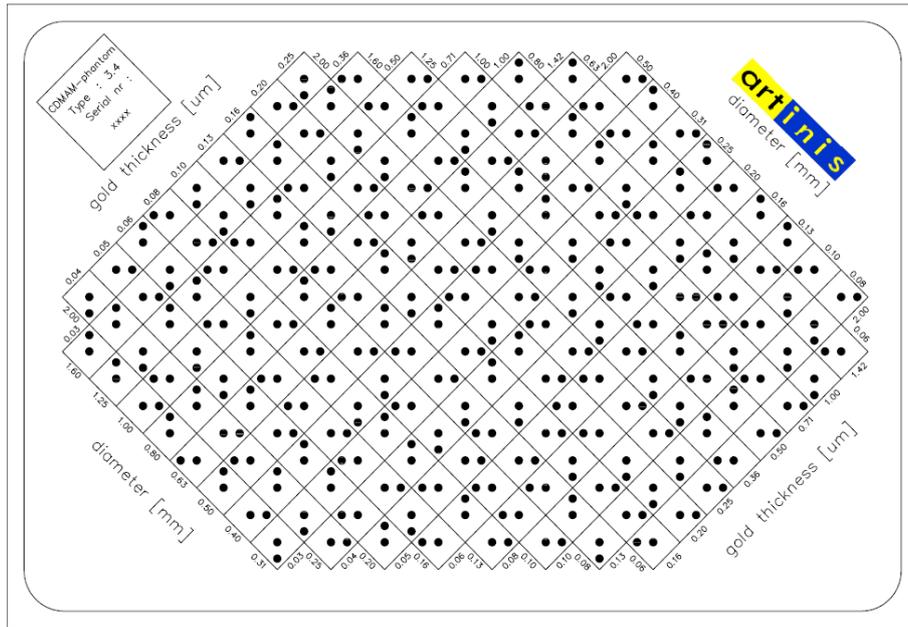


Abbildung 1: Schemazeichnung des CDMAM-Prüfkörpers 3.4 [1]; Der Prüfkörper ist in Quadrate eingeteilt, in welchen Goldplättchen unterschiedlichen Durchmessers und unterschiedlicher Golddicke enthalten sind. In jedem Quadrat ist ein Goldplättchen im Zentrum sowie ein weiteres in einer der vier Ecken des Quadrats enthalten. Die Punkte geben die Bereiche in den Quadraten an, in welchen sich die Goldplättchen befinden.

Der CDMAM-Prüfkörper 3.4 wird für Abnahme- und Konstanzprüfungen an digitalen Mammographiegeräten verwendet. Der Strukturkörper des CDMAM-Prüfkörper 3.4, im Folgenden der Einfachheit halber als „CDMAM-Prüfkörper“ bezeichnet, besteht aus einer Aluminium-Grundplatte von 0,5 mm Dicke, auf welche im Zentralbereich ein Raster aus stark absorbierendem Material aufgebracht ist. In jedem der Rasterkästchen sind zwei Goldplättchen aufgebracht, jeweils ein Plättchen in der Mitte des Kästchens und ein entsprechendes im Bereich einer der vier Ecken, s. Abbildung 1. Die Plättchen in den unterschiedlichen Kästchen unterscheiden sich in ihrer Dicke sowie dem Durchmesser. Die Dicke variiert zwischen 30 nm und 2 μm , der Durchmesser zwischen 80 μm und 2 mm. Die Strukturplatte wird auf der Seite der Goldplättchen durch eine PMMA¹-Haube geschützt.

Der CDMAM-Strukturkörper wird für Prüfungen zusammen mit vier jeweils 1 cm dicken PMMA-Platten verwendet, die als Schwächungskörper dienen. Bei den Aufnahmen ist der CDMAM-Strukturkörper mittig zwischen je 2 cm PMMA positioniert.

¹ Polymethylmethacrylat: Kunststoff einer mittleren Dichte von 1,19 g/cm³, der unter verschiedenen Handelsnamen, z.B. Plexiglas, Acrylglas vertrieben wird.

4.2. Der Testeinsatz AP nach PAS1054 (Erläuterungen zur Anwendung – 10/2005)

Der Testeinsatz AP wird für Abnahme- und Konstanzprüfungen in der Mammographie verwendet. Der Testeinsatz AP wurde erstmals in der PAS1054 [2] spezifiziert. Nachdem sich Probleme mit der Anwendung des Prüfkörpers zeigten wurde die originäre Spezifikation des Testeinsatzes AP durch eine neue Spezifikation gemäß den „Erläuterungen zur Anwendung von PAS1054“ [3] aus 10/2005 ersetzt. Prüfkörper dieses zweiten Typs wurden im Rahmen des Vorhabens untersucht.

Der Testeinsatz AP wurde als vereinfachte Form des CDMAM-Prüfkörpers konzipiert. Er ist in der Struktur an diesen angelehnt. In dem Testeinsatz AP befinden sich fünf Quadrate, die jeweils ein Paar Goldplättchen enthalten. Wie beim CDMAM-Prüfkörper ist jeweils ein Plättchen in der Mitte des Quadrats ein entsprechendes in einer der Ecken positioniert, s. Abbildung 3. Die Dicke der Plättchen reicht von 120 nm bis 1,8 μm , der Durchmesser von 100 μm bis zu 2 mm. Im Unterschied zum CDMAM-Prüfkörper sind die Goldplättchen auf eine PMMA-Basisplatte aufgebracht.

Der Testeinsatz AP wird zusammen mit einem PMMA-Schwächungskörper von 40 mm Dicke verwendet, s. Abbildung 2. Der Testeinsatz wird auf der der Röntgenröhre zugewandten Seite des Schwächungskörpers positioniert.

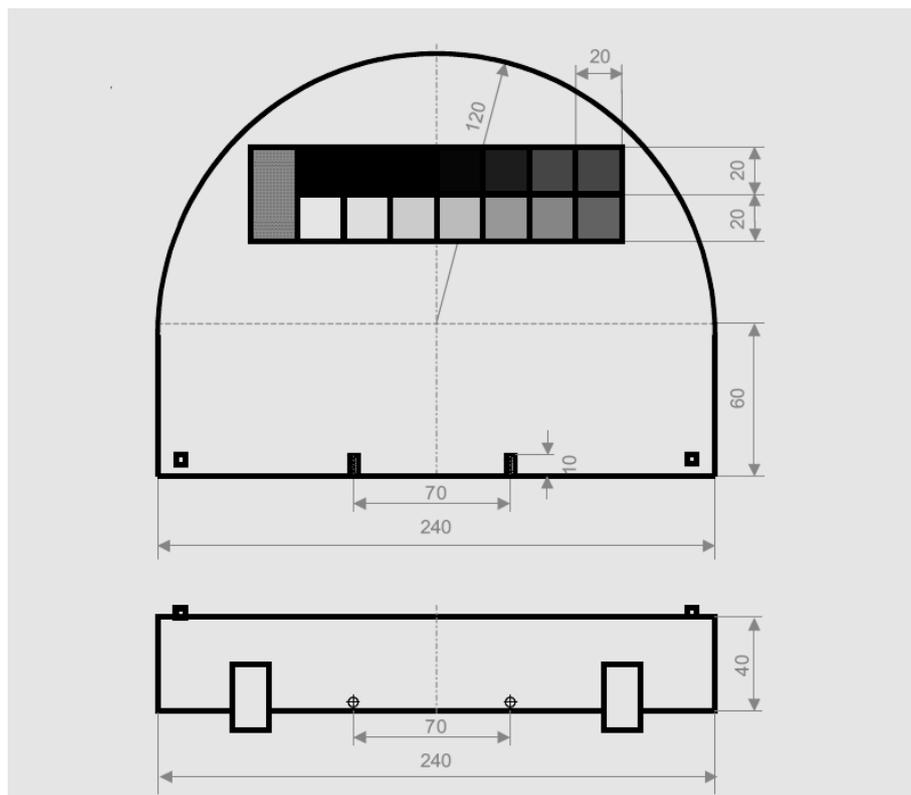


Abbildung 2: Schemazeichnung des Schwächungskörpers, der zusammen mit dem Testeinsatz AP verwendet wird. [2]. Die in der Schemazeichnung enthaltenen Zahlen geben die in der Norm spezifizierte Ausdehnung des Prüfkörpers in der Einheit Millimeter wieder. Die im oberen Teil der Abbildung erkennbaren Kästchen entsprechen einer Aluminium-Dynamikterappe. Diese wurde im Rahmen des Vorhabens nicht untersucht.

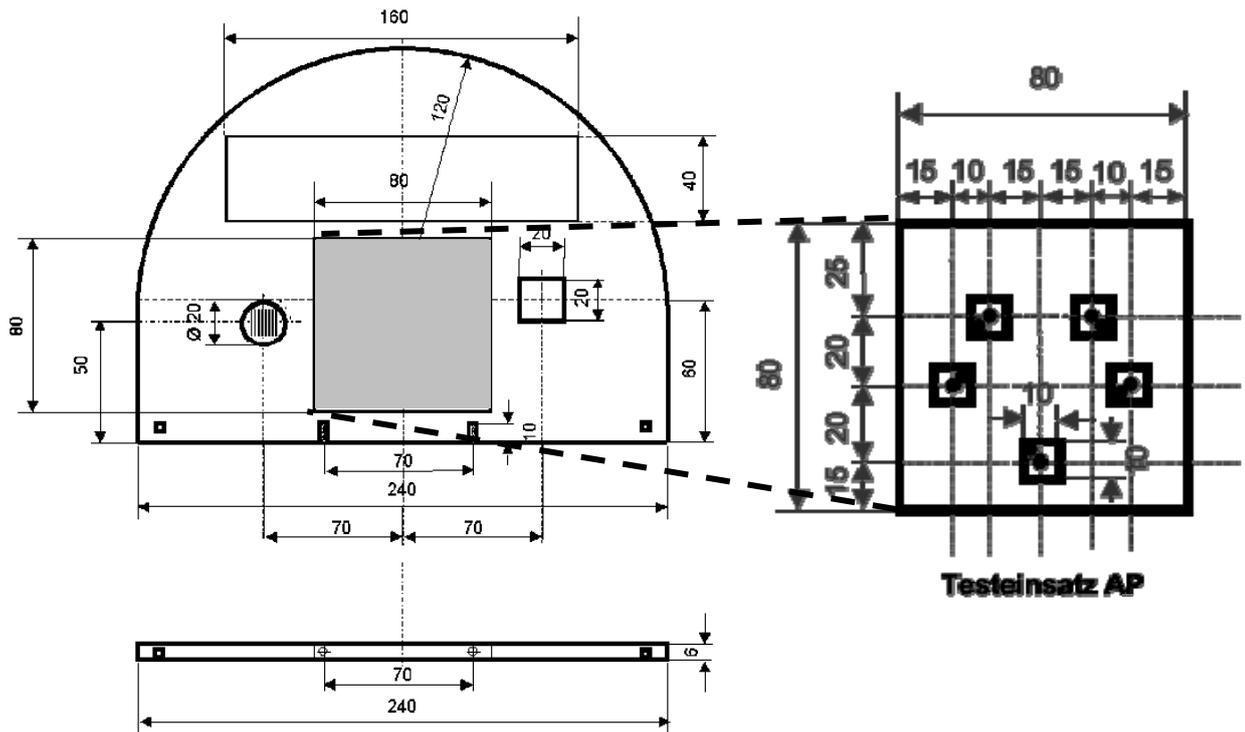


Abbildung 3: Schemazeichnung der Strukturplatte, in die der Testeinsatz AP im kenntlich gemachten Bereich eingebracht wird (links), sowie des Testeinsatzes AP (rechts)[2]. Die Position der Goldplättchen innerhalb der Quadrate des Testeinsatzes AP ist durch Punkte in der Schemazeichnung angedeutet. Die in den Schemazeichnungen enthaltenen Zahlen geben die in der Norm spezifizierte Ausdehnung des Prüfkörpers in der Einheit Millimeter wieder.

4.3. Der Prüfkörper nach DIN 6868-13

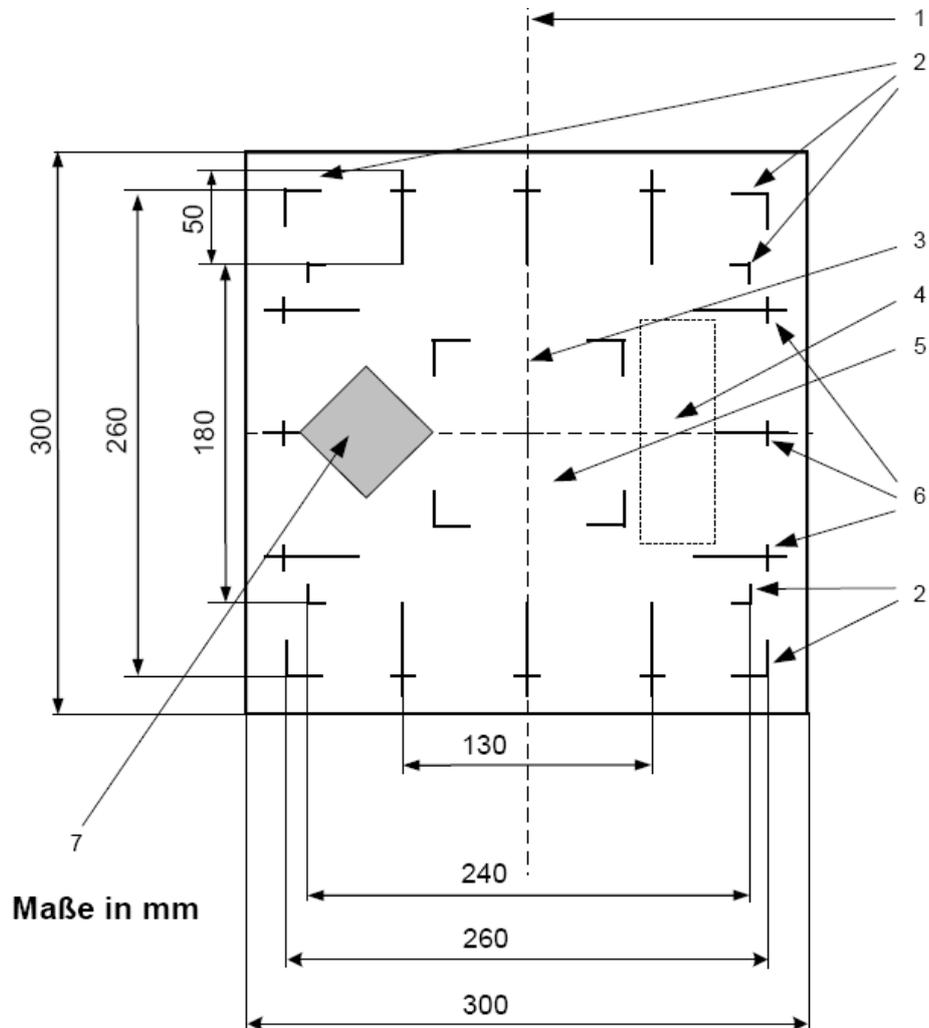
Der Prüfkörper nach DIN 6868-13 [4] wird für Konstanzprüfungen an Röntgenprojektionsanlagen verwendet.

Der Strukturkörper des Prüfkörpers nach DIN 6868-13 kann auf zwei unterschiedliche Weisen ausgebildet sein, s. Abbildung 4 und Abbildung 5. Abbildung 4 zeigt eine einfache Variante, ohne beinhaltete Dynamiktreppe und ohne Niedrigkontrastobjekte. Diese Variante ist prinzipiell möglich, wurde jedoch im Rahmen des Vorhabens an keiner Stelle beobachtet. Die Untersuchung wurde daher auf Strukturkörper gemäß Abbildung 5 ausgerichtet. In dem untersuchten Strukturkörper sind folgende Komponenten enthalten:

1. Die Komponenten des Strukturkörpers sind auf einer bzw. in eine 1 mm dicke Kupferplatte befestigt.
2. Dynamiktreppe aus Kupfer mit Materialdicken zwischen 0 mm und 2,3 mm
3. Es sind sechs Niedrigkontrastobjekte enthalten. Die Niedrigkontrastobjekte ergeben einen Kontrast zwischen 0,8% und 5,6% bei der Exposition durch Röntgenstrahlung, die mit einer Röhrenspannung von 70 kV bei 2,5 mm Eigenfilterung und 25 mm Al Zusatzfilterung erzeugt wird. Das zur Erreichung der spezifizierten Kontraste zu verwendende Material sowie die benötigte Materialdicke sind in der Norm nicht vorgeschrieben. Es sind jedoch exemplarisch Aluminiumdicken angegeben, die unter den spezifizierten Expositionsbedingungen die spezifizierten Kontraste ergeben. In den untersuchten Prüfkörpern sind die Niedrigkontrastobjekte alle als Aluminiumplättchen realisiert.
4. Bleistrichrastern mit Frequenzen zwischen 0,6 Lp/mm und 5 Lp/mm; Die Materialdicke des Bleistrichrasters ist zu 50 µm festgelegt.

5. Ein Raster zur Prüfung der Übereinstimmung von Licht- und Strahlenfeld. Das Material sowie die Dicke des Rasters sind in der Norm nicht spezifiziert.

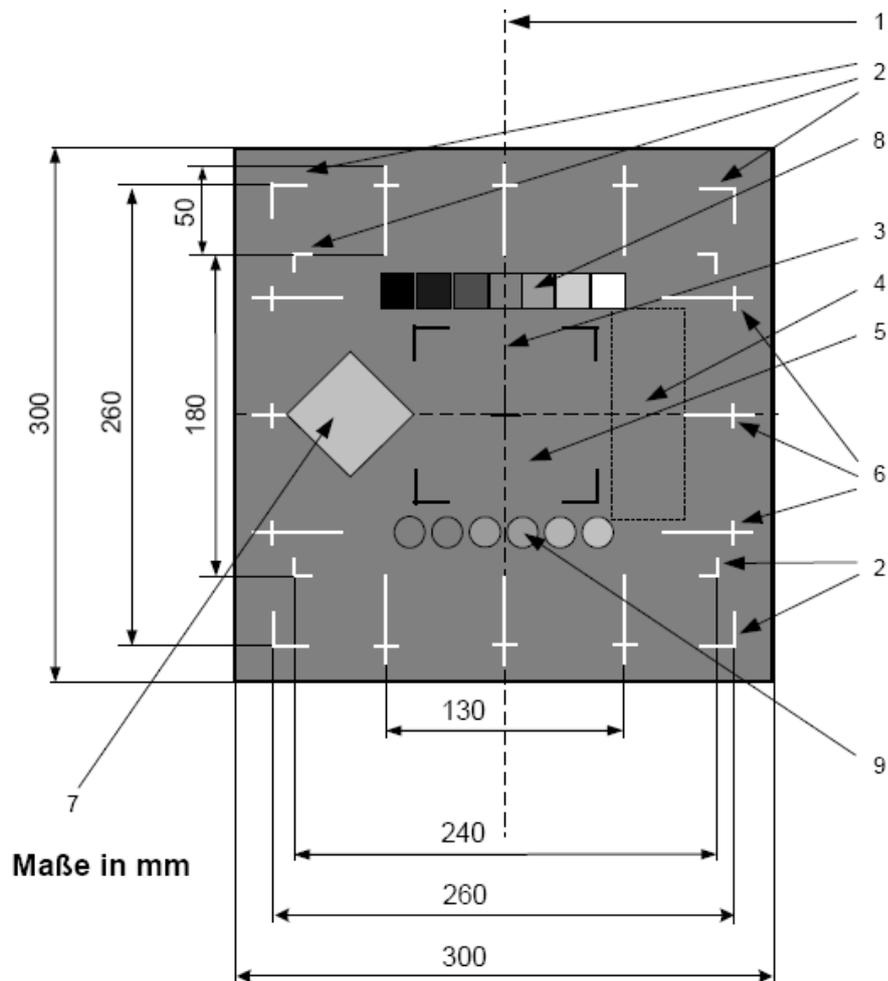
Der Strukturkörper wird entweder zusammen mit einem Schwächungskörper aus 25 mm Aluminium oder einer Kombination eines Schwächungskörpers aus 30 mm PMMA und 1 mm Kupfer verwendet.



Legende

- 1 Achse der Röntgenröhre
- 2 strahlenabsorbierende Feldmarkierungen zum Einstellen des Lichtfeldes (Ausführungsbeispiel)
- 3 Fadenkreuz für Zentrierung, nicht strahlendicht
- 4 nicht strahlendichte Markierung des Bereiches für den zulässigen Messort für die Dosis (120 mm × 40 mm)
- 5 freie Fläche (≥ 10 cm × 10 cm) für Signalnormierung mit nicht strahlendichter Markierung
- 6 strahlenabsorbierende Hilfsmarkierungen zum Auswerten
- 7 Bleistrichraster

Abbildung 4: Strukturkörper nach DIN 6868-13, einfache Form [4]. Einzelne, besonders hervorgehobene Positionen des Prüfkörpers sind durch Nummern markiert und in der Legende beschrieben. Die in der Schemazeichnung enthaltenen Zahlen geben die in der Norm spezifizierte Ausdehnung des Prüfkörpers in der Einheit Millimeter wieder.



Legende

- 1 Achse der Röntgenröhre
- 2 strahlenabsorbierende Feldmarkierungen zum Einstellen des Lichtfeldes (Ausführungsbeispiel)
- 3 Fadenkreuz für Zentrierung, nicht strahlendicht
- 4 nicht strahlendichte Markierung des zulässigen Bereiches für den Messort für die Dosis (120 mm × 40 mm)
- 5 freie Fläche (≥ 10 cm × 10 cm) für Signalnormierung mit nicht strahlendichter Markierung
- 6 strahlenabsorbierende Hilfsmarkierungen zum Auswerten
- 7 Bleistrichraster
- 8 Treppe für Dynamikumfang (Dynamiktreppe); die mittlere Stufe dient als Bezugspunkt für die Bestimmung der optischen Dichte bzw. Leuchtdichte; realisiert durch Kupferscheiben mit den Dicken 0,3 mm, 0,65 mm, 1,0 mm (Grundplatte), 1,4 mm, 1,85 mm und 2,3 mm
- 9 Niedrigkontrastobjekte (Kontrast 0,8 %, 1,2 %, 2,0 %, 2,8 %, 4,0 %, 5,6 % bei 70 kV; diese Werte gelten bei einer Röntgenröhrenspannung von etwa 70 kV, 2,5 mm Al Eigenfilterung und einer Zusatzfilterung von 25 mm Al; z. B. kann die Objektreihe aus Aluminiumscheibchen mit den Dicken 0,1 mm, 0,15 mm, 0,25 mm, 0,35 mm, 0,5 mm und 0,7 mm hergestellt werden)

Abbildung 5: Strukturkörper nach DIN 6868-13, incl. Dynamiktreppe und Niedrigkontrastobjekten [4]. Einzelne, besonders hervorgehobene Positionen bzw. Komponenten des Prüfkörpers sind durch Nummern markiert und in der Legende beschrieben. Die in der Schemazeichnung enthaltenen Zahlen geben die in der Norm spezifizierten Ausdehnung des Prüfkörpers in der Einheit Millimeter wieder.

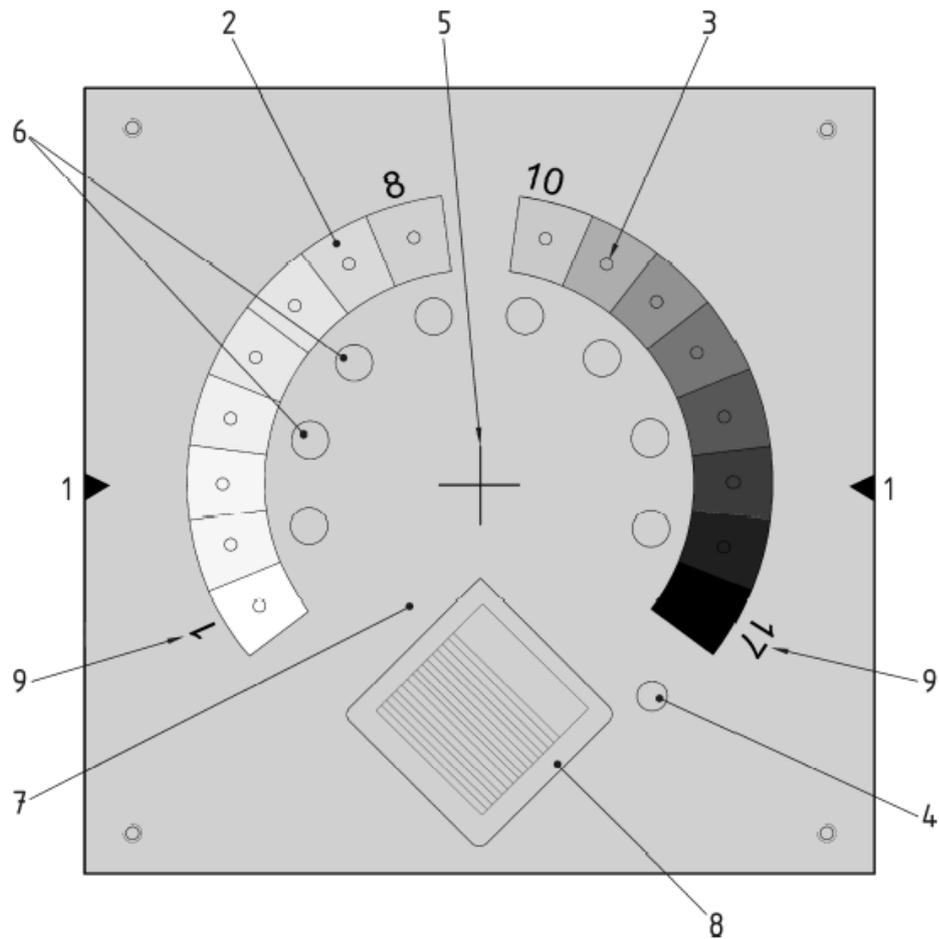
4.4. Der Prüfkörper nach DIN 6868-4

Der Prüfkörper nach DIN 6868-4 [5] wird für Konstanzprüfungen an Röntgenanlagen mit Durchleuchtungsmodus verwendet.

In dem untersuchten Strukturkörper sind folgende Komponenten enthalten:

1. Grundkörper aus einer 1,5 mm dicken Kupferplatte und PMMA mit je nach Region unterschiedlicher Materialdicke
2. Dynamiktreppe aus Kupfer mit einer Materialdicke zwischen 0 mm und 3,48 mm
3. Im Innenbereich des Prüfkörpers, s. Nr. 6 in Abbildung 6, Niedrigkontrastobjekte als Bohrungen einer Tiefe zwischen 400 μm und 4 mm in den PMMA-Grundkörper
4. Im Bereich der Kupferstufen, s. Nr. 3 in Abbildung 6, zentral gelegene Niedrigkontrastobjekte als Bohrung einer Tiefe von 2,5 mm
5. Bleistrichraster mit Frequenzen von 0,6 Lp/mm bis 5 Lp/mm; die Materialdicke des Bleistrichrasters ist zu 100 μm festgelegt.
6. Ein Raster zur Prüfung der Übereinstimmung von Licht- und Strahlenfeld. Das Material sowie die Dicke des Rasters sind in der Norm nicht spezifiziert.
7. Der Prüfkörper enthält grundsätzlich noch ein „kV-Prüffeld“, welches innerhalb des Vorhabens jedoch nicht genauer untersucht wurde.

Der Strukturkörper wird entweder zusammen mit einem Schwächungskörper aus 25 mm Aluminium oder einer Kombination eines Schwächungskörpers aus 30 mm PMMA und 1 mm Kupfer verwendet.



Legende

- 1 Richtung der Röhrenachse
- 2 Dynamikstufen
- 3 Detailkontrastobjekte 4 mm Durchmesser
- 4 KV-Prüffeld
- 5 Linienkreuz als Mittenmarkierung
- 6 Detailkontrastobjekte 10 mm Durchmesser
- 7 Innenfeld, frei von Strukturen
- 8 Auflösungstest
- 9 Klartext-Ziffern zur Bezeichnung der Dynamikstufen

Abbildung 6: Schemazeichnung des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 [5]; Einzelne, besonders hervorgehobene Positionen bzw. Komponenten des Prüfkörpers sind durch Nummern markiert und in der Legende beschrieben.

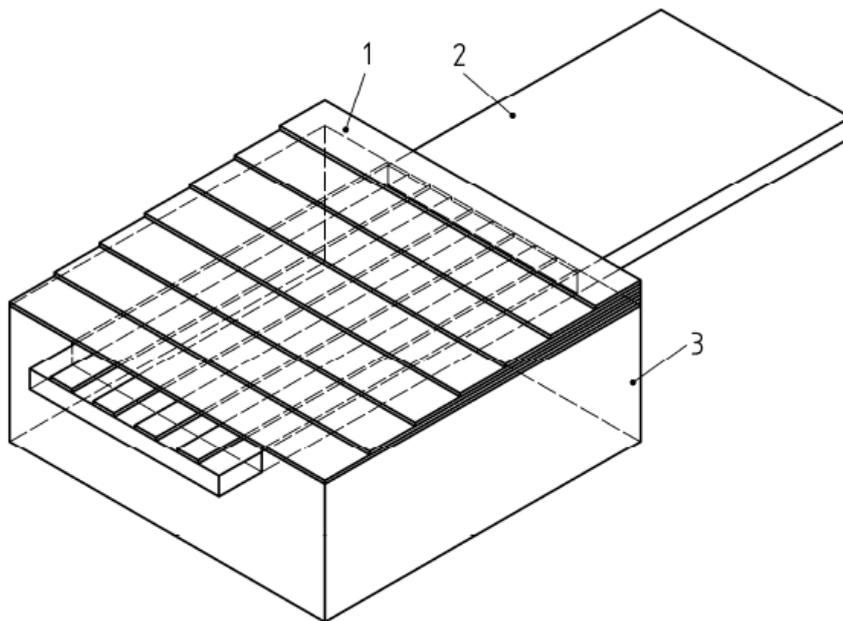
4.5. Der DSA-Prüfkörper nach DIN 6868-4

Der DSA-Prüfkörper nach DIN 6868-4 [5], kurz DSA-Prüfkörper, wird für Abnahme- und Konstanzprüfungen an DSA-fähigen Anlagen, d.h. insbesondere Röntgenanlagen in der Angiographie sowie von Herzkatheterplätzen, verwendet.

Der Prüfkörper kann auf zwei unterschiedliche Weisen ausgebildet sein, s. Abbildung 7 und Abbildung 8. Prüfkörper nach Abbildung 7 werden für den deutschen Markt nur von einer Firma hergestellt. Prüfkörper dieser Bauart sind nur in kleiner Stückzahl auf dem deutschen Markt verfügbar. Die weit überwiegende Anzahl an Prüfkörpern entspricht der Abbildung 8.

In den untersuchten Strukturkörpern sind folgende Komponenten enthalten

1. PMMA-Grundkörper einer Materialdicke von 57 mm
2. röhrenseitig, ganzflächig aufgebrachte Dynamiktreppe aus Kupfer mit einer Materialdicke zwischen 0,2 mm und 1,4 mm
3. Mittig im PMMA-Grundkörper befindet sich eine verschiebbar gelagerte PMMA-Platte von 5 mm Dicke. Auf der Platte sind Aluminium-Streifen mit Materialdicken zwischen 50 μm und 400 μm aufgebracht. Die Streifen verlaufen orthogonal zu den Stufen der Kupfertreppe.

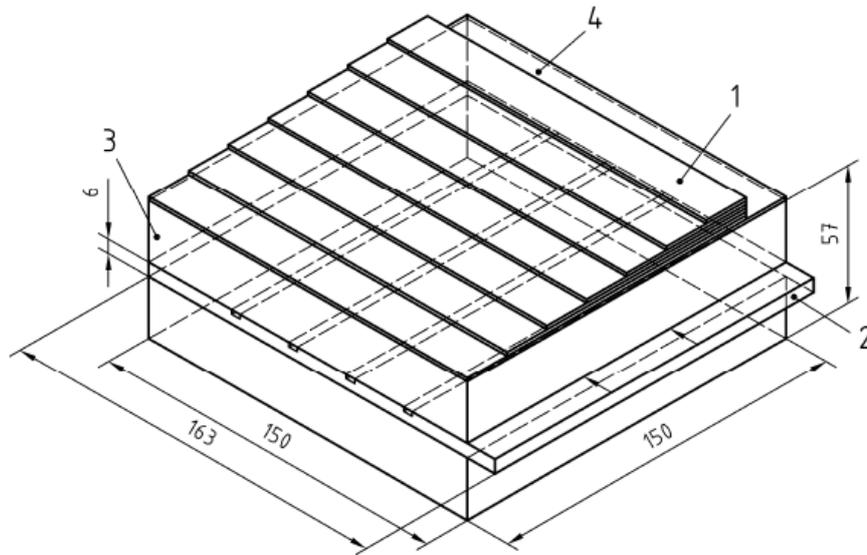


Legende

- 1 Dynamiktreppe: 7 Stufen mit je 0,2 mm Cu
- 2 Einsatz 300 mm \times 90 mm \times 9,5 mm PMMA mit Gefäßsimulation 0,05 mm, 0,1 mm, 0,2 mm, 0,4 mm Al 99,5
- 3 Grundkörper 150 mm \times 150 mm \times 57 mm aus PMMA mit Aussparung für Einsatz

Abbildung 7: Schemazeichnung eines DSA-Prüfkörpers ohne Logarithmierstufe [5]; Einzelne, besonders hervorgehobene Positionen bzw. Komponenten des Prüfkörpers sind durch Nummern markiert und in der Legende beschrieben.

Maße in mm



Legende

- 1 Dynamiktreppe: 7 Stufen mit je 0,2 mm Cu
- 2 Einsatz 300 mm × 90 mm × 9,5 mm PMMA mit Gefäßsimulation 0,05 mm, 0,1 mm, 0,2 mm, 0,4 mm Al 99,5
- 3 Grundkörper 150 mm × 150 mm × 57 mm aus PMMA mit Aussparung für Einsatz
- 4 Prüfstufe für LOGARITHMIERUNG

Abbildung 8: Schemazeichnung eines DSA-Prüfkörpers mit Logarithmierstufe [5]. Die in der Schemazeichnung enthaltenen Zahlen geben die in der Norm spezifizierte Ausdehnung des Prüfkörpers in der Einheit Millimeter wieder. Einzelne, besonders hervorgehobene Positionen bzw. Komponenten des Prüfkörpers sind durch Nummern markiert und in der Legende beschrieben.

4.6. Der CTDI-Prüfkörper nach DIN EN 60601-2-44

Der CTDI-Prüfkörper nach DIN EN 60601-2-44 [6], kurz CTDI-Prüfkörper, wird für Abnahme- und Konstanzprüfungen an Computertomographen eingesetzt. Im Unterschied zu den anderen untersuchten Prüfkörpern werden mit dem CTDI-Prüfkörper keine Abbildungseigenschaften von Röntgenanlagen untersucht. Der CTDI-Prüfkörper wird für die Prüfung dosimetrischer Eigenschaften verwendet.

Der Prüfkörper, s. Abbildung 9, ist gemäß seiner Spezifikation ein homogener PMMA-Zylinder mit einer Länge von mindestens 14 cm. Längs der Zylinderachse enthält der Prüfkörper fünf Bohrungen. Eine Bohrung ist mittig im Zylinder, die vier anderen Bohrungen liegen jeweils 90° auseinander mit ihrem Mittelpunkt 10 mm unterhalb der Prüfkörperoberfläche. Bei der Nutzung des CTDI-Prüfkörpers befindet sich in einer der Bohrungen die für die Dosismessung benötigte CTDI-Kammer. Die weiteren Bohrungen sind durch Stopfen aus dem gleichen Material wie die CTDI-Prüfkörper gefüllt.

Es gibt zwei CTDI-Prüfkörper unterschiedlichen Durchmessers, ein „Kopf-Phantom“ von 16 cm Durchmesser sowie ein „Körper-Phantom“ von 32 cm Durchmesser, s. Abbildung 9. Im Normalfall werden Kopf- und Körperphantom als Kombination vertrieben. In diesem Fall wird das Kopf-Phantom durch Ergänzung eines 8 cm breiten Ringes zu einem Körper-Phantom erweitert. Die im Rahmen dieses Vorhabens untersuchten CTDI-Prüfkörper entsprechen alle dem Kombinationstyp.

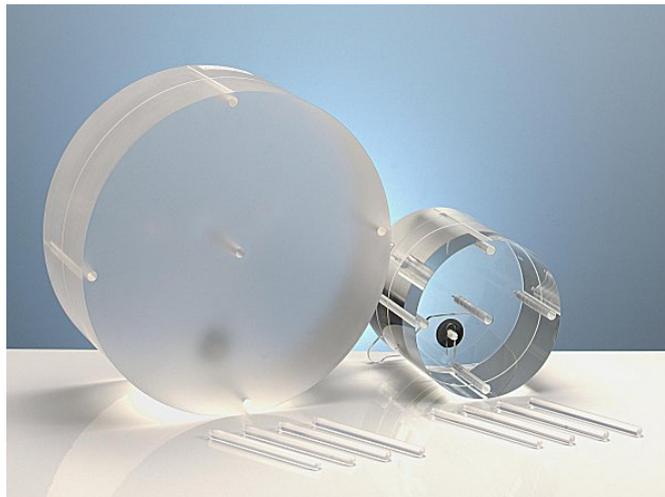


Abbildung 9: Abbildungen des Körper- sowie des Kopfphantoms des CTDI-Prüfkörpers

5. Theoretische Vorüberlegungen

Viele Komponenten in den Prüfkörpern werden eingesetzt, um Abbildungseigenschaften einer Röntgeneinrichtung zu untersuchen. Bei der Untersuchung der Prüfkörper sowie zur Bewertung möglicher Abweichungen einzelner Komponenten von den Normvorgaben ist es somit relevant, zu berücksichtigen, welche Kontraste und damit Materialdickenunterschiede von idealen bildgebenden Systemen überhaupt aufgelöst werden können. Anforderungen, welche über die technischen Möglichkeiten bildgebender Systeme hinausgehen oder solche, welche nicht zu einer Verbesserung des Einsatzzweckes der jeweiligen Komponenten führen, sind als kritisch zu bewerten.

Für den CTDI-Prüfkörper, der zur Messung einer Dosisgröße eingesetzt wird, gelten entsprechende Überlegungen. Hier ist es wesentlich, zu berücksichtigen, wie stark die gemessene Dosis durch Abweichungen eines Prüfkörpers von der Normvorgabe beeinflusst werden darf. Bei den Schwächungskörpern ist der Einfluss einer Normabweichung auf die Strahlschwächung sowie die Änderung des Strahlspektrums zu berücksichtigen.

5.1. Die Prüfkörper nach DIN 6868-4 und DIN 6868-13

Um eine Abschätzung darüber zu ermöglichen, wie sich eine Änderung der Materialdicke von Komponenten der Prüfkörper auf die untersuchten Messgrößen auswirkt, wurden Kontrastberechnungen nach dem linearen Schwächungsgesetz durchgeführt. Bei der Abschätzung wurde nicht der Einfluss von Streustrahlung sowie der Bildgebungskette berücksichtigt. Die aus den Rechnungen resultierenden Werte entsprechen daher in jedem Fall einer Idealsituation. Bei realen Röntgenanlagen resultieren bei gleichen Materialdicken kleinere Kontraste mit der Folge, dass reale Röntgenanlagen teilweise nur in der Lage sind, deutlich größere Materialdickenunterschiede aufzulösen.

Der Kontrast, der von einer Komponente herrührt, hängt von der für die Aufnahmen verwendeten Röntgenstrahlungsqualität (Röhrenspannung und Filterung) ab. In Abbildung 10 ist exemplarisch der Luftkerma-Kontrast dargestellt, welcher sich für unterschiedliche Röntgenspektren in Abhängigkeit von der unterschiedlichen Materialdicken einer Aluminium- bzw. Kupfertreppe einstellt.

Folgende Materialdicken ergeben entsprechend der Berechnungen bei einer Röhrenspannung von 70 kV, gefiltert mit 2,5 mm Aluminium, einen Kontrast von 1%:

Cu: 1 μm

Al: 25 μm

PMMA: 250 μm

Bei niedrigerer Röhrenspannung wird der resultierende Kontrast erhöht. Bei höherer Röhrenspannung und stärkerer Filterung sinkt der resultierende Kontrast. Letzteres ist insbesondere bei den Niedrigkontrastobjekten der untersuchten Prüfkörper zu beachten. Die hier aufgelisteten, bei 70 kV erzielbaren Dickenaufösungen, entsprechen in jedem Fall einer Idealsituation. Es ist nicht anzunehmen, dass klinisch genutzte Röntgenanlagen Materialdickenunterschiede aufzulösen im Stande sind, die kleiner als die angegebenen Materialdicken sind. Eine Auflösung entsprechender Materialdicken durch die zu entwickelnde Messprozedur sollte für den Messzweck daher ausreichend sein.

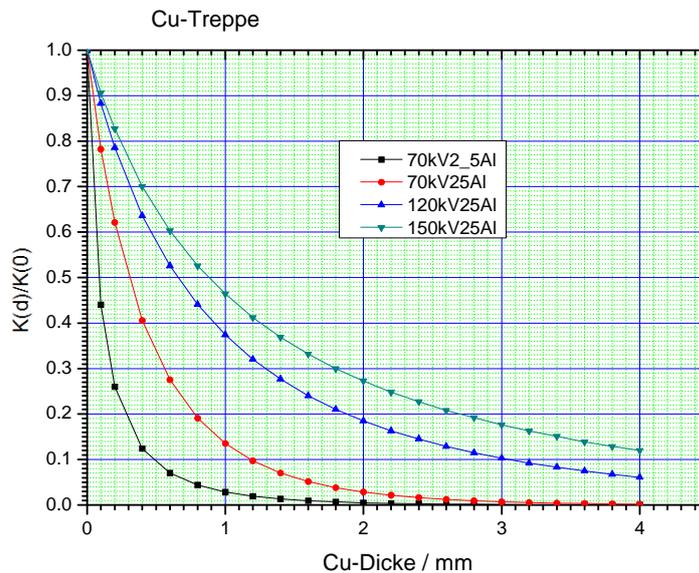
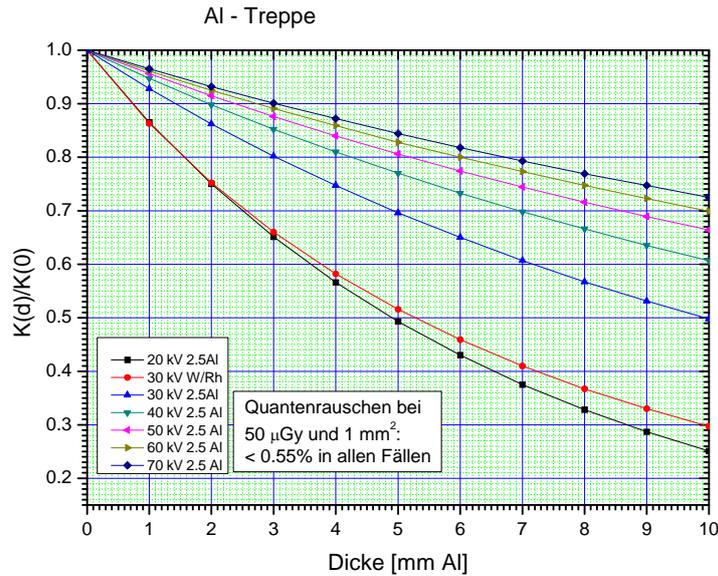


Abbildung 10: Simulierter Luftkerma-Kontrast $K(d)/K(0)$ von Aluminium- (oben) bzw. Kupfer-Objekten (unten) in Abhängigkeit der Materialdicke bei der Exposition mit unterschiedlichen Röntgenspektren. Die bei der Verwendung unterschiedlicher Spektren resultierenden Kontrastverläufe sind farblich unterschieden. Die jeweils verwendeten Spektren sind in den Graphiken angegeben. Die Materialdicke des Aluminiumfilters ist in allen Fällen 2,5 mm angegeben.

Die sinnvollerweise zu fordernde Fertigungstoleranz an Komponenten aus PMMA, Aluminium und Kupfer hängen vom Zweck ab, für den sie eingesetzt werden.

Niedrigkontrastobjekte haben das Ziel, die Auflösung kleiner, definierter Kontraste durch das bildgebende System zu prüfen. Entsprechende Objekte sind in den Prüfkörpern als Aluminium-Plättchen bzw. –Streifen sowie als Bohrungen im PMMA realisiert. Für diese Komponenten erscheint es angebracht, eine Fertigungstoleranz zu fordern, die in der Größenordnung der oben angegebenen idealen Systemauflösung ist.

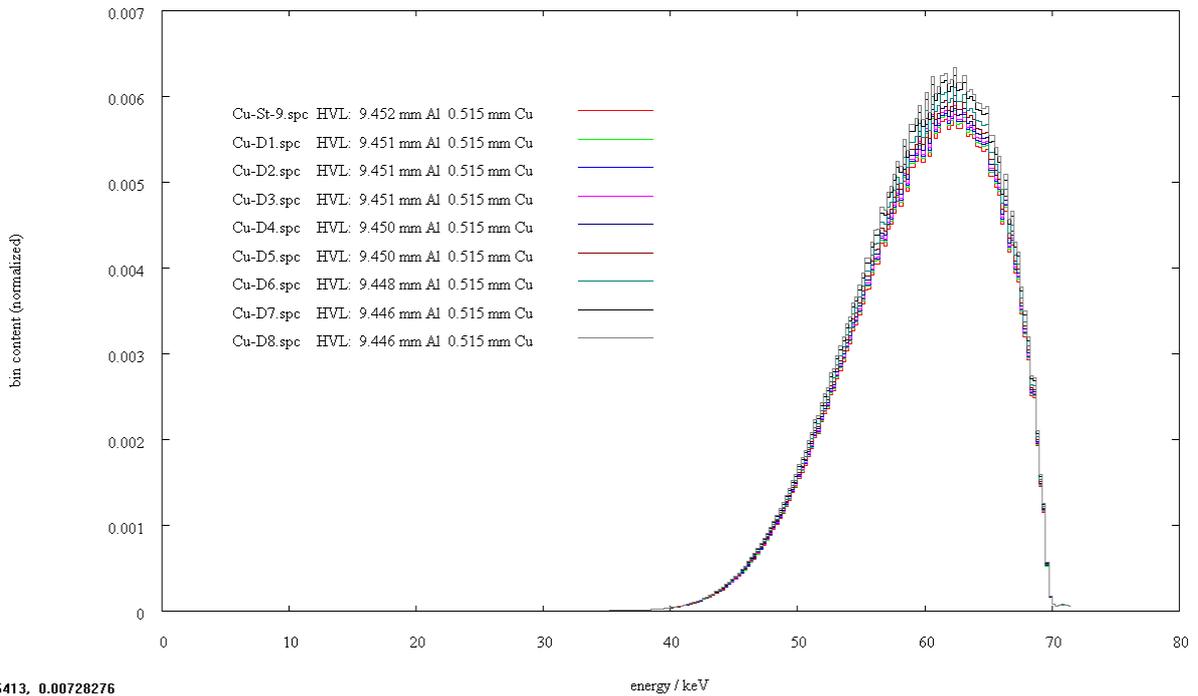
Dynamiktreppe haben das Ziel, den Dynamikbereich des bildgebenden Systems zu prüfen. Entsprechende Objekte sind in den Prüfkörpern als Kupferflächen unterschiedlicher Materialdicke realisiert. Entsprechend dem Einsatzzweck erscheint eine Fertigungstoleranz von 10% im Kontrast als ausreichend.

Schwächungskörper haben das Ziel, den Primärstrahl zu schwächen und das Strahlspektrum zu modulieren, um eine Situation zu simulieren, die in etwa einer klinischen entspricht. In Abhängigkeit des Materials des Schwächungskörpers erscheinen dabei unterschiedlich große Abweichungen von der Normvorgabe tolerabel zu sein.

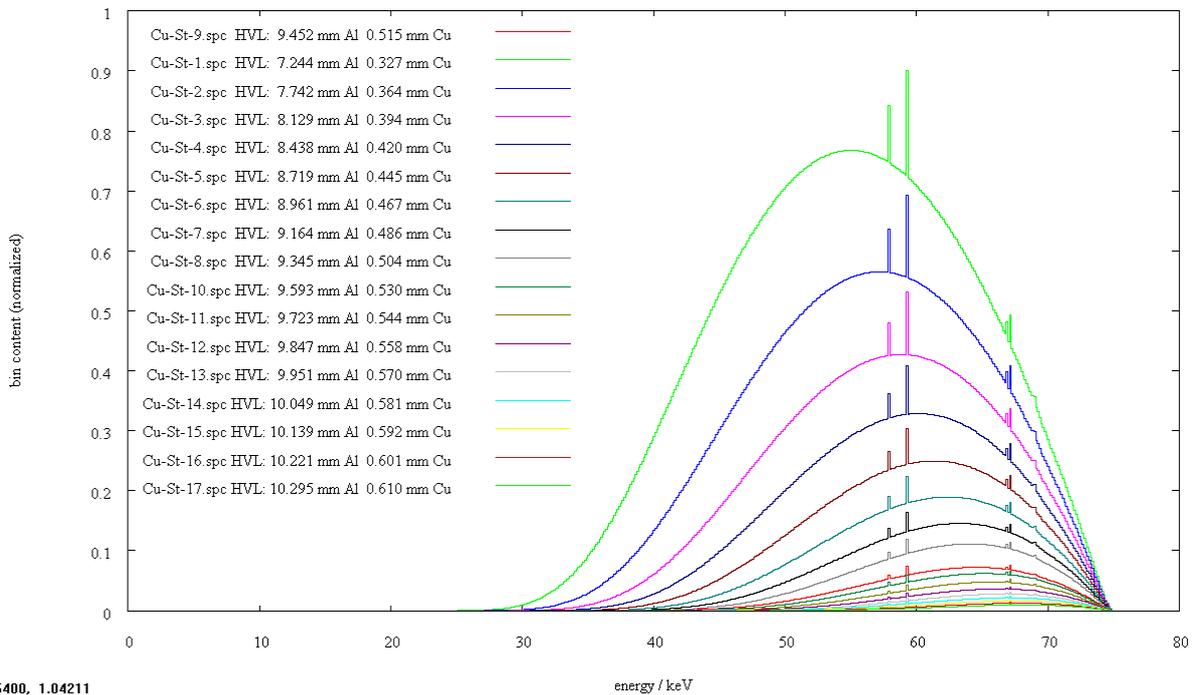
In Abbildung 11 sind exemplarisch Röntgenspektren dargestellt, die sich nach einer Filterung durch PMMA- bzw. Kupferschichten unterschiedlicher Dicke ergeben. Die einfallende Strahlung stammt dabei von einer Röntgenröhre mit einer Spannung von 75kV mit einer Eigenfilterung von 2,5 mm Aluminium. Die einzelnen Spektren sind farbcodiert dargestellt. In der Legende ist die zu den Spektren gehörende Halbwertsschichtdicke angegeben. Im oberen Teil der Abbildung sind die Spektren dargestellt, die sich hinter den Niedrigkontrastbohrungen im Innenbereich des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 ergeben. Die Primärstrahlung durchtritt in diesem Fall zwischen 400 μm und 4 mm PMMA. Im unteren Teil der Abbildung sind die Spektren dargestellt, die sich hinter den Stufen der Dynamiktreppe aus Kupfer im Prüfkörper nach DIN 6868-4 ergeben. Die Primärstrahlung durchtritt in diesem Fall zwischen 0mm und 3,48 mm Kupfer.

Es ist zu erkennen, dass sich durch die Filterung mit bis zu 4 mm PMMA das Röntgenspektrum faktisch nicht ändert. Entsprechende Unterschiede in den Materialdicken eines Struktur- oder Schwächungskörpers aus PMMA führen nur zu einer geänderten Fluenz am Bildempfänger, welche sich bei dosimetrischen Messungen bemerkbar macht. Eine Auswirkung auf die Abbildung von weiteren Objekten im Strahlengang, z.B. Niedrigkontrastobjekten, ist nicht anzunehmen. Wie die Simulation zeigt, führen im Unterschied dazu im Strahlengang liegende Kupferschichten mit verschiedenen Dicken zu deutlichen Unterschieden in der Abbildung. Bereits 400 μm Kupfer führen zu einer relevanten Änderung der Halbwertsschichtdicke des Spektrums und damit zu geänderten Kontrasten bei der Abbildung von weiteren Objekten im Strahlengang.

Vor dem Hintergrund der Informationen erscheint es angemessen, bei den Struktur- oder Schwächungskörpern eine Fertigungsgenauigkeit von 1 mm bei Komponenten aus PMMA sowie 100 μm bei Komponenten aus Kupfer zu fordern.



26.5413, 0.00728276



10.5400, 1.04211

Abbildung 11: Simulierte Röntgenspektren, welche sich nach der Filterung durch PMMA (oben) bzw. Kupfer (unten) unterschiedlicher Materialdicke ergeben. Es wurden exemplarisch die Stufungen betrachtet, welche den Materialdicken in den PMMA-Niedrigkontrastbohrungen sowie der Kupfertreppe des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 entsprechen. Die unterschiedlichen Spektren sind farblich codiert aufgetragen. In der Legende ist zur Orientierung die den Spektren entsprechende Halbwertsschichtdicke angegeben.

5.2. Der CTDI-Prüfkörper nach DIN EN 60601-2-44

Mit dem EGSnrc Code System wurden Monte Carlo Simulationen zur Berechnung des gewichteten CTDI für das Körper- und Kopfphantom, $CTDI_{W,B}$ (B=Body) und $CTDI_{W,H}$ (H=Head), durchgeführt. Alle Berechnungen beziehen sich auf das so genannte „ $CTDI_{100}$ – Konzept“, also das CTDI für die fest definierte Integrationslänge von 100 mm. Ziel der Berechnungen war es, die Variation des $CTDI_W$ mit der Dichte und den Abmessungen der CTDI-Phantome, sowie der Lage der Bohrungen innerhalb der CTDI Phantome zu ermitteln. Daraus wurden Anforderungen an die Genauigkeit der Fertigung und Messgenauigkeit bei der Untersuchung der CTDI-Prüfkörper abgeleitet.

Bei der Abnahmeprüfung nach DIN EN 61223-3-5 [7] müssen die ermittelten Werte für das $CTDI_{vol}$, also dem „pitchkorrigierten“ $CTDI_W$, für das Kopf- und Körperphantom innerhalb von $\pm 20\%$ der an der Bedienungsvorrichtung angezeigten Werte liegen. Die Variation von Einflussgrößen, die den $CTDI_W$ Wert um weniger als 1 % ändern, können deshalb als akzeptabel angesehen werden. Anhand der Ergebnisse der Simulationsrechnungen lassen sich unter dieser Voraussetzung folgende, sinnvollerweise zulässigen Toleranzen für die CTDI-Prüfkörper abschätzen:

Länge des Prüfkörpers:	$\pm 1\text{ cm}$
Durchmesser des Prüfkörpers:	$\pm 1\text{ mm}$
Materialdichte:	$\pm 3\%$
Radiale Position der Bohrungen für die CTDI-Messkammer:	$\pm 1\text{ mm}$
Verkipfung der CTDI-Messkammern gegen die zentrale Achse:	$\pm 1^\circ$

6. Entwicklung der Prüfmethode

6.1. Prämissen / Ausgangslage

Die Prüfkörper, Struktur- und Schwächungskörper, die in der Röntgendiagnostik eingesetzt werden, haben das Ziel, über standardisierte Aufnahmen des Prüfkörpers Informationen über die Abbildungseigenschaften einer Röntgeneinrichtung und die hierfür benötigte Dosis zu liefern. Die Schwächungskörper werden dabei eingesetzt, um eine in etwa Patienten äquivalente Schwächung und Modulation der Röntgenstrahlung zu erreichen. Die Strukturkörper enthalten Komponenten welche in der Röntgenabbildung Kontraste hervorrufen, die im Hinblick auf das Niedrigkontrastverhalten, den Dynamikbereich sowie die Ortsauflösung der Röntgeneinrichtung ausgewertet werden können.

Die Hauptzielstellung des Vorhabens ist die Entwicklung zerstörungsfreier Methoden, mit denen die Norm-Konformität des Aufbaus der Schwächungs- und Strukturkörper festgestellt werden kann.

Die Schwächungskörper, welche zusammen mit den Prüfkörpern nach DIN 6868-4, DIN 6868-13 sowie den Mammographie-Prüfkörpern verwendet werden, sind einfache geometrische Körper, meist Quader, eines Materials (PMMA, Kupfer oder Aluminium) ohne weitere Binnenstruktur. Gleiches gilt für den CTDI-Prüfkörper. Die Geometrie dieser Objekte lässt sich, zumindest prinzipiell, zerstörungsfrei messen. Bei dem Schwächungskörper des DSA-Prüfkörpers sowie sämtlichen Strukturkörpern ist das nicht der Fall. Hier sind die einzelnen Komponenten des Prüfkörpers nicht separat zu untersuchen. Vielfach befinden sie sich im Inneren des Strukturkörpers und entziehen sich damit einem direkten mechanischen Zugriff.

Eine taktile, geometrische Untersuchung dieser Komponenten scheidet daher zur Erreichung des Vorhabensziels aus. Auch optische Verfahren sind für die Untersuchung nicht sinnvoll einsetzbar. Der Grund ist, dass zum einen die Prüfkörper teilweise nicht transparent sind, andererseits ist die erreichbare Auflösung nicht ausreichend hoch. Gleiches gilt für den Einsatz von Ultraschallverfahren. Grundsätzlich haben alle genannten Verfahren das Problem, dass mit ihnen nur die Geometrie der Komponenten der Prüfkörper bestimmt werden kann. Eine Aussage über das Abbildungs- bzw. Schwächungsverhalten bei der Exposition durch Röntgenstrahlung ist, wenn überhaupt, nur sehr begrenzt möglich. Eine Möglichkeit, diese, im Hinblick auf den Einsatzzweck relevante Größe, zu bestimmen, bildet die quantitative Untersuchung der Prüfkörper durch Röntgenstrahlen. Hierbei wird der Zusammenhang zwischen dem Signalwert (Pixelwert) eines digitalen Röntgendetektors und der dort aufgetroffenen Dosis ausgenutzt. Die auftreffende Dosis hängt von der Ausdehnung der untersuchten Komponente in Strahlrichtung sowie ihrem linearen Schwächungswert ab. Anhand der Signalwerte der Abbildungen einzelner Komponenten der Prüfkörper lässt sich damit unter der Annahme bekannter linearer Schwächungswerte der Materialien oder durch Korrelation mit Objekten bekannter Ausdehnung die Ausdehnung einer Komponente des Prüfkörpers in Strahlrichtung berechnen. Grundsätzlich ist bei dieser Messmethode zu bedenken, dass stets das Produkt aus der Materialdicke in Strahlrichtung und dem Absorptionskoeffizienten des verwendeten Materials untersucht wird. Im Hinblick auf den Einsatzzweck der Prüfkörper ist dieses auch die relevante Eigenschaft der Prüfkörper. Es ist dabei jedoch zu erwähnen, dass diese Kombinationsgröße bislang nur sehr begrenzt in der Spezifikation von Prüfkörpern verwendet wird, s. Abschnitt 4. Meistenteils werden die Geometrie sowie das zu verwendende Material benannt, ohne dass die Materialeigenschaften, wie z.B. mögliche Verunreinigungen durch Schwermetalle ausreichend berücksichtigt und spezifiziert werden.

Im Rahmen des Vorhabens wurden zur Untersuchung der Ausdehnung der Komponenten der Prüfkörper in Strahlrichtung, mit Ausnahme des CTDI-Prüfkörpers, die Absorptionseigenschaften der Komponenten untersucht. Die Umrechnung der Signalwerte in Materialdicken erfolgte anhand von Referenz-Objekten bekannter Materialien und bekannter Geometrie. Die Referenz-Objekte sind in Referenz-Prüfkörper eingebettet, die von ihrem Schwächungsverhalten sowie von den Abbildungseigenschaften der beinhalteten Komponenten her den untersuchten Prüfkörpern ähneln. Anhand der Abbildungseigenschaften der Referenz-Prüfkörper wurden Korrelationsfunktionen für den Zusammenhang zwischen den Materialdicken von Komponenten der Prüfkörper und dem im Bild resultierenden Signalwert bestimmt. Die Geometrie der Komponenten der Referenz-Prüfkörper wurde durch unterschiedliche, absolut messende Methoden bestimmt. Die hierzu jeweils verwendete Methode orientierte sich an der für das untersuchte Objekt benötigten Messunsicherheit. Es wurde Koordinatenmesstechnik unter Verwendung von Tastern sowie optischer Sensoren für sämtliche Prüfkörper mit Ausnahme des CDMAM-Referenzprüfkörpers sowie Röntgenfluoroskopie für den CDMAM-Referenzprüfkörper eingesetzt.

Die Umrechnung der Signalwerte unbekannter Objekte in deren Materialdicke ist an zwei Voraussetzungen geknüpft, welche jedoch für die untersuchten Prüfkörper als erfüllt anzusehen sind:

1. Die Komponenten im untersuchten Prüfkörper haben den gleichen linearen Schwächungskoeffizienten wie entsprechende Komponenten im Referenz-Prüfkörper. Diese Voraussetzung wurde für das Vorhaben postuliert. Wie oben bereits erwähnt, wird durch die verwendete Untersuchungsmethode jeweils das Produkt aus dem linearen Schwächungskoeffizienten und der Materialdicke in Strahlrichtung untersucht. Ein leicht anderer Schwächungskoeffizient eines Materials wäre damit in

gewissen Grenzen durch eine gegenläufige Änderung der Materialdicke kompensierbar, ohne dass dieses bei der Prüfung auffiele. Es würde jedoch in diesem Fall auch nicht zu einer verringerten Nutzbarkeit der Komponente für den Einsatzzweck des Prüfkörpers führen.

2. Der Einfluss der weiteren im Strahlengang befindlichen Komponenten des untersuchten Prüfkörpers unterscheidet sich nur wenig von denen im Referenz-Prüfkörper. Ein relevanter Einfluss läge z.B. dann vor, wenn die nicht untersuchten Komponenten das Strahlspektrum deutlich anders als im Referenz-Prüfkörper ändert. Die Gültigkeit dieser Voraussetzung wurde für die einzelnen Prüfkörper überprüft.

Es war ursprünglich vorgesehen, innerhalb des Vorhabens Referenzprüfkörper mit bekannter, genau definierter Geometrie und Materialeigenschaft zu erstellen. Auf dieses Vorgehen wurde aus Kostengründen verzichtet. Als Referenz-Prüfkörper wurden anstelle dessen Prüfkörper mit Komponenten aus der Routinefertigung eines Prüfkörperherstellers verwendet. In den so festgelegten „Referenz-Prüfkörpern“ wurden die beinhalteten Komponenten quantitativ geometrisch untersucht. Hierdurch ist es möglich, nach einer Röntgenabbildung eine Korrelation zwischen der Materialdicke eines Objektes und dessen Signalwert im Röntgenbild zu erstellen. Nachteilig an dieser Vorgehensweise ist, dass die Geometrie der Komponenten der so verwendeten Referenz-Prüfkörper, teilweise recht deutlich von idealen Messobjekten abweicht, siehe z.B. Abschnitt 6.3.1. Dieses erhöhte den Aufwand der Arbeiten. Die Gültigkeit der innerhalb des Vorhabens erzielten Resultate wird hierdurch gleichwohl nicht wesentlich negativ beeinflusst.

Die Vorarbeiten und die Entwicklung der Prüfmethode unterscheiden sich zwischen der Gruppe der Mammographieprüfkörper, dem CTDI-Prüfkörper und den sonstigen Prüfkörpern. Im Folgenden werden die für die Untersuchung der drei Gruppen entwickelten Prüfmethoden nacheinander gesondert vorgestellt.

6.2. Die Strukturkörper des CDMAM 3.4 sowie der Testeinsatz AP nach PAS1054 (Erläuterungen zur Anwendung – 10/2005)

In der Mammographie werden im Vergleich zur sonstigen Röntgendiagnostik besonders hohe Anforderungen an die Orts- und Kontrastauflösung des verwendeten bildgebenden Systems gestellt. Dem entsprechend sind in dem CDMAM-Prüfkörper, der zur Kontrast-Detail-Prüfung von Mammographiesystemen verwendet wird, sehr kleine und sehr wenig Kontrast gebende Komponenten enthalten. Die Prüfung der Norm-Konformität dieser Prüfkörper stellt in besonderem Maß Anforderungen an das verwendete bildgebende System. Eine Herausforderung stellt insbesondere die Abbildung der Objekte mit sehr kleinem Durchmesser dar. Um die Objekte mit einem Durchmesser von wenigen Hundert Mikrometern ausreichend vergrößern zu können, ist es notwendig, Röntgenanlagen mit einem Fokus zu verwenden, der deutlich kleiner als die laterale Ausdehnung des abzubildenden Objektes ist. Es wurde daher entschieden, die Untersuchung der CDMAM-Prüfkörper sowie der Exemplare des Testeinsatzes AP an einer Mikrofokus-Röntgenanlage durchzuführen. Innerhalb des Vorhabens wurde hierzu eine Mikrofokus-Röntgenanlage der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) verwendet.

Als Referenz-Prüfkörper für den CDMAM-Prüfkörper sowie den Testeinsatz AP wurde ein geometrisch besonders gut charakterisiertes Exemplar des CDMAM 3.4 Prüfkörpers verwendet. Gegenüber den für Routinemessungen verwendeten Prüfkörpern unterscheidet sich der Referenzprüfkörper darin, dass auf ihm kein Hochkontrastraster aufgebracht ist. Auf der Aluminium-Grundplatte befinden sich ausschließlich die Goldplättchen des CDMAM-Prüfkörpers. Der Grund für die Abweichung von der Standardfertigung war die Überlegung,

den Referenz-Prüfkörper im Anschluss an die Durchstrahlungsmessungen zu zerteilen und die Einzelelemente mittels Rasterkraftmikroskopie zu untersuchen. Für diesen Arbeitsschritt wären die Metallpartikel der Hochkontraststrukturen potentiell hinderlich gewesen. Zudem hat der Referenz-Prüfkörper im Unterschied zu gewöhnlichen CDMAM-Prüfkörpern eine abnehmbare PMMA-Haube. Hierdurch ist eine Untersuchung der Goldplättchen ohne störenden Einfluss der PMMA-Haube möglich.

Die Geometrie der Referenzprüfkörper wurde durch taktile Methoden, Rasterkraftmikroskopie bzw. mit einem Konturmessgerät, sowie durch Röntgenfluoreszenzmessungen untersucht. Die taktilen Methoden wurden gewählt, da die Rasterkraftmikroskopie bei geeigneten Prüfstücken eine Dickenauflösung im einstelligen Nanometerbereich besitzt. Die Röntgenfluoreszenzmessungen hatten das Ziel, bestehende Untersuchungen weiterer CDMAM-Prüfkörper, die 2008 im Auftrag des NAR von der Arbeitsgruppe von Herrn Dr. M. Krumrey durchgeführt wurden, an die Untersuchung des Referenzprüfkörpers anzubinden, um die Durchstrahlungsmessungen an der Mikrofokusanlage mit einer größeren Anzahl an Prüfkörpern bekannter Geometrie kalibrieren zu können. Im Verlauf des Vorhabens zeigte sich, wie im Weiteren noch beschrieben wird, dass die Oberflächenbeschaffenheit des CDMAM-Prüfkörpers eine taktile Untersuchung mit ausreichend kleiner Messunsicherheit verhindert. Innerhalb des Vorhabens wurden daher nur die Röntgenfluoreszenzmessungen weiter durchgeführt.

6.2.1. Taktile Untersuchungen²

6.2.1.1. Taktile Untersuchungen des CDMAM Referenz-Prüfkörpers

In Vorbereitung der taktilen Messungen am Referenz-Prüfkörper wurde eine Muster-Aluminium-Basisplatte des CDMAM-Prüfkörpers licht- und rasterkraftmikroskopisch untersucht. Eine beispielhafte lichtmikroskopische Aufnahme ist als Abbildung 12 beigefügt. Eine exemplarische rasterkraftmikroskopische Aufnahme ist als Abbildung 13 beigefügt.

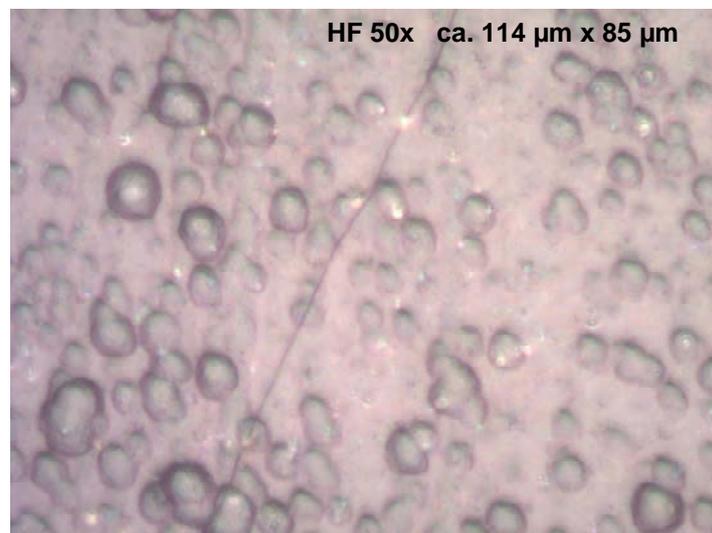


Abbildung 12: Lichtmikroskopische Aufnahme eines Ausschnitts der Oberfläche der untersuchten Muster-Aluminium-Basisplatte des CDMAM-Prüfkörpers

² Taktile Untersuchung: Untersuchung unter Verwendung von Tastern, welche direkt die Oberfläche eines Objektes untersuchen. Aus der Kenntnis der Position der Ober- und Unterseite lässt sich dann die zugehörige Materialausdehnung berechnen

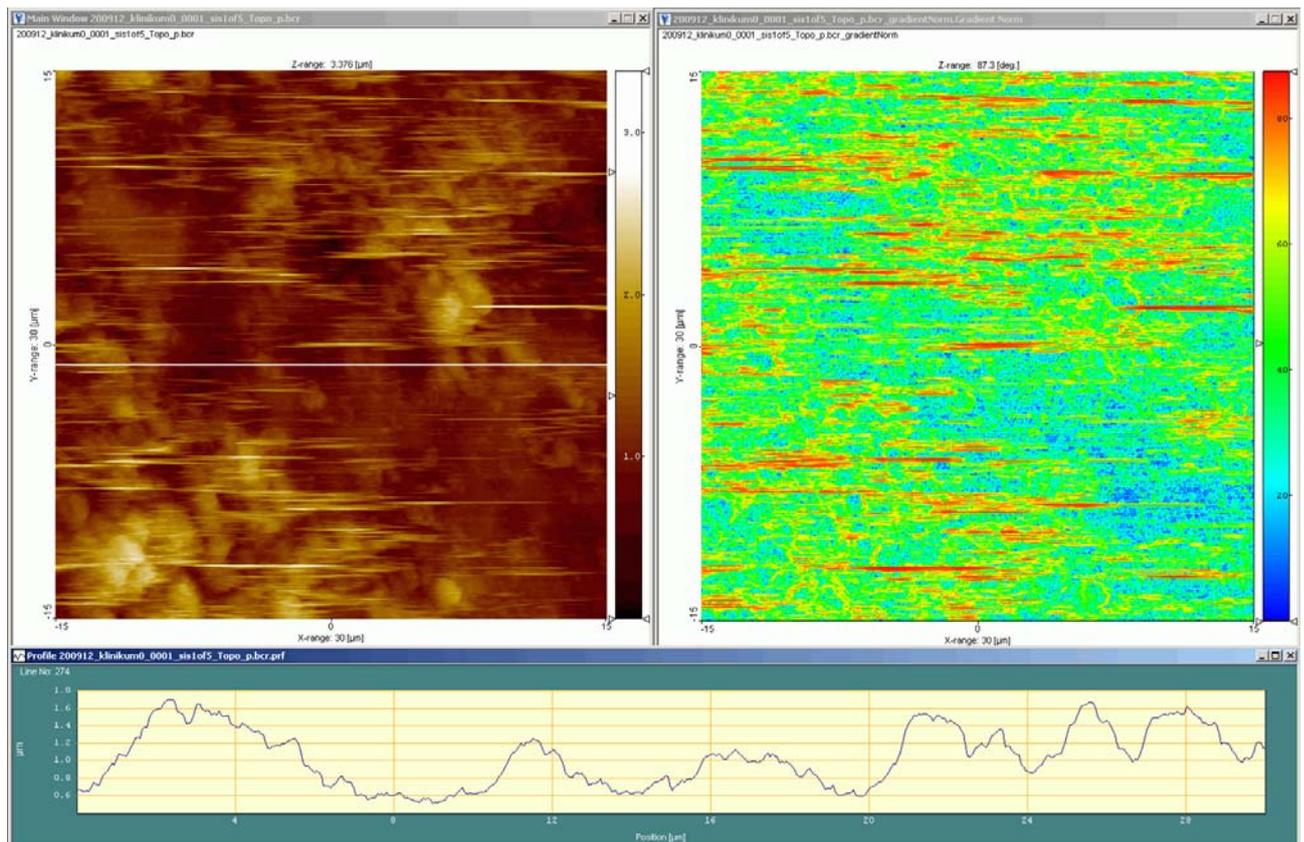


Abbildung 13: Rasterkraftmikroskopische Aufnahme eines Ausschnitts der Oberfläche der Muster-Aluminium-Basisplatte des CDMAM-Prüfkörpers. Oben links: farbcodierte Darstellung des Höhenprofils; oben rechts: farbcodierte Darstellung der Gradienten; unten: Höhenprofil im untersuchten Ausschnitt entlang der in der oberen, linken Darstellung kenntlich gemachten horizontalen Linie. Sämtliche Achsen haben die Einheit Mikrometer.

Schon in den lichtmikroskopischen Bildern (Hellfeld, 50x) ist eine auffallend große Rauheit der Oberfläche des Aluminium-Substrats sichtbar. Die Rauheit der Oberfläche stammt recht sicher von der Vorbereitung der Aluminium-Oberfläche für die Belegung mit den Goldplättchen. Das Aluminium wird hierbei eloxiert. Vor dem eigentlichen Eloxieren wird die Oberfläche bei einigen Arten der Vorbereitung geschliffen bzw. gebeizt. Bei diesen Vorbereitungsschritten wird die Materialoberfläche auf mikroskopischer Skala deutlich aufgeraut. Genaue Informationen über die bei der Herstellung des CDMAM-Prüfkörpers vorgenommenen Schritte waren vom Hersteller nicht zu erhalten.

In den rasterkraftmikroskopischen Aufnahmen ist zu erkennen, dass die gemittelte Rautiefe R_z^3 der Oberfläche in der Größe von 1-2 μm liegt. Es treten sehr steile Kanten mit Amplituden von 1-2 μm auf. Das in Abbildung 13 dargestellte Profil geht noch nicht einmal durch die Maxima der Amplitude. Die Skala neben dem Profilschrieb zeigt den Bereich von 0,6 μm bis 1,8 μm . Die beobachtete Topographie ist typisch für eloxierte Oberflächen.

Eine rasterkraftmikroskopische Untersuchung derart rauer Oberflächen ist messtechnisch nicht sinnvoll. Aus diesem Grund erfolgten die Untersuchungen der Oberfläche des CDMAM-Referenzprüfkörpers anstelle rasterkraftmikroskopischer Untersuchungen mit einem Tastschnittgerät (Tencor P-11). Es wurden in Abhängigkeit der Größe der Goldpunkte Flächenabschnitte von 200 μm x 500 μm bis 600 μm x 800 μm mit je 30 bis 60 Scanlinien an den in Abbildung 14 bezeichneten Stellen untersucht.

³ R_z : gemittelte Rautiefe; diese entspricht der Differenz aus dem maximalen und minimalen Messwert der topologischen Oberflächenuntersuchung

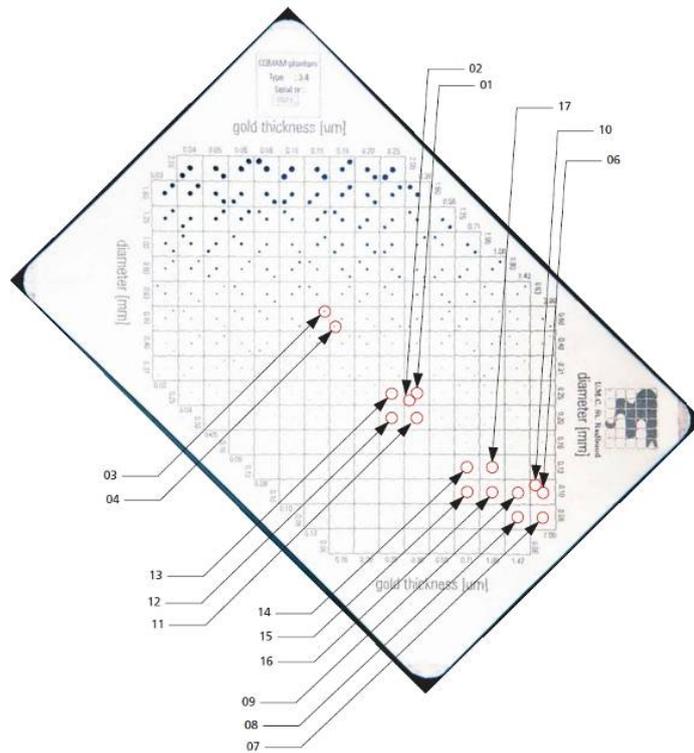


Abbildung 14: Bereiche, in denen der Referenz-Prüfkörper des CDMAM exemplarisch mit dem Tastschnittgerät untersucht wurde

Die Messungen weisen darauf hin, dass die Oberflächenrauigkeit der zuvor untersuchten Aluminium-Basisplatte repräsentativ für die Oberflächenrauigkeit des CDMAM-Referenzprüfkörpers ist. An zwei Messstellen ermittelte Werte ergaben einen Mittenrauwert R_a^4 von ca. $0,25 \mu\text{m}$ sowie eine gemittelte Rautiefe R_z von bis zu $2 \mu\text{m}$.

Exemplarisch sind Aufnahmen der Messungen mit dem Tastschnittgerät, die an den Positionen 3, 10 und 13 aus Abbildung 14 erfolgt sind, als Abbildung 15 bis Abbildung 18 beigefügt.

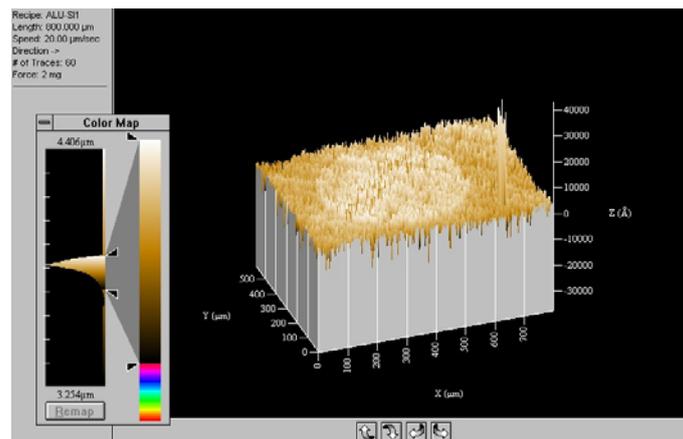


Abbildung 15: 3D-Ansicht der Oberfläche des CDMAM-Referenzprüfkörpers an der Messstelle Nr. 3 nach Abbildung 14; nominale Dicke des Goldplättchens: 130 nm ; die x- und y-Achse haben die Einheit Mikrometer, die z-Achse hat die Einheit Angström.

⁴ R_a : mittlere Rauheit; diese entspricht dem arithmetischen Mittel des Abstands der Messpunkte von der Mittellinie

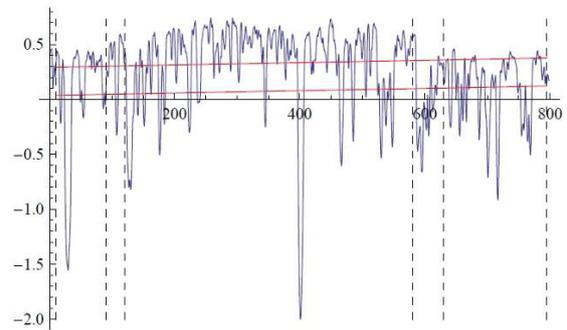
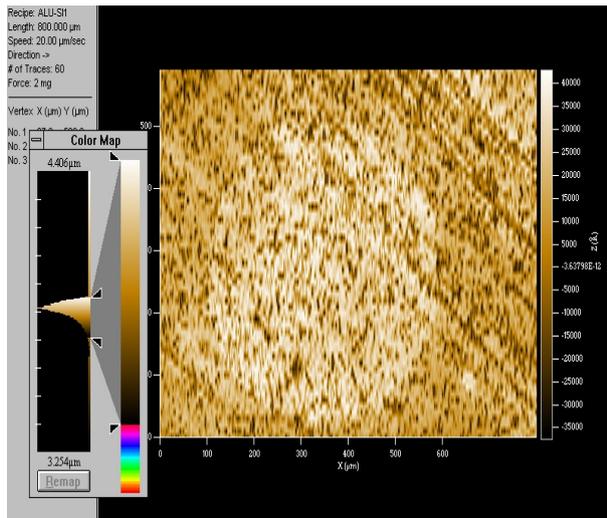


Abbildung 16: 2D-Ansicht (links) und Profilschnitt (rechts) der Oberfläche des CDMAM-Referenzprüfkörpers an der Messstelle Nr. 3 nach Abbildung 14; nominale Dicke des Goldplättchens: 130 nm. Sämtliche Achsen haben die Einheit Mikrometer.

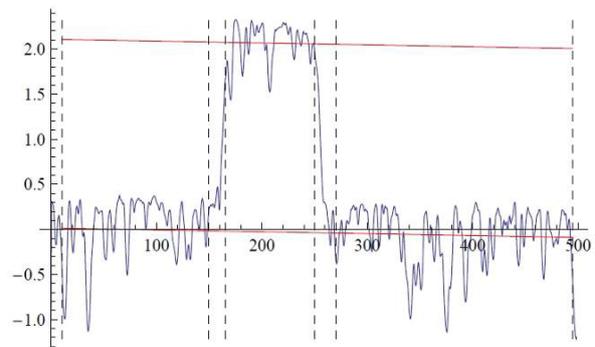
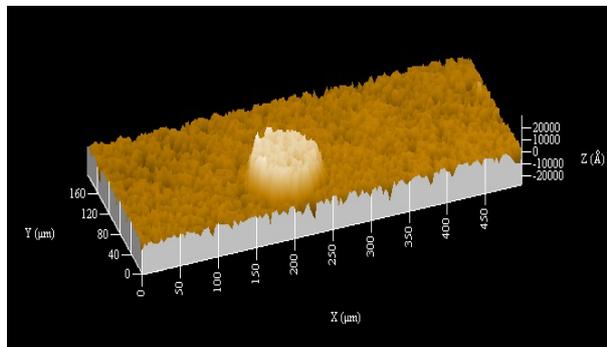


Abbildung 17: 3D-Ansicht (links) und Profilschnitt (rechts) der Oberfläche des CDMAM-Referenzprüfkörpers an der Messstelle Nr. 10 nach Abbildung 14; nominale Dicke des Goldplättchens: 2 μm. Die x- und y-Achse in der 3D-Darstellung haben die Einheit Mikrometer, die z-Achse hat die Einheit Angström. Die Achsen im Profilschnitt haben die Einheit Mikrometer.

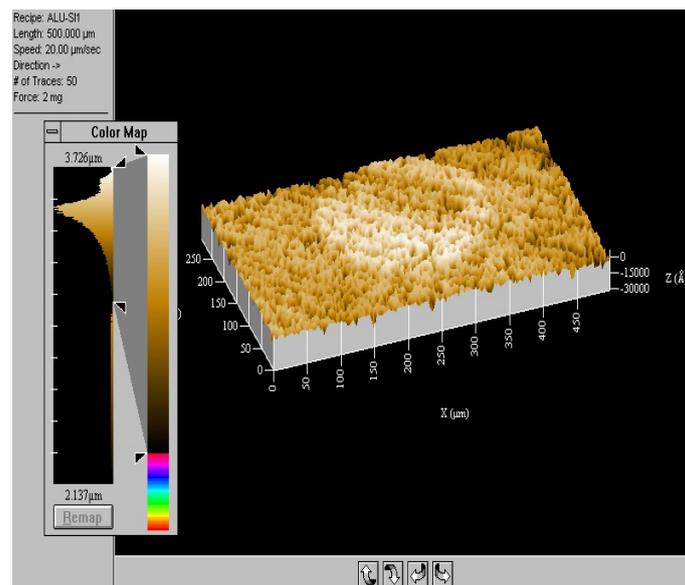


Abbildung 18: 3D-Ansicht der Oberfläche des CDMAM-Referenzprüfkörpers an der Messstelle Nr. 13 nach Abbildung 14; nominale Dicke des Goldplättchens: 250 nm. die x- und y-Achse haben die Einheit Mikrometer, die z-Achse hat die Einheit Angström.

Insbesondere in Abbildung 16 und Abbildung 18 sind neben einer nicht texturierten Rauheit, Rillen zu erkennen, welche den Ort des Goldplättchens überschneiden, die in beiden Fällen von oben links nach unten rechts verlaufen. Die Rillen stammen wahrscheinlich von der bereits beschriebenen Bearbeitung des Aluminium-Substrats vor dem Eloxieren. Die Rillen der Basisplatte sind teilweise so tief, dass die Oberfläche der Goldplättchen wesentlich von einer Ebene abweicht, s. Abbildung 18.

Auf diese auf mikroskopischer Skala extrem raue Basisplatte werden im Herstellungsprozess die Goldplättchen aufgebracht.

Das Gold lagert sich, wie aus den Durchstrahlungsmessungen, s. z.B. Abbildung 67, zu ersehen ist, im Wesentlichen mit einer homogenen Dickenverteilung auf der Oberfläche ab. Bildlich lässt sich dieses wie die Verteilung einer Schneeschicht auf einer Hügellandschaft vorstellen.

Aufgrund der Rauheit des Substrats mit typischen Werten von $R_m > 300$ nm und lokalen Störungen durch Kratzer bzw. Löcher im Substrat ist die Messunsicherheit der Schichtdickenwerte bei taktiler Untersuchung durch die Qualität des Messobjekts bestimmt und nicht durch das Messgerät. Für alle Ergebnisse wird eine erweiterte Messunsicherheit von ± 200 nm ($k = 2$) angenommen. Das hat zur Folge, dass nur bei Goldplättchen mit Materialdicken von mindestens 500 nm die taktilen Messungen sinnvoll quantitativ ausgewertet werden können. Dieses ist für die Erreichung des Projektziels nicht ausreichend. Es wurde daher von einer Verwendung der topographischen Daten zur Kalibrierung der Messung der Goldplättchendicke im Referenzprüfkörper abgesehen.

6.2.1.2. *Taktile Untersuchungen weiterer Referenz-Prüfkörper*

Da die Oberflächenbeschaffenheit der CDMAM-Prüfkörper keine ausreichend präzisen Topografiemessungen zulässt, wurden Testobjekte mit geeigneterer Oberfläche hergestellt. In Abbildung 19 ist die Schemazeichnung eines der Testobjekte dargestellt. Es handelt sich um mikrolithographisch erzeugte Goldobjekte, die auf einer als Haftgrund fungierenden ganzflächigen Chromschicht als Haftgrund auf einem Siliziumsubstrat (Si-Wafer) aufgebracht sind. Diese Testobjekte wurden am Institut für Mikro- und Informationstechnik der Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. („HSG-IMIT“) in Villingen-Schwenningen gefertigt. Die Dicke der Goldschicht an einem der Prüfobjekte beträgt etwa 130 nm mit einer Unsicherheit ($k=2$) kleiner 3,5 nm und am zweiten Prüfobjekt je nach Messort 350 nm bis 360 nm mit einer Unsicherheit ($k=2$) kleiner 2 nm.

Die mikrolithographisch erzeugten Teststücke wurden verwendet, um verbliebene Fragen im Hinblick auf die Eigenschaften der Kalibrier-Goldschichten bei den Röntgenfluoreszenzmessungen, s. Abschnitt 6.2.2, zu klären. Mit Hilfe der aus der Untersuchung der Teststücke gewonnenen Informationen wurde es möglich, die Unsicherheit der Fluoreszenzmessungen relevant zu verringern.

Es ist nicht möglich, die zusätzlich erzeugten und besonders genau charakterisierten Testobjekte neben der oben erwähnten Verwendung auch für die Durchstrahlungsmessungen an der Röntgen-Mikrofokusanlage zu verwenden. Dieses ist auf die im Vergleich zum CDMAM deutlich unterschiedliche Schwächung des Substrats der Testobjekte zurückzuführen.

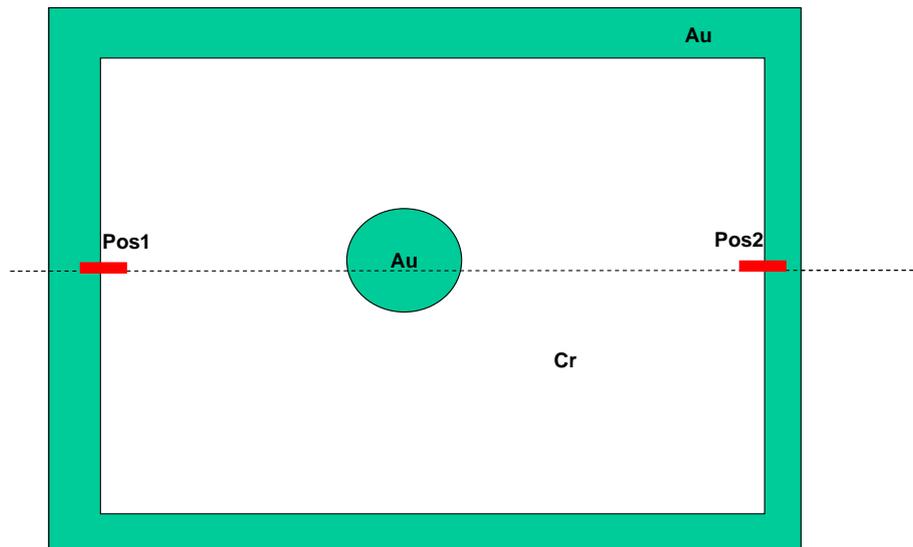


Abbildung 19: Schemazeichnung der ergänzend erstellten Testobjekte; die grün gekennzeichneten Bereiche entsprechen den Regionen des Testobjektes, bei denen Goldobjekte definierter Materialdicke auf die Chrom-Haftschrift aufgebracht sind

Die Oberfläche der Testobjekte wurde mittels Rasterkraftmikroskopie (AFM) untersucht.

In Abbildung 20 bis Abbildung 22 ist die Oberfläche bzw. die Oberflächenrauheit exemplarischer Bereiche der Testobjekte dargestellt. Die an den Testobjekten gemessenen Rauwerte liegen um einen Faktor 1000 unter den Werten des CDMAM-Referenzprüfkörpers (R_a -Werte von ca. 0,24 nm und R_z -Werte von ca. 1,8 nm). Im Bereich der Chrom-Haftschrift neben den Goldpunkten liegen die Rauwerte in der gleichen Größenordnung.

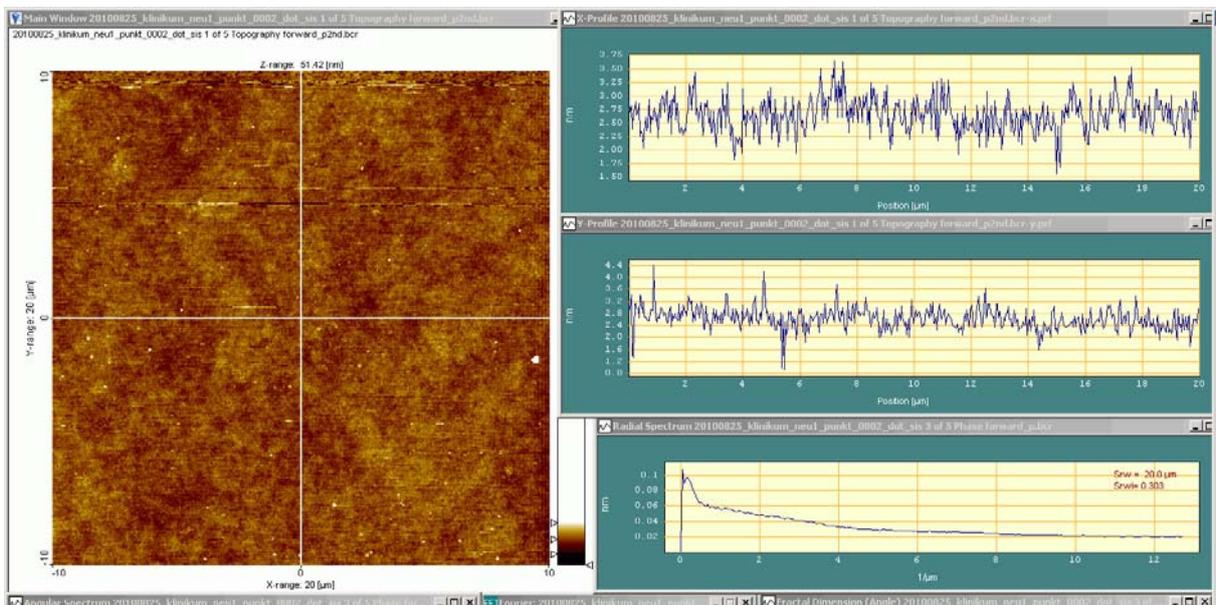


Abbildung 20: Resultate der Untersuchung der Oberflächenrauhheit auf dem mittig angeordneten Goldpunkt des Objektes nach Abbildung 19 (Messfeld: 20 µm x 20 µm): Im linken Teil der Abbildung ist die Oberflächentopologie farbcodiert dargestellt; rechts sind Rauheitsprofile aufgetragen; rechts oben: Rauheit entlang der in der linken Abbildung gekennzeichneten Horizontallinie; rechts Mitte: Rauheit entlang der in der linken Abbildung gekennzeichneten Vertikallinie; rechts unten: Frequenzspektrum der Rauheit der Oberfläche. Die Einheit der linken Abbildung sowie der x-Achsen rechts oben und rechts mittig ist Mikrometer. Die Einheit der x-Achse rechts unten ist 1/µm. Die Einheit der y-Achsen rechts ist Nanometer. Es ergaben sich R_a -Werte von etwa 0,24 nm und R_z -Werte von etwa 1,8 nm.

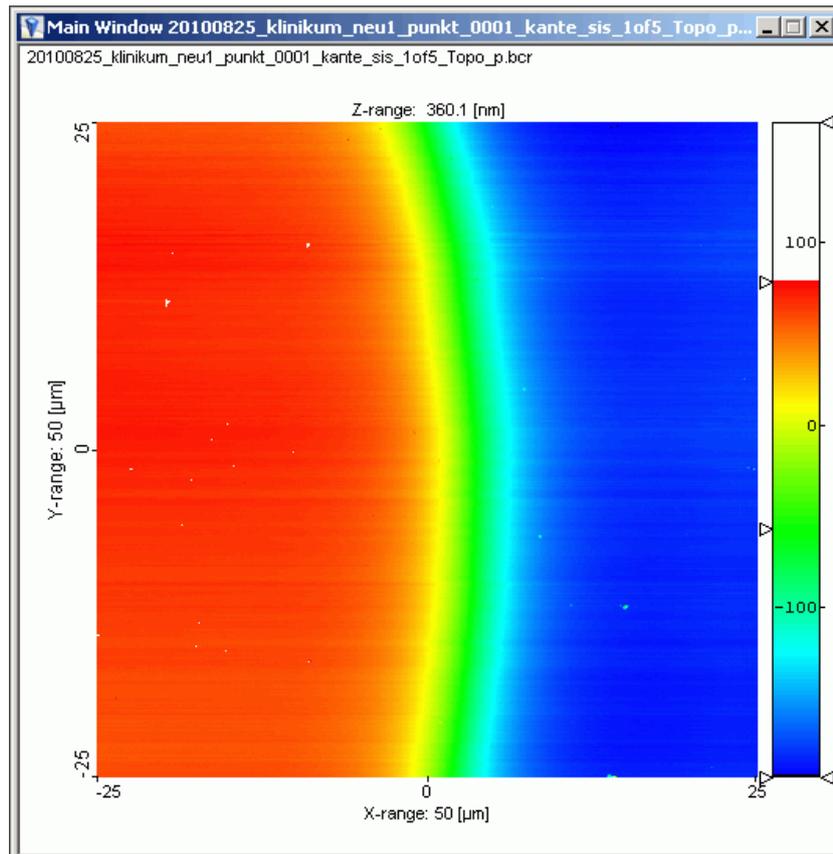


Abbildung 21: Resultate der Untersuchung der Oberflächenrauheit am Rand des mittig angeordneten Goldpunktes des Objektes nach Abbildung 19 (Messfeld: 50 µm x 50 µm). Die Einheit der x- und y-Achse ist Mikrometer. Die Einheit der farbcodiert dargestellten z-Achse ist Nanometer.

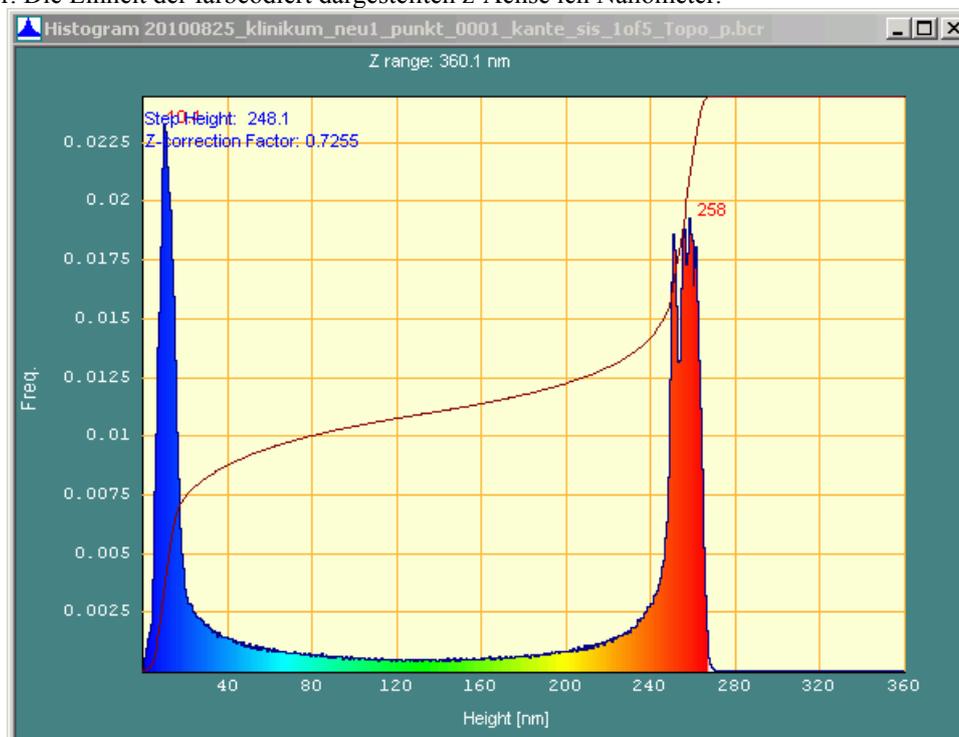


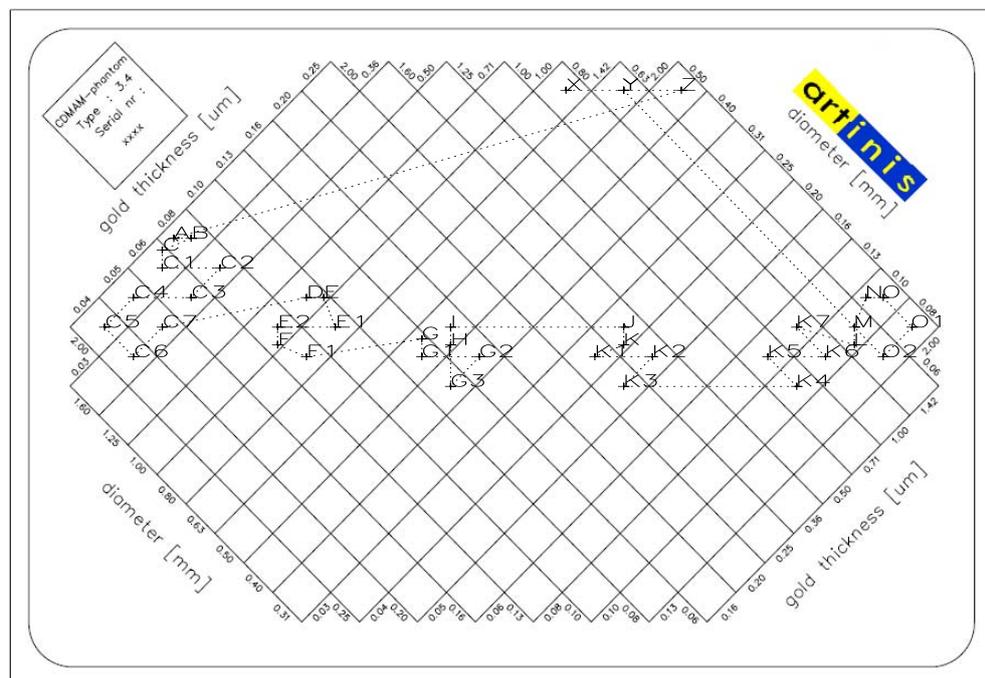
Abbildung 22: Histogramm der Verteilung der Daten der Oberflächenhöhe an der Kante eines Goldobjektes. Es ist die enge Verteilung der Materialhöhen im Bereich der Goldschicht sowie der Haftschrift zu erkennen. Die aus den Daten ermittelte Schichtdicke ergibt 248 nm.

6.2.2. Röntgenfluoreszenzuntersuchungen des Referenz-Prüfkörpers

Die Dicke ausgewählter Goldplättchen, s. Abbildung 23, des CDMAM-Referenzprüfkörpers wurde an der BAMline⁵ am Berliner Elektronenspeicherring für Synchrotronstrahlung BESSY II in Berlin bestimmt. Die hohe Leistungsdichte der Synchrotronstrahlung ermöglicht es, Untersuchungen mit quasi monochromatischer Strahlung durchzuführen. Hierdurch ist es möglich, energieabhängig das Absorptionsverhalten sowie die Fluoreszenzstrahlung der Probe zu untersuchen. Bei einigen Vorkenntnissen ist es damit möglich, auf die unbekannte Dicke der Goldplättchen zu schließen.

Mit Hilfe einer Pt/Ir-Lochblende wurde der Durchmesser des Synchrotronstrahls an der Messapparatur auf 50 µm begrenzt, Größe und Form des Strahls wurden mit einem CCD-Kamerasystem mit einer Pixelgröße von etwa 3 µm kontrolliert. Die Prüfkörper befanden sich auf einem x-y-Tisch, der mit Hilfe von Schrittmotoren die horizontale und vertikale Positionierung mit einer Genauigkeit von wenigen Mikrometern erlaubte.

Zunächst wurde für die Goldplättchen mit der größten Materialdicke der Kantenhub an der Au L3 Kante in Transmission bestimmt, s. Abbildung 24. Dazu wurde mit einer Silizium-Photodiode hinter dem Prüfkörper die Strahlungsleistung in Abhängigkeit von der Photonenenergie im Bereich von 11,55 keV bis 12,5 keV gemessen, und zwar mit dem jeweiligen Goldplättchen im Strahl bzw. an einer anderen Stelle des Prüfkörpers, an dem sich kein Goldplättchen befand.



Score form CDMAM-phantom, type 3.4

Abbildung 23: Schemazeichnung des CDMAM-Prüfkörpers mit Einzeichnung der durch Röntgenfluoreszenz untersuchten Goldplättchen

⁵ BAMline: Bezeichnung der am BESSY II verwendeten Beamline. Siehe: http://www.bessy.de/bit/bit_show_object.html.php?i_bit_id_object=42 für weitergehende Informationen

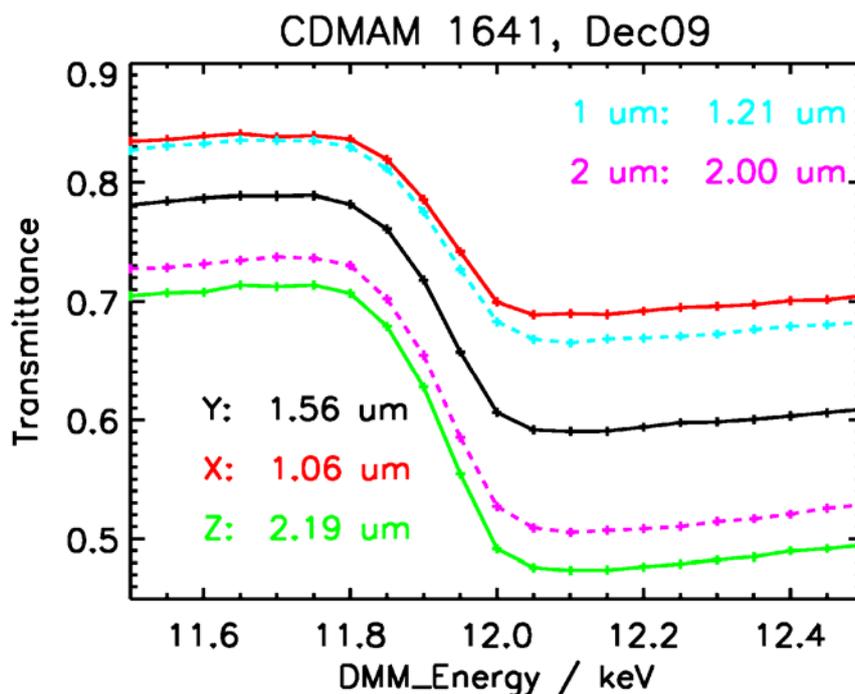


Abbildung 24: Messwerte des Kantenhubs der Au L3 Kante. Es ist die Transmission des Synchrotronstrahls in Abhängigkeit der Photonenenergie aufgetragen.

Anschließend wurden nacheinander alle zu untersuchenden Goldplättchen im Prüfkörper so positioniert, dass der Strahl mit einer Photonenenergie von 20 keV senkrecht auf das jeweilige Plättchen traf. Mit einem Silizium-Drift-Detektor wurde die entstehende Fluoreszenzstrahlung auf der Eintrittsseite der Strahlung gemessen. Bei allen Goldplättchen wurde zunächst in einem automatisierten Scan an der berechneten Mittenposition des Plättchens und an zwei weiteren um jeweils eine Strahlbreite nach rechts und links versetzten Positionen gemessen. Wenn, wie insbesondere bei den kleinen Plättchen zu erwarten, die drei Spektren nicht übereinstimmten, wurde anschließend noch ein Scan in x- und y-Richtung über das Plättchen durchgeführt. Das eigentliche Spektrum wurde in der so bestimmten Mittenposition aufgenommen.

Zusätzlich wurde die Fluoreszenzstrahlung der Goldschicht der Testobjekte, s. Abbildung 25, gemessen. Die Materialdicke der benannten Objekte wurde nachfolgend mittels Röntgenreflektometrie (XRR) gemessen. Die XRR-Messungen wurden an der FCM-beamline⁶ ebenfalls bei BESSY II durchgeführt.

In Abbildung 25 ist exemplarisch die Röntgenfluoreszenz von Objekten zweier unterschiedlicher Materialdicken in Abhängigkeit der Photonenenergie dargestellt. Die in der Abbildung enthaltene schwarze Kurve entspricht dem Untergrundsignal, welches an Stellen des Prüfkörpers gemessen wird, an denen sich keine Goldobjekte befinden. Die grüne Kurve entspricht dem Signal durch ein Objekt mit 40 nm Materialdicke, die rote Kurve dem Signal durch ein Objekt mit 2 µm Materialdicke.

In dem Messsignal sind sehr deutlich die L-Fluoreszenzlinien von Gold zu erkennen. Diese lassen sich gut zur Analyse der Materialdicke heranziehen. Neben den Goldlinien sind im Signal an den Orten der Goldobjekte keine weiteren Fluoreszenzlinien zu erkennen. Es gibt anhand der Messungen daher keinen Hinweis auf eine am Ort der Goldobjekte vorhandene Haftschiicht eines anderen Metalls.

⁶ FCM-beamline: „Four crystal monochromator“ Beamline der PTB am BESSY II Speicherring

Zur Auswertung der Fluoreszenzmessungen an der BAMline wurden, nach Abzug des an zwei Positionen auf dem Prüfkörper ohne Goldplättchen gemessenen Untergrunds, die Intensitäten der Au $L\alpha$ -, Au $L\beta$ - und Au $L\gamma$ -Strahlung verwendet. Auf der Basis der Kantenhubmessungen ergaben sich nach Korrektur für die Selbstabsorption im Goldplättchen Werte für die Dicke aller Goldplättchen. Zusätzlich wurden für die dünneren Goldplättchen (Dicke unter 1 μm) auch die durch Vergleich mit der Referenzschicht gewonnenen Ergebnisse herangezogen.

Die Messung der Materialdicke anhand der Fluoreszenzstrahlung ist indirekt. Sie basiert auf der Kenntnis der Fluoreszenz von Proben bekannter Materialdicke und Dichte. Als Referenz für die Goldobjekte mit weniger als 1 μm Dicke wurden Proben mit großflächig aufgetragenen Goldschichten genutzt, die in der Arbeitsgruppe am BESSY II verfügbar waren. Die Materialdicke der Goldschichten wurde durch Röntgenreflektometrie (XRR) bestimmt. In Abbildung 26 ist der Reflektionsgrad in Abhängigkeit des Strahleinfallswinkels exemplarisch für eine Probe aufgetragen. Aus der Frequenz der Oszillation sowie dem Gradienten der Kurve ist auf die Materialdicke und -dichte zu schließen.

Die so bestimmte Dicke der Schicht von 111 nm wurde zunächst nicht weiter zur Auswertung herangezogen, weil Zweifel an der Dichte der Goldschicht auftraten. Daher wurden Messungen an den nachträglich angefertigten Testobjekten durchgeführt, bei denen die Dicke der Goldschicht mittels Rasterkraftmikroskopie bestimmt werden konnte, s. Abschnitt 6.2.1. An diesen Schichten ließ sich mit XRR nachweisen, dass die Dichte der Goldschicht in etwa dem Literaturwert entspricht. Durch Vergleich der Fluoreszenzstrahlung mit derjenigen der zuvor verwendeten Referenzschicht konnte auch hierfür die Golddicke verifiziert werden.

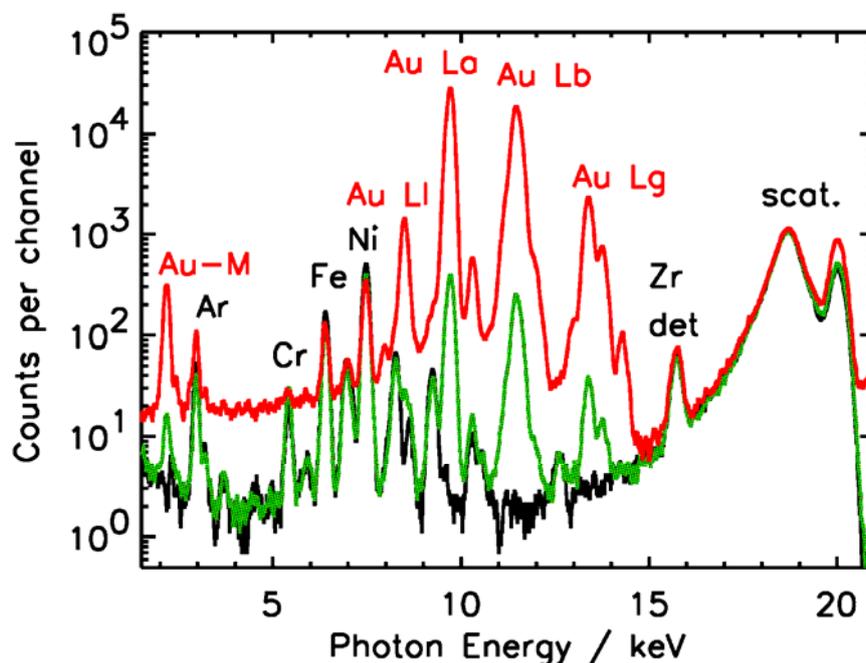


Abbildung 25: Fluoreszenzsignal des CDMAM-Prüfkörpers an unterschiedlichen Orten: schwarze Linie: Untergrundsignal neben den Gold-Objekten; grün: Signal am Ort eines Goldobjektes der Materialdicke von 40 nm; rot: Signal am Ort eines Goldobjektes der Materialdicke von 2 μm

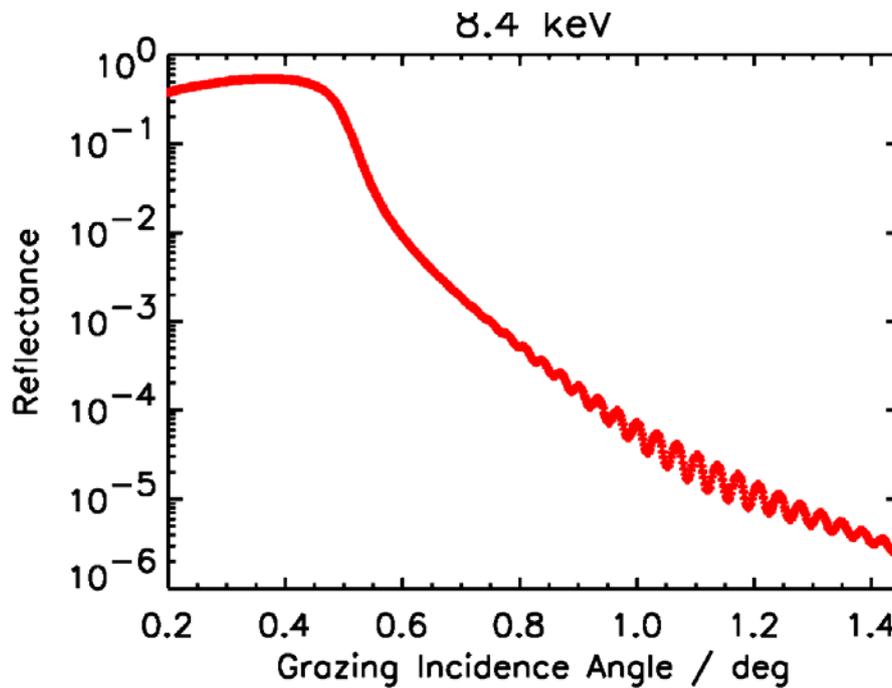


Abbildung 26: Exemplarische Darstellung des Reflektionsgrades (reflectance) in Abhängigkeit des Strahleinfalls winkels (grazing incidence angle) bei der Röntgenreflektometrie-Messung einer Referenzprobe für die Materialdickenbestimmung

In Tabelle 1 sind die anhand der Messungen am Synchrotron erhaltenen Werte für die Dicke der Goldplättchen zusammengefasst. Ebenfalls angegeben ist die erweiterte Unsicherheit ($k=2$) der Dickenangabe unter der Annahme, dass die Dichte der Referenz-Goldschicht dem Literaturwert entspricht. Die relativen Unsicherheiten liegen bei den dickeren Goldplättchen bei etwa 5 % (mit Ausnahme der beiden Plättchen mit 80 μm Durchmesser, dort eher 12 %), bei den dünneren Goldplättchen zwischen 5 % und 9 %. Die Nummerierung der Objekte entspricht derjenigen in Abbildung 23.

Punkt	$d_{\text{nom}} / \mu\text{m}$	$d_{\text{mess}} / \mu\text{m}$	$U / \mu\text{m}$
A	0.080	0.079	0.007
B	0.080	0.079	0.007
C	0.060	0.063	0.006
C1	0.060	0.063	0.006
C2	0.080	0.081	0.007
C3	0.060	0.065	0.006
C4	0.050	0.049	0.004
C5	0.040	0.039	0.003
C6	0.040	0.039	0.003
C7	0.050	0.049	0.004
D	0.100	0.103	0.009
E	0.100	0.103	0.009
E1	0.100	0.102	0.009
E2	0.080	0.081	0.007
F	0.080	0.080	0.007
F1	0.080	0.080	0.007
G	0.130	0.133	0.012
G1	0.130	0.132	0.011
G2	0.160	0.163	0.014
G3	0.130	0.132	0.012
H	0.160	0.165	0.014
I	0.160	0.166	0.014
J	0.360	0.367	0.030
K	0.360	0.365	0.030
K1	0.250	0.253	0.021
K2	0.360	0.361	0.030
K3	0.250	0.250	0.021
K4	0.710	0.670	0.049
K5	0.710	0.688	0.050
K6	1.000	0.931	0.060
K7	1.000	0.952	0.060
L	1.420	1.338	0.072
M	1.420	1.346	0.073
N	2.000	1.923	0.096
O	2.000	1.894	0.095
O1	2.000	1.827	0.219
O2	1.420	1.268	0.152

Tabelle 1: Auf Basis der Röntgenfluoreszenzmessungen bestimmte Dicke der Goldplättchen im CDMAM-Referenzprüfkörper; d_{nom} : Golddicke gemäß Prüfkörperdefinition, d_{mess} : gemessene Golddicke; U: erweiterte Unsicherheit ($k=2$)

6.2.3. Entwicklung der Messprozedur zur Untersuchung von auf dem Markt erhältlichen Prüfkörpern der Typen CDMAM 3.4 und Testeinsatz AP

Die Untersuchung von auf dem Markt erhältlichen Prüfkörpern der Typen CDMAM 3.4 und Testeinsatz AP erfolgte an einer Transmissions-Mikrofokusröhre der BAM. In Tabelle 2 sind relevante Geräte- und Aufnahmeparameter der Untersuchung zusammengestellt.

Um die Einsatzmöglichkeiten der Transmissions-Mikrofokusröntgenröhre zur zerstörungsfreien Prüfung des CDMAM-Prüfkörpers abschätzen zu können, wurden von der PTB (Gruppe Dr. L. Büermann) Röntgenspektren für die Röntgenröhre im Bereich 10 kV bis 100 kV in Schritten von 10 kV mit der Monte Carlo Methode berechnet. Aus den Rechnungen ließ sich die Dosisleistungsausbeute der Röhre abschätzen. Mit Hilfe der berechneten Spektren wurde das Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis (KRV) für die Goldplättchen im CDMAM-Prüfkörper als Funktion der Dicke und der geometrischen Durchmesser berechnet und in Form einer Matrix dargestellt. Mit Hilfe dieser Ergebnisse lässt sich abschätzen, welche Strahlungsqualitäten und Dosen erforderlich sind, um für den Messzweck geeignete KRV zu erzielen. Es wurde entschieden, die Messungen mit 50 kV Röhrenspannung durchzuführen. Es wurde ein Röhrenstrom von 60 μA verwendet. Eine Vergrößerung der abgebildeten Goldplättchen wurde über eine Variation des Fokus-Objekt-Abstandes eingestellt.

Der Detektor liefert 2,5 Bilder pro Sekunde. Jede einzelne Aufnahme ist aufgrund des kleinen Röhrenstroms für eine Analyse zu stark verrauscht. Für die Erreichung einer wünschenswert hohen Kontrastauflösung wurden für Goldplättchen der CDMAM-Prüfkörper mit einer nominellen Dicke kleiner oder gleich 100 nm 14000 (280 x 50) Bilder kumuliert. Für die anderen Goldplättchen der CDMAM-Prüfkörper sowie die Goldplättchen der untersuchten Exemplare des Testeinsatzes AP wurden je 3000 (60 x 50) Bilder kumuliert. Nach jeweils 50 Bildern wurde die Position des Prüfobjektes zur jeweils anderen Aufnahme positioniert. Die Aufnahme der Bilder in zwei unterschiedlichen Aufnahmepositionen ist durch das zeitliche Verhalten des verwendeten Detektors begründet. Auf dieses wird im Folgenden noch detailliert eingegangen. Die Aufnahmezeit beträgt für einen untersuchten Bereich 90 min bzw. 20 min.

In Abbildung 27 ist der experimentelle Aufbau, ohne Einbringung eines Mammographie-Prüfkörpers, dargestellt.

Typ der Mikrofokusröhre	Feinfokus FXE 100.53
Target	6 μm Wolfram + 0,5 mm Beryllium
Detektortyp	Hamamatsu (C7940 DA – 02 SPL 5801)
Detektormatrix	2400 x 2400 Pixel
Nominelle Pixelgröße	50 μm
Aktive Bildmatrix	12 x 12 cm^2
Fokus-Detektor-Abstand	40,5 cm
Grauwertbereich	12 bit
Röhrenstrom	60 μA
Röhrenspannung	50 kV

Tabelle 2: Relevante Geräte- und Aufnahmeparameter der für die Untersuchung von auf dem Markt erhältlichen Mammographieprüfkörpern verwendeten Röntgenanlage

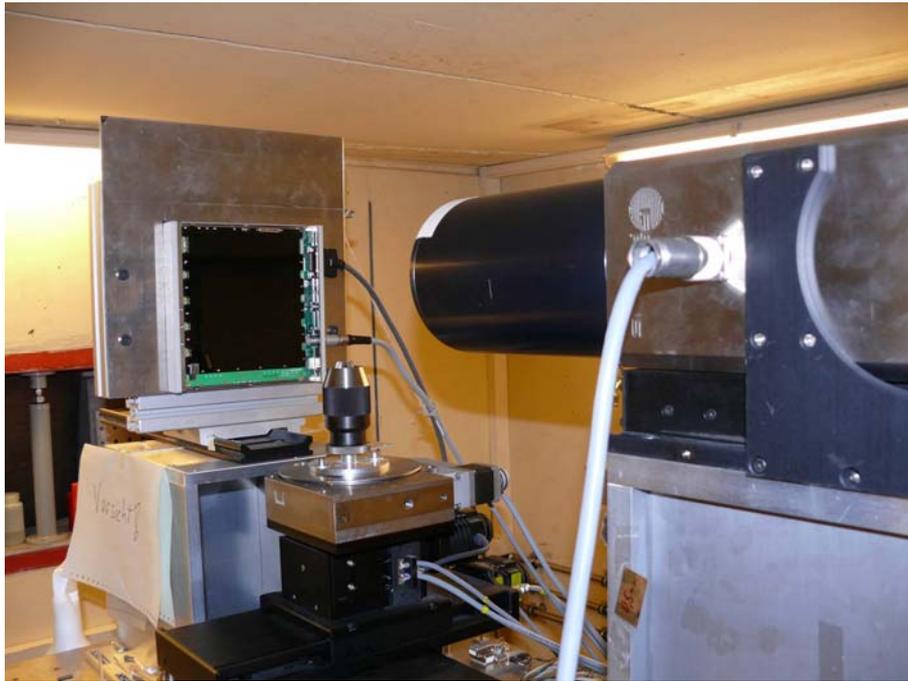


Abbildung 27: Abbildung des experimentellen Aufbaus an der Mikrofokusröhre der BAM

An den CDMAM-Prüfkörpern wurden, mit Ausnahme der Objekte X, Y und Z, die Goldplättchen an den Positionen untersucht, an denen auch die Röntgenfluoreszenzmessungen erfolgten, s. Abschnitt 6.2.2. Aufgrund der Größe der aktiven Bildmatrix ist es notwendig, die interessierenden Objekte in mehreren Messungen nacheinander abzubilden. In dem Bereich der Prüfkörper mit Goldplättchen eines Durchmessers, der größer oder gleich $400\ \mu\text{m}$ ist, ist es möglich, die Strukturen aus vier nebeneinander liegenden Auswertungsquadraten des CDMAM-Prüfkörpers, entspricht insgesamt acht Goldplättchen, parallel zu untersuchen. Bei kleineren Strukturen kann aufgrund der notwendigen Objektvergrößerung nur noch ein Auswertungsquadrat gleichzeitig aufgenommen werden. Für eine Abbildung sämtlicher untersuchten Bereiche eines CDMAM-Prüfkörpers wurden 15 Einzelaufnahmen benötigt.

Die Strukturen der Testeinsätze AP wurden jeweils separat untersucht, d.h. an jedem Testeinsatz AP werden 5 Einzelaufnahmen untersucht.

6.2.3.1. Das Detektorverhalten und dessen Korrektur

Der verwendete Detektor wird in Form einzelner Felder ausgelesen, die ein im Detail unterschiedliches Ansprechvermögen haben, s. Abbildung 28. Das lokal unterschiedliche Ansprechverhalten wird durch eine Homogenitätskorrektur ausgeglichen.

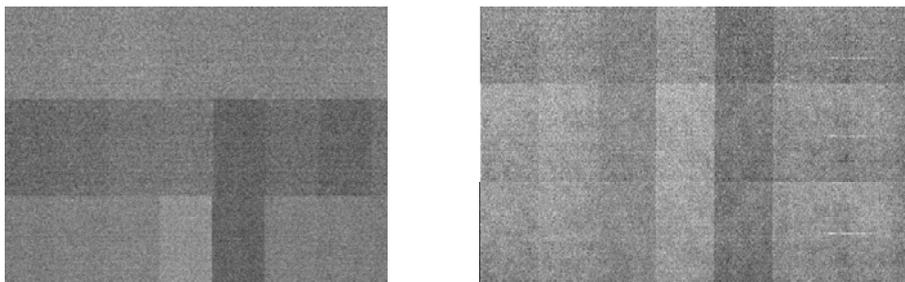


Abbildung 28: Signalhöhenverteilung eines Bereichs des Detektors bei homogener Signaleinstrahlung, links: ohne Streukörper, rechts: mit einem Aluminium Streukörper im Strahlengang. In der oberen Reihe ist das Signal nach 10 aufsummierten Bildern, in der mittleren Reihe, das Signal nach 30 aufsummierten Bildern und in der unteren Reihe das Signal nach 60 aufsummierten Bildern dargestellt.

Über den langen Zeitraum der Datenaufnahme zeigt der Detektor darüber hinaus eine lokale, zeitabhängige Änderung im Ansprechverhalten. Dieses lokale Verhalten ist zufällig und nicht reproduzierbar. Es führt lokal zu wolkenförmigen Mustern bei einer homogenen Signaleinstrahlung, s. Abbildung 29. Das Verhalten lässt sich nicht durch eine Homogenitätskorrektur ausgleichen. Es kann jedoch unberücksichtigt zu einer Verfälschung der gemessenen Signale und damit der gemessenen Golddicken führen.

Innerhalb der entwickelten Prüfprozedur wird dieses Detektorverhalten dadurch berücksichtigt, dass die untersuchten CDMAM-Prüfkörper während der Messung zwischen zwei definierten Positionen hin und her bewegt werden. Eine bei dieser Aufnahmetechnik resultierende Durchstrahlungsaufnahme ist in Abbildung 30 dargestellt. Dieses Vorgehen wird im Folgenden als „dynamische Aufnahme“ bezeichnet. Praktisch wurde bei der dynamischen Aufnahme zwischen den beiden Positionen nach der Aufnahme von jeweils 50 Bildern gewechselt. Bei den Prüfstücken des Testeinsatzes AP wurde gleichermaßen verfahren, wenn der Hintergrund der Goldpunkte mit ausreichender Genauigkeit als homogen anzusehen war. In der Analyse der Daten wurden die Zählraten aufeinander folgender Aufnahmen an gleicher Position aufsummiert. Von den kumulierten Bilddaten wurde das ohne Einstrahlung von Röntgenstrahlung gemessene „Dunkelbild“ subtrahiert. Danach wurden die entsprechenden Bilder durch das nachfolgende bzw. vorhergehende Summenbild dividiert. Die resultierenden Quotientenbilder wurden ebenfalls aufsummiert und durch die Anzahl summierter Quotientenbilder geteilt. Die resultierenden Daten wurden logarithmiert, um eine Darstellung zu erhalten, in welcher der Signalwert linear von Materialdicke abhängt.

Durch Korrelation der Messwerte mit denen der Röntgenfluoreszenzmessungen wurde der Absorptionskoeffizient der Goldplättchen bestimmt.

Wurde die Probe während der Messung nicht verschoben, wurde die Dicke aus dem logarithmierten Quotienten der Intensitäten im Goldpunkt und in dessen unmittelbarer Umgebung, dividiert durch den Absorptionskoeffizienten berechnet.

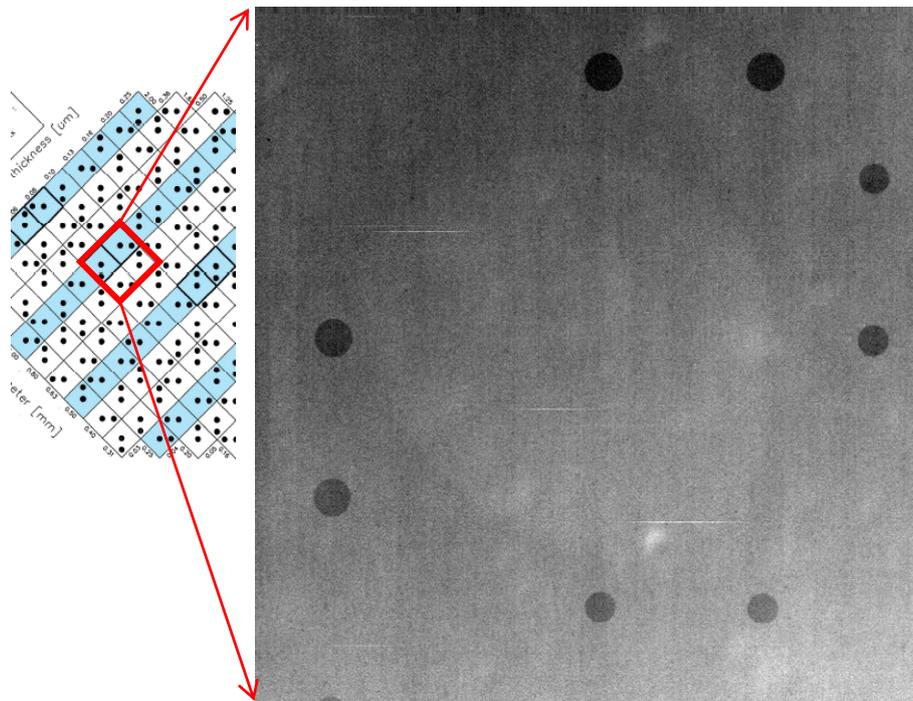


Abbildung 29: Aufnahme eines Bereichs nebeneinander liegender Goldplättchen des CDMAM Referenz-Prüfkörpers bei der Aufnahme in einer Messposition. Die auch nach der Homogenitätskorrektur verbleibende Wolkenstruktur ist deutlich sichtbar.

Im linken Teil der Abbildung 30 ist zu erkennen, dass die dynamische Aufnahme bei dem Referenz-Prüfkörper ungestört möglich ist. Bei den auf dem Markt verfügbaren Prüfkörpern treten bei der Untersuchung jedoch Probleme auf. Bei allen Prüfkörpern mit Ausnahme des Referenz-Prüfkörpers führt die Nähe der Goldplättchen zu den Linien des Rasters dazu, dass vielfach nur eine unvollständige Trennung der Objekte bei der Verschiebung möglich ist. Die Überlagerung der Strukturen ist für den menschlichen Auswerter problemlos zu erkennen und zu berücksichtigen. Eine automatisierte Analyse der Materialdicke sowie auch der Plättchenform und –größe ist jedoch vergleichsweise aufwändig zu programmieren. Aus diesem Grund wurden die Analysen entgegen der ursprünglichen Planung nicht automatisiert, sondern manuell durchgeführt. In Abbildung 31 ist eine mögliche, automatische Formerkennung dargestellt. Der in diesem Zusammenhang entwickelte Algorithmus ist einzig für die Goldplättchen anwendbar, die 1 µm oder dicker sind. Abbildung 32 zeigt das Vorgehen bei der manuellen Messung der Objektgrößen, welches bei den dynamischen Aufnahmen angewendet wurde.

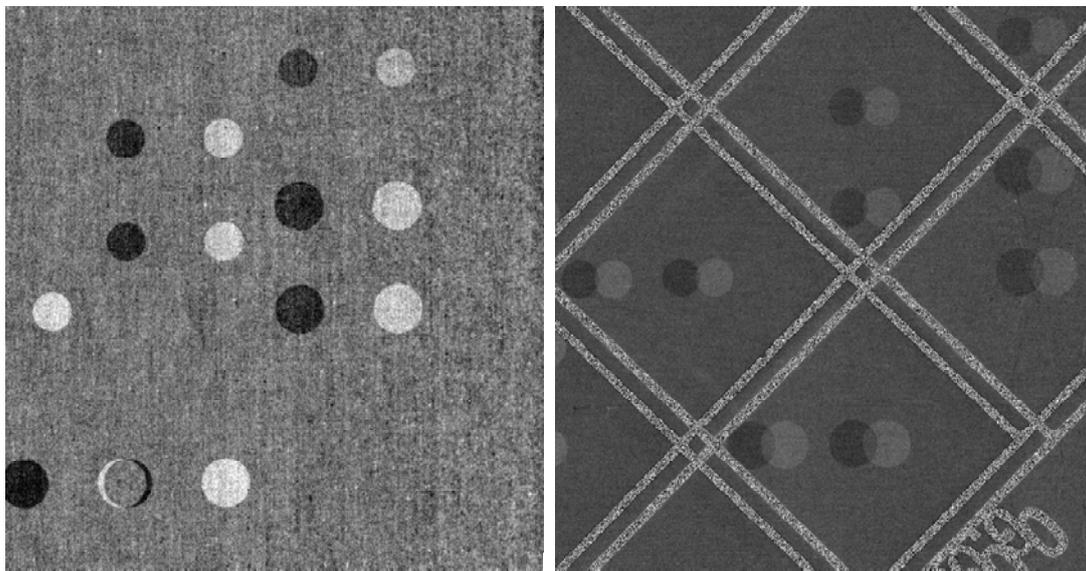


Abbildung 30: exemplarische Abbildung des CDMAM-Prüfkörpers bei dynamischer Aufnahmetechnik. links: Aufnahme des Referenz-Prüfkörpers, rechts: Aufnahme an einem Prüfkörper der Stichprobenuntersuchung

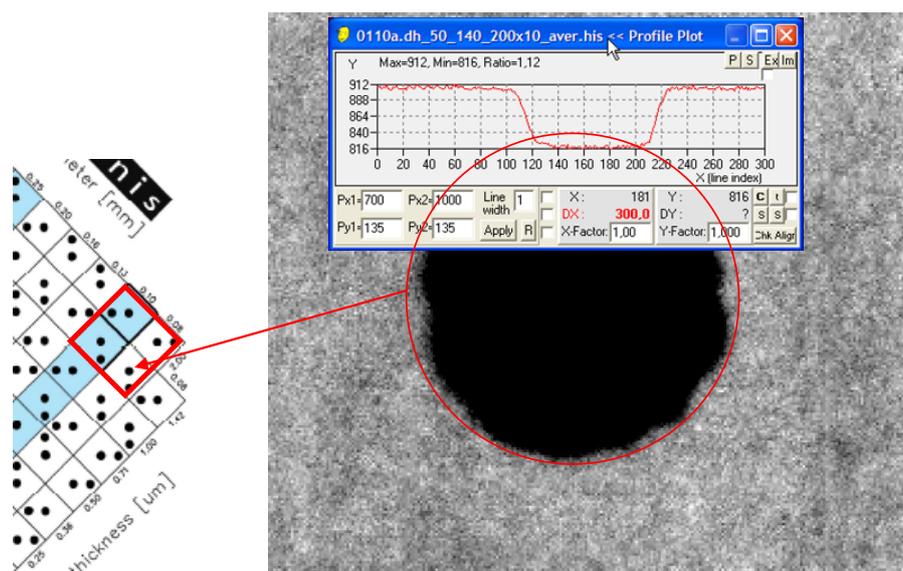


Abbildung 31: Exemplarische Darstellung der automatisierten Bestimmung von Objektgrößen; das entsprechende Verfahren wurde bei der Stichprobenuntersuchung nicht verwendet, da es bei den dynamischen Aufnahmen in der innerhalb des Vorhabens entwickelten Form nicht anwendbar ist.

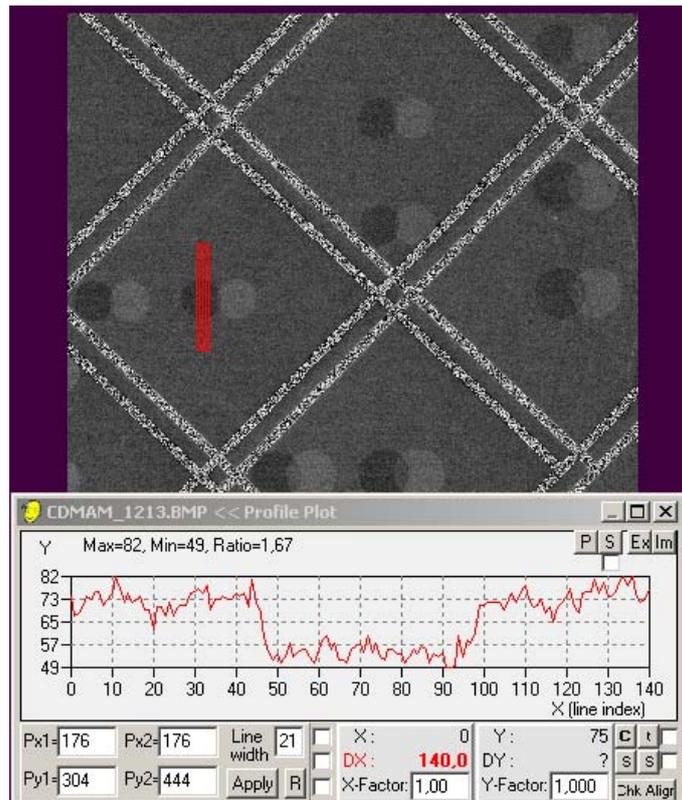


Abbildung 32: Exemplarische Darstellung der manuellen Bestimmung von Objektgrößen; dieses Vorgehen wurde innerhalb der Stichprobenuntersuchung angewendet

6.3. Die Strukturkörper der Normen DIN 6868-13 und DIN 6868-4 (inkl. DSA-Prüfkörper) sowie die zugehörigen Schwächungskörper

Die Strukturkörper der Normen DIN 6868-4 und DIN 6868-13 sowie des DSA-Prüfkörpers sind in Abschnitt 4.3 bis Abschnitt 4.5 beschrieben. Sie enthalten jeweils

1. Materialien unterschiedlicher Dicke, mit denen der erreichbare Dynamikbereich der Röntgeneinrichtung geprüft wird. Diese „Dynamiktreppe“ ist jeweils durch Kupferobjekte unterschiedlicher Materialdicke realisiert.
2. Objekte unterschiedlicher Dicke, mit denen die Niedrigkontrastauflösung der Röntgeneinrichtung geprüft wird. Diese „Niedrigkontrastelemente“ sind im Prüfkörper nach DIN 6868-13 sowie im DSA-Prüfkörper als Objekte aus Aluminium realisiert, im Prüfkörper nach DIN 6868-4 sind die Niedrigkontrastelemente als Bohrungen im Schwächungskörper realisiert.

Bei den Strukturkörpern nach DIN 6868-4 und DIN 6868-13 sind darüber hinaus

1. Hochkontrastlinien enthalten, mit denen die Übereinstimmung von Licht- und Röntgenfeld geprüft wird. Diese sind als Linien eines stark absorbierenden Materials oder Fräsungen im Schwächungskörper realisiert. Bei den Prüfkörpern, die Rastermarkierungen aus einem stark absorbierenden enthalten, sind diese Markierungen auf einer zusätzlichen Platte aufgebracht. Material und Dicke dieser Platte sind in den Normen nicht spezifiziert.
2. Auflösungstests enthalten, mit denen das Hochkontrastaufklärungsvermögen der Röntgeneinrichtung geprüft wird. Diese sind als Linienraster aus Blei realisiert.

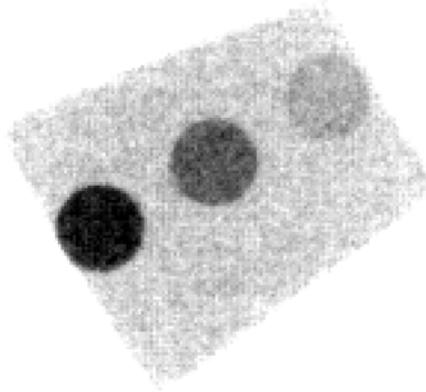


Abbildung 33: links: Detail aus dem Referenz-Prüfkörper nach DIN 6868-4. Dargestellt sind die Bohrungen zur Erstellung einer Korrelationsfunktion für die Niedrigkontrastauflösung am Ort der Dynamiktreppe; rechts: Röntgenabbildung des unteren Teils der links dargestellten Struktur

Neben den Strukturkörpern werden homogene Schwächungskörper verwendet, welche aus PMMA, Kupfer oder Aluminium gefertigt sind.

Nach der innerhalb des Vorhabens angewandten Untersuchungsmethode wird die Zusammensetzung unbekannter Prüfkörper anhand von Röntgenaufnahmen bestimmt, die unter definierten Bedingungen erstellt werden. Die Rückführung der Abstände senkrecht zur Strahlrichtung und der Schwächungswerte dieser Aufnahmen in Objektgrößen bzw. Materialdicken geschieht anhand von Korrelationsfunktionen, die an Referenz-Prüfkörpern mit Komponenten bekannter Größe erstellt werden.

Als Referenz-Objekte für die Strukturkörper der betrachteten Prüfkörper wurden im Rahmen des Vorhabens Exemplare der drei Prüfkörpertypen verwendet, bei denen die Komponenten vor dem Zusammenfügen für geometrische Messungen zugänglich waren. Ergänzend zu den Komponenten, die auch in auf dem Markt verfügbaren Strukturkörpern vorhandenen sind, enthält der Referenz-Prüfkörper des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 an den Orten der Dynamiktreppe jeweils zwei weitere Bohrungen unterschiedlicher Tiefe, s. Abbildung 33. Diese Erweiterung gegenüber dem Standardprüfkörper ist notwendig, um eine Korrelationsfunktion zwischen dem Objektkontrast und der Bohrungstiefe erstellen zu können, die für die Analyse der Tiefe der Bohrungen an den Orten der Dynamiktreppe in unbekanntem Prüfkörpern benötigt wird.

Bei den Schwächungskörpern besteht ebenso das Problem, dass diese keine Stufung unterschiedlicher Materialdicken enthalten, anhand derer eine Korrelationsfunktion zwischen der Materialdicke und dem Signal der Röntgenabbildung erstellt werden kann. Für die Schwächungskörper aus Metall und PMMA wurde daher innerhalb des Vorhabens ein abweichendes Vorgehen zur Bestimmung einer Korrelationsfunktion gewählt:

Schwächungskörper aus PMMA: Neben PMMA-Referenzplatten mit einer Nominaldicke von 10 mm wurden innerhalb des Vorhabens auch solche mit nominalen Materialdicken von 5 mm bis 9 mm in 1 mm Stufungen verwendet. In Kombination ist es mit Hilfe der verfügbaren Platten möglich sämtliche Materialdicken im Bereich von 5 mm bis 55 mm mit einer Stufung von 1 mm darzustellen. Dieses wurde zur Erstellung der Korrelationsfunktion verwendet. Es wurde für die Objekte der interessierenden Materialdicken von 10 mm, 30 mm und 40 mm PMMA der Bereich von 5 mm unterhalb bis 5 mm oberhalb der interessierenden Materialdicke dargestellt und bei der Erstellung der Korrelationsfunktion berücksichtigt.

Schwächungskörper aus Metall: Für die Schwächungskörper aus Aluminium und Kupfer wurden ergänzend zu den auf dem Markt verfügbaren Schwächungskörpern

Treppen aus dem gleichen Material gefertigt, welche aus Plättchen bekannter Materialdicke zusammengesetzt sind, s. Anlage B.4. Die Treppen wurden bei den Referenzaufnahmen im relevanten Bereich auf dem Originalschwächungskörper befestigt. Aus der Abbildung lassen sich Korrelationsfunktionen erarbeiten, mit Hilfe derer die Dicke der Schwächungskörper anhand ihrer Röntgenabbildung berechnet werden kann.

Bei gewöhnlichen Prüfkörpern sind die Metallkomponenten zum Schutz vor Korrosion sowie für ein besseres Aussehen, vielfach mit einem Schutzlack überzogen. Bei der Untersuchung der Geometrie derartiger Komponenten würde ein fehlerhaft zu großer Wert der Materialdicke gemessen. Bei den Referenzprüfkörpern wurde daher gezielt auf einen Lacküberzug sämtlicher Komponenten verzichtet. Im Hinblick auf die Röntgenabsorption trägt der Lack vernachlässigbar wenig bei. Die mit Hilfe der verwendeten Komponenten erstellten Korrelationsfunktionen sind damit weiterhin allgemein verwendbar.

In Abschnitt 6.3.1 werden die Methoden und Ergebnisse der geometrischen Untersuchung der Referenz-Prüfkörper beschrieben. In Abschnitt 6.3.2 wird die Entwicklung geeigneter Korrelationsfunktionen zwischen der untersuchten Objekteigenschaft (Materialdicke bzw. Ausdehnung senkrecht zur Strahlrichtung) und deren Darstellung in Röntgenabbildungen beschrieben.

6.3.1. Geometrische Untersuchung der Referenz-Prüfkörper

6.3.1.1. Durchführung der geometrischen Untersuchungen

Die präzise geometrische Untersuchung der Referenz-Prüfkörper stellt einige messtechnische Herausforderungen. Diese sind insbesondere:

1. Große Ausdehnung der Objekte:

Etliche der untersuchten Objekte, z.B. die Schwächungskörper der Prüfkörper, sind so groß, dass Sie nicht beliebig mit einem möglicherweise wünschenswerten Messgerät untersucht werden konnten. Limitationen treten insbesondere am Dickenmessplatz sowie am Fokusvariations-Sensor auf.

Die große Ausdehnung der Objekte erfordert es zudem, dass Messungen nur an ausgewählten Einzelpunkten erfolgen können, zwischen denen mathematisch eine Fläche aufgespannt wird. Teilweise ist es möglich den Dickenverlauf zwischen den Messpunkten durch flächenhafte Messungen der Topographie zu interpolieren.

2. Flexible Objekte:

Etliche der untersuchten Objekte, z.B. die Aluminium-Niedrigkontrastobjekte des DSA-Prüfkörpers sowie die großen Kupferplatten der Prüfkörper nach DIN 6868-4 bzw. DIN 6868-13, sind flexibel. Bei taktilen Messungen ist dieses zu berücksichtigen, was wiederum andere messtechnische Probleme mit sich bringt.

3. Große Formabweichungen:

Etliche der in den Referenz-Prüfkörpern zunächst enthaltenen Komponenten wichen in ihrer Form und Oberflächenbeschaffenheit wesentlich von einem idealen Messobjekt ab. Insbesondere die Dynamiktreppen aus Kupfer, welche durch Fräsen hergestellt werden, wiesen geometrische, durch Röntgenabbildungen klar nachweisbare Formabweichungen sowie Frässpuren auf. In Abbildung 34 ist dieses exemplarisch für die zunächst vorgesehenen Kupfer-Dynamiktreppen des Referenz-Prüfkörpers nach DIN 6868-4 dargestellt. Im linken Teil der Abbildung sind die beiden in dem Prüfkörper enthaltenen Kupfer-Dynamiktreppen dargestellt. Die Frässpuren sind deutlich erkennbar. Hinweise auf derartige Frässpuren mit teilweise wesentlich

größerer Beeinflussung der Röntgenabbildungen wurden bei der Untersuchung von auf dem Markt erhältlichen Prüfkörpern des Typs DIN 6868-4 festgestellt, s. Abbildung 71. Im rechten Teil ist farbcodiert die Abweichung die mittels Koordinatenmesstechnik gemessene Formabweichung des ersten Designs für den dünneren Teils der Kupfertreppe im Prüfkörper nach DIN 6868-4 dargestellt. In der Abbildung ist eine ausgeprägte Verdrillung der Treppe an einem Ende zu erkennen. Aufgrund der ausgeprägt nicht idealen Form dieser Komponente wurde innerhalb des Referenz-Prüfkörpers eine Kupfer-Dynamiktreppe anderer Bauweise verwendet, bei der die Treppe als Teil der im Strukturkörper enthaltenen Kupferplatte gearbeitet ist, s. Anlage B.1.1. Auch bei einem ersten Satz von Niedrigkontrastobjekten des DSA-Prüfkörpers bestand zwischen beiden Enden der Aluminiumstreifen teilweise ein Dickenunterschied von mehr als 8%. In den Fällen, in denen die zunächst verfügbaren Objekte trotz erhöhtem messtechnischem Aufwand nicht als Referenz-Prüfkörper zu verwenden waren, wurden wie exemplarisch oben beschrieben, geänderte bzw. gesondert angefertigte Objekte verwendet.

Die Komponenten der Prüfkörper wurden je nach Eignung mit einem der vier folgenden Messinstrumente untersucht:

1. Multisensor-Koordinatenmessgerät (Werth Video Check HA)

Das Messgerät sowie eine Detailvergrößerung des Sensorbereichs sind in Abbildung 35 dargestellt.

Das Messgerät verfügt über luftgelagerte Verstellachsen in x-, y- und z-Richtung mit einer spezifizierten Längenmessabweichung von $1,5 \mu\text{m} + L/300 \mu\text{m}$, wobei L der Ausdehnung des untersuchten Objektes in Millimetern entspricht.

Der taktile Taster des Messgerätes ermöglicht das Antasten horizontaler und vertikaler Objektoberflächen. Der Tastkugeldurchmesser beträgt 1 mm.

Der Video-Sensor besitzt eine telezentrische Optik sowie eine CCD-Kamera mit einer Bildmatrix von 640 x 480 Pixel. Er ermöglicht die Messung horizontaler Dimensionen in 2D. Eine Fläche von $(1 \mu\text{m})^2$ auf dem Messobjekt wird jeweils auf einem Pixel der CCD-Kamera abgebildet.

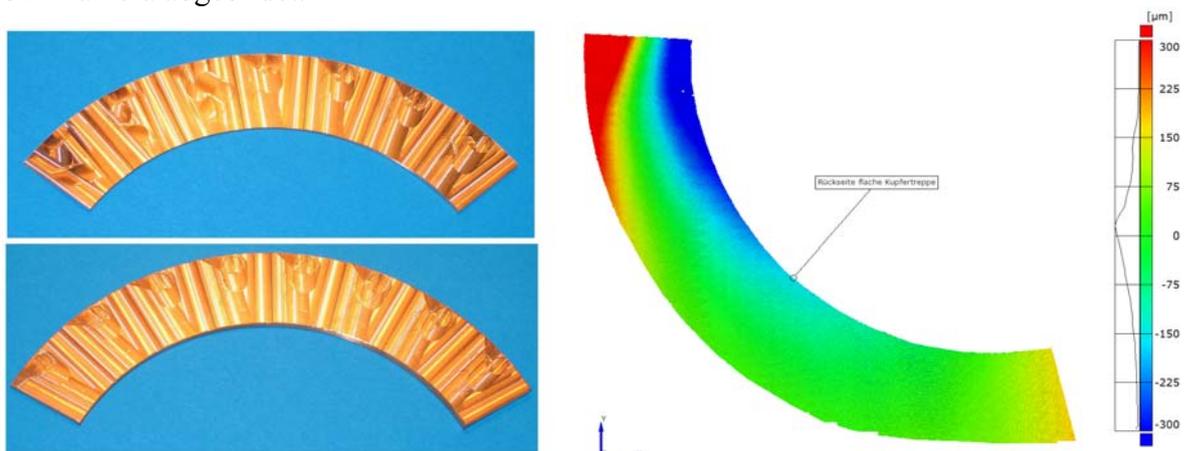


Abbildung 34: Links: Abbildung der beiden ursprünglich als Referenz-Objekte für die Kupfertreppen im Prüfkörper nach DIN 6868-4 vorgesehenen Kupfer-Teiltreppen. Die ausgeprägten Frässpuren sind deutlich zu erkennen; rechts: Farbcodierte Darstellung der mittels Koordinatenmesstechnik gemessenen Formabweichung des ersten Designs der dünneren Dynamiktreppe des Prüfkörpers nach DIN 6868-4.

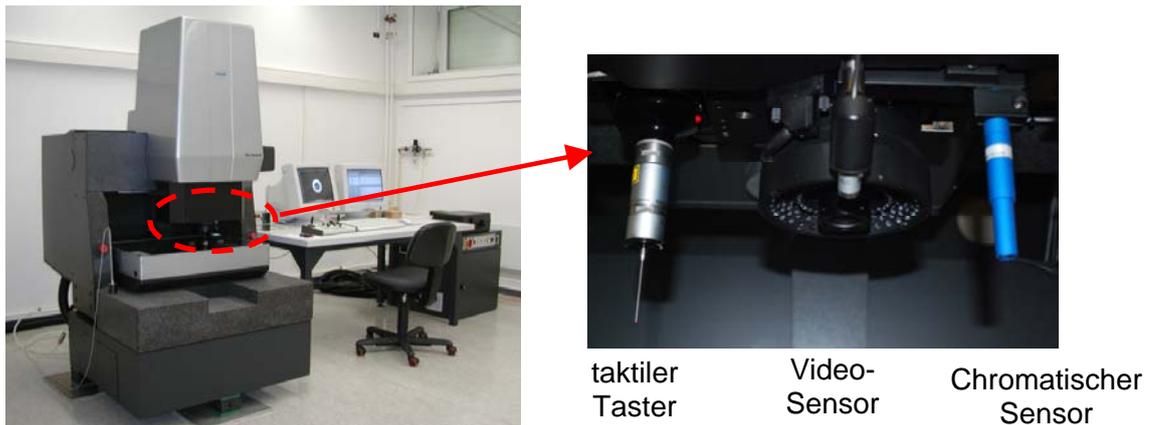


Abbildung 35: Darstellung des Multisensor-Koordinatenmessgerätes Werth Video Check HA (links) sowie eine Detailvergrößerung des Sensorbereichs (rechts)

Der chromatische Sensor ist ein optischer Abstandssensor, basierend auf chromatischer Aberration. Mit dem Sensor wird ein Messfleck von jeweils $2\ \mu\text{m}$ Durchmesser untersucht. Durch Verfahren der Verstellachsen des Koordinatenmessgerätes lassen sich Objektoberflächen scannen.

2. Fokusvariationsmessgerät (Alicona Infinite Focus)

Das Messgerät ist im linken Teil der Abbildung 36 dargestellt.

Das Messgerät ist ein optisches Messgerät, mit dem Oberflächentopologien durch eine Variation des Fokus der Optik untersucht werden können. Hierzu wird die geringe Schärfentiefe optischer Vergrößerungen ausgenutzt. Verwendet wurde das Messgerät mit einem 10fach vergrößernden Objektiv. Das Messgerät ermöglicht die flächenhafte Messung der Topographie von Objekten. Die nominelle vertikale Auflösung beträgt $100\ \text{nm}$, die laterale Auflösung $1,1\ \mu\text{m}$.

3. Dickenmessplatz

An dem Dickenmessplatz lässt sich die Ausdehnung von Objekten punktuell durch beidseitige taktile Antastung untersuchen. Die Antastung erfolgt an dem gelagerten Objekt in vertikaler Richtung. Im Rahmen des Vorhabens wurden Tastkugeln von $8\ \text{mm}$ Durchmesser verwendet, die Antastkraft betrug $0,48\ \text{N}$ bis $0,73\ \text{N}$. Die geringen Antastkräfte sind notwendig, um eine Materialverformung, insbesondere bei weichen Materialien, zu vermeiden. Die nominelle Unsicherheit der Messung beträgt $2\ \mu\text{m}$.

4. Taktiles Koordinatenmessgerät (Leitz PMM 866)

Das Messgerät ist im rechten Teil der Abbildung 36 dargestellt. Es ist ein luftgelagertes Koordinatenmessgerät zur taktilen Untersuchung größerer Objekte. Im Rahmen des Vorhabens wurden Tastkugeln von $8\ \text{mm}$ Durchmesser verwendet. Die nominelle Unsicherheit der Messung beträgt $0,8\ \mu\text{m} + L/300\ \mu\text{m}$, wobei L der Ausdehnung des untersuchten Objektes in Millimetern entspricht.

Bei den Messungen wurden zur Orientierung über die Topographie der Prüfkörper vielfach flächenhafte Messungen durchgeführt. Die in der weiteren Ausarbeitung der Korrelationsfunktionen benötigten Dicken wurden dann in den meisten Fällen jedoch taktil gemessen. Der Grund hierfür ist, dass die meisten untersuchten Objekte an der Oberseite und Unterseite relevant von einer ebenen Form abweichen, s. exemplarisch Abbildung 37, in welcher farbcodiert die Oberflächentopologie einer untersuchten PMMA-Platte dargestellt ist. Die Formabweichung liegt zwar jeweils nur in der Größe einiger Mikrometer, im Hinblick auf die mögliche, erreichbare Dickenauflösung ist dieses gleichwohl ein relevanter Beitrag.

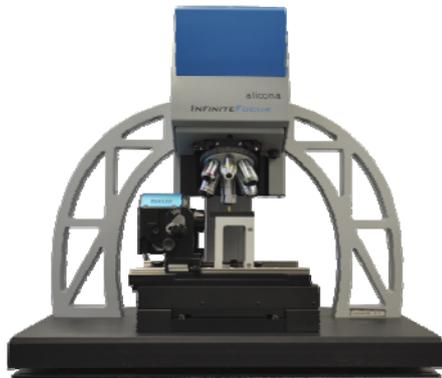


Abbildung 36: Abbildungen des Fokusvariationsmessgerätes Alicona Infinite Focus (links) sowie des taktilen Koordinatenmessgerätes Leitz PMM 866 (rechts)

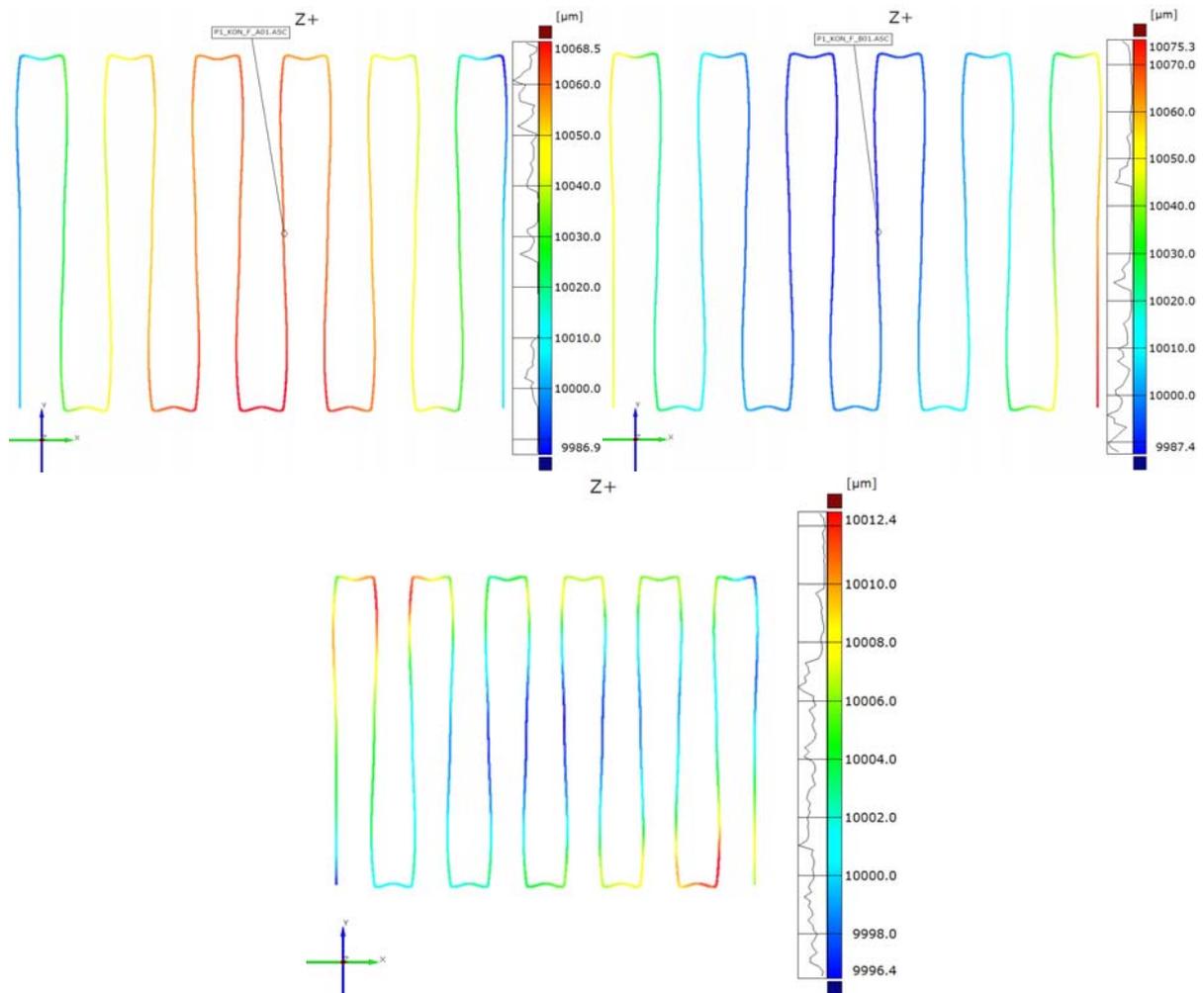


Abbildung 37: Farbkodierte Darstellung der Formabweichung einer untersuchten PMMA-Platte; oben links: Formabweichung Oberseite, oben rechts: Formabweichung Unterseite; unten: resultierende Materialdickenabweichung

Folgendes ist zu den Messungen der vertikalen und lateralen Materialausdehnungen einiger spezieller Objekte zu erwähnen:

Bleistrichraster:

Die Messung der Steg- und Lückenbreiten der Bleistrichraster erfolgten mit dem Video-Sensor des Multisensor-KMGs. Es wurden Untersuchungen in Durchlicht- sowie in Hellfeld-Auflichtbeleuchtung durchgeführt. Im zunächst verfügbaren, mit einer Deckplatte geschützten Bleistrichraster, waren die Aufnahmen zwar möglich, jedoch artefaktbehaftet, s. Abbildung 38 oben. Die in den Aufnahmen beobachteten Artefakte stammen von Klebemittelblasen. Diese haben einen im Hinblick auf die Anwendung der Objekte unbedeutenden Einfluss. In der geometrischen Untersuchung sind die Artefakte jedoch so gravierend, dass die Aufnahmen nicht sinnvoll zu verwerten sind. Aus diesem Grund wurden als Referenz-Objekte Bleistrichraster verwendet, bei denen die schützende Deckplatte nicht fest angebracht war. Die Deckplatte wurde für die Untersuchungen entfernt. In Abbildung 38 unten ist eine exemplarische Aufnahme des modifizierten Referenz-Objektes dargestellt. In den hellen, bleifreien Bereichen sind Riefen in der Plexiglas-Grundplatte erkennbar, die die Messung aber nicht wesentlich stören.

An den Bleilinen wurden links und rechts Konturpunkte gemessen an die jeweils eine Gerade angepasst wurde, s. Abbildung 39. Die Mittengerade zwischen diesen Geraden repräsentiert die Mitte der Bleilinie. Die Linienabstände wurden ausgemessen und für die weitere Analyse verwendet. Es zeigte sich, dass die Linienabstände bei dem Referenz-Objekt allgemein nur wenige Mikrometer von den Sollwerten abweichen.

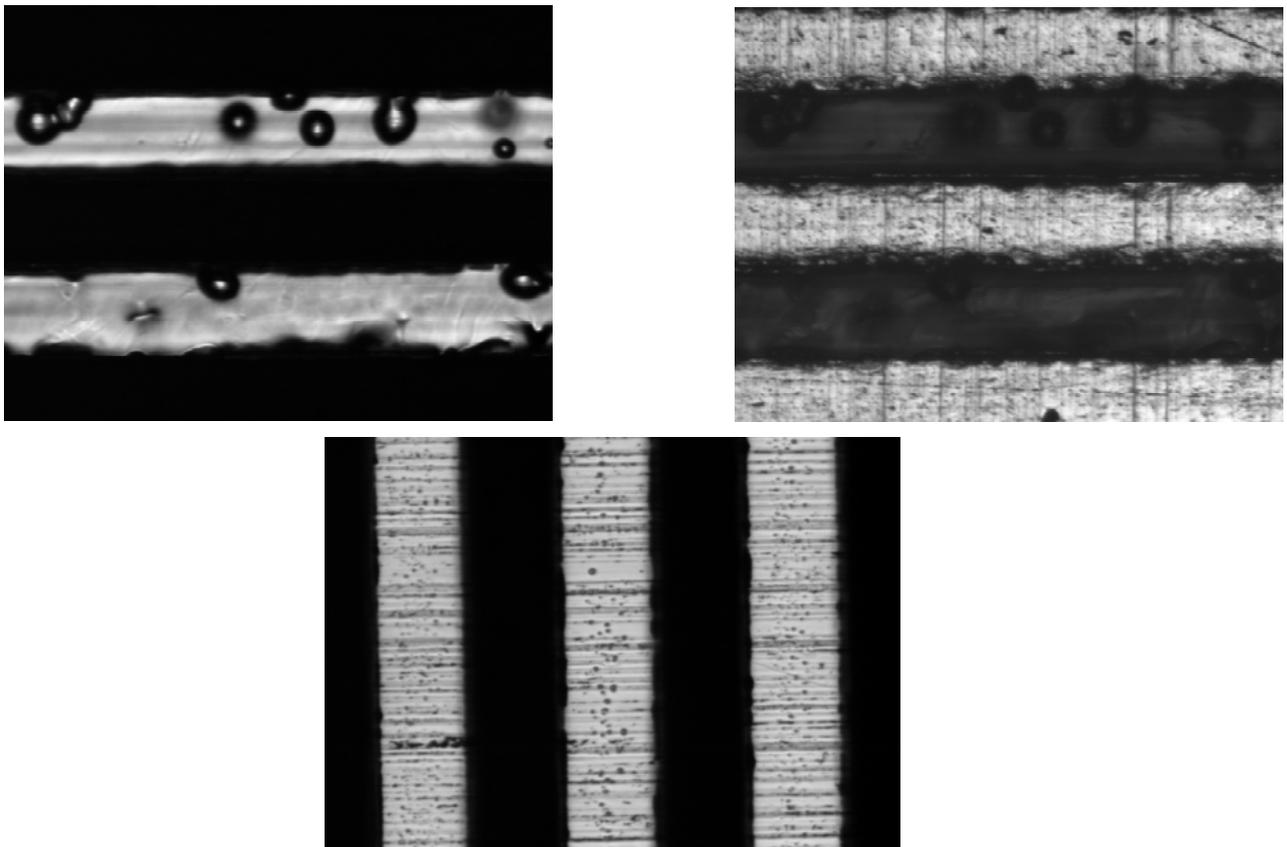


Abbildung 38: Aufnahmen eines Ausschnittbereichs eines Bleistrichrasters mit Deckplatte in Durchlichtbeleuchtung (oben links) sowie Hellfeld-Auflichtbeleuchtung (oben rechts); unten: Aufnahme eines Bleistrichrasters ohne fest verklebte Deckplatte

Für die Bestimmung der Materialdicke der Bleistrichraster wurden an ausgewählten Positionen mit dem Fokusvariations-Sensor Höhenprofile der Materialdicke senkrecht zu den Rasterlinien aufgenommen. In Abbildung 40 sind die untersuchten Messorte sowie ein exemplarisches Höhenprofil dargestellt. An die Messpunkte im Bereich der Bleistege sowie der Lücken wurden Linien angepasst. Als Restriktion für die Linienanpassung wurde vorgegeben, dass die Linien der Lücke und der benachbarten Stege parallel verlaufen müssen. Die Materialdicke an Blei entspricht dem Abstand der Linien. In Abbildung 40 unten rechts sind die mittleren im Bereich der Messorte gemessenen Materialdicken aufgetragen. Es ist auffallend, dass die Messwerte für die Schichtdicke ortsabhängig weit stärker als bei anderen innerhalb des Vorhabens untersuchten Objekten streuen.

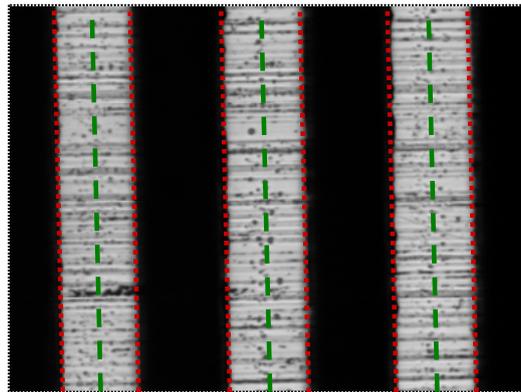
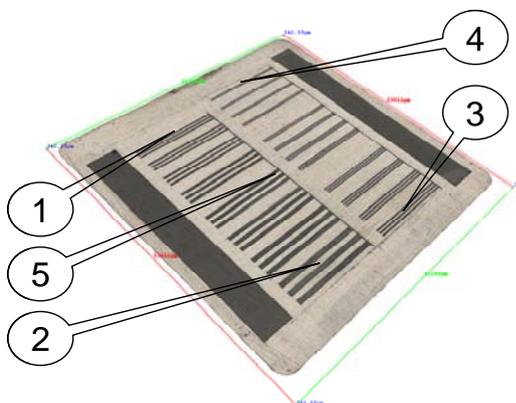
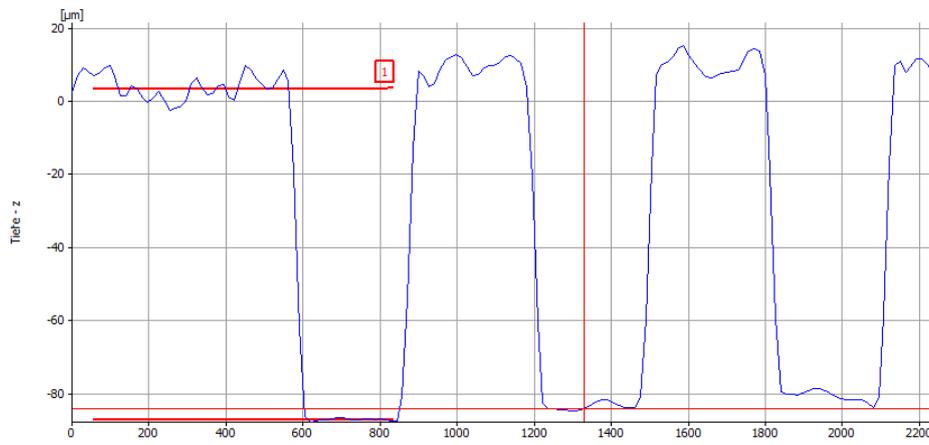


Abbildung 39: schematische Darstellung der Ermittlung der Linienabstände über a) das Einfügen von Konturpunkten (rot) und b) die Ermittlung von Mittengeraden (grün) deren Abstände bestimmt werden



Ort	Schichtdicke in µm
1	90,60
2	94,24
3	92,60
4	92,15
5	87,38

Abbildung 40: Vorgehen bei der Bestimmung der Materialdicken der Bleistrichraster; oben: Höhenprofile senkrecht zu den Rasterlinien mit eingepassten parallelen Geraden; unten links untersuchte Messorte; unten rechts: an den Messorten gemessenen Materialdicken

Prüfkörper nach DIN 6868-4:

Wegen der großen Abmessungen der Kupferplatte und der daraus resultierenden Durchbiegung war technisch bedingt deren Untersuchung mit dem flächenhaft messenden Sensor mittels Fokusvariation nicht mit ausreichender Genauigkeit möglich. Die Messung der Materialdicke der Kupferstufen erfolgte aus diesem Grund auf anderem Weg. Mit dem optischen Abstandssensor (Punktsensor) des Multisensor-Koordinatenmessgeräts wurde die Materialdicke linienweise an interessierenden Bereichen untersucht. In Abbildung 41 und Abbildung 42 ist farbcodiert der Materialdickenunterschied zweier unterschiedlicher Stufen im Vergleich zum direkten Umfeld der Stufen dargestellt. An die Messpunkte neben den Stufen sowie im Bereich der Stufen wurde eine triangulierte Fläche eingepasst. Aus dem Abstand der beiden Flächen wurden die Stufenhöhe sowie die Formabweichung im Bereich der einzelnen Stufen bestimmt.

Neben den Stufenhöhen wurden mit dem Dickenmessplatz Kupferdicken im Bereich der Stufen bestimmt.

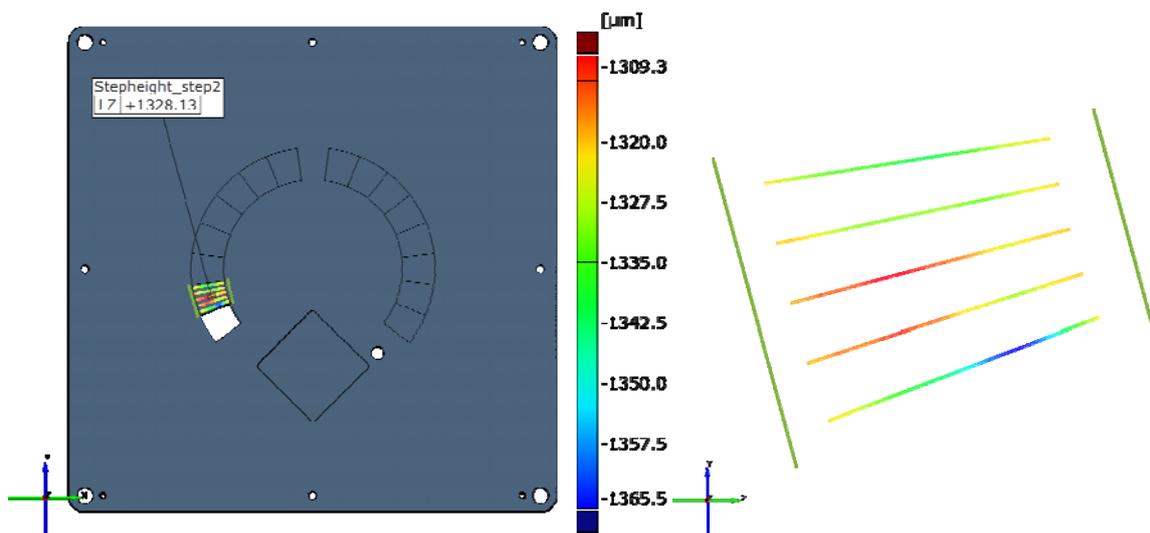


Abbildung 41: links: farbcodierte Darstellung des Materialdickenunterschieds am Ort der dünnsten Stufe der Kupfer-Dynamiktreppe im Vergleich zum direkten Umfeld; rechts: Vergrößerte Darstellung der Messwerte aus dem linken Teil der Abbildung

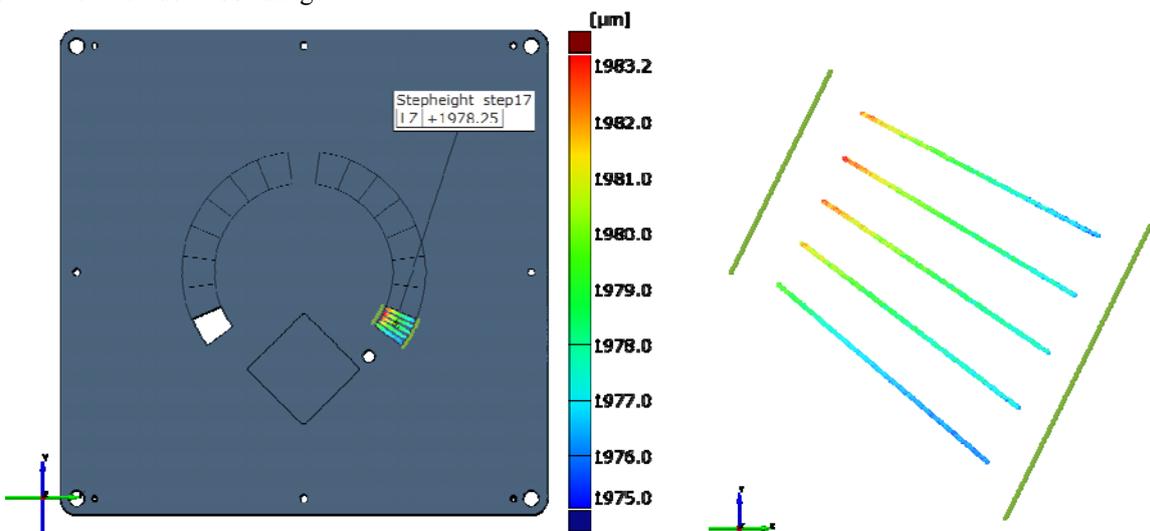


Abbildung 42: links: farbcodierte Darstellung des Materialdickenunterschieds am Ort der Stufe der Kupfer-Dynamiktreppe mit der größten Materialdicke im Vergleich zum direkten Umfeld; rechts: Vergrößerte Darstellung der Messwerte aus dem linken Teil der Abbildung

Rasterplatten:

Die Messungen an den Rasterplatten wurden mit dem optischen Koordinatenmessgerät durchgeführt. Es wurden exemplarisch die Abstände der Hochkontrastlinien auf der Rasterplatte an den in Abbildung 35 gezeigten vier Positionen untersucht. Hierzu wurden in den markierten Bereichen auf einer Länge von 8 mm die Koordinaten der beiden Kanten der Hochkontrastlinien ermittelt und die Linienmitte bestimmt. Als Abstand wurde der Abstand der Linienmitten verwendet.

6.3.1.2. **Resultate der geometrischen Untersuchungen**

Die gemessene Ausdehnung der Komponenten in den Referenz-Prüfkörpern ist in Anlage B aufgelistet. Die dort angegebenen Materialdicken entsprechen vielfach den Werten der Punktmessungen. Materialdicken an Stellen zwischen den Messpunkten wurden auf Basis der Information über die Oberflächentopologie interpoliert.

Folgende Dinge fallen im Hinblick auf die Materialdicke sowie die Dickenvariation innerhalb der Referenzprüfkörper besonders auf:

PMMA-Basiskörper des DSA-Prüfkörpers:

Sowohl die Deckplatte wie auch die Fußplatte des PMMA-Basiskörpers sind im linken und rechten Randbereich um bis zu 130 μm dicker in der Mitte der Platte. Entlang der anderen Hauptachse der Platten variiert die Materialdicke um weniger als 40 μm . Dieses ist vor dem Hintergrund der bearbeiteten Fragestellung vernachlässigbar. Die Materialdicke beider Objekte wurde taktil am Dickenmessplatz gemessen. Die Materialdicke zwischen den Messpunkten wurde für die weitere Entwicklung der Messprozedur interpoliert. Der Einfluss der Abweichung von einer exakt gleichen Materialdickenverteilung auf die Röntgenbildgebung ist, aufgrund des im Vergleich zu dem Schwächungskoeffizienten der anderen Materialien des Prüfkörpers niedrigen Schwächungskoeffizienten von PMMA, gering. Die bewegliche Mittelplatte des DSA-Referenzprüfkörpers ist mit 5,3 mm Dicke um 500 μm dünner als gemäß DIN 6868-4 vorgesehen.

Prüfkörper nach DIN 6868-13:

Das Niedrigkontrastobjekt der Nominaldicke von 250 μm weicht an sämtlichen Messpunkten um etwa 15 μm vom Sollwert ab. Zudem ist die Schwankung der Materialdicke bei den Objekten mit nominell 500 μm sowie 700 μm mit bis zu 10 μm im Vergleich hoch.

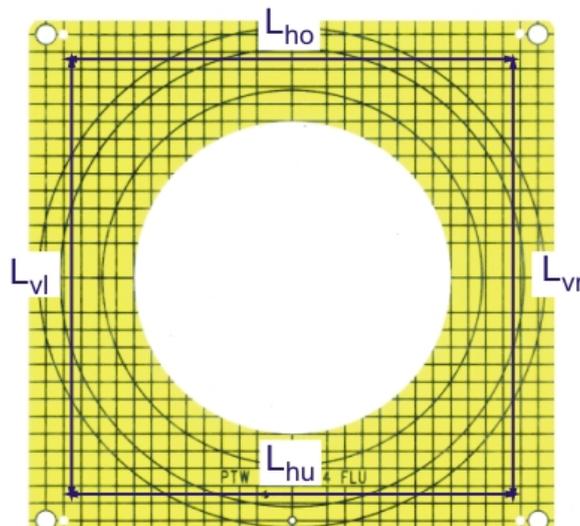


Abbildung 43: Abbildung der Referenz-Rasterplatte des Prüfkörpers nach DIN 6868-4. In der Abbildung sind schematisch die Positionen eingezeichnet, an denen die Abstände der Rastermarkenabstände gemessen wurden

6.3.2. Entwicklung der Messprozedur zur Untersuchung von auf dem Markt erhältlichen Prüfkörpern nach DIN 6868-4 (inkl. DSA-Prüfkörper) sowie DIN 6868-13

6.3.2.1. Röntgeneinrichtung und Aufnahmeparameter

Die Röntgenuntersuchung der Strukturkörper nach DIN 6868-4 und DIN 6868-13 mit Ausnahme der Bleistrichraster sowie die Röntgenuntersuchung sämtlicher Schwächungskörper wurde innerhalb des Vorhabens an einer klinischen Röntgenanlage vom Typ Digital Diagnost der Firma Philips durchgeführt. In Tabelle 3 sind relevante Geräte- und Aufnahmeparameter zusammengestellt.

Das verwendete Strahlspektrum wurde durch Änderung der Röhrenspannung unter Abwägung zweier Einflussfaktoren für jede untersuchte Komponente der Prüfkörper individuell festgelegt. Eine niedrige Röhrenspannung hat zur Folge, dass, aufgrund größerer Schwächungskoeffizienten der Materialien, kleinere Dickenunterschiede aufgelöst werden können. Eine niedrige Röhrenspannung hat jedoch gleichermaßen eine erhöhte Strahlabsorption zur Folge. Unter Berücksichtigung einer begrenzten Röhrenleistung führt dieses tendenziell zu einem höheren Rauschen in den Bilddaten. Die zur Untersuchung der einzelnen Prüfkörper verwendete Röhrenspannung ist in Tabelle 4 aufgelistet. Die Aufnahmen wurden jeweils ohne Zusatzfilterung erstellt. Die Gesamtfilterung der Strahlung ohne das untersuchte Objekt setzt sich aus den in Tabelle 3 genannten drei Beiträgen zusammen. Sie beträgt 3,27 mm Aluminium-Gleichwert. Sämtliche Untersuchungen wurden mit einem Streustrahlenraster im Strahlengang durchgeführt. Voruntersuchungen ohne Verwendung eines Streustrahlenrasters ergaben, dass der Streustrahlungseinfluss anderenfalls zu groß für eine sinnvolle Datenauswertung ist.

Unterschiedliche Komponenten eines Strukturkörpers wurden bei gleicher Röhrenspannung teilweise mit unterschiedlichem Strom-Zeitprodukt aufgenommen. Durch die Anpassung des Strom-Zeit-Produktes wurde erreicht, dass das Detektorsignal der Abbildungen sämtlicher Komponenten, auch bei großen Materialdickenunterschieden, in etwa in der Mitte des Dynamikbereichs des Detektors lag. Dieses ist insbesondere für die Untersuchung der Kupfer-Dynamiktreppe bedeutsam. Bei zu kleinem Detektorsignal wäre der negative Einfluss des Rauschens zu groß. Bei zu großem Detektorsignal erreichen vermehrt Bildelemente den Sättigungswert des Detektors. Hierdurch wird der Messwert systematisch verfälscht. Zudem ist davon auszugehen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Einfallstrahlung und Signalwert vornehmlich im mittleren Bereich des Dynamikumfangs besteht.

Detektortyp	Pixium 4600
Detektormatrix	3121 x 3121 Pixel
Nominelle Pixelgröße	143 μm
Aktive Bildmatrix	43 x 43 cm^2
Strahlfilterung der Röhre	2,5 mm Aluminium-Gleichwert
Strahlfilterung der Tiefenblende	0,22 mm Aluminium-Gleichwert
Strahlfilterung des Wandstativs	0,55 mm Aluminium-Gleichwert
Verwendeter Film-Fokus-Abstand	180 cm

Tabelle 3: relevante Geräte- und Aufnahmeparameter der klinischen Röntgenanlage, die zur Untersuchung der Prüfkörper nach DIN 6868-4 und DIN 6868-13 verwendet wurde

Für die Datenanalyse wurden die Einzelaufnahmen einer Komponente gemeinsam ausgewertet. Hierzu wurden die Signalwerte der Einzelbilder entsprechend dem verwendeten Strom-Zeit-Produkt angeglichen. Dieses Verfahren setzt voraus, dass

1. die Einfallsdosis am Ort des Prüfkörpers proportional zum Strom-Zeit-Produkt ist.
2. die Strahlungsleistung der Röntgenröhre innerhalb des Zeitfensters von maximal 2 Stunden, in denen die Untersuchung erfolgt, ausreichend stabil ist.

Das Zutreffen beider Voraussetzungen wurde geprüft. Die hierzu benötigten Dosismessungen wurden mit einem Diagnostikdosimeter vom Typ MagicMax der Firma iba dosimetry durchgeführt.

Zur Überprüfung des Zusammenhangs nach Nr. 1 wurde die Einfallsdosis an einem repräsentativen Ort der Detektoroberfläche in Abhängigkeit des Röhrenstroms bei einer konstanten Expositionszeit von 50 ms gemessen. In Abbildung 44 ist der anhand der Messungen festgestellte Zusammenhang zwischen der Dosis und dem Röhrenstrom aufgetragen. Der Zusammenhang ist mit guter Näherung linear, wie auch die in den Zusammenhang eingepasste Gerade zeigt.

Prüfkörper	Untersuchte Komponente	Röhrenspannung / kV
DIN 6868-4	alle, mit Ausnahme der Stufen der Kupfer-Dynamiktreppe mit einer Materialdicke von 1,73 mm und mehr sowie der dortigen Niedrigkontrastobjekte	60
DIN 6868-4	Stufen der Kupfer-Dynamiktreppe mit einer Materialdicke von 1,73 mm und mehr sowie der dortigen Niedrigkontrastobjekte	81
DSA-Prüfkörper	Niedrigkontrastobjekte	50
DSA-Prüfkörper	Dynamiktreppe	70
DIN 6868-13	Alle	50
CDMAM	PMMA-Schwächungskörper (1 cm)	40
Testeinsatz AP	PMMA-Schwächungskörper (4 cm)	40
DIN 6868-4 / DIN 6868-13	PMMA-Schwächungskörper (3 cm)	40
DIN 6868-4 / DIN 6868-13	Kupfer-Schwächungskörper (1 mm)	50
DIN 6868-4 / DIN 6868-13	Aluminium-Schwächungskörper (25 mm)	55

Tabelle 4: Auflistung der für die Untersuchung der unterschiedlichen Komponenten der Prüfkörper verwendeten Röhrenspannung

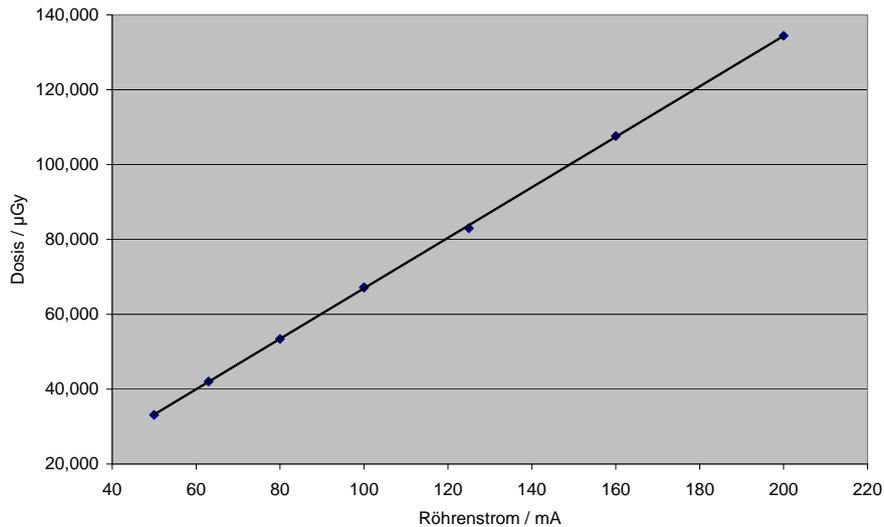


Abbildung 44: Exemplarische Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem Röhrenstrom und der Dosis an einer repräsentativen Stelle der Detektoroberfläche bei konstanter Expositionszeit

Zur Überprüfung des Zusammenhangs nach Nr. 2 wurde bei konstanten Expositionsbedingungen die Einfallsdosis an einer repräsentativen Stelle der Detektoroberfläche über einen Zeitraum von 24 Stunden untersucht. Innerhalb des Zeitraums wurden drei Messserien mit je 10 Einzelmessungen durchgeführt. In Abbildung 45 sind die Messwerte der Dosis in chronologischer Reihenfolge aufgetragen. Die Standardabweichung der Messwertverteilung jeder Messserie ist kleiner als 0,3% bezogen auf den jeweiligen Mittelwert. Die Standardabweichung der Verteilung sämtlicher Messwerte ist ebenso kleiner als 0,3% des Mittelwertes aller Messdaten.

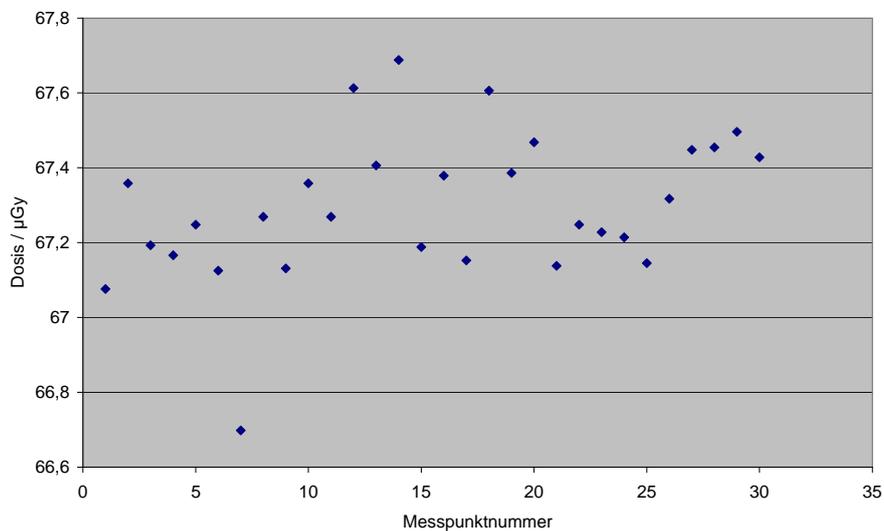


Abbildung 45: Exemplarische Darstellung der an einem repräsentativen Ort der Detektoreingangsfläche gemessenen Dosis innerhalb eines Zeitraums von 24 Stunden. Es wurden in dem Zeitraum drei Messserien mit jeweils 10 Einzelmessungen durchgeführt. Die Messwerte sind chronologisch von links nach rechts aufgetragen.

Die Analyse der Bilddaten erfolgte auf der Basis der unkorrigierten Rohdaten des Detektors. Die Firma Philips hat dem Projektteam freundlicherweise den Zugang zu den benötigten Daten ermöglicht. Es wurden zur Untersuchung jedes Objektes jedes untersuchten Prüfkörpers jeweils 10 Aufnahmen angefertigt. Die Aufnahmen wurden separat verarbeitet und analysiert. Die Messwerte der Einzelaufnahmen wurden für die Analyse gemittelt.

Die Bleistrichraster wurden bei einer Energie von 100 kV und einem Strom von 40 μ A an der Mikrofokus-Röntgenanlage der BAM untersucht. Es wurden jeweils mindestens 7 verschiedene Durchstrahlungsaufnahmen mit je 3 x 10 Bildern erstellt. Die Messzeit je Bild betrug 10 s.

6.3.2.2. Bilddatenaufbereitung

Vor der Analyse müssen die aufgenommenen Rohdaten aufgearbeitet werden, um Effekte des Detektors sowie der Signalverarbeitungselektronik zu berücksichtigen. Diese führen anderenfalls zu Artefakten in den Aufnahmen. Folgende Schritte in der Signalaufbereitung wurden für die Untersuchung der Prüfkörper nach DIN 6868-4 und DIN 6868-13 durchgeführt:

1. Anwendung einer Homogenitätskorrektur
2. Korrektur toter bzw. offensichtlich defekter Detektorelemente

Entsprechende Korrekturen werden in der klinischen Anwendung der Röntgenanlage ganz natürlich im Rahmen einer Bildaufbereitung vorgenommen, meistens jedoch ohne direkten Einfluss des Anwenders. Um volle Kontrolle über die Bilddaten innerhalb der gesamten Analyseketten zu behalten, wurden beide Korrekturen im Rahmen des Vorhabens unabhängig von Verarbeitungsroutinen des Geräteherstellers durchgeführt. Die Auswirkung beider Korrekturen auf die Bilddaten ist schematisch in Abbildung 46 dargestellt.

Im linken Teil der Abbildung ist das vollständig unkorrigierte Bild einer PMMA-Platte homogener Dickenverteilung dargestellt. Es ist ein deutliches Streifenmuster in der Abbildung zu erkennen. Dieses ist dadurch verursacht, dass an den einzelnen Bildpunkten durch die Empfindlichkeit des zugehörigen Detektorelementes sowie der Bildverarbeitungselektronik ein unterschiedlich großes Ansprechvermögen besteht. Durch eine Homogenitätskorrektur wird dieses unterschiedlich große Ansprechvermögen korrigiert. Die Auswirkung der Korrektur ist im mittleren Teil der Abbildung zu erkennen.



Abbildung 46: Schematische Darstellung der Änderung der Bilddaten durch die einzelnen Schritte der Bildaufbereitung; links: Original, Mitte: nach der Homogenitätskorrektur, rechts: nach der Korrektur defekter Bildpunkte

Bei der im Rahmen des Vorhabens verwendeten Homogenitätskorrektur werden die Signalwerte der Bildpunkte mit den zugehörigen Werten einer Matrix multipliziert, in welcher das relative Ansprechvermögen der einzelnen Bildpunkte zueinander gespeichert ist.

Die Korrekturmatrix wurde über folgende Schritte erzeugt:

1. Erzeugung eines Bildes ohne Signaleinstrahlung:

Auch ohne eingestrahlte Röntgenstrahlung enthalten die Detektorelemente ein Signal (Dunkelbild). Dieses ergibt sich durch Effekte der Bildverarbeitungselektronik. Das Signal des Dunkelbildes ist normalerweise im Vergleich zu den Signalwerten bei einer Röntgenaufnahme klein. In Bereichen der Prüfkörper mit starker Röntgenabsorption und damit kleinem Nutzsignal ist es teilweise dennoch relevant, das Signal des Dunkelbildes zu berücksichtigen.

Innerhalb des Vorhabens wurden jeweils 10 Bilddatensätze ohne eingestrahlte Röntgenstrahlung, „Dunkelbilder“ D , erzeugt und bildpunktweise gemittelt. Mit dem gemittelten Bild wurde in der Analyse weiter gearbeitet.

2. Erzeugung eines Bildes bei unstrukturierter Signaleinstrahlung:

Es werden Bilddaten erhoben, die sich bei der Einstrahlung eines homogenen Strahlungsfeldes ergeben, „Hellbilder“ H . Innerhalb des Vorhabens wurden hierzu jeweils 10 Expositionen durchgeführt und die zugehörigen Bilddaten bildpunktweise gemittelt. Mit dem gemittelten Bild wurde in der Analyse weiter gearbeitet.

Es zeigte sich innerhalb des Vorhabens, dass das relative Ansprechvermögen der Bildpunkte zueinander leicht von dem verwendeten Strahlspektrum abhängig ist. Um möglichst homogene Bilddaten für die Analyse zu erhalten wurde ein Satz von Korrekturmatrixen erstellt, so dass für die jeweiligen, untersuchten Komponenten der Prüfkörper eine individuell passende Korrekturmatrix verfügbar war. Dabei wurde die mittlere Strahlqualität am Ort des Bilddetektors durch unterschiedliche Absorbermaterialien im Strahlengang so eingestellt, dass sie in etwa derjenigen entsprach, die sich aufgrund der jeweils untersuchten Komponenten der Prüfkörper ergibt.

Es zeigte sich bei der Analyse der Messdaten der Stichprobenerhebung, dass es in einigen Fällen von besonders kleinen Objekten mit besonders geringem Signalunterschied sinnvoll wäre, die Anzahl der Bilder zur Erstellung des Hellbildes zu erhöhen.

3. Erstellung der Korrekturmatrix:

Die Erstellung der Korrekturmatrix aus Hell- und Dunkelbild setzt sich aus drei Schritten zusammen:

- a. Die Signalwerte des Dunkelbildes werden bildelementweise vom Hellbild subtrahiert: $S = H - D$
- b. Es wird ein mittlerer Signalwert, „Gainreferenz“ r , als Median der Signalwerte der Bildelemente aus dem zentralen Bereich des Differenzbildes berechnet. Der „zentrale Bereich“ umfasst den zentrierten Bereich des Bildes mit der halben Bildhöhe und Bildbreite.
- c. Es wird die Korrekturmatrix durch bildelementweise Division des Differenzbildes durch die Gainreferenz berechnet: $F = S/r$

Die primären Bilddaten B_0 einer Prüfkörperaufnahme wurden bildelementweise gemäß

$$B_{korr} = [B_0 - D] * F^{-1}$$

korrigiert.

Das Ansprechvermögen der einzelnen Detektorelemente und der zugehörigen Verarbeitungselektronik ändert sich zeitabhängig leicht. Hieraus resultiert ein Unsicherheitsbeitrag in der Bilddatenanalyse. Um den resultierenden Unsicherheitsbeitrag möglichst klein zu halten, wurden die Korrekturmatriizen F regelmäßig neu bestimmt. Es zeigte sich, dass die relative Änderung des Ansprechvermögens eines Detektorelementes nahezu unabhängig von dem eingestrahlenen Strahlspektrum war. Zur Optimierung des Vorgehens wurde daher eine neue Korrekturmatriix $F'_{40\text{ mm PMMA}}$ nur für ein definiertes Strahlspektrum, entsprechend einer Filterung durch 40 mm PMMA, bestimmt.

Die jeweils aktuelle Korrekturmatriix für ein anderes Spektrum, z.B. 25 mm Aluminium, wurde gemäß

$$F'_{25\text{ mm Al}} = F_{25\text{ mm Al}} * K$$

mit

$$K = F'_{40\text{ mm PMMA}} / F_{40\text{ mm PMMA}}$$

berechnet.

Tote bzw. offensichtlich defekte Detektorelemente wurden nach folgendem Schema berücksichtigt:

1. Detektorelemente, die überhaupt nicht angesprochen werden, erhalten den Signalwert NaN , „not a number“, zugewiesen.
2. Detektorelemente mit einem Signalwert, der oberhalb des maximalen oder unterhalb des minimalen Signalwerts des Detektors liegt, erhalten den Signalwert NaN zugewiesen.
3. Detektorelemente mit einem Signal deutlich außerhalb der Signalwertverteilung innerhalb des untersuchten Bereichs eines Prüfkörpers, erhalten den Signalwert NaN zugewiesen. Dieser Korrekturschritt erfolgt nur für Detektorelemente, welche dauerhaft Signale erzeugten, die deutlich außerhalb des sinnvollen Bereichs lagen.
4. Bilddatenelemente mit dem Signalwert NaN wurden in der Analyse nicht berücksichtigt.

6.3.2.3. Festlegung der analysierten Bilddatenbereiche / Berücksichtigung von Bilddatenartefakten

Bei der Analyse Signalwerte im Bereich der untersuchten Komponenten wurde jeweils der Mittelwert einer definierten Region, „region of interest“ ROI, verwendet. Die für die unterschiedlichen Komponenten verwendeten ROI sind in Anlage C in exemplarischen Bilddaten eingezeichnet. Als ROI wurde jeweils der mittlere Bereich der untersuchten Komponenten verwendet.

Bei zahlreichen Komponenten, z.B. sämtlichen Niedrigkontrastobjekten, ist die relevante Messgröße ein Signalwertkontrast. Die Vergleichsbereiche ohne die jeweils betrachtete Komponente sind ebenso in Anlage C eingezeichnet. Sie wurden jeweils in unmittelbarer Nähe der untersuchten Objekte gewählt. Dabei wurde besonderer Wert darauf gelegt, dass die Vergleichsbereiche in möglichst kleinem Umfang durch den Einfluss benachbarter Strukturen beeinflusst werden.

Das Design der Prüfkörper ist innerhalb der von den Normen vorgegebenen Rahmenbedingungen von den Prüfkörperherstellern frei wählbar. Das hat an einigen Stellen zur Folge, dass Prüfkörper unterschiedlicher Hersteller sich so im Design unterscheiden, dass unterschiedliche Hersteller-spezifische ROI festgelegt werden mussten. Dieses ist ebenso in Anlage C zu ersehen. Die Anzahl der Bildpunkte in den ROI, die für die einzelnen Komponenten verwendet wurden, ist in Tabelle 5 aufgelistet.

Allgemein stellte es sich als deutliche Herausforderung heraus, Signale in den untersuchten Komponenten sowie in den Vergleichsregionen zu erhalten, welche nicht wesentlich von benachbarten Strukturen beeinflusst werden. In den aktuell verfügbaren Prüfkörpern sind derartige Beeinflussungen nicht explizit berücksichtigt und vermieden worden. Dieses hat zur Folge, dass es insbesondere im Bereich des Übergangs zwischen Objekten mit deutlich unterschiedlicher Strahlschwächung zu wesentlichen Überstrahlungsartefakten kommt. In Abbildung 47 sind exemplarische Abbildungen beigelegt, welche die Auswirkung der Überstrahlung visualisieren. In Abbildung 47 a) ist die Überstrahlung aus dem dünnen Bereich der Kupfer-Dynamiktreppe des Prüfkörpers nach DIN 6868-13 in den umgebenden Bereich des Prüfkörpers dargestellt. In Abbildung 47 b) sind die Überstrahlungsartefakte visualisiert, die aus dem dünnen Bereich der Kupfer-Dynamiktreppe des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 sowie dem Bereich des Bleistrichrasters in den umgebenden Bereich des Prüfkörpers bestehen. Abbildung 47 c) bis e) zeigen Überstrahlungen aus dem Randbereich der Prüfkörper. In Abbildung 47 d) bis e) ist zusätzlich der Verlauf des mittleren Signals in dem in den Abbildungen markierten Bereich von links nach rechts aufgetragen. In Abbildung 47 f) sind die Überstrahlungen visualisiert, die aus den durch Fräsungen im PMMA realisierten Rastermarkierungen der Prüfkörper resultieren.

In allen Fällen wird das Signal angrenzender Bereiche von den bezeichneten Komponenten der Prüfkörper stark beeinflusst. In einigen Fällen wird dem eigentlichen Signal ein Signalgradient überlagert, s. Abbildung 47 d) bis e). In anderen Fällen ist der Einfluss der Überstrahlung so ausgeprägt, dass einzelne Komponenten der Prüfkörper prinzipiell nicht mehr sichtbar sind, s. Abbildung 47 b) am Beispiel der Niedrigkontrastobjekte des Prüfkörpers nach DIN 6868-4.

Innerhalb des Vorhabens wurde daher eine Messprozedur entwickelt, welche durch den gezielten Einsatz von Blenden verhindert, dass die untersuchten Komponenten oder Teilkomponenten durch eine Signaleinstrahlung aus Nachbarbereichen wesentlich beeinflusst werden. In Abbildung 48 sind exemplarisch einige der verwendeten Blenden dargestellt. Die Blenden wurden bei den Aufnahmen um die Prüfkörper herum sowie bei Bedarf auch zur Abdeckung über einzelne Komponenten der Prüfkörper gelegt. Der Einfluss der Blenden ist in Abbildung 49 exemplarisch am Beispiel der Niedrigkontrastobjekte der Prüfkörper nach DIN 6868-4 sowie DIN 6868-13 visualisiert. Es war mit Hilfe der Blenden möglich, sämtliche Bereiche der Prüfkörper zu untersuchen.

Prüfkörper	Komponente	Hersteller	Anzahl an Bilddatenelementen	
			Objekt-ROI	Referenz-ROI
DIN 6868-4	Niedrigkontrastobjekte im Innenkreis	alle	1201	2 x 1450
	Niedrigkontrastobjekte in der Dynamiktreppe	alle	256	1200
	Dynamiktreppe	alle	4 x 716	
	Strukturkörperdicke	alle	110000	
DIN 6868-13	Niedrigkontrastobjekte	iba dosimetry / PTW	1976	6976
		pehamed	5957	6980
	Dynamiktreppe	alle	6400	
	Strukturkörperdicke	alle	179928	
DSA-Prüfkörper	Niedrigkontrastobjekte	iba dosimetry / PTW	750 - 920	750 - 920
		quart	5720	5720
	Dynamiktreppe	Iba dosimetry / PTW	32708	
		quart	27900	
Schwächungskörper CDMAM			4 x 225000	
Schwächungskörper Testeinsatz AP			4 x 100000	
PMMA Schwächungskörper DIN 6868-4 und -13			insgesamt > 1000000	
Kupfer Schwächungskörper DIN 6868-4 und -13			600000	
Aluminium Schwächungskörper DIN 6868-4 und -13			3323600	

Tabelle 5: Aufstellung der Anzahl der Bildelemente in den ROI zur Untersuchung der Komponenten der Prüfkörper nach DIN 6868-4, -13 sowie des DSA-Prüfkörpers

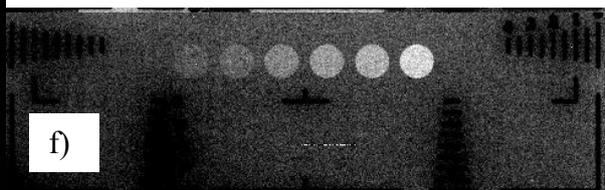
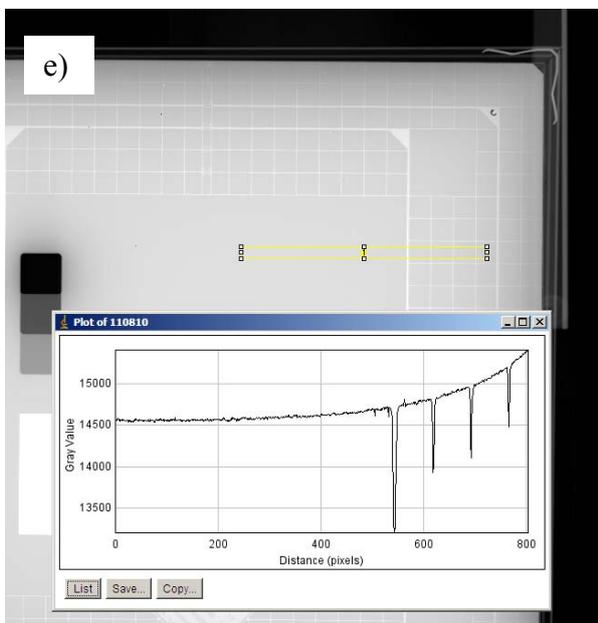
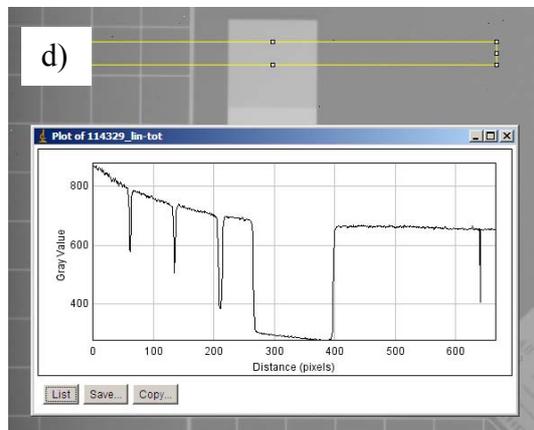
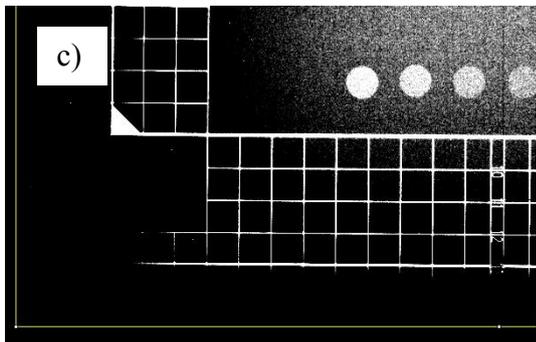
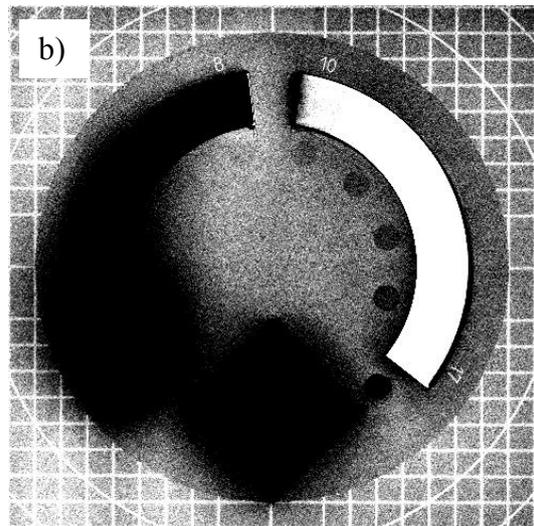
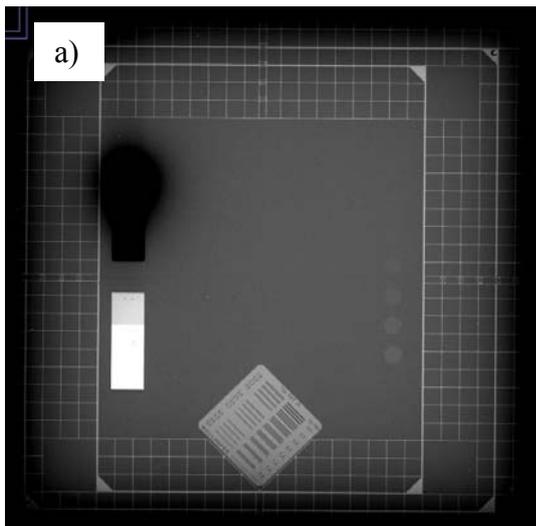


Abbildung 47: Beispiele von Überstrahlungsartefakten aufgrund des aktuellen Prüfkörperdesigns; Überstrahlung durch die dünnsten Stufen der Kupfer-Dynamiktreppe des Prüfkörpers nach DIN 6868-13 (a) sowie der Kupfer-Dynamiktreppe und des Bereichs des Bleistrichrasters des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 (b); c-e: Einstrahlung aus dem Randbereich des Prüfkörpers; in den Abbildungen (d) bis (e) ist ergänzend der Signalwertverlauf in dem gekennzeichneten Bereich des Prüfkörpers von links nach rechts dargestellt; f: Einstrahlung aus Fräsungen für Rastermarkierungen im PMMA der Strukturplatte



Abbildung 48: Exemplarische Zusammenstellung unterschiedlicher Blenden zur Unterdrückung von Überstrahlungsartefakten

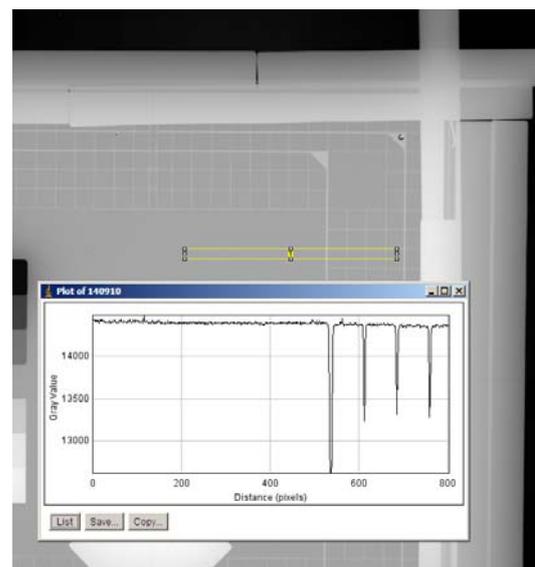
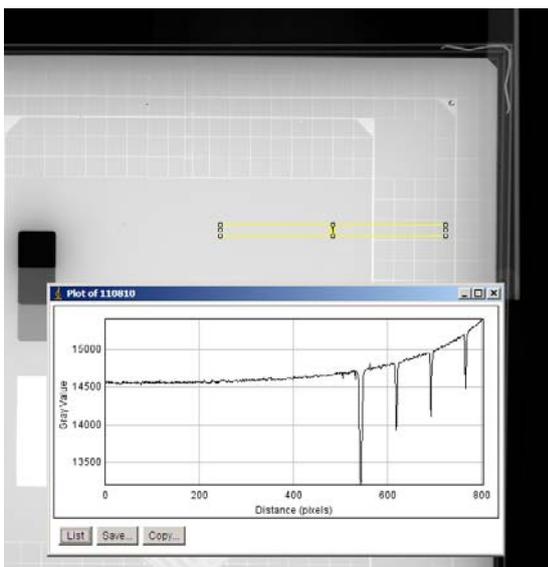
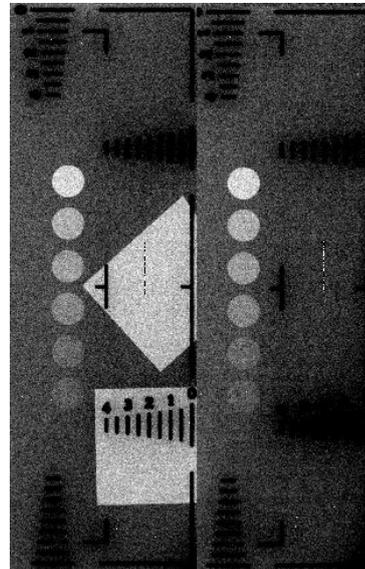
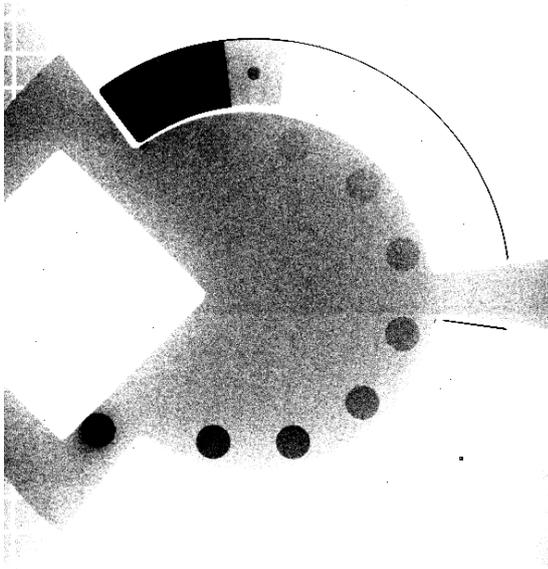


Abbildung 49: Beispiele zur Auswirkung der Blenden zur Unterdrückung der Überstrahlungsartefakte; oben links: Auswirkung auf die Niedrigkontrastobjekte des Prüfkörpers nach DIN 6868-4, oben rechts: Auswirkung auf die Niedrigkontrastobjekte des Prüfkörpers nach DIN 6868-13; unten: Gegenüberstellung des Signalverlaufs innerhalb des Prüfkörpers ohne (links) bzw. mit (rechts) einer Blende um den gesamten Prüfkörper

6.3.2.4. Erstellung der Korrelationsfunktionen

Aus den Bilddaten werden in Abhängigkeit von der untersuchten Komponente eines Prüfkörpers unterschiedliche Messgrößen ausgewertet. Diese sind:

Kontrast bezogen auf eine Referenzdicke:

1. Niedrigkontrastobjekte
2. Dynamiktrepfen (teilweise)

Absolutwerte der Signale:

1. Schwächungskörper
2. Strukturkörperdicken
3. Dynamiktrepfen (teilweise)

Abstand der Bildpunkte:

1. Rastermarkierungen

Die Auswertung des Kontrastes erfolgt bei den Komponenten über die Auswertung des logarithmischen Kontrastes, hier mit K bezeichnet, entsprechend folgendem Zusammenhang:

$$K = \ln \frac{S}{S_0}$$

Dabei entspricht S dem mittleren Signalwert des untersuchten Objektes sowie S_0 dem mittleren Signalwert der Referenzregion. S_0 ist proportional zur Einfallsdosis I_0 . Für S gilt:

$$S = S_0 \cdot e^{-\mu d}$$

mit μ = mittlerer Schwächungskoeffizient des Materials bezüglich der verwendeten Strahlungsqualität und d = Dicke des durchstrahlten Materials. Für den Fall, dass bei dem Durchtritt der Strahlung durch das Material keine relevante Strahlaufhärtung erfolgt, kann μ in guter Näherung als unabhängig von der Dicke d des durchstrahlten Materials angenommen werden. In diesem Fall besteht ein linearer Zusammenhang zwischen K und d . Entsprechendes wird z.B. bei den Niedrigkontrastobjekten der Prüfkörper beobachtet. In Abbildung 50 ist der bestehende Zusammenhang exemplarisch für die Niedrigkontrastobjekte des Prüfkörpers nach DIN 6868-13 dargestellt.

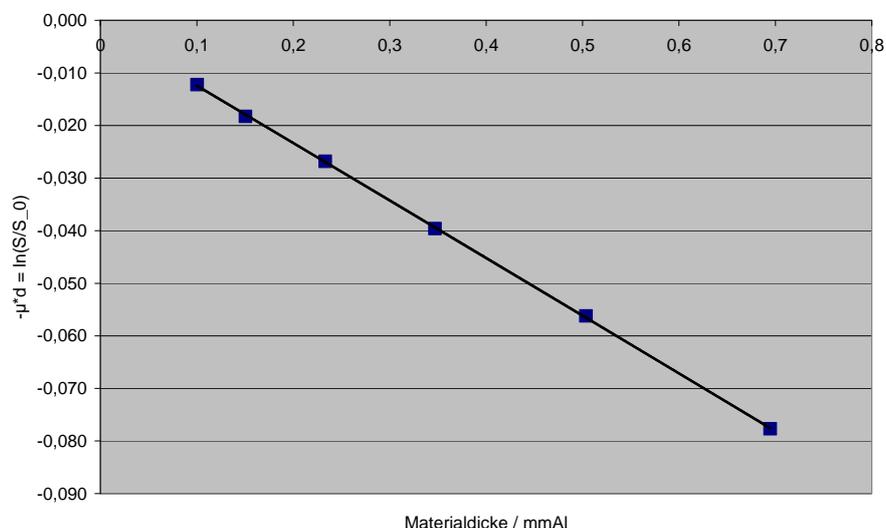


Abbildung 50: Exemplarische Darstellung des bei Niedrigkontrastobjekten bestehenden, linearen Zusammenhangs zwischen $K = -\mu d$ und der Materialdicke d

Bei den Kupfer-Dynamiktreppe liegt dieser lineare Zusammenhang nicht mehr vor. Bei diesen kommt es beim Durchtritt der Strahlung durch den Prüfkörper zu einer relevanten Änderung des Strahlspektrums. Hierdurch ändert sich das mittlere μ relevant zwischen den einzelnen Kupferstufen. In Abbildung 51 ist exemplarisch der bei der Kupfer-Dynamiktreppe des Prüfkörpers nach DIN 6868-13 gemessene Zusammenhang zwischen K und d dargestellt. Wenngleich klar erkennbar, so ist die Abweichung von dem linearen Zusammenhang immer noch so klein, dass empirisch eine gute Beschreibung des Zusammenhangs anhand von Polynomen zweiten Grades möglich war. Soweit möglich, wurde auch dabei ein Kontrast K ausgewertet.

Die Auswertung von K hat gegenüber derjenigen von S den Vorteil, dass mögliche Schwankungen in der Einfallsdosis I_0 berücksichtigt werden. Bei den Objekten, bei denen keine Flächen bestehen, anhand derer ein Referenzsignal definiert werden kann, z.B. bei den in sich homogenen Schwächungskörpern, wurde die Analyse auf Basis von S durchgeführt. Retrospektiv ist festzustellen, dass es gewisse Vorteile geboten hätte, für sämtliche Objekte Referenzflächen, ggf. auch unabhängig vom eigentlich untersuchten Prüfkörper zu definieren, um die bestehende Messunsicherheit zu minimieren.

Bei einigen der untersuchten Komponenten liegen bei Durchstrahlungsaufnahmen mehrere Materialien in Strahlrichtung hintereinander, ohne dass die einzelnen Materialien separat untersucht werden könnten. Dieses ist der Fall bei der Untersuchung der Kupfertreppe des DSA-Prüfkörpers sowie bei der Untersuchung der Strukturkörperdicken der Prüfkörper nach DIN 6868-4 und DIN 6868-13 und dem Kombinations-Schwächungskörper aus Kupfer und Aluminium, welcher von der Firma iba dosimetry vertrieben wird. In allen Fällen handelt es sich um die Kombination einer Komponente aus Kupfer und einer aus PMMA. Die Auswertung der Materialdicke wurde jeweils unter dem Postulat durchgeführt, dass die PMMA-Komponente eine Dicke hat, welche dem Normwert entspricht. Sämtliche Abweichung von der Normvorgabe wurde der Kupfer-Komponente zugeschlagen. Nachdem die Kupfer-Komponente in allen Fällen den Hauptteil zur Strahlschwächung beiträgt, erscheint diese Vorgehensweise plausibel. Die so bestimmte Materialdickendifferenz der Kupferkomponente ist somit konkret ggf. zu einem kleinen Anteil falsch. Im Hinblick auf den Einsatzzweck des Prüfkörpers macht es gleichwohl keinen Unterschied, ob sich die Dickendifferenz auf beide Komponenten aufteilt oder nur einer Komponente zugeschlagen wird. Darüber hinaus trägt eine Dickendifferenz in der PMMA-Komponente nur unwesentlich zu einer Änderung der Gesamtschwächung bei. Ein Unterschied von 1 mm in der PMMA-Komponente entspricht in etwa einer Differenz in der Kupferkomponente von $3,75 \mu\text{m}$.

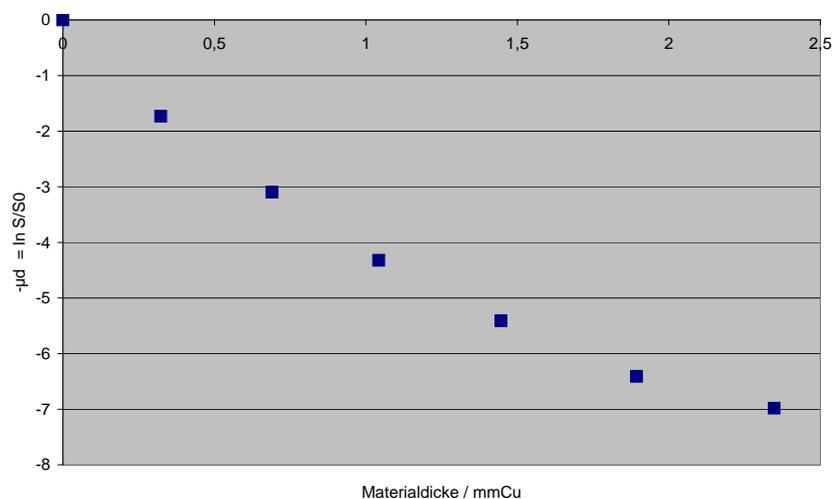


Abbildung 51: Exemplarische Abbildung des bei den Kupfer-Dynamiktreppe bestehenden Zusammenhangs zwischen K und der Materialdicke d

Dort, wo die Dicke der PMMA-Komponente des Referenz-Prüfkörpers vom Normwert abweicht, wurden die Daten auf einen Prüfkörper mit korrekter Dicke der PMMA-Komponente korrigiert. Hierzu wurde die Signalschwächung, die sich aus der Normwertabweichung der PMMA-Dicke ergibt, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen linearen Schwächung von PMMA und Kupfer umgerechnet. Die Korrektur war nie größer als 3 µm Kupfer.

Die Abstände der Rastermarkierungen wurden manuell gemessen. Es wurde dabei analog zu den bei der PTB durchgeführten Messungen der Abstand der Linienmitten bestimmt, s. Abbildung 52. Aus den Untersuchungen der Referenz-Prüfkörper wurde der jeweilige Abbildungsmaßstab

$$A = [\text{Abstand in Millimetern}] / [\text{Abstand in Bildpunkten}]$$

berechnet und auf die unbekanntenen Abstände bei den Prüfkörpern der Stichprobe angewandt.

Für die Analyse der Frequenz der Bleistrichraster wurden nach der Messung die Zählraten entlang der Stege des Bleistrichrasters integriert. Vom resultierenden Profil wurden die Wendepunkte bestimmt. Die Wendepunkte wurden mit der Lage der Kanten identifiziert. Der Abstand zweier Wendepunkte wurde als der Breite eines Stegs bzw. einer Lücke im Bleistrichraster angesehen.

Für die Analyse der Materialdicke des Bleis in den Bleistrichrastern wurde anhand der Referenz-Prüfkörper eine Korrelationsfunktion erarbeitet. Mit Hilfe dieser Korrelationsfunktion ist es möglich, die Materialdicke unbekannter Objekte zu berechnen.

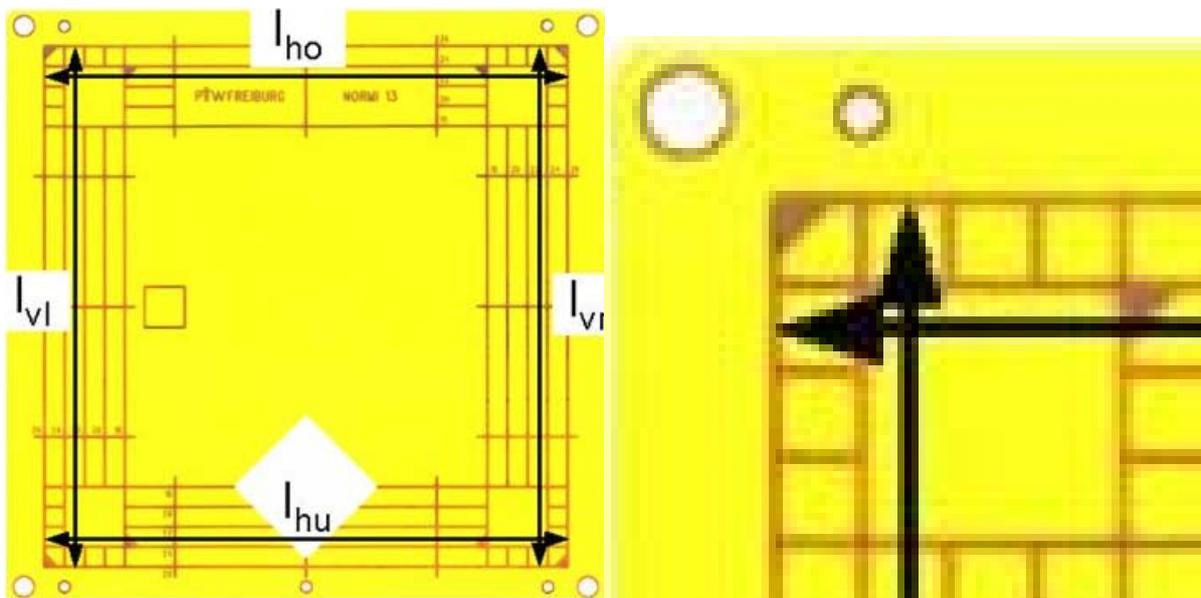


Abbildung 52: Exemplarische Abbildung der Bestimmung der Rasterabstände; links: Abbildung einer Rasterplatte mit eingezeichneten Messabständen, rechts: Vergrößerung aus dem linken Teil der Abbildung

6.4. Der CTDI-Prüfkörper nach DIN EN 60601-2-44

6.4.1. Allgemeine Bemerkungen zur Entwicklung einer Messprozedur für auf dem Markt verfügbare Prüfkörper

Abweichend von den sonstigen Prüfkörpern wurden für den CTDI-Prüfkörper zwei Referenz-Prüfkörper verwendet, jeweils ein Exemplar des CTDI-Prüfkörpers der Firma PTW sowie eines der Firma iba dosimetry. Der Grund für die Verwendung zweier Referenz-Prüfkörper ist durch die unten beschriebene Messprozedur für auf dem Markt verfügbare Prüfkörper gegeben, zusammen mit der Tatsache, dass die beiden Firmen im Detail unterschiedliche Prüfkörper herstellen. Die Prüfkörper unterscheiden sich primär in zwei Dingen:

1. Der mittlere Durchmesser der Bohrungen für die CTDI-Messkammer, beträgt bei dem einen Prüfkörpertyp etwa 9,1 mm und bei dem anderen Typ etwa 12,6 mm.
2. Bei einem Prüfkörpertyp verlaufen die Bohrungen für die CTDI-Messkammer zylindrisch durch den gesamten Prüfkörper von etwa 144 mm Länge. Bei dem zweiten Typ verjüngt sich die Bohrung in einer Tiefe von etwa 126 mm auf etwa 3 mm und wird als Zylinder mit kleinerem Durchmesser bis zum Ende des Prüfkörpers weitergeführt.

Die Prüfkörper haben auf der Front- und Rückseite keine Vorzugsorientierung. Um im Fall von festgestellten Artefakten oder Herstellungsauffälligkeiten nachträglich den zugehörigen Messpunkt bzw. die entsprechende Region des Prüfkörpers zu finden, wurden bei den Prüfkörpern eines Herstellers die an den Prüfkörpern vorhandenen Indexbohrungen verwendet. In Abbildung 53 sind die Indexbohrungen der Prüfkörper erkennbar. Bei den Prüfkörpern des zweiten Herstellers wurden ablösbare Markierungen angebracht, die nach Beendigung der Untersuchungen entfernt wurden.

Die geometrische Untersuchung der Referenz-Prüfkörper erfolgte bei den CTDI-Prüfkörpern nach DIN EN 60601-2-44 mit einer anderen Intention als bei den Prüfkörpern nach DIN 6868-4 bzw. DIN 6868-13, s. Abschnitt 6.3.1. Während bei den anderen Prüfkörpern die geometrische Untersuchung eine Vorarbeit für die Untersuchung unbekannter Prüfstücke durch quantitative Röntgenbildgebung darstellt, dient sie in diesem Fall dazu, eine Prüfprozedur zu entwickeln, anhand derer in der Routine unbekannte Prüfstücke auf ihre Geometrie hin untersucht werden können.

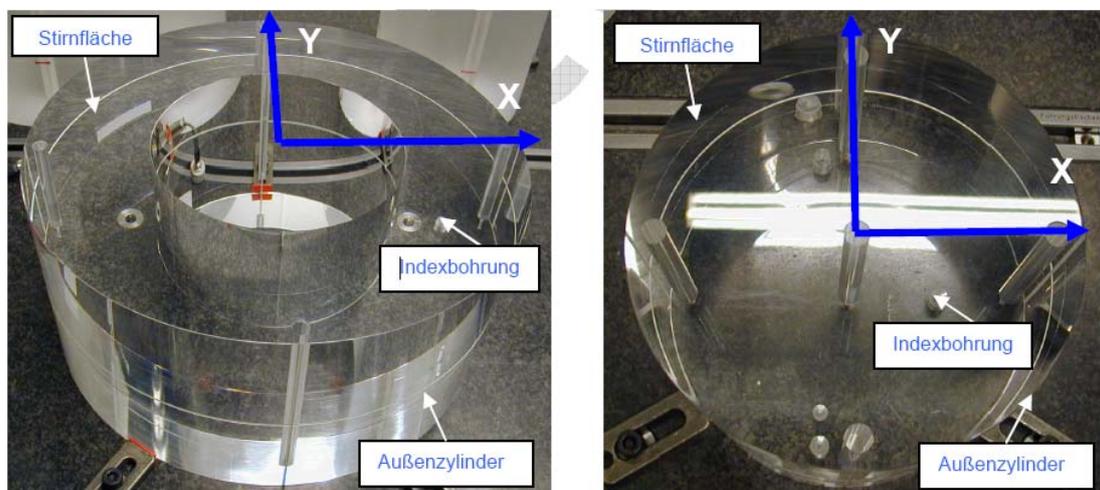


Abbildung 53: Photos des CTDI-Kopfphantoms (rechts) sowie des Ringes für die Erweiterung des Prüfkörpers zu einem Körperphantom (links), sowie Angabe der verwendeten Koordinatensysteme

Die unterschiedliche Vorgehensweise bei dem CTDI-Prüfkörper ist in dem von den sonstigen untersuchten Prüfkörpern abweichenden Aufbau des CTDI-Prüfkörpers begründet. Bei den sonstigen Prüfkörpern sind relevante Komponenten im Inneren der Prüfkörper enthalten, die durch geometrische Messmethoden nicht zerstörungsfrei untersucht werden können. Der CTDI-Prüfkörper enthält keine dieser Strukturen. Er besteht aus einem idealerweise homogenen PMMA-Block. Sämtliche relevanten Informationen über die Geometrie eines Prüfstücks sind über eine Untersuchung der Oberfläche zu erhalten. Eine quantitative Röntgenbildgebung, die im Fall des CTDI-Prüfkörpers als computertomographische Untersuchung auszulegen ist, da der Aufbau des Prüfkörpers insbesondere auch in drei Dimensionen relevant ist, ist damit nicht zwingend erforderlich. Insofern wird die Wahl der sinnvollerweise zu verwendenden Messprozedur durch die Kosten für die Untersuchung eines Prüfkörpers sowie die erreichbare Messunsicherheit bestimmt. Die Unsicherheit der geometrischen Untersuchung, s. Abschnitt 7.2.1, liegt im einstelligen Mikrometerbereich. Quantitative, bildgebende Untersuchungen mit einer Messunsicherheit von entsprechender Größe müssen durch ein Mikro-CT erfolgen. Die Kosten für die Nutzung dieser Geräte liegen weit oberhalb derjenigen von Koordinatenmessgeräten. Selbst unter Berücksichtigung der Tatsache, dass bei der Untersuchung der Geometrie der CTDI-Prüfkörper mittels Koordinatenmesstechnik eine ergänzende Untersuchung der Dichte und Dichteverteilung durch ein konventionelles, klinisch genutztes CT erfolgen muss, s.u., ist die unten beschriebene Messmethode finanziell noch deutlich zu bevorzugen

Neben der Geometrie der CTDI-Prüfkörper ist ihr Material als PMMA einer Dichte von $(1,19 \pm 0,01) \text{g/cm}^3$ in der DIN EN 60601-2-44 definiert. Für die Untersuchung dieser Prüfkörpereigenschaft wurde eine Messprozedur auf Basis computertomographischer Aufnahmen der Prüfkörper an einem klinischen Computertomographen entwickelt, s. Abschnitt 6.4.4.

6.4.2. Geometrische Untersuchungen der Referenz-Prüfkörper

Die geometrische Untersuchung der Referenz-Prüfkörper erfolgte in der PTB mit dem taktilen Koordinatenmessgerät nach Abschnitt 6.3.1.1. Es wurden Messungen an 36 Antastpunkten je untersuchtem Zylinder in 10 Höhen des Prüfkörpers in einer Tiefe zwischen 3 mm und 120 mm gegenüber der Oberseite durchgeführt. Hierzu wurden die Prüfkörper auf einem Messtisch aufgespannt, s. Abbildung 54. Für den Innen- und Außenzylinderdurchmesser sowie die Bohrungen in der Peripherie des Prüfkörpers wurden in die von den Messpunkten beschriebene Formen Zylinder eingepasst und für diese die Mittenposition im Bezug auf den Prüfkörpermittelpunkt, der Durchmesser, die Rundheitsabweichung sowie Verkippungen der Zylinderachse in der xz- und yz-Ebene berechnet. Aus der Gesamtheit der Mittenpositionen eines Zylinders, z.B. einer Bohrung, wurde die mittlere Winkelposition in der x-y-Ebene bzw. Verkippungen in z-Richtung berechnet. Die Höhe der Prüfkörper wurde als Abstand der Ebene durch die Prüfkörperoberseite zur Ebene durch die Prüfkörperunterseite berechnet.

Die Messpunkte für das Kopf- sowie das Körperphantom sind exemplarisch für einen Prüfkörper in Abbildung 55 dargestellt.

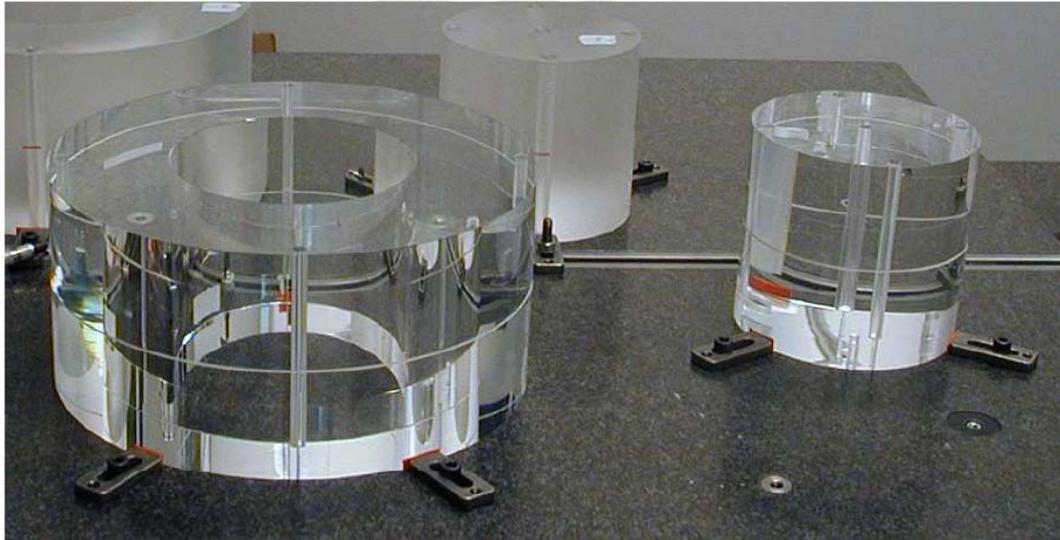


Abbildung 54: Messaufbau zur Untersuchung der CTDI-Prüfkörper

Die Prüfung der im Rahmen der Stichprobe untersuchten Exemplare des CTDI-Prüfkörpers wurde an einen DAkkS-akkreditierten Messdienstleister, die Fa. Feinmess in Bad Endbach-Rottenhorn, vergeben. Dort wurden entsprechend der Vorarbeiten an den Referenz-Prüfkörpern Messungen an den unbekanntem Prüfkörpern durchgeführt. Abweichend von den Messungen bei der PTB wurden für die Prüfung im Rahmen der Stichprobe je Zylinder 18 Antastpunkte gemessen. Aufgrund der Vorarbeiten an der PTB, bei denen sich zeigte, dass die Zylinder in unterschiedlicher Höhe innerhalb des Prüfkörpers eine sehr reguläre Form haben, wurde die Verringerung der Punktzahl als sinnvoll möglich bewertet. Es gibt keine Hinweise darauf, dass die Verringerung der Messpunkte negative Auswirkungen auf die Qualität des Ergebnisses der Messungen hat.

Die Referenz-Prüfkörper wurden neben der PTB auch durch die der Firma Feinmess untersucht und die Resultate verglichen, s. Anlage D. Im Hinblick auf die Projektfragestellung und unter Berücksichtigung der Messunsicherheit sind die Resultate an beiden Messinstituten als übereinstimmend anzusehen.

Für die Untersuchung der auf dem Markt erhältlichen Prüfkörper wurde ein taktiles Koordinatenmessgerät vom Typ Leitz PMM 12106 verwendet. Die Messungen wurden bei einer mittleren Werkstücktemperatur von $20,07^{\circ}\text{C} \pm 0,05^{\circ}\text{C}$ durchgeführt und unter Verwendung eines thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $70 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ auf $20,0^{\circ}\text{C}$ Messtemperatur korrigiert.

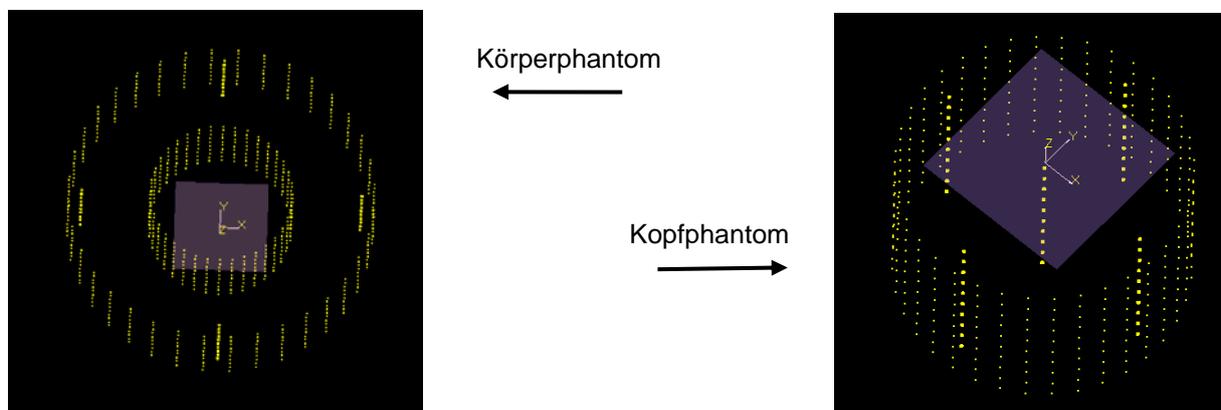


Abbildung 55: Exemplarische Darstellung Messpunkte eines Kopf- bzw. Körperphantoms des CTDI-Prüfkörpers (dargestellt sind jeweils die Tastermittelpunkte)

6.4.3. Resultate der geometrischen Untersuchungen der Referenz-Prüfkörper

In Anlage D.3 sind für beide Referenz-Prüfkörper aus den Messwerten in allen Messhöhen jeweils der Mittelwert, die Spanne zwischen den höchsten und niedrigsten Wert sowie die Standardabweichung der Messwerte aufgelistet. Die Werte stammen aus der Messung bei der Firma Feinmess. In allen Fällen ist die Standardabweichung der Messwertverteilung für sämtliche Messgrößen kleiner 100 μm , die Spanne ist in allen Fällen kleiner als 300 μm . Die jeweils untersuchten Details der CTDI-Prüfkörper sind somit gut anhand des Mittelwertes der Messwerte aus allen Messhöhen zu beschreiben. Dieses wurde bei der Durchführung der Messprozedur auch verwendet.

In Anlage D.1 und Anlage D.2 sind die über die 10 Messhöhen gemittelten Werte aus den Messungen an der PTB denen der Firma Feinmess gegenübergestellt. Die Werte der Längenmessungen unterschieden sich zwischen beiden Einrichtungen um weniger als 5 μm , die Winkel in xy-, xz- und yz-Ebene weichen um weniger als 1' voneinander ab. Im Rahmen der Messunsicherheit, s. Abschnitt 7.3, stimmen die Messwerte miteinander überein.

6.4.4. Computertomographische Untersuchungen der Referenz-Prüfkörper

Die Aufgabe der computertomographischen Untersuchung besteht darin, mögliche Dichteabweichungen sowie Dichteschwankungen in den CTDI-Prüfkörpern festzustellen. Konkret sind folgende Teilfragestellungen zu beantworten:

1. Detektion von Dichteschwankungen längs der Zylinderachse
2. Detektion von Dichteschwankungen senkrecht zur Zylinderachse
3. Detektion von kleinen Rissen oder Clustern von Luftbläschen.

Die Untersuchung der CTDI-Prüfkörper erfolgte an einem 2-Zeilen Computertomographen des Typs Emotion Duo der Firma Siemens. Die Untersuchungen wurden mit den in Tabelle 6 angegebenen Parametern durchgeführt.

Die rekonstruierte Schichtdicke wurde auf 3 mm festgelegt, um kleine Risse im Material, welche sich in einer geänderten mittleren Materialdichte in einem Voxel und damit einer geänderten CT-Zahl äußern, sicher detektieren zu können. Bei größerer Schichtdicke ist zu befürchten, dass die Risse durch Partialvolumeneffekte ggf. nicht zu erkennen sind.

Die Aufnahmen wurden in Spiraltechnik durchgeführt. Diese erwies sich gegenüber der Step-and-Shoot-Technik als vorteilhaft. Bei letzterer wurden artifiziell alternierende mittlere CT-Zahlen von einer zur nächsten Schicht mit einer Amplitude von etwa 1,2 HU beobachtet, s. Abbildung 56. Bei der Spiraltechnik treten diese Artefakte nicht auf. Hier liegt die Amplitude der beobachteten Oszillation der mittleren CT-Zahl bei 0,5 HU. Die Ursache der beobachteten Oszillationen wurde nicht ermittelt, da dieses für die Erreichung des Prüfergebnisses unerheblich war.

Röhrenspannung	130 kV
Röhrenstrom	90 mA
Rotationszeit	1s
Kollimation	2 x 1,5 mm
Rekonstruierte Schichtdicke	3 mm

Tabelle 6: relevante Geräteparameter der computertomographischen Untersuchung der CTDI-Prüfkörper

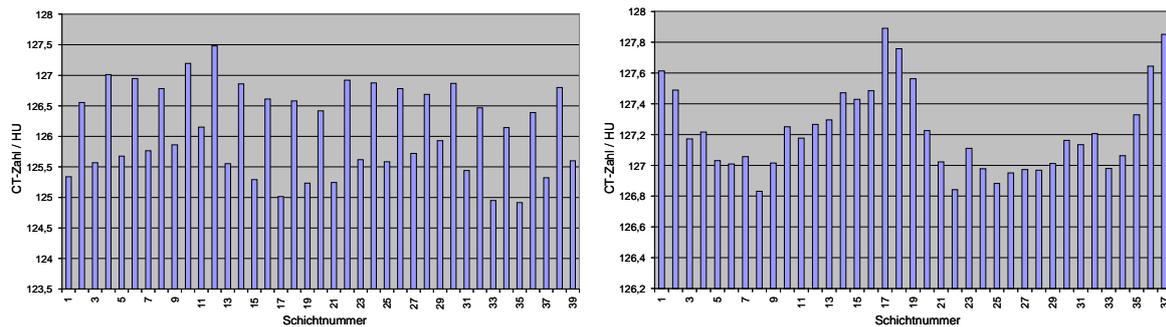


Abbildung 56: Darstellung der mittleren CT-Zahl in unterschiedlichen Schichten des CTDI-Prüfkörpers bei Aufnahmen in sequenzieller Aufnahmetechnik (links) sowie Spiraltechnik (rechts)

Es wurde jeweils das Kopf- Phantom zusammen mit dem Körper-Phantom untersucht. Es gibt keinen Anlass dazu, anzunehmen, dass eine separate Untersuchung Vorteile bei der Untersuchung der Dichteschwankungen bringt. Für die Aufnahmen wurden die Bohrungen für die CTDI-Messkammer mit für diesen Zweck vorgesehenen Füllzylindern gleichen Materials gefüllt.

Bei den computertomographischen Aufnahmen ist die Aufnahmegeometrie nicht exakt zylindersymmetrisch, was insbesondere aus dem Einfluss des Lagerungstischs resultiert. Der Einfluss äußert sich in einem Unterschied der CT-Zahl einander entsprechender Bereiche in der oberen und unteren Hälfte des CTDI-Prüfkörpers von etwas weniger als 1 HU, s. Abbildung 57. Der Effekt wurde bei den Aufnahmen dadurch berücksichtigt, dass jeder Prüfkörper in zwei Positionen, 0° sowie 180° , untersucht wurde, wobei sich die 180° Position durch Drehung des Prüfkörpers um 108° um die Zylinderachse ergibt. Die mittlere CT-Zahl einander entsprechender Regionen des Prüfkörpers wurde bei der Datenanalyse gemittelt. Die Aufnahmen in jeder Position wurden dreifach durchgeführt und die Daten bei der Analyse gemittelt.

Die theoretischen Vorüberlegungen, s. Abschnitt 5.2, haben ergeben, dass Dichteunterschiede von 3% zu einer Änderung des $CTDI_w$ von weniger als 1% führen. Das Ziel der Messprozedur ist daher, Unterschiede in der Dichte von 1% sicher zu erkennen. Diese Anforderung steht etwas entgegen der Anforderung der gültigen DIN, welche eine Fertigungstoleranz von etwa 0,8% fordert.

6.4.4.1. Datenaufbereitung, Korrektur der Aufhängungsartefakte

Die CT-Zahl der untersuchten Prüfkörper wurde schichtweise in jeweils acht Segmenten ausgewertet, s. Abbildung 57 links. Es wurde darauf geachtet, dass die Segmente nicht mit den Bereichen des Prüfkörpers mit den Bohrungen für die CTDI-Kammer sowie dem Übergangsbereich vom Kopf- zum Körperphantom überlappen. Die Beeinflussung der Messung durch nicht exakt passende Stopfen bzw. nicht exakt ineinander passende Kopf- und Körperphantome ist gering. Gleichwohl könnten Auswirkungen auf die CT-Zahl fehlerhaft als Dichteschwankung interpretiert werden.

Die vier Segmente im Bereich des Körperphantoms haben eine Größe von etwa 22000 Voxeln. Die Segmente im Bereich des Kopfphantoms haben eine Größe von etwa 5000 Voxeln.

Die CT-Zahlen einander entsprechender Schichten aus unterschiedlichen Tiefen im Zentralbereich der Prüfkörper wurden innerhalb der Datenanalyse gemittelt. Für die Prüfkörper der Firma iba dosimetry wurde ein Bereich von etwa 144 mm, für die Prüfkörper der Firma PTW ein Bereich von 126 mm entlang der Zylinderachse verwendet. Der Bereich

bei Prüfkörpern der Firma PTW ist, bedingt durch die Verjüngung der Bohrungen an einer Seite, etwas kleiner gewählt.

In Abbildung 57 rechts ist zu erkennen, dass die CT-Zahlen im Kopfphantom um etwas mehr als 2 HU unter denen im Körperphantom liegen. Dieses ist als Artefakt zu deuten, welches auf eine in der Bilddatenrekonstruktion nicht perfekt korrigierte Strahlauhhärtung zurückzuführen ist.

Um den Einfluss des Aufhärtungsartefaktes zu korrigieren, wurden Untersuchungen unter Verwendung von mit Wasser gefüllten Kunststofftonnen durchgeführt. Die Tonnen haben einen Außendurchmesser von etwa 310 mm, sie entsprechen damit weitgehend den Maßen der CTDI-Prüfkörper. Die Tonnen wurden mit den gleichen Parametern wie die CTDI-Prüfkörper und ebenso in der 0° und 180° Orientierung untersucht. In Abbildung 58 ist eine Schicht einer CT-Aufnahme der Kunststofftonne, zusammen mit den gemessenen CT-Zahlen dargestellt. Die Daten der Messung wurden, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Schwächungswerte von Wasser und PMMA zur Korrektur der Messungen an den CTDI-Prüfkörpern eingesetzt.

Nachdem sich die ROI für die CTDI-Prüfkörper der beiden Hersteller leicht unterscheiden, wurden zwei Sätze von Korrekturen ermittelt. Das Aufhärtungsartefakt lässt sich durch die angewandte Methode verringern, jedoch nicht vollständig korrigieren. Der Grund hierfür ist unbekannt. Nachdem die resultierende Unsicherheit, s. Abschnitt 7.3.2, auf den Messprozess deutlich unterhalb der aufzulösenden Unterschiede liegt, wurde auf eine weitere Optimierung dieser Messprozedur verzichtet.

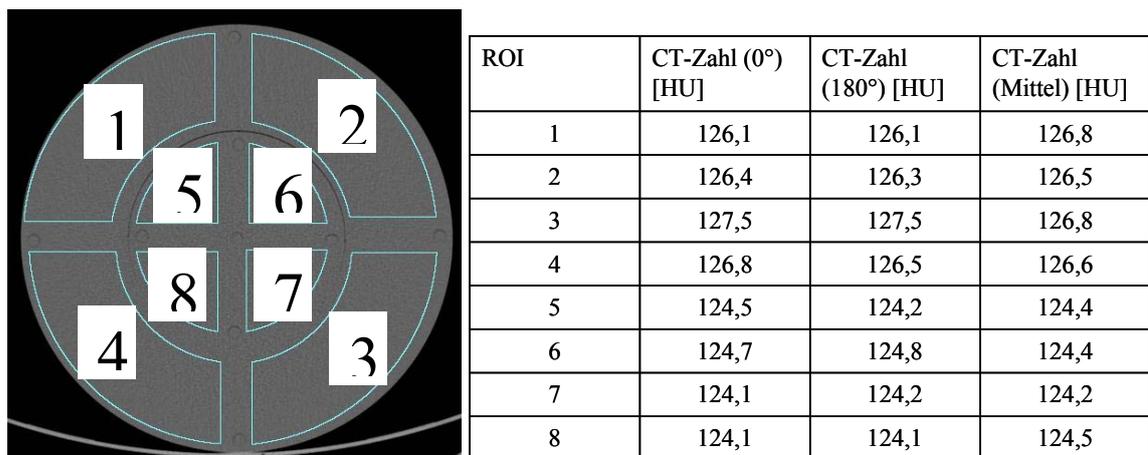


Abbildung 57: links: Abbildung einer Schicht der CT-Aufnahme eines CTDI-Phantoms mit überlagerten Markierungen der acht in der Analyse verwendeten Segmente; rechts: exemplarische CT-Zahlen in den acht Segmenten bei einer Aufnahme in 0°-Orientierung, in 180°-Orientierung sowie nach Mittelung der CT-Zahl einander entsprechender Segmente aus Aufnahmen in beiden Orientierungen.

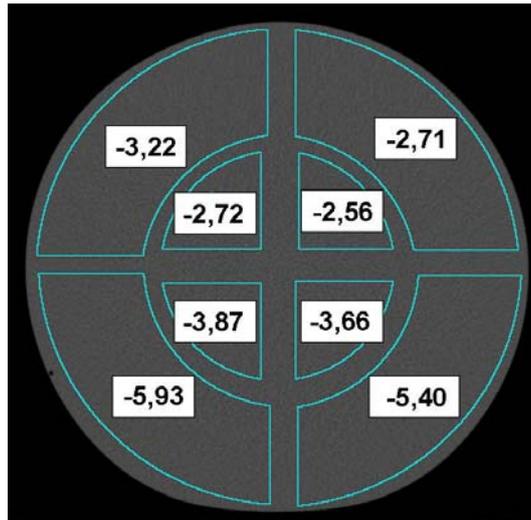


Abbildung 58: Abbildung einer Schicht einer CT-Aufnahme der mit Wasser gefüllten Kunststofftonne, welche zum Ausgleich der Aufhärtungsartefakte verwendet wurde. Die mittleren CT-Zahlen der acht ROI sind mit angegeben.

6.4.4.2. Kalibrierung der Messdaten

Um eine Aussage über die Materialdichte zu erhalten, müssen die CT-Zahlen, welche sich aus den Messungen ergeben, in Dichtewerte umgerechnet werden. Die Umrechnung ist gemäß folgendem Zusammenhang möglich:

$$CT - Zahl(\mu_{Material}) = \frac{\mu_{Material} - \mu_{Wasser}}{\mu_{Wasser}} \cdot 1000 \text{ HU}$$

mit dem für die verwendete Strahlqualität berechneten mittleren Schwächungskoeffizienten des unbekanntes Materials $\mu_{Material}$ sowie von Wasser μ_{Wasser} . Die mittleren Schwächungskoeffizienten der Materialien wurden entsprechend der folgenden Gleichung berechnet:

$$\mu_{Material} = (\mu/\rho)_{Material} \cdot \rho_{Material}$$

Dabei ist $(\mu/\rho)_{Material}$ ein tabellierter Wert des mittleren Massenschwächungskoeffizienten des Materials und $\rho_{Material}$ die Materialdichte.

Es wurde eine Kalibrierung mit einem Prüfkörper, AAPM CT Performance Phantom (AAPM-Phantom) durchgeführt, der Einsätze bekannter Materialien enthält, s. Abbildung 59. Die Kalibrierung erfolgte unter Verwendung der gleichen Expositionsbedingungen, wie die Untersuchung der CTDI-Prüfkörper. Das AAPM-Phantom hat originär einen Durchmesser von 216 mm. Mit einem zusätzlichen „Körperring“ lässt sich der Durchmesser auf 305 mm erweitern. Um die Kalibrierung unter Bedingungen durchzuführen, die den Untersuchungen der CTDI-Prüfkörper möglichst nahe kommen, wurde bei den Messungen das AAPM-Phantom zusammen mit dem Körperring untersucht.

Die Dichte sowie die für die verwendete Strahlungsqualität gültigen mittleren Massenschwächungskoeffizienten der Materialien des AAPM-Phantoms sind in Tabelle 7 aufgelistet. Der Massenschwächungskoeffizient wurde aus tabellierten Werten [8] und den gemäß dem Datenblatt des Prüfkörpers im AAPM-Phantom [9] enthaltenen Dichten der Materialien berechnet. Bei der Berechnung wurde der für monoenergetische Strahlung von 68 keV tabellierte Wert verwendet. Dieses entspricht in etwa der mittleren Energie des verwendeten Strahlspektrums bei den computertomographischen Untersuchungen im Rahmen des Vorhabens.

- 1: Nylon
- 2: Polycarbonate
- 3: PMMA
- 4: Polyethylen
- 5: Polystyrol

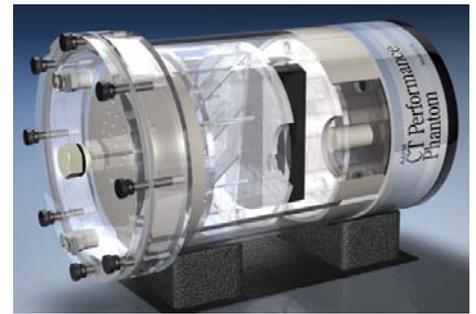
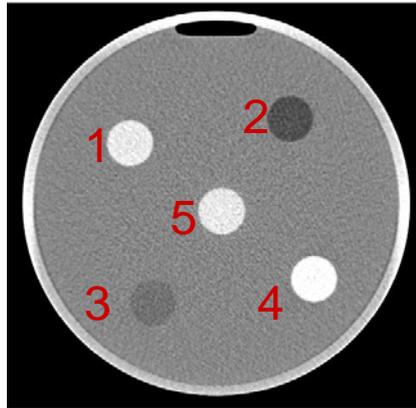


Abbildung 59: Materialzusammensetzung (links), Abbildung (rechts) sowie transversaler Schnitt einer CT-Aufnahme durch den relevanten Teil (Mitte) eines AAPM CT Performance Phantoms; In der CT-Abbildung sind die Positionen der beinhalteten Materialien durch Nummern kenntlich gemacht.

Ergänzend ist in Tabelle 7 der Schwächungswert von Wasser angegeben.

In Abbildung 60 ist die gemessene CT-Zahl gegen den Schwächungswert der Materialien im AAPM-Phantom aufgetragen. Für vier der Materialien besteht ein gut linearer Zusammenhang. Das Nylon (magentafarbener Punkt) weicht deutlich von dem linearen Zusammenhang ab. Dieses ist dadurch zu erklären, dass für „Nylon“ verschiedene Subtypen unterschiedlicher Schwächung existieren. Aus der Produktbeschreibung des AAPM-Phantoms geht der verwendete Subtyp nicht hervor. Dieser Datenpunkt wurde bei Kalibrierkurve nicht berücksichtigt. Mit der ermittelten Kalibrierkurve ergibt sich die CT-Zahl von Wasser zu 9,38 HU. Dieses stimmt gut mit den Erwartungen überein. Für PMMA führt gemäß dem festgestellten Zusammenhang eine Dichteänderung von 1% zu einer Änderung der CT-Zahl von etwa 10,5 HU.

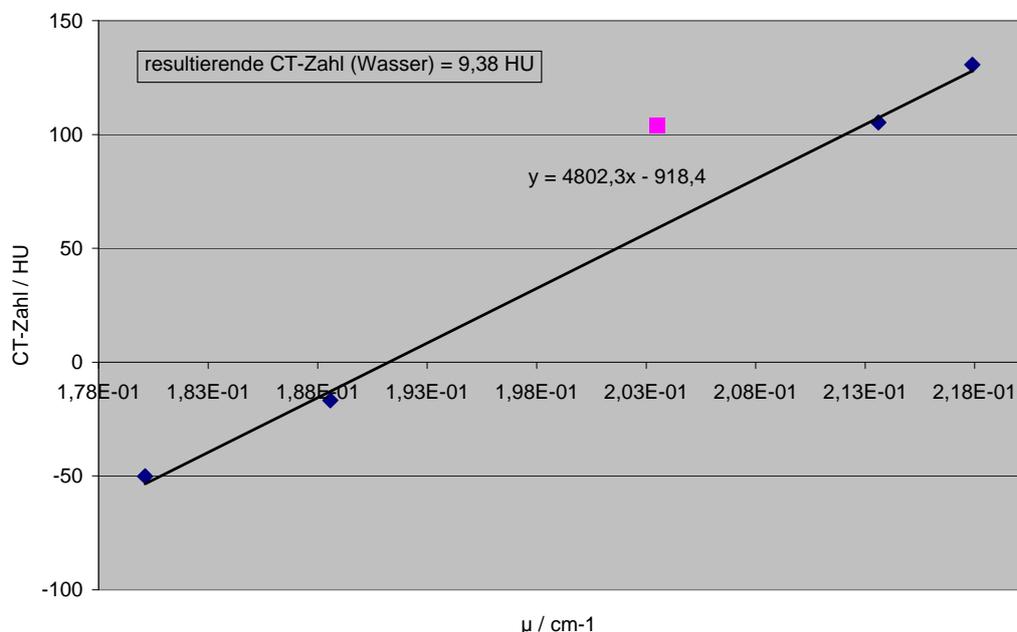


Abbildung 60: Auftragung des Zusammenhangs zwischen der gemessenen CT-Zahl und dem Schwächungskoeffizienten für Materialien der Zylinder im AAPM-Phantom. Der magentafarbene Punkt entspricht dem Nylon-Objekt. Dieser Wert wurde nicht in die Bestimmung der Kalibrierkurve einbezogen. Neben den Messwerten sind die den Zusammenhang beschreibende Formel sowie die aus der Beschreibung resultierende CT-Zahl von Wasser angegeben.

Material	Acryl (PMMA)	Polycarbonate (PC)	Nylon (PA)	Polystyrol (PS)	Polyethylene (PE)	Wasser
$\rho / \text{g/cm}^3$	1,19	1,2	1,1	1,05	0,95	1
$\mu/\rho / \text{cm}^2/\text{g}$	1,83E-01	1,78E-01	1,85E-01	1,80E-01	1,90E-01	1,93E-01
resultierendes μ / cm^{-1}	2,18E-01	2,14E-01	2,04E-01	1,89E-01	1,80E-01	1,93E-01

Tabelle 7: Dichte der gemäß dem Datenblatt im AAPM CT Performance Phantom enthaltenen Materialien; die Massenabsorptionskoeffizienten der Materialien gemäß [NIST] sowie daraus berechnete Schwächungswerte

6.4.4.3. Langzeitstabilität

Die Langzeitstabilität der Messprozedur wurde durch Wiederholungsmessungen an dem Referenz-Prüfkörper der Firma PTW überprüft. Es wurden insgesamt sechs Messungen an dem Prüfkörper über einen Zeitraum von etwa einem Jahr durchgeführt. In Abbildung 61 ist die Abweichung der CT-Zahl vom Mittelwert für die 8 ausgewerteten Segmente dargestellt. Die Abweichung vom Mittelwert ist für alle Messzeitpunkte und Segmente kleiner als 0,9 HU.

6.4.4.4. Überprüfung der Materialhomogenität

Die bisher vorgestellten Untersuchungen betrachten jeweils den Dichtewert größerer Bereiche eines CTDI-Prüfkörpers. Lokale Cluster von Luftbläschen oder feine Risse im Material führen aufgrund der Mittelung der untersuchten Größen über einen größeren Bereich jedoch möglicherweise nicht zu auffälligen Abweichungen. Ein Einfluss eines Risses, welcher nahezu senkrecht von der Zylinderoberfläche bis zu der CTDI-Kammer reicht, auf den Dosismesswert ist dabei nicht auszuschließen. Aus diesem Grund wurde eine statistische Analyse der Daten durchgeführt, welche es ermöglicht, unabhängig von einer externen, visuellen Prüfung der Prüfstücke, derartige Mängel in einem Prüfkörper zu entdecken.

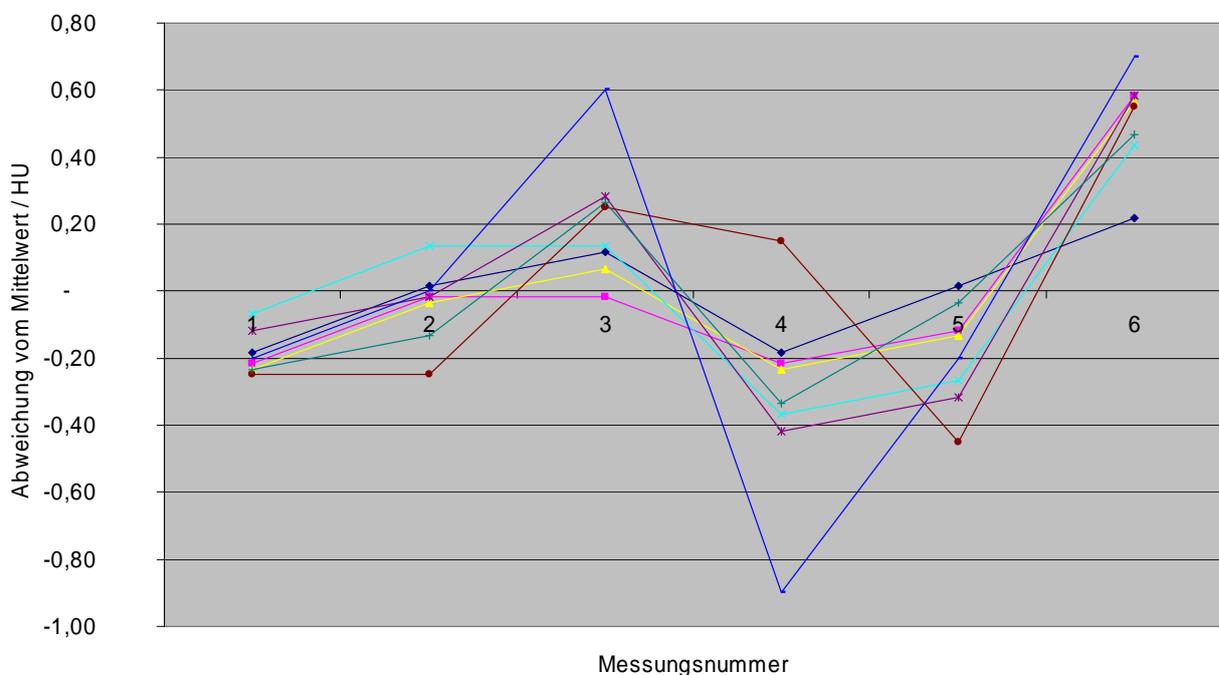


Abbildung 61: Darstellung des zeitlichen Verlaufs der gemessenen, mittleren CT-Zahlen in den acht ROI des zu unterschiedlichen Zeitpunkten untersuchten Exemplars der CTDI-Prüfkörper

In der statistischen Analyse werden die CT-Zahlen sämtlicher Voxel unabhängig betrachtet. Für den Fall eines Prüfkörpers, der aus einem Material mit homogen gleicher Dichte besteht, sind die CT-Zahlen der Voxel statistisch verteilt. Im linken Teil von Abbildung 62 ist eine derartige Verteilung dargestellt. Für den Fall feiner Risse oder von Bläschenclustern gibt es überproportional viele Voxel mit niedrigen CT-Zahlen. In Abbildung 62 ist dieses anhand eines gestellten Beispiels verdeutlicht. Die betrachtete ROI in diesem Beispiel beinhaltet den Luftschlitz, der zwischen dem Kopf- und dem Körperphantom des CTDI-Prüfkörpers verbleibt. Der Schlitz führt zu einer erhöhten Anzahl von Voxel mit niedrigen CT-Zahlen. Dieses ist direkt auffällig.

Innerhalb des Vorhabens wurden die statistischen Verteilungen der CT-Zahlen der Voxel visuell ausgewertet. Eine automatisierte Auswertung ist denkbar, wurde aufgrund der kleinen Stückzahl an Prüfobjekten jedoch nicht umgesetzt.

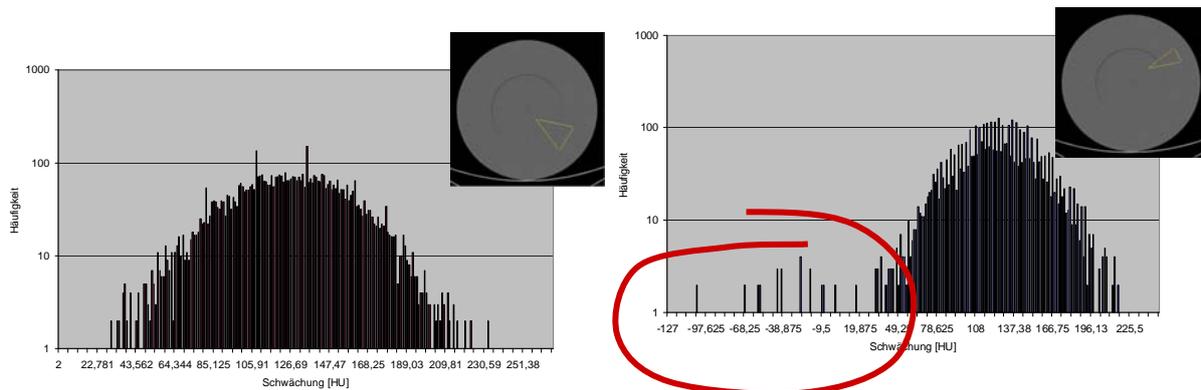


Abbildung 62: Auftragung der Häufigkeit unterschiedlicher CT-Zahlen in exemplarisch ausgewählten ROI. Die Position der ROI ist in den in den Abbildungen der CT-Schichten als gelbe Dreiecke angegeben. Links: Bereich homogenen Materials, die CT-Werte sind im Wesentlichen normalverteilt; rechts: die ROI überdeckt einen Bereich, in dem sich ein Luftspalt befindet. Hierdurch kommt es zu einem vermehrten Anteil an kleinen CT-Zahlen.

7. Unsicherheit der Messprozeduren

7.1. *Der Strukturkörper des CDMAM 3.4 sowie der Testeinsatz AP nach PAS1054 (Erläuterungen zur Anwendung – 10/2005)*

Es gibt bei den ermittelten Dicken der Goldplättchen anhand der angewandten Messprozedur zwei unterschiedliche Unsicherheitsbeiträge. Ein Beitrag ist systematischer Natur und basiert auf der Unsicherheit, mit der der Zusammenhang zwischen der Golddicke und dem bei der Durchstrahlungsuntersuchung resultierenden Signal bekannt ist. Der zweite Beitrag ergibt sich aus der Reproduzierbarkeit der Messungen.

Der systematische Beitrag zur Messunsicherheit ($k=2$) setzt sich aus folgenden Teilunsicherheiten zusammen:

1. Teilunsicherheit der durch die Röntgenfluoreszenzmessungen ermittelten Materialdicke: 7%
2. Unsicherheit der Steigung der an den Zusammenhang zwischen der Materialdicke und dem logarithmierten Signalwertunterschied der Durchstrahlungsmessungen angepassten Ausgleichsgeraden, $\mu*d$: 4%.

Der aus der Reproduzierbarkeit der Messungen resultierende Beitrag zur Messunsicherheit ist abhängig von der Länge der Aufnahmezeit, s. Abschnitt 6.2.3. Die aus den Durchstrahlungsmessungen zu mehreren Zeitpunkten ermittelte Dicke eines Objektes schwankt absolut um weniger als 10 nm bei den Goldplättchen, welche durch die „langen Messungen“ untersucht wurden sowie um bis zu 30 nm bei den Goldplättchen, die mit den „kürzeren Messungen“ untersucht wurden. Dieser Unsicherheitsbeitrag entspricht der unteren Grenze, mit der Prüfkörper relativ zueinander verglichen werden können.

Die Gesamtunsicherheit der gemessenen Materialdicke setzt sich aus beiden Beiträgen zusammen. Bei der Analyse des Absolutwertes der Materialdicke eines Goldplättchens ist es relevant, beide Unsicherheitsbeiträge zu berücksichtigen. Bei der Analyse von Fertigungstoleranzen verbleibt nur der Beitrag, der auf die Messwertschwankungen zurückzuführen ist. Der systematische Unsicherheitsbeitrag ist bei dieser Analyse nicht relevant.

Der maximale Fehler der manuellen Bestimmung der Durchmesser der Goldplättchen ergibt sich daraus, dass die untersuchten Objekte keine scharfe Kante im Randbereich haben. Dadurch ist die zugeordnete Grenze der Goldplättchen in gewissem Rahmen willkürlich. Der maximale Fehler wird mit 10 μm angenommen.

7.2. *Die Strukturkörper der Normen DIN 6868-13 und DIN 6868-4 (inkl. DSA-Prüfkörper) sowie die zugehörigen Schwächungskörper*

7.2.1. Messunsicherheit der Untersuchung der Prüfkörpergeometrie

Die erweiterte Unsicherheit ($k=2$) der Messungen der Geometrie der Objekte in den Referenzprüfkörpern ist in Tabelle 8 zusammengefasst. Zudem ist die idealerweise gewünschte Messunsicherheit an das jeweilige, untersuchte Objekt angegeben. Die ideale Messunsicherheit ergibt sich aus dem Schwächungsverhalten des untersuchten Materials sowie der Anforderung an die untersuchte Komponente, s. Abschnitt 5. Abschließend ist in

Tabelle 8 jeweils auch die für die entsprechende Komponente verwendete Messeinrichtung angegeben.

Es fällt auf, dass die Unsicherheit der Messung der Detailkontrastelemente des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 deutlich größer ist als die der meisten anderen untersuchten Objekte. Die größere Messunsicherheit ist eine Folge des Prüfstückes. Die Grundfläche der Bohrung ist in einigen Fällen nicht ideal eben. Die Bohrungstiefe wurde als Mittelwert der in der betrachteten Region enthaltenen Bohrungstiefen berechnet. Nachdem dieser Wert sich, je nach verwendeter, betrachteter Region leicht ändert, ist hier eine größere Unsicherheit für den Messwert anzunehmen.

Die Ermittlung der Messunsicherheiten erfolgte gemäß dem Leitfaden „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)“ [10] und teilweise mithilfe der Software „GUM Workbench Pro“ [11].

Folgende Unsicherheitsbeiträge sind in die Gesamtunsicherheit eingeflossen:

- Wiederholbarkeit der Messergebnisse,
- Spezifikation des verwendeten Messgeräts,
- Abweichungen bei der Messung von ähnlichen, kalibrierten Referenzobjekten,
- Unsicherheit bei der Kalibrierung der Referenzobjekte,
- Temperatur bei der Messung,
- Unsicherheit des Wärmeausdehnungskoeffizienten,
- Eigenschaften des Messobjekts (Rauheit, Dickenschwankungen).

Bei den Untersuchungen stellte sich heraus, dass die wesentlichen Unsicherheitsbeiträge die Reproduzierbarkeit, die Abweichung von Referenzwerten und die Eigenschaften der untersuchten Messobjekte waren. So kann z.B. der Beitrag der Rauheit zur Standardunsicherheit u einer Dickenmessung mit $R_z/4$ abgeschätzt werden [12]. R_z ist dabei die gemittelte Rautiefe nach DIN EN ISO 4287 [13]. Der gemessene mittlere R_z -Wert der Kupferbleche betrug z. B. $2,38 \mu\text{m}$.

Ein Vergleich der erreichten Unsicherheit, U_{PTB} , mit der tolerierbaren Unsicherheit, U_{max} , zeigt, dass bis auf die Dickenmessungen an den Kupferplatten alle erreichten Unsicherheiten kleiner als die tolerierbaren sind.

Die Unsicherheit der taktilen Untersuchung stellt die untere Grenze der Messunsicherheit der Messprozedur zur Konformitätsprüfung unbekannter Prüfkörper dar.

7.2.2. Messunsicherheit der Untersuchung auf Basis der Röntgenbildgebung

Die möglichen Unsicherheitsbeiträge in der quantitativen Röntgenbildgebung wurden umfangreich analysiert. Die Beiträge mit relevantem Einfluss auf die Gesamtunsicherheit sind im Folgenden aufgeführt:

Unsicherheit der Koordinatenmessung:

Die in Tabelle 8 aufgelisteten Beiträge stellen die untere Grenze der möglichen Gesamtunsicherheit dar.

Reproduzierbarkeit der Dosisschaltung:

Die Reproduzierbarkeit der Dosisschaltung wurde bereits in Abschnitt 6.3.2.1 diskutiert. Sie hat Einfluss auf die Komponenten, die in mehreren Teilaufnahmen aufgenommen werden sowie diejenigen, bei denen die Analyse anhand der Absolutdaten erfolgt.

Der Umfang dieses Unsicherheitsbeitrags wurde bestimmt durch

1. Wiederholungsmessungen der Dosis
2. Auswertung der Variation des Signalwertes bei Wiederholungsmessungen des 4 cm PMMA-Schwächungskörpers welche für die Homogenitätskorrektur erstellt wurden

Der Beitrag der Reproduzierbarkeit der Dosisschaltung zur Gesamtunsicherheit liegt bei 0,09%.

Prüfkörper	Messmethode / Messgerät	U_{PTB} / μm	U_{ideal} / μm
DIN 6868-4			
Dicke PMMA (an den Ecken)	taktil / Dickenmessplatz	5	50
Dicke Kupferplatte	taktil / Dickenmessplatz	2	0,5
Dicke im Stufenbereich, gekrümmte Treppe (Punkte)	taktil / Dickenmessplatz	2	0,5
Tiefe Detailkontrast (Ø10 mm Vertiefung in PMMA)	taktil / Werth	10	50
Tiefe Detailkontrast (Ø 4 mm Vertiefung in PMMA)	taktil / Werth	10	50
Abstand Linienpaare Bleistrichraster 100 μm	optisch / Werth (Bildauswertung)	0,5	
Dicke Bleistrichraster 100 μm (Stufenhöhe)	optisch / Alicona	5	
Linienabstand Rasterplatte	optisch / Werth (Bildauswertung)	10	
Dicke Cu-Platte am Ort des Bleistrichrasters	taktil (Dickenmessplatz)	2	0,5
DIN 6868-4 – DSA			
Dicke PMMA	taktil / Dickenmessplatz	5	50
Dicke Cu	taktil / Dickenmessplatz	2	0,5
Dicke Al	taktil / Dickenmessplatz	2	5
DIN 6868-13			
Dicke PMMA	taktil / Dickenmessplatz	5	50
Dicke Kupferplatte	taktil / Dickenmessplatz	2	0,5
Dicke im Stufenbereich, gerade Treppe (Punkte)	taktil / Dickenmessplatz	2	0,5
Dicke Niedrigkontrast (Al-Scheibchen)	taktil / Dickenmessplatz	2	5
Abstand Linienpaare Bleistrichraster 50 μm	optisch / Werth (Bildauswertung)	0,5	
Dicke Bleistrichraster 50 μm (Stufenhöhe)	optisch / Alicona	5	
Linienabstand Rasterplatte	optisch / Werth (Bildauswertung)	10	
Schwächungskörper			
Dicke Al-Schwächungskörper	optisch / Werth (chromatisch) und taktil (Dickenmessplatz)	2	5
Dicke Cu-Schwächungskörper	taktil / Dickenmessplatz	2	0,5
Dicke PMMA-Platten für Mammographie-Prüfkörper	optisch / Werth (chromatisch, Stufe)	10	50
Dicke PMMA-Schwächungskörper	taktil / Dickenmessplatz	5	50

Tabelle 8: Zusammenstellung der erweiterten Unsicherheit ($k=2$) der taktilen Messung der Ausdehnung an den untersuchten Komponenten der Prüfkörper.

Beitrag des Quanten- und Detektorrauschens:

Die Schwächung sowie Detektion ionisierender Strahlung ist ein statistischer Prozess. Bei jeder Einzelmessung wird damit ein leicht anderes Signal detektiert. Zudem führt die Signalverarbeitungselektronik zu einem weiteren Rauschanteil im detektierten Signal. Beide Faktoren haben Einfluss auf sämtliche Messungen von Komponentendicken.

Die Größe des Einflusses wurde anhand von Wiederholungsmessungen gleicher Objekte in kurzem zeitlichem Abstand abgeschätzt. Der Beitrag ist dabei teilweise von der Reproduzierbarkeit der Dosisschaltung überlagert.

Der Beitrag des Rauschens auf die Gesamtunsicherheit ist kleiner als 0,25% für die Stufen der Dynamiktreppe sowie kleiner 0,35% für die Niedrigkontrastobjekte.

Einfluss von Aus- und Einstreuung:

In Abschnitt 6.3.2.3 wurde das Problem der Signaleinstreuung, welches sich aus den aktuellen Prüfkörperdesigns ergibt, diskutiert. Durch Blenden, welche im Rahmen des Vorhabens entwickelt wurden, wurde der Einfluss wesentlich reduziert. In kleinem Umfang bleiben jedoch Signalein- und Ausstreuungen erhalten. Diese haben in unterschiedlichem Umfang Einfluss auf sämtliche Messungen von Komponentendicken.

Der Umfang dieses Unsicherheitsbeitrags wurde durch exemplarische Untersuchungen von Prüfkörperaufnahmen abgeschätzt, bei denen die Blenden in leicht unterschiedlichen Positionen angeordnet waren.

Der Beitrag der Aus- und Einstreuung auf die Gesamtunsicherheit kann als kleiner 0,65% angenommen werden.

Einfluss der Positionierung der ROI:

Die Komponenten der Prüfkörper sind vielfach in ihrer Materialdicke nicht homogen, s. Abschnitt 8.3.1.1. Zudem gibt es einen Einfluss durch Aus- und Einstreuung von Signalanteilen. Das hat zur Folge, dass sich für gleiche Objekte in Abhängigkeit von der zur Analyse herangezogenen Region unterschiedliche Werte ergeben. Die ROI-Positionierung hat in unterschiedlichem Umfang Einfluss auf sämtliche Messungen von Komponentendicken.

Der Einfluss unterschiedlicher Positionierung der ROI wurde an exemplarischen Aufnahmen durch extreme Positionierung der ROI in Randbereichen der untersuchten Objekte überprüft.

Der Beitrag der ROI-Positionierung auf die Gesamtunsicherheit kann bei den Dynamiktreppe als kleiner 0,7% angenommen werden. Bei den Niedrigkontrastobjekten ist der Beitrag kleiner 0,1%. Der Grund für den unterschiedlich großen Beitrag ist, dass die Niedrigkontrastobjekte allgemein eine gleichmäßigere Materialdickenverteilung haben als die Dynamiktreppe. Zudem treten bei den Niedrigkontrastobjekten nur in Ausnahmefällen Aus- bzw. Einstreueffekte auf.

Einfluss von Geisterbildern:

Bei den Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Signale in Aufnahmen in begrenztem Umfang durch zuvor durchgeführte Aufnahmen beeinflusst wurden. In den meisten Fällen ist die Beeinflussung so klein, dass sie nicht nachweisbar ist. In Fällen, in denen nacheinander Komponenten deutlich unterschiedlicher Schwächung aufgenommen werden, ist der Einfluss nachweisbar. In Abbildung 63 sind zwei extreme Beispiele dargestellt.

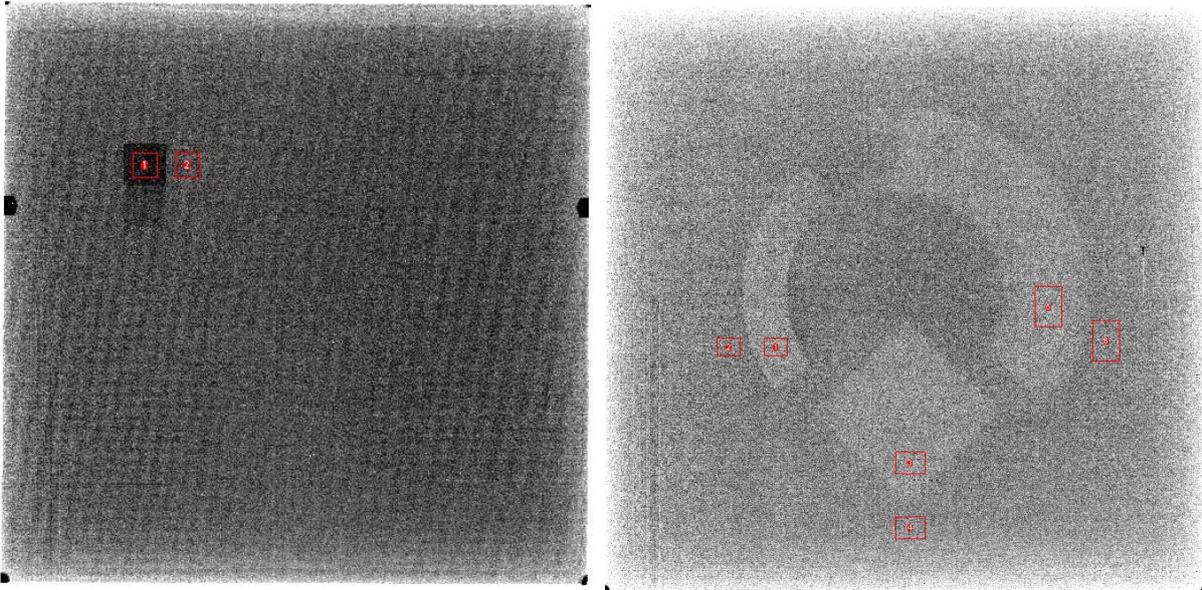


Abbildung 63: Extreme Beispiele von Geisterbildern aufgrund vorhergehender Exposition des Bilddetektors. Dargestellt sind Aufnahmen homogener Schwächungskörper nach vorhergehender Aufnahme eines Prüfkörpers nach DIN 6868-13 (links) bzw. DIN 6868-4 (rechts).

Im linken Teil der Abbildung ist das Geisterbild eines zuvor untersuchten Prüfkörpers nach DIN 6868-13 bei der Untersuchung eines homogenen Schwächungskörpers dargestellt. Im rechten Teil der Abbildung ist das Geisterbild eines Prüfkörpers nach DIN 6868-4 bei der Untersuchung eines Schwächungskörpers dargestellt.

Der Einfluss von Geisterbildern wurde detailliert untersucht. Der Einfluss ist bei den beiden dünnsten Stufen der Dynamiktreppe am größten. Dort ist der Beitrag auf das Signal jedoch immer noch in allen Fällen kleiner 0,15%.

Einfluss der Änderung im Ansprechverhalten der Detektorelemente:

Das Ansprechverhalten der Detektorelemente ändert sich mit der Zeit. Dieses führt zu einem geänderten, detektierten Signal bei gleicher Dosis. Der Einfluss wurde weitgehend durch eine regelmäßige Erneuerung der Homogenitätskorrektur bei den Aufnahmen kompensiert. Um den Aufwand an dieser Stelle im Rahmen zu halten bestand jedoch zwischen den Neubestimmungen ein Zeitraum einiger Wochen. Die bis zur nächsten Erneuerung aufgelaufene Änderung der Signale führt zu geänderten Messwerten. Aufgrund der großen Anzahl an Detektorelementen in den ROI bei der Bilddatenanalyse tragen Änderungen einzelner Detektorelemente faktisch nicht zum Messwert bei. Eine systematische Änderung im Ansprechverhalten des gesamten Detektors hat jedoch potentiell messbare Auswirkungen auf die Untersuchungen, die auf Basis der Absolutwerte erfolgen. Dieses sind Untersuchungen der Dynamiktreppe bei einigen Prüfkörpern, der Strukturkörperdicken sowie der Schwächungskörper. Auswertungen, die auf der Basis von Kontrasten erfolgen, sind durch die Änderung im Ansprechverhalten der Detektorelemente nahezu unbeeinflusst. Eine globale Änderung des Ansprechverhaltens hat den gleichen Einfluss auf die untersuchten Komponenten und die Referenzregionen.

Die Größe des Einflusses der Änderung des Ansprechvermögens wurde durch die Änderung der Signalwerte bei den Wiederholungsbestimmungen der Homogenitätskorrektur abgeschätzt.

Der Einfluss dieses Beitrags auf die Gesamtunsicherheit ist bei der durchgeführten, monatlichen Neufestlegung der Homogenitätskorrektur kleiner 1%.

Unsicherheit der Abbildungsfunktion:

Durch die zuvor genannten Einflussfaktoren werden für identische Objekte bei Wiederholungsmessungen in einem größeren Zeitraum unterschiedliche Signale gemessen, welche sich im Fall des Referenz-Prüfkörpers in unterschiedlichen Abbildungsfunktionen äußern.

Die Änderung der Signalwerte wurde bei der Erstellung der Abbildungsfunktion durch mindestens achtfache Wiederholung der Bestimmung der Abbildungsfunktion und Mittelung über die Einzelresultate berücksichtigt.

Die Verteilung der Werte ermöglicht es darüber hinaus, abzuschätzen, wie stark gemessene Signale aufgrund des Einflusses der oben genannten Faktoren beeinflusst werden. Die hier festgestellte Variation ist als Zusammenfassung des Einflusses der oben aufgeführten Faktoren mit Ausnahme der Koordinatenmessung zu betrachten. Die aus den Messungen abgeschätzte, erweiterte Messunsicherheit ist von der untersuchten Komponente und dabei oftmals auch der konkreten Dicke des untersuchten Objektes abhängig. In Tabelle 10 ist die für die unterschiedlichen, untersuchten Komponenten relevante erweiterte Unsicherheit ($k=2$) der Abbildungsfunktion zusammengefasst. Bei Komponenten welche aus einer großen Anzahl an Objekten, mit ggf. deutlich unterschiedlicher Materialdicke, bestehen, ist teilweise ein Bereich angegeben, in dem sich die erweiterte Unsicherheit in Abhängigkeit des betrachteten Objektes bewegt.

Die in Tabelle 10 angegebenen Werte für die Unsicherheit beinhalten den Unsicherheitsbeitrag der jeweiligen Referenz-Prüfkörper durch die Geometriemessungen nach Tabelle 8.

In den meisten Fällen ist die erweiterte Unsicherheit der Messung an einem Objekt kleiner als 5%, in vielen Fällen sogar kleiner 2,5%. Im Vergleich zu den sonstigen Unsicherheiten fallen drei Komponenten auf, bei denen die erweiterte Unsicherheit größer werden kann. Dieses sind die Niedrigkontrastbohrungen im Prüfkörper nach DIN 6868-4 sowie die Aluminium-Niedrigkontrastobjekte im Bereich des DSA-Prüfkörpers und bei dem Prüfkörper nach DIN 6868-13.

Bei dem dünnsten Niedrigkontrastobjekt im Innenbereich des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 beträgt die erweiterte Unsicherheit nahezu 10%. Der Grund für die hohe Unsicherheit ist die im Innenbereich des Prüfkörpers bestehende relevante Beeinflussung durch die direkt angrenzend liegende Kupfertreppe, s. Abbildung 47. Diese Beeinflussung wurde durch die Einführung von Blenden bei den Aufnahmen weitgehend unterbunden. Die im Rahmen des Vorhabens genutzten Blenden sind gleichwohl noch nicht optimal. Es kommt in Einzelfällen immer noch zu nachweisbaren Ein- bzw. Ausstreuungen in den Innenbereich, die zu einer leichten Beeinflussung der Werte führen. Bei dem Objekt mit dem kleinsten Kontrast wird die verbleibende Beeinflussung relevant. Eine Optimierung der Blenden würde an dieser Stelle bei ansonsten unverändertem Prüfkörper eine deutliche Verringerung der Messunsicherheit nach sich ziehen. Innerhalb des Vorhabens wurde diese Optimierung nicht durchgeführt, da der Arbeitsprozess zum Zeitpunkt des Bekanntwerdens des Problems schon zu weit vorangeschritten war.

Bei den Niedrigkontrastbohrungen im Bereich der Dynamiktreppe beträgt die erweiterte Unsicherheit bei einigen Stufen bis zu 7%. Der Grund hierfür ist einerseits die kleine Fläche der Bohrungen. Zudem ergibt sich durch die unebenen Kupferstufen ein weiterer Unsicherheitsbeitrag. Es ist aktuell nicht bekannt, wie die erweiterte Unsicherheit bei allen Stufen deutlich unter den aktuellen Wert zu senken ist.

Bei dem dünnsten Aluminium-Niedrigkontrastobjekt des Prüfkörpers nach DIN 6868-13 beträgt die erweiterte Unsicherheit 6%. Dieser Wert erscheint aktuell als ausreichend, um relevante Abweichungen von der Normvorgabe festzustellen.

Bei den Aluminium-Niedrigkontraststreifen des DSA-Prüfkörpers nach DIN 6868-4 beträgt die erweiterte Unsicherheit bei dem dünnsten Objekt von 50 µm 30%. Diese Unsicherheit ist sicherlich als zu hoch für die Messaufgabe an diesem Objekt anzusehen. Der Grund für die große Unsicherheit liegt primär darin begründet, dass die Objekte und damit die Mittelungsfläche vergleichsweise klein sind. Dieses führt zu einem im Vergleich zu den anderen in diesem Abschnitt besprochenen Untersuchungen deutlich erhöhten Rauschen der Einzeldaten. Das erhöhte Rauschen der Einzelaufnahmen lässt sich im Prinzip durch eine erhöhte Anzahl an Aufnahmen über welche gemittelt wird, ausgleichen. Leider fiel das Problem erst gegen Ende des Vorhabens auf, nachdem die Aufnahmen der Stichprobe bereits durchgeführt worden waren. Innerhalb des Vorhabens wurde auf eine Wiederholung der Aufnahmen verzichtet. Bei einer Routinetätigkeit wäre es notwendig, wie beschrieben zu verfahren, um eine ausreichend kleine Messunsicherheit zu erhalten. Der zusätzliche Messaufwand ist in der Abschätzung des Gesamtaufwands für die Prüfung in Abschnitt 9.2.1 bereits beinhaltet.

Allgemein gilt, dass die Messunsicherheit der Materialdicke bei sämtlichen untersuchten Komponenten mit erweitertem Aufwand, insbesondere durch eine Erhöhung der Wiederholungsaufnahmen, noch wesentlich verringert werden kann. Die innerhalb des Vorhabens erzielte Messunsicherheit wurde als guter Kompromiss zwischen dem Aufwand der Prüfungen und der erhaltenen Präzision angesehen. Für alle untersuchten Komponenten mit Ausnahme der Aluminium-Niedrigkontrastobjekte des DSA-Prüfkörpers ist die im Vorfeld der Messungen getroffene Entscheidung auch retrospektiv als sinnvoll anzusehen.

Unsicherheit der Abstandsmessung der Rasterlinien:

Die Messung der Abstände der Rasterlinien wird im Wesentlichen durch folgende Faktoren beeinflusst:

1. Unsicherheit der Positionierungsgenauigkeit des Prüfkörpers im Strahlengang mit Einfluss auf den Vergrößerungsfaktor
2. Reproduzierbarkeit der Abstandsmessung an gleichen Abbildungen.

Die erweiterte Unsicherheit der Messung ist in Tabelle 10 angegeben.

7.3. Der CTDI-Prüfkörper nach DIN EN 60601-2-44

7.3.1. Messunsicherheit der Untersuchung der Prüfkörpergeometrie

Die erweiterte Unsicherheit (k=2) der bei der PTB durchgeführten taktilen Messungen der CTDI-Prüfkörper sind in Tabelle 9 zusammengestellt.

Durchmesser der Kopf- und Körperphantome	2 µm
Position der Bohrungen	1 µm
Winkelmessungen	4°

Tabelle 9: Erweiterte Unsicherheit (k=2) der Messung der CTDI-Prüfkörper bei der PTB

Die Messunsicherheitsbestimmung der Firma Feinmess erfolgte durch Simulation mit der von der PTB entwickelten Methode „Virtuelles Koordinatenmessgerät“ mit der Softwareversion 4.4.4. Die Firma gibt für die radiale Position sowie die Durchmesser der Bohrungen eine erweiterte Messunsicherheit kleiner als 1,5 µm an. Für die Winkelmessungen war die erweiterte Messunsicherheit kleiner 5' angegeben.

Struktur- / bzw. Schwächungskörper	Komponente	Erweiterte Messunsicherheit
DIN 6868-4	Strukturkörper	20 µm Cu
	Kupfer-Dynamiktreppe	5 µm Cu – 20 µm Cu
	Niedrigkontrastbohrungen im Innenbereich	35µm PMMA – 100µm PMMA
	Niedrigkontrastbohrungen im Bereich der Dynamiktreppe	50 µm PMMA – 175 µm PMMA
	Rasterlinien	0,7%
DSA-Prüfkörper nach DIN 6868-4	Kupfer-Dynamiktreppe	5 µm Cu
	Aluminium-Niedrigkontraststreifen	15 µm Al – 20 µm Al
DIN 6868-13	Strukturkörper	5 µm Cu
	Kupfer-Dynamiktreppe	5 µm Cu
	Aluminium-Niedrigkontrastpunkte	6 µm Al – 13 µm Al
	Rasterlinien	0,7%
Kupfer-Schwächungskörper		5 µm Cu
Aluminium-Schwächungskörper		150 µm Al
PMMA-Schwächungskörper nach DIN 6868-4 bzw. -13		200 µm PMMA
PMMA-Schwächungskörper nach PAS1054		250 µm PMMA
PMMA-Schwächungskörper des CDMAM		200 µm PMMA

Tabelle 10: Zusammenstellung der relevanten, erweiterten Messunsicherheit (k=2) der Messungen an Komponenten der Struktur- und Schwächungskörper nach DIN 6868-4, DIN 6868-13 sowie den Schwächungskörpern des CDMAM 3.4 sowie nach PAS1054

7.3.2. Messunsicherheit der Untersuchung der Materialdichte

Aus der Messprozedur zur Untersuchung der Materialdichte ergeben sich vier Haupteinflussfaktoren für die Messunsicherheit:

1. Unsicherheit der Kalibrierung des Zusammenhangs zwischen CT-Zahl und Materialdichte: Diese setzt sich zusammen aus
 - 1.1. Unsicherheit der Messung der CT-Zahlen im AAPM-Phantom
 - 1.2. Unsicherheit der Kenntnis der exakten Materialzusammensetzung und –dichte im AAPM-Phantom
 - 1.3. Unsicherheit der verwendeten Massenschwächungskoeffizienten
 - 1.4. Unsicherheit der Übertragbarkeit der Messungen am AAPM-Phantom auf die CTDI-Prüfkörper

Sämtliche Unsicherheitsbeiträge sind einzeln sehr klein. Der Unsicherheitsbeitrag der Kalibrierprozedur wird mit kleiner als 0,3% angenommen.

2. Unsicherheit durch verbleibende Artefakte der Strahlauhfärtung: Der verbleibende Unterschied zwischen den inneren und äußeren Segmenten ist in allen Fällen kleiner 0,1%. Dieser Wert wurde als Unsicherheitsbeitrag angenommen.
3. Einfluss der Langzeitstabilität: Die maximale Abweichung einzelner Segmente vom Mittelwert in der Untersuchung der Langzeitstabilität ist kleiner 0,1%. Dieser Wert wurde als Unsicherheitsbeitrag angenommen.
4. Einfluss des Rauschens: In jedem ausgewerteten Segment werden Daten aus mehr als 4900 Voxeln bei den vier inneren ROI sowie mehr als 31700 Voxeln bei den äußeren ROI je Schicht gemittelt. Die Mittelwerte der ROI werden über mindestens 37 Schichten gemittelt. Der verbleibende Beitrag des Rauschens auf die Messunsicherheit liegt unterhalb von 0,1%.

Die erweiterte Unsicherheit ($k=2$) der Messprozedur wurde, unter Berücksichtigung der oben aufgelisteten Unsicherheitsbeiträge zu kleiner 0,5% abgeschätzt. Eine Dichteabweichung um $0,006 \text{ g/cm}^3$ lässt sich damit sicher nachweisen.

8. Untersuchung von auf dem Markt erhältlichen Prüfkörpern

8.1. Allgemeines / Vorbemerkungen

Die untersuchten Prüfstücke wurden dem Projektteam von Nutzern der entsprechenden Prüfkörper zur Verfügung gestellt. Es handelt sich um Exemplare der Prüfkörper unterschiedlichen Alters, die in der Routine eingesetzt werden. Von den in den Normen DIN 6868-13 und DIN 6868-4 (inkl. DSA-Prüfkörper) spezifizierten Prüfkörpern sowie dem CTDI-Prüfkörper nach DIN EN 60601-2-44 wurden darüber hinaus einige Exemplare direkt von den Herstellern zur Verfügung gestellt. Es war das Ziel, von jedem Prüfkörpertyp und Hersteller 10 Exemplare zu untersuchen. Dieses Ziel wurde in einigen Fällen nicht erreicht. Der Grund war jeweils ein so geringer Marktanteil des Herstellers für den entsprechenden Prüfkörper, dass dieser weder über Anwender noch über den Hersteller in ausreichend hoher Stückzahl zu erhalten war.

Die Prüfstücke wurden in dem Messaufbau und unter Verwendung der entwickelten Mess- und Auswerteprozeduren, s. Kapitel 6, untersucht.

8.2. Strukturkörper des CDMAM 3.4 sowie Testeinsatz AP nach PAS1054 (inkl. Erläuterungen zur Anwendung – 10/2005)

Mit dem unter Abschnitt 6.2 beschriebenen Verfahren wurden insgesamt 10 Exemplare des CDMAM-Prüfkörpers sowie acht Exemplare des Testeinsatzes AP untersucht. Die Exemplare des Testeinsatzes AP stammen vollständig von der Firma pehamed. Der CDMAM-Prüfkörper wird bislang ausschließlich von der Firma Artinis hergestellt.

Alle untersuchten Exemplare des Testeinsatzes AP stammen von Anwendern. Nach Aussage des Herstellers werden aktuell so wenig neue Prüfkörper gefertigt, dass kein Lagerbestand verfügbar war, der dem Projektteam zur Verfügung gestellt werden konnte. Von den untersuchten Exemplaren des CDMAM-Prüfkörpers stammt eines von der für Deutschland zuständigen Vertriebsfirma des Prüfkörpers, die weiteren Exemplare stammen von Anwendern.

8.2.1. Qualitative Resultate

Bei den Durchstrahlungsaufnahmen der Exemplare des CDMAM-Prüfkörpers sowie des Testeinsatzes AP fielen in den Bilddaten einige charakteristische Artefakte der Prüfkörper auf. In Abbildung 64 und Abbildung 65 sind exemplarisch einige der Artefakte dargestellt, die beim Testeinsatz AP bzw. dem CDMAM beobachtet wurden.

Ein Artefakttyp, zu erkennen in Abbildung 64a) bis Abbildung 64c) zeigt Hochkontraststrukturen, die neben den eigentlichen Goldobjekten auftreten. Entsprechendes wird beim CDMAM beobachtet, s. Abbildung 65a). Die in den Prüfkörpern beobachteten Hochkontraststrukturen haben einen Durchmesser von bis zu etwa 80 μm . Sie können damit bei ungünstiger Lage zu einem Fehlentscheid bei der Erkennung der Position der Goldplättchen mit kleinen Durchmessern in den Mammographie-Prüfkörpern führen.

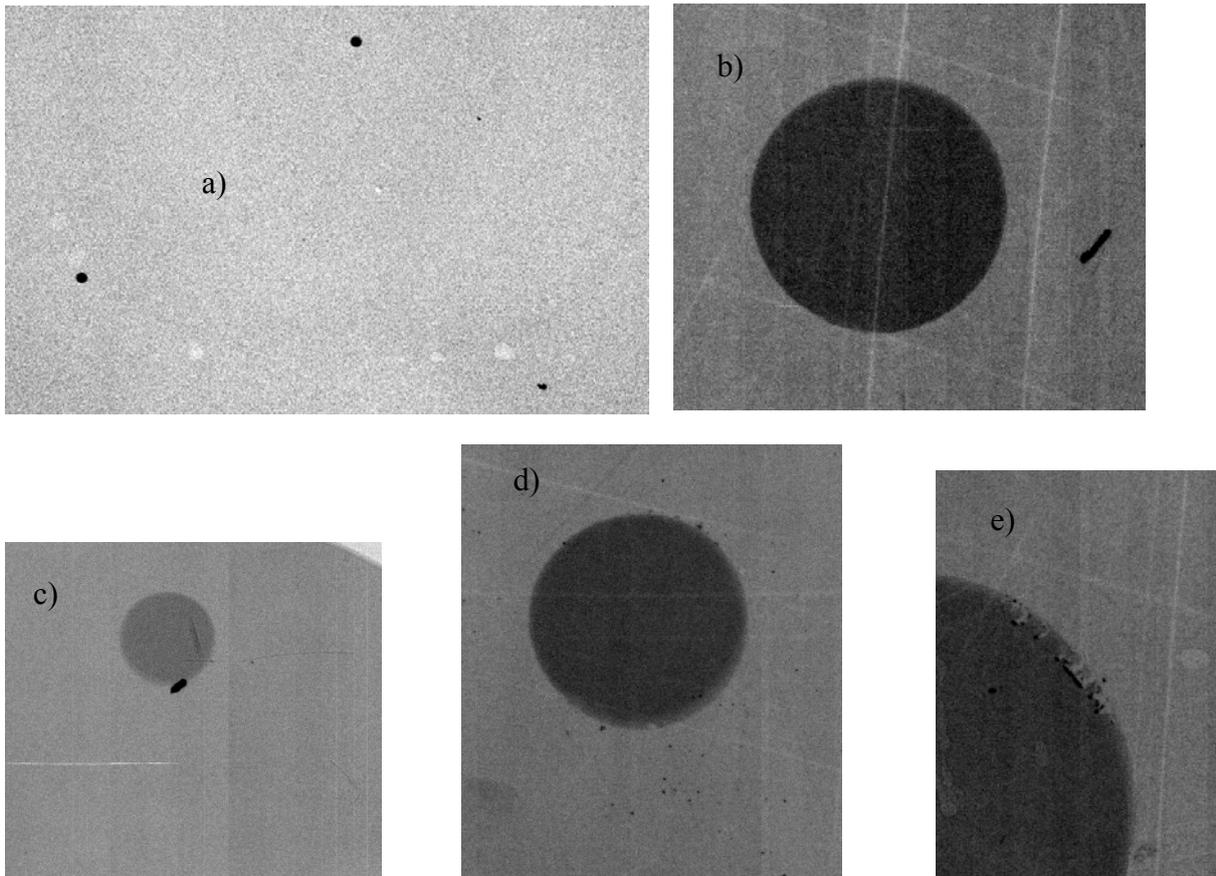


Abbildung 64: Ausschnitte aus Durchstrahlungsaufnahmen von Exemplaren des Testeinsetzes AP, welche exemplarisch einige der beobachteten Artefakte zeigen; a) bis c) zusätzliche Hochkontraststrukturen neben den Goldobjekten, d) bis e) im Randbereich unvollständig hergestellte Goldplättchen

Derartige Strukturen können nach aktuellem Kenntnisstand zwei Ursachen haben:

1. In dem als Basis verwendeten Aluminium sind zu einem kleinen Anteil andere Elemente mit größerem Absorptionskoeffizienten enthalten. Es wird berichtet, dass diese sich teilweise zu Clustern zusammenlagern, welche entsprechende Muster im Röntgenbild zeigen.
2. Bei dem CDMAM sind die Rasterlinien aus Farbe hergestellt, welcher hoch absorbierende Materialien beigefügt sind. Spritzer dieser Farbe können entsprechende Muster im Röntgenbild zeigen.

In Abbildung 64d) und Abbildung 64e) sind unvollständig hergestellte Goldplättchen zu erkennen, bei Abbildung 64e) ist ein Randteil des Goldplättchens weggerissen, bei Abbildung 64d) scheint die Belichtungsmaske bei der Herstellung verrutscht zu sein. Durch derartige Artefakte werden die Goldplättchen kleiner und sind damit schwerer in den Durchstrahlungsbildern zu erkennen.

Abbildung 65b) zeigt ein Faserartefakt, welches bei einem Exemplar eines CDMAM-Prüfkörpers festgestellt wurde. Ob und in welchem Umfang ein derartiges Artefakt Einfluss auf die Erkennbarkeit des Goldplättchens hat, wurde nicht untersucht.

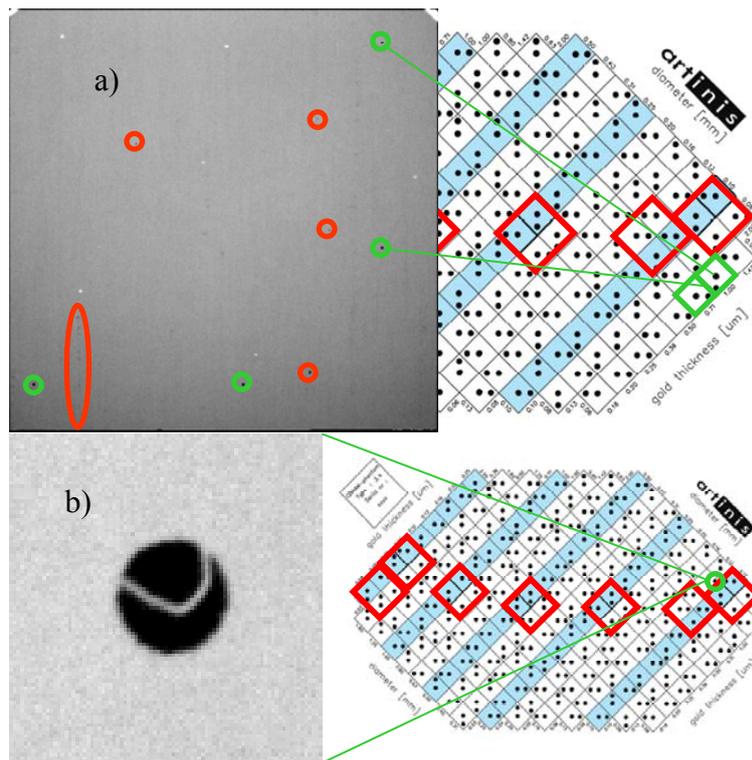


Abbildung 65: Ausschnitte aus Durchstrahlungsaufnahmen von Exemplaren des CDMAM-Prüfkörpers; neben den Durchstrahlungsaufnahmen sind in Schemazeichnungen des CDMAM die abgebildeten Regionen dargestellt. a) Neben den regulären Strukturen, grün markiert, werden weitere Strukturen, rot markiert, beobachtet. b) In einem untersuchten Objekt wurde ein Artefakt beobachtet, welches wahrscheinlich auf eine Faser zurückzuführen ist.

In Abbildung 66a)-b) ist ein relevanter Mangel der Goldplättchen des Testeinsatzes AP dargestellt. In Abbildung 66 a) und c) ist dabei die aus den Durchstrahlungsdaten berechnete Materialdickenverteilung als Oberflächen-Plot dargestellt. In Abbildung 66 b) und d) sind Radiographien von Objekten sowie ergänzend die Materialdickenverteilung der als rote Linie gekennzeichneten Bereiche als Histogramm dargestellt. In fünf der acht untersuchten Exemplare ist die Golddicke im Bereich der „Plättchen“ stark inhomogen. In vielen Fällen ist das Objekt nicht zylindrisch sondern gleicht von der Form her eher einer „Zipfelmütze“. Entsprechendes ist in Abbildung 66a) zu erkennen. Eine messtechnisch korrekte Materialdicke lässt sich für solch inhomogene Strukturen nicht angeben. Gleiches gilt für Goldplättchen, bei denen wie in Abbildung 66c) ein „Loch“ in der Materialdickenverteilung besteht. Die zugehörige Radiographie zu der Golddickenverteilung nach Abbildung 66a) ist in Abbildung 66b) dargestellt. Für den Auswerter von Aufnahmen dieser Prüfkörper im Rahmen der Qualitätssicherung an Mammographie-Einrichtungen hat die ungleichmäßige Verteilung zur Folge, dass der Test nicht wie in der Norm vorgesehen durchgeführt wird und damit auch das Testergebnis deutlich verfälscht wird.

In drei der acht untersuchten Exemplaren ist die Verteilung der Materialdicke des Goldplättchens mit einer nominellen Dicke von 1,8 µm im Zentralbereich in etwa homogen, s. Abbildung 66d). Anhand der Kennnummern der Prüfkörper besteht kein Hinweis darauf, dass die Prüfkörper mit der eher homogenen Materialdickenverteilung aus einem besonderen Zeitbereich stammen, z.B. am jüngsten bzw. ältesten sind.

In einem der Exemplare des Testeinsatzes AP waren anstelle der Objekte mit 0,5 mm Durchmesser solche mit 1 mm Durchmesser eingebaut.

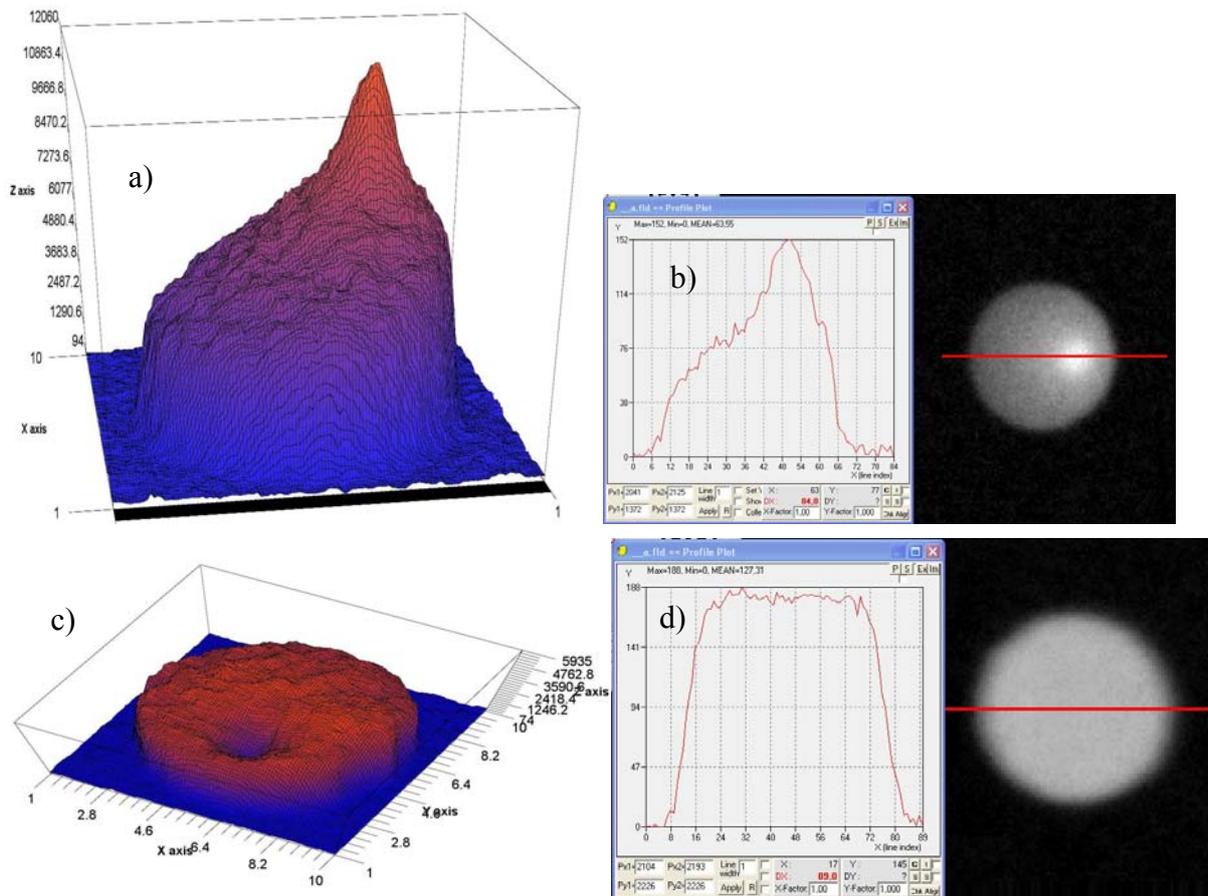


Abbildung 66: Exemplarische Abbildung der Dickenverteilung in den untersuchten Exemplaren des Testeinsatzes AP; in den Teilabbildungen a) und c) ist die Signalwertverteilung in Materialdicken umgerechnet und als Oberfläche dargestellt. Die Abbildungen b) und d) zeigen neben der Durchstrahlungsaufnahme eines Goldplättchens ein Histogramm der Materialdickenverteilung längs der rot markierten Linie.

Bei den untersuchten Exemplaren des CDMAM-Prüfkörpers ist die Verteilung der Materialdicke innerhalb der Goldplättchen als homogen anzusehen. Die Radiographie sowie ein exemplarisches Histogramm der Golddickenverteilung ist in Abbildung 67a) dargestellt. In einigen Fällen werden jedoch auch bei Exemplaren des CDMAM-Prüfkörpers bei den Goldplättchen mit einem nominellen Durchmesser von 80 μm bzw. 100 μm relevante Abweichungen in der regulären Kreisform bzw. im Hinblick auf die korrekte Objektgröße festgestellt. Es wurden drei Hauptarten der Abweichung beobachtet:

1. irregulärer Rand unter Beibehaltung der Kreisform, s. Abbildung 67b)
2. Abweichung von der Kreisform, s. Abbildung 67c)
3. relevante Abweichung von der nominellen Größe

Bei 35% der untersuchten Goldplättchen mit einem nominellen Durchmesser von 80 μm oder 100 μm unterscheidet sich die Länge der beiden Hauptachsen der Ellipsen, die sich bei der Abweichung von der Kreisform ergeben, um mindestens 10 μm . Eine Abweichung von mindestens 10% in der Objektgröße wurde in etwa 62% der untersuchten Goldplättchen mit einem nominellen Durchmesser von 80 μm oder 100 μm festgestellt. In Tabelle 17 sind Werte zur Abweichung von der Kreisform zusammengestellt. Die Golddickenverteilung ist dabei jedoch im mittleren Bereich der Plättchen, anders als vielfach bei den Exemplaren des Testeinsatzes AP, homogen.

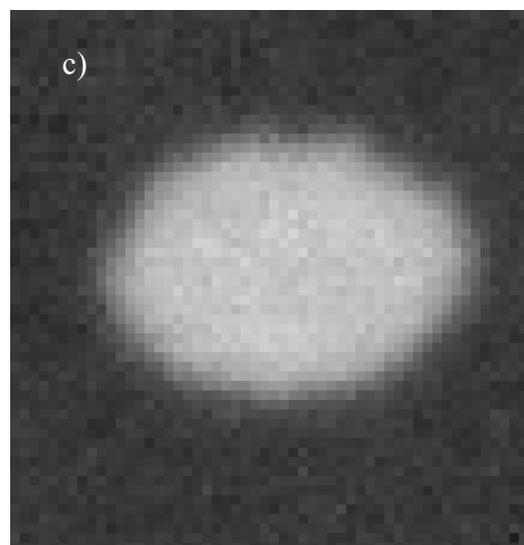
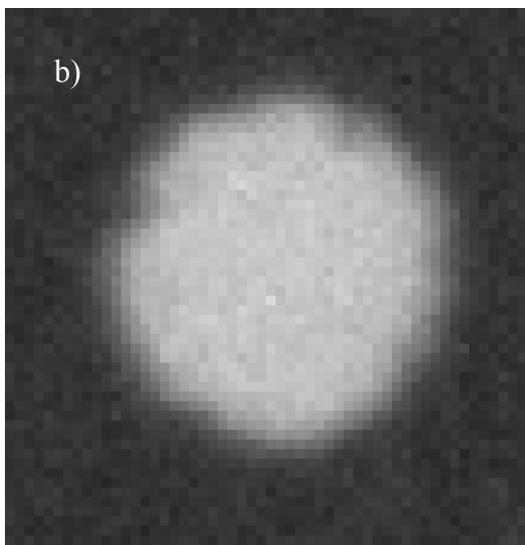
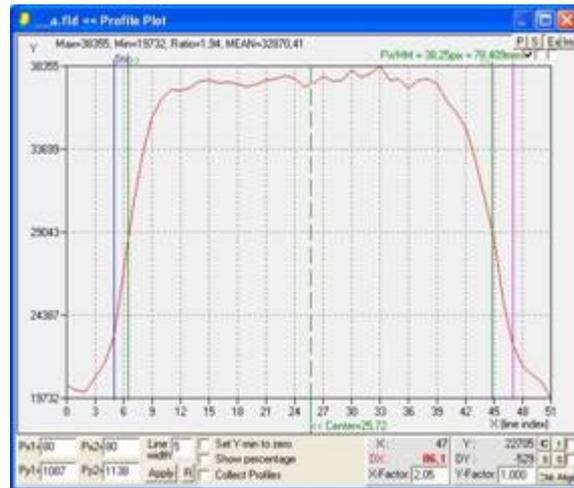
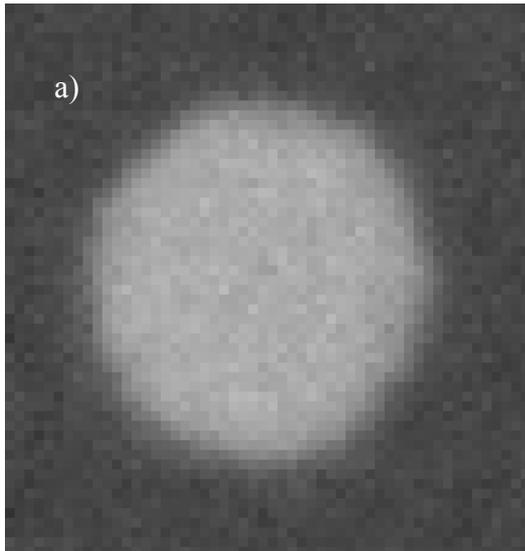


Abbildung 67: Exemplarische Abbildung der Durchstrahlungsbilder von Exemplaren des CDMAM-Prüfkörpers, sowie in a) zusätzliche Darstellung des Histogramms der Materialdickenverteilung. In allen Fällen ist eine homogene Materialdickenverteilung erkennbar; a) reguläre Kreisform, b) irregulärer Rand unter Beibehaltung der Kreisform, c) relevante Abweichung von der Kreisform.

Eine Abweichung der Form des Randes von der Kreisform sollte keinen wesentlichen Einfluss auf die Objekterkennbarkeit und damit den Einsatzzweck des Prüfkörpers haben solange hierdurch die Gesamtfläche des Plättchens nicht wesentlich beeinflusst wird. Der Grund hierfür ist, dass die Goldplättchen, welche die Auffälligkeit zeigen, so klein sind, dass sie in Mammographien in nicht mehr als vier Detektorelementen abgebildet werden. Eine detaillierte Erkennbarkeit des Randes ist in dem Fall ohnehin nicht gegeben. Eine Abweichung von der Kreisform hingegen hat zur Folge, dass in relevantem Umfang auch die Fläche des Objektes geändert wird. Hierdurch wird die Anzahl an Detektorelementen, in denen das Goldplättchen zu einem Signal führt, sowie die Signalhöhe innerhalb der Detektorelemente relevant beeinflusst. Diese Änderung kann eine geänderte Objekterkennbarkeit zur Folge haben.

8.2.2. Quantitative Resultate

8.2.2.1. Resultate der Dickenmessung

In Tabelle 11 sind die aus den mittleren Schwächungswerten der Goldplättchen anhand der in Abschnitt 6.3.2 beschriebenen Methode berechneten Dicken der Goldplättchen für die in der Stichprobe untersuchten CDMAM-Prüfkörper aufgelistet. Die einem untersuchten Prüfkörper zugehörigen Messwerte sind in jeweils einer Spalte aufgetragen.

				Golddicke / μm									
Mess- position	nomineller Durchmesser / mm	Dicke / μm	Lage (r)and, (m)ittig	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
M1	2,00	0,04	r	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04
	2,00	0,04	m	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04
	1,60	0,04	r	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
	1,60	0,04	m	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	2,00	0,05	r	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04
	2,00	0,05	m	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04
	1,60	0,05	r	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05
	1,60	0,05	m	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04
M2	2,00	0,06	r	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	2,00	0,06	m	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05
	1,60	0,06	r	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05
	1,60	0,06	m	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05
	2,00	0,08	r	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06
	2,00	0,08	m	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,08	0,07	0,07
	1,60	0,08	r	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	1,60	0,08	m	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,08	0,07	0,07
M3	1,00	0,08	r	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,08	0,08	0,07	0,07
	1,00	0,08	m	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	0,80	0,08	r	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,08	0,08	0,07	0,07
	0,80	0,08	m	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,08	0,08	0,07	0,07
	1,00	0,10	r	0,10	0,10	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09
	1,00	0,10	m	0,10	0,11	0,11	0,10	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,08
	0,80	0,10	r	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09
	0,80	0,10	m	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09
M4	0,50	0,13	r	0,14	0,14	0,14	0,14	0,12	0,13	0,12	0,12	0,13	0,12
	0,50	0,13	m	0,13	0,14	0,14	0,13	0,12	0,13	0,12	0,13	0,12	0,12
	0,40	0,13	r	0,13	0,14	0,13	0,14	0,13	0,12	0,13	0,12	0,12	0,11
	0,40	0,13	m	0,13	0,14	0,14	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,11
	0,50	0,16	r	0,16	0,17	0,17	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,15	0,14
	0,50	0,16	m	0,17	0,19	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,14
	0,40	0,16	r	0,16	0,17	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15	0,16	0,15	0,15
	0,40	0,16	m	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,16	0,16	0,16	0,14	0,14
M5	0,20	0,25	r	0,26	0,26	0,26	0,24	0,24	0,24	0,23	0,23	0,22	0,23
	0,20	0,25	m	0,26	0,26	0,27	0,24	0,24	0,25	0,24	0,24	0,22	0,23
	0,20	0,36	r	0,36	0,38	0,37	0,36	0,35	0,35	0,34	0,34	0,34	0,32
	0,20	0,36	m	0,37	0,39	0,37	0,35	0,35	0,36	0,34	0,34	0,35	0,32
M6	0,25	0,36	r	0,37	0,39	0,37	0,36	0,36	0,36	0,34	0,35	0,34	0,34
	0,25	0,36	m	0,37	0,38	0,36	0,36	0,35	0,36	0,34	0,34	0,33	0,34
M7	0,25	0,25	r	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,24	0,24	0,23	0,24
	0,25	0,25	m	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,24	0,23	0,23	0,23
M8	0,08	2,00	r	1,85	1,85	1,77	1,78	1,80	1,81	1,78	1,72	1,65	1,65
	0,08	2,00	m	1,87	1,88	1,83	1,82	1,82	1,81	1,80	1,70	1,64	1,65
M9	0,10	2,00	r	1,97	1,97	1,90	1,88	1,91	1,88	1,87	1,83	1,72	1,68
	0,10	2,00	m	1,91	1,89	1,84	1,86	1,87	1,83	1,84	1,78	1,76	1,69
M10	0,08	1,42	r	1,35	1,34	1,29	1,31	1,29	1,28	1,21	1,24	1,20	1,20
	0,08	1,42	m	1,36	1,34	1,31	1,30	1,28	1,28	1,25	1,23	1,19	1,15
M11	0,10	1,42	r	1,39	1,37	1,33	1,33	1,32	1,33	1,28	1,30	1,27	1,21
	0,10	1,42	m	1,40	1,36	1,37	1,34	1,32	1,32	1,28	1,31	1,28	1,17
M12	0,13	1,00	r	1,00	1,00	0,99	0,99	0,98	0,97	0,92	0,92	0,92	0,87
	0,13	1,00	m	1,00	0,99	0,96	0,97	0,95	0,96	0,92	0,93	0,92	0,86
M13	0,10	1,00	r	1,00	0,97	0,96	0,96	0,94	0,95	0,94	0,94	0,91	0,89
	0,10	1,00	m	0,99	0,96	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,95	0,89	0,89
M14	0,13	0,71	r	0,70	0,70	0,67	0,69	0,69	0,68	0,66	0,67	0,65	0,63
	0,13	0,71	m	0,70	0,71	0,71	0,70	0,68	0,69	0,66	0,66	0,66	0,63
M15	0,10	0,71	r	0,69	0,67	0,67	0,68	0,67	0,69	0,65	0,65	0,60	0,60
	0,10	0,71	m	0,68	0,66	0,67	0,67	0,67	0,69	0,66	0,66	0,62	0,63

Tabelle 11: Resultate der Messung der Materialdicke der Goldplättchen der im Rahmen der Stichprobe untersuchten CDMAM-Prüfkörper. Die Exemplare sind als C1 bis C10 nummeriert.

Die untersuchten Prüfkörperexemplare sind so sortiert, dass diejenigen mit den kleinsten Abweichungen zwischen den gemessenen Materialdicken und den jeweiligen Nominaldicken links und die mit den im Mittel größten Abweichungen rechts angeordnet sind. Es ist zu erkennen, dass nur bei wenigen Goldplättchen die gemessene Materialdicke größer als die Nominaldicke ist. Relevante Abweichungen der Messwerte treten nur in Richtung hin zu kleineren Materialdicken auf.

Bei Plättchendicken unterhalb von 100 nm weicht der Messwert sämtlicher untersuchter Plättchen in den Prüfkörpern der Stichprobe um nicht mehr als 10 nm von der nominellen Materialdicke ab. Im Rahmen der Messunsicherheit, s. Abschnitt 7.1, sind bei allen untersuchten Exemplaren des CDMAM-Prüfkörpers sämtliche Werte für die ermittelte Materialdicke mit der Nominaldicke im Einklang. Bei größeren Plättchendicken treten in zunehmendem Umfang größere Abweichungen auf. Ab einer nominellen Materialdicke von 1 µm gibt es in der Stichprobe einzelne Objekte bei denen die gemessene Materialdicke signifikant kleiner als der Nominalwert ist.

Die gemessene Materialdicke von Objekten nominell gleicher Dicke ist an den unterschiedlichen Messorten innerhalb eines Prüfkörpers bis zu einer nominellen Materialdicke von 360 nm sehr ähnlich. Bis zu dieser Materialdicke unterscheiden sich in den untersuchten Exemplaren des CDMAM-Prüfkörpers die Goldobjekte nominell gleicher Dicke innerhalb eines Prüfkörpers um nicht mehr als 20 nm. Dieses ermöglicht die gepoolte Betrachtung mehrerer Objekte gleicher Materialdicke innerhalb eines Exemplars. Hier zeigt sich, dass bei einer Nominaldicke von 360 nm die Plättchen in einigen untersuchten Exemplaren signifikant dünner als der Nominalwert sind.

Bei größeren Materialdicken und damit verbunden kleineren Plättchendurchmessern gibt es größere Unterschiede zwischen Objekten nominal gleicher Materialdicke. Teilweise ist der größere Unterschied auf die größere Messunsicherheit zurückzuführen. Es gibt jedoch auch Hinweise auf eine systematisch unterschiedliche Materialdicke bei nominell gleich dicken Objekten mit 80 µm bzw. 100 µm Durchmesser. In Tabelle 14 ist die über sämtliche untersuchten Exemplare des CDMAM gemittelte Materialdicke der Objekte mit einem nominellen Durchmesser von 100 µm denen mit 80 µm Durchmesser gegenübergestellt. Bei den Objekten beider untersuchter Materialdicken sind die Objekte mit 100 µm Durchmesser im Mittel, aber auch im Einzelfall für alle untersuchten Exemplare, dicker als entsprechende mit 80 µm Durchmesser.

Der Unterschied zwischen der gemessenen und der nominellen Materialdicke wächst dabei unabhängig zu größeren nominellen Materialdicken hin an. Bei den Objekten von nominell 2 µm Dicke ist die gemessene Dicke teilweise bis zu 17,5% kleiner als die Nominaldicke.

Die Herstellerfirma gibt an, dass die Prüfkörper mit einer Toleranz von 10% gefertigt werden. Dieser Toleranzbereich wird bei Nominaldicke größer oder gleich 1 µm bei einzelnen Goldplättchen in einigen Exemplaren der Stichprobe verlassen.

Nominelle Materialdicke / µm	Gemessene Golddicke / µm	
	Durchmesser: 100 µm	Durchmesser: 80 µm
1,42	1,31	1,27
2,00	1,84	1,77

Tabelle 12: Messwert der über sämtliche untersuchten Objekte sämtlicher untersuchten Exemplare des CDMAM-Prüfkörpers gemittelte Materialdicke für Objekte mit einer nominellen Materialdicke von 1,42 µm bzw. 2,00 µm

Relevanter als eine absolute Abweichung von dem nominellen Wert für die Golddicke ist der Golddickenunterschied von Exemplaren in Folge von Fertigungsschwankungen. Der Grund hierfür ist, dass bei der ursprünglichen Festlegung von Grenzwerten, die bei Prüfungen unter Verwendung des CDMAM einzuhalten sind, keine Kenntnis über eine mögliche, systematische Dickenabweichung bestand. Die Grenzwerte wurden damit ohne eine Kenntnis der exakten Dicken der Goldplättchen festgelegt. Die Werte beziehen sich auf die Nominaldicke der entsprechenden Objekte, sie sind damit faktisch als Angabe über das Objekt zu verstehen, welches bei den Tests erkannt werden muss, ohne dass dieses explizit mit einer Dicken- bzw. Kontrastauflösung verbunden ist. Eine systematische Abweichung hin zu dickeren oder dünneren Objekten hat daher auf den Prüfvorgang keinen Einfluss. Anders sieht es bei einer Exemplarstreuung aus, bei der einzelne Prüfkörper Goldplättchen enthalten, die relevant von der Dicke entsprechender Goldplättchen in anderen Exemplaren abweichen.

In Tabelle 13 sind einige statistische Größen der Verteilung der Messwerte der CDMAM-Prüfkörper der Stichprobe zusammengestellt. Die angegebenen Werte ergeben sich nach der Mittelung über alle untersuchten Objekte der Prüfkörper mit nominell gleicher Materialdicke. Bei der Mittelung wurden Objekte unterschiedlichen Durchmessers zusammengefasst. Bei einer nominellen Materialdicke von weniger als 100 nm ist die Spannbreite der Verteilung vernachlässigbar. Bei den Goldplättchen einer Nominaldicke von 2 µm differiert die mittlere Dicke zwischen dem CDMAM-Exemplar mit der größten mittleren Dicke der Plättchen und dem mit der kleinsten mittleren Dicke um 230 nm. Mittelwert und Median der Verteilung fallen bei allen Golddicken im wesentlichen zusammen.

Der Einfluss der im Rahmen dieses Vorhabens quantifizierten Fertigungsstreuung wurde qualitativ bereits seit einiger Zeit im Rahmen des organisierten, qualitätsgesicherten Mammographie-Screenings festgestellt. Hier sind Prüfkörper bekannt, bei denen relevant andere Resultate bei Prüfungen von Mammographie-Einrichtungen resultieren.

In Tabelle 14 sind die aus den Schwächungswerten der Goldplättchen der untersuchten Exemplare des Testeinsatzes AP nach der unter Abschnitt 6.2 beschriebenen Methode berechneten Dicken der Goldplättchen aufgelistet. Bei den Prüfkörpern, bei denen die Goldplättchen des Objektes mit 100 µm Durchmesser annähernd ein Plateau bilden, wurde die Golddicke aus dem Zentralbereich, ohne Berücksichtigung der Flanken, berechnet. Bei den Objekten, die eine deutlich asymmetrische Form aufweisen, s. Abbildung 66a), ist ein Wertepaar, Basisdicke am Beginn der Schrägen und Maximaldicke, angegeben.

Ohne Berücksichtigung der Objekte von 100 µm Durchmesser unterscheidet sich die Dicke der Plättchen gleicher Nominaldicke innerhalb eines Exemplars der Stichprobe um bis zu 30 nm. Der Unterschied innerhalb eines Exemplars ist damit größer als bei den Objekten entsprechender Materialdicke in den untersuchten Exemplaren des CDMAM-Prüfkörpers. Die mittlere Dicke der Goldplättchen weicht bei den untersuchten Exemplaren des Testeinsatzes AP im Unterschied zu den CDMAM-Prüfkörpern zu beiden Richtungen vom Nominalwert ab.

Nominaldicke / µm	0,04	0,05	0,06	0,08	0,1	0,13	0,16	0,25	0,36	0,71	1	1,42	2
Mittelwert der Dicke / µm	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,13	0,16	0,24	0,35	0,67	0,95	1,29	1,81
Median der Dicke / µm	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,13	0,16	0,25	0,36	0,67	0,96	1,31	1,84
Spannbreite der Verteilung / µm	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06	0,08	0,13	0,20	0,23
relative Spannbreite	20%	16%	18%	15%	18%	20%	19%	14%	16%	11%	13%	15%	12%

Tabelle 13: Statistische Größen zur Verteilung der Messwerte an den CDMAM-Prüfkörpern der Stichprobe. Für die einzelnen Nominaldicken sind der Mittelwert, Median sowie die Spannbreite der in der Stichprobe gemessenen Materialdicken angegeben. Die angegebenen Werte ergeben sich nach Mittelung über alle untersuchten Objekte der Prüfkörper mit nominell gleicher Materialdicke, auch wenn diese unterschiedliche Durchmesser haben.

nomineller Durchmesser / mm	Nominaldicke / μm	Lage (r)and, (m)ittig	gemessene Golddicke / μm								
			AP1	AP2	AP3	AP4	AP5	AP6	AP7	AP8	
[mm]	[μm]										
1,00	0,15	r	0,14	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,19	0,17	0,14
1,00	0,15	m	0,15	0,16	0,16	0,17	0,15	0,21	0,17	0,17	0,15
0,50	0,25	r	0,31	0,25	0,26	0,26	0,26	0,22	0,16	0,23	0,23
0,50	0,25	m	0,32	0,25	0,26	0,27	0,25	0,23	0,16	0,23	0,23
0,10	1,80	r	0,30 bis 0,95	0,29 bis 0,58	1,75	0,40 bis 1,50	0,45 bis 1,50	1,83	1,64	0,40 bis 1,50	1,50
0,10	1,80	m	0,30 bis 0,58	0,23 bis 0,35	1,73	0,40 bis 0,90	0,45 bis 0,85	1,86	1,64	0,40 bis 0,80	0,80
0,25	0,50	r	0,61	0,54	0,50	0,50	0,48	0,51	0,50	0,47	0,47
0,25	0,50	m	0,61	0,54	0,50	0,51	0,49	0,50	0,51	0,48	0,48
2,00	0,12	r	0,10	0,16	0,13	NA	0,12	0,16	0,11	0,12	0,12
2,00	0,12	n	0,13	0,13	0,13	NA	0,12	0,16	0,14	0,15	0,15

Tabelle 14: Resultate der Messung der Materialdicke der Goldplättchen der im Rahmen der Stichprobe untersuchten Exemplare des Testeinsatzes AP; Die Exemplare sind als AP1 bis AP8 nummeriert.

In Tabelle 14 sind einige statistische Größen der Verteilung der Messwerte der Exemplare des Testeinsatzes AP der Stichprobe zusammengestellt. Für die Objekte mit 100 μm Durchmesser wurden nur die drei Prüfkörper berücksichtigt, bei denen im Zentralbereich eine homogene Materialdickenverteilung vorlag und somit eine Dicke der Goldplättchen sinnvoll berechnet werden kann.

Es ist zu erkennen, dass die mittlere Materialdicke sämtlicher Goldplättchen jeweils einer Nominaldicke in der Stichprobe bei den Objekten bis zu 500 nm nomineller Materialdicke auf bis zu 20 nm mit dem Nominalwert übereinstimmt. Der Median und der Mittelwert der Verteilung liegen nahe beieinander.

Dabei ist bei den Goldplättchen mit einer Nominaldicke von bis zu 250 nm die Spannweite, d.h. die Fertigungsstreuung, um einen Faktor 2,3 bis 4 oberhalb der Fertigungsstreuung bei den untersuchten Exemplaren des CDMAM-Prüfkörpers. Die relative Spannweite der Verteilung beträgt für diese Objekte zwischen 43% und 65%. Für die Objekte mit einer Nominaldicke von 500 nm ist die relative Fertigungsstreuung aufgrund des höheren Nominalwertes kleiner. Jedoch ist die Fertigungsstreuung auch hier noch etwa um einen Faktor 2 oberhalb derer bei den CDMAM-Prüfkörpern.

Aufgrund der festgestellten, relevanten Mängel bei den Objekten eines nominellen Durchmessers von 100 μm sowie der sehr großen Streuung zwischen den Exemplaren ist eine Nutzung des Testeinsatzes AP innerhalb der Normung als kritisch zu bewerten.

8.2.2.2. Resultate der Objektgrößenmessung

Von vier Exemplaren des CDMAM-Prüfkörpers wurde die Größe aller untersuchten Goldplättchen bestimmt. In Tabelle 16 ist der Durchmesser der untersuchten Plättchen mit einer Nominaldicke bis zu 1 μm aufgelistet. In keinem Fall weicht der ermittelte Durchmesser um mehr als 10 μm vom Nominalwert ab. Die Werte sind im Rahmen der Messunsicherheit daher alle mit dem Nominalwert vereinbar. Die Form aller Plättchen ist gut kreisförmig.

Nominaldicke / μm	0,12	0,15	0,25	0,5	1,8
Mittelwert der Dicke / μm	0,13	0,16	0,25	0,52	1,74
Median der Dicke / μm	0,13	0,16	0,25	0,50	1,74
Spannweite der Verteilung / μm	0,06	0,07	0,16	0,14	0,22
relative Spannweite	45%	43%	65%	27%	13%

Tabelle 15: Statistische Größen zur Verteilung der Messwerte an den Testeinsatzes AP der Stichprobe. Für die einzelnen Nominaldicken sind der Mittelwert, Median sowie die Spannweite der in der Stichprobe gemessenen Materialdicken angegeben. Die angegebenen Werte ergeben sich nach Mittelung über alle untersuchten Objekte der Prüfkörper mit nominell gleicher Materialdicke.

			CDMAM Kennung	C1	C2	C3	C4
Pos.	Nom. Dicke [μm]	Nom. Durchmesser [mm]	Lage (r)and (m)ittig	Durchmesser [mm]	Durchmesser [mm]	Durchmesser [mm]	Durchmesser [mm]
M1	0,04	2,00	r	2,01	2,01	2,00	2,00
	0,04	2,00	m	1,99	2,00	2,00	2,00
	0,04	1,60	r	1,59	1,60	1,59	1,59
	0,04	1,60	m	1,59	1,61	1,60	1,59
	0,05	2,00	r	1,97	2,01	1,99	2,00
	0,05	2,00	m	1,98	2,00	1,99	2,00
	0,05	1,60	r	1,58	1,59	1,59	1,59
	0,05	1,60	m	1,58	1,60	1,59	1,59
M2	0,06	2,00	r	2,00	2,00	1,99	1,99
	0,06	2,00	m	1,98	2,00	1,98	1,99
	0,06	1,60	r	1,60	1,60	1,59	1,58
	0,06	1,60	m	1,60	1,61	1,59	1,59
	0,08	2,00	r	1,99	2,00	2,00	2,00
	0,08	2,00	m	1,98	1,99	1,99	1,99
	0,08	1,60	r	1,60	1,60	1,58	1,59
	0,08	1,60	m	1,59	1,60	1,58	1,59
M3	0,08	1,00	r	1,00	1,00	1,00	1,00
	0,08	1,00	m	0,99	1,00	1,00	1,00
	0,08	0,80	r	0,79	0,78	0,80	0,80
	0,08	0,80	m	0,80	0,79	0,80	0,79
	0,10	1,00	r	1,00	1,00	1,00	1,00
	0,10	1,00	m	1,00	1,00	1,00	1,00
	0,10	0,80	r	0,80	0,80	0,79	0,80
	0,10	0,80	m	0,79	0,80	0,80	0,80
M4	0,13	0,50	r	0,50	0,50	0,49	0,49
	0,13	0,50	m	0,51	0,51	0,50	0,49
	0,13	0,40	r	0,40	0,41	0,38	0,39
	0,13	0,40	m	0,39	0,41	0,38	0,40
	0,16	0,50	r	0,50	0,51	0,48	0,49
	0,16	0,50	m	0,50	0,51	0,49	0,49
	0,16	0,40	r	0,39	0,41	0,38	0,39
	0,16	0,40	m	0,39	0,41	0,38	0,39
M5	0,25	0,20	r	0,19	0,20	0,19	0,19
	0,25	0,20	m	0,19	0,20	0,19	0,20
	0,36	0,20	r	0,19	0,20	0,19	0,20
	0,36	0,20	m	0,19	0,20	0,19	0,20
M6	0,36	0,25	r	0,25	0,26	0,24	0,25
	0,36	0,25	m	0,25	0,26	0,24	0,25
M7	0,25	0,25	r	0,24	0,26	0,24	0,25
	0,25	0,25	m	0,24	0,26	0,24	0,25
M12	1,00	0,13	r	0,12	0,12	0,12	0,13
	1,00	0,13	m	0,12	0,13	0,12	0,13
M13	1,00	0,10	r	0,09	0,10	0,09	0,10
	1,00	0,10	m	0,09	0,11	0,09	0,10
M14	0,71	0,13	r	0,12	0,12	0,12	0,13
	0,71	0,13	m	0,12	0,12	0,12	0,13
M15	0,71	0,10	r	0,09	0,11	0,09	0,10
	0,71	0,10	m	0,09	0,11	0,09	0,10

Tabelle 16: Durchmesser der Goldplättchen mit einer Nominaldicke bis zu 1 μm ; Die untersuchten CDMAM-Prüfkörper sind als C1 bis C4 nummeriert

In Tabelle 17 ist für fünf Exemplare aus der Stichprobe der gemessene Durchmesser von Goldplättchen mit nominellen Dicken von 1,42 μm sowie 2 μm angegeben. Im Unterschied zu Tabelle 16 ist hier der vertikale sowie der horizontale Durchmesser angegeben. Der Grund hierfür die die bereits in Abschnitt 8.2.1 angesprochene, teilweise ausgeprägte, Abweichung

der Objektform von der Kreisform. Es ist zu erkennen, dass die Ausdehnung etlicher Goldplättchen deutlich von den Nominalwerten abweicht. Dabei sind einige der Goldplättchen unter Beibehaltung der Kreisform kleiner als nominell vorgegeben. Bei einigen Goldplättchen unterscheiden sich darüber hinaus der horizontale und der vertikale Durchmesser deutlich voneinander. In zahlreichen Fällen weicht die gemessene Fläche der Goldplättchen um 20% oder mehr von der Nominalgröße ab. Gemäß der vom Hersteller vorgegebenen Spezifikationen ist diese Abweichung nicht als Mangel der Produkte anzusehen. Gemäß der Spezifikation des Herstellers dürfen die Goldplättchen in ihrem Durchmesser um 10 µm von dem Nominalwert abweichen. Unter Einbeziehung der angenommenen Messunsicherheit weicht damit kein Goldplättchen mehr als zulässig vom Nominalwert ab. Dieses ändert gleichwohl nichts daran, dass bei einer deutlich von der Nominalgröße abweichenden Plättchengröße auch eine wesentlich geänderte Erkennbarkeit innerhalb des Kontrast-Detail-Tests zu erwarten ist. Dieses sollte sinnvollerweise bei den Grenzwerten für die Tests unter Nutzung des CDMAM-Prüfkörpers berücksichtigt werden.

In Abbildung 68 ist im linken Teil die Radiographie eines der Goldplättchen dargestellt, welches in der Größe und Form relevant vom Soll abweicht. Im rechten Teil der Abbildung ist die Materialdickenverteilung als Histogramm aufgetragen. Die Abbildung kann als repräsentativ angesehen werden. In der Abbildung ist die aus der Aufnahmeweise resultierende Darstellung eines Positivs und eines Negativs abgebildet. Es ist zu erkennen, dass die Materialdicke im Fußbereich des Goldplättchens deutlich größer ist als im oberen Bereich. Anhand der beobachteten Materialdickenverteilungen ist zu vermuten, dass bei den Plättchen mit nominellen Dicken von mehr als 1 µm die Form und Größe zum Beginn der Fertigung regulär ist. Erst bei größerer Dicke kommt es, möglicherweise durch ein Anhaften des Materials an der Maske für die Fertigung, zu einer Verjüngung der Objekte nach oben hin. Die Materialablagerung im inneren Bereich der Plättchen bleibt davon unbeeinflusst. Daher wird das Plateau der Materialdicke im Zentralbereich nicht gestört auch wenn die Gesamtform beeinflusst ist.

				CDMAM Kennung	C1		C2		C3	
Position	nom. Dicke / µm	nom. Durchmesser / mm	Lage	Durchmesser / mm	rel. Fläche	Durchmesser / mm	rel. Fläche	Durchmesser / mm	rel. Fläche	
M8	2,00	0,08	r	H0,060;V0,070	0,66	H0,090;V0,065	0,91	H0,070;V0,070	0,77	
	2,00	0,08	m	H0,065;V0,070	0,66	H0,090;V0,065	0,91	H0,065;V0,070	0,71	
M9	2,00	0,10	r	H0,085;V0,090	0,77	H0,105;V0,105	1,10	H0,085;V0,090	0,77	
	2,00	0,10	m	H0,085;V0,090	0,77	H0,105;V0,100	1,10	H0,085;V0,090	0,77	
M10	1,42	0,08	r	H0,065;V0,070	0,66	H0,085;V0,070	0,93	H0,065;V0,070	0,66	
	1,42	0,08	m	H0,065;V0,070	0,66	H0,085;V0,065	0,86	H0,065;V0,070	0,66	
M11	1,42	0,10	r	H0,085;V0,090	0,77	H0,105;V0,100	1,05	H0,090;V0,090	0,81	
	1,42	0,10	m	H0,090;V0,090	0,81	H0,105;V0,105	1,10	H0,085;V0,090	0,77	
				CDMAM Kennung	C4		C5			
Position	nom. Dicke / µm	nom. Durchmesser / mm	Lage	Durchmesser / mm	rel. Fläche	Durchmesser / mm	rel. Fläche			
M8	2,00	0,08	r	H0,070;V0,080	0,88	H0,070;V0,080	0,88			
	2,00	0,08	m	H0,070;V0,080	0,88	H0,070;V0,080	0,88			
M9	2,00	0,10	r	H0,095;V0,105	1,00	H0,090;V0,100	0,90			
	2,00	0,10	m	H0,095;V0,105	1,00	H0,090;V0,100	0,90			
M10	1,42	0,08	r	H0,075;V0,080	0,94	H0,070;V0,080	0,88			
	1,42	0,08	m	H0,075;V0,080	0,94	H0,070;V0,080	0,88			
M11	1,42	0,10	r	H0,095;V0,100	0,95	H0,090;V0,095	0,86			
	1,42	0,10	m	H0,095;V0,100	0,95	H0,090;V0,095	0,86			

Tabelle 17: Durchmesser von Goldplättchen mit einer Nominaldicke von mehr als 1 µm. Es sind für jedes Objekt jeweils der Durchmesser entlang der beiden Hauptachsen sowie die relative Fläche des Objektes im Verhältnis zur Größe eines zirkulären Objektes mit dem Nominaldurchmesser angegeben. Die untersuchten CDMAM-Prüfkörper sind als C1 bis C4 nummeriert.

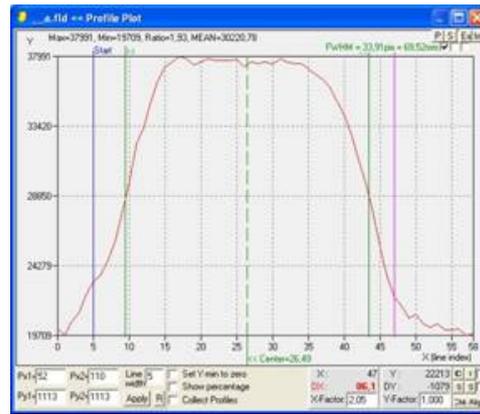
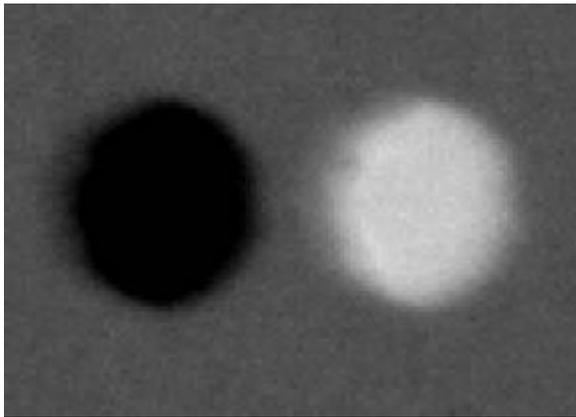


Abbildung 68: links: Abbildung des positiven und negativen Abbilds eines Goldplättchens, welches aus der dynamischen Aufnahmetechnik resultiert; rechts: Histogramm der Dickenverteilung des Goldplättchens. Es ist zu erkennen, dass im Fußbereich die Form und Größe eine andere ist als im oberen Bereich des Plättchens

Bei den Goldplättchen der Exemplare des Testeinsatzes AP ist die Golddickenverteilung vielfach so inhomogen, dass auf eine systematische Bestimmung der Plättchengrößen verzichtet wurde. Bei den Plättchen, welche im Zentralbereich ein Plateau haben, wäre eine derartige Größenbestimmung denkbar. Doch auch hier ist anhand der Abbildungen zu erkennen, dass die Kanten vielfach nicht steil sind. Dieses hat zur Folge, dass die reale Fläche mit der maximalen, in der Analyse in Tabelle 20 angegebenen, Golddicke im Zentralbereich deutlich kleiner als die nominelle Plättchengröße ist. In Abbildung 69 ist dieses anhand zweier Beispiele visualisiert. Neben den Durchstrahlungsbildern sind in der Abbildung Histogramme überlagert, in denen die Materialdickenverteilung innerhalb der rot markierten Bereiche aufgetragen ist.

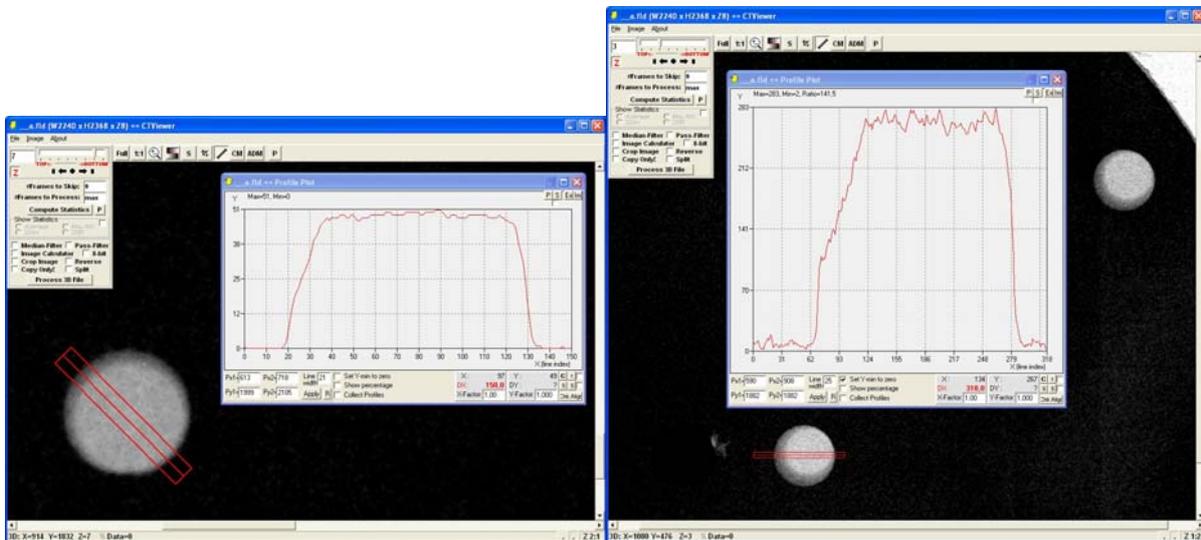


Abbildung 69: Beispiele der Golddickenverteilung in Objekten der Testeinsätze AP; neben den Durchstrahlungsbildern sind in den Abbildungen Histogramme überlagert, in welchen die Materialdickenverteilung in den rot markierten Bereichen angegeben ist. In den dargestellten Beispielen hat das Goldplättchen im Zentralbereich eine in etwa konstante Golddicke. Im Randbereich ist jedoch eine deutliche Abweichung von einer idealen Zylinderform zu erkennen

8.3. Die Strukturkörper der Normen DIN 6868-13 und DIN 6868-4 (inkl. DSA-Prüfkörper) sowie die zugehörigen Schwächungskörper

Im Folgenden werden die Resultate der Stichprobenuntersuchung an Struktur- und Schwächungskörpern vorgestellt, welche in den Normen DIN 6868-4 (inkl. DSA-Prüfkörper) sowie DIN 6868-13 spezifiziert sind. Es wird dabei jeweils die Gesamtzahl untersuchter Prüfkörper sowie die Aufteilung der untersuchten Prüfkörper auf die unterschiedlichen auf dem deutschen Markt vertretenen Hersteller angegeben. Um eine möglichst weitgehende Anonymität der Hersteller zu gewährleisten, entspricht die bei den Resultaten verwendete Nummerierung der Hersteller durch römische Zahlen nicht unbedingt der Reihenfolge ihrer Nennung.

Bei den quantitativen Resultaten werden, soweit nicht besondere Gründe dem entgegenstehen, jeweils der Mittelwert sowie Minimum und Maximum der in der Stichprobe von einem Hersteller untersuchten Exemplare aufgetragen. Zudem werden die absolute und relative Spanne, berechnet gemäß $(\text{Maximum}-\text{Minimum}) / \text{Mittelwert}$, für die in der Stichprobe enthaltenen Exemplare angegeben.

In den Tabellen sind gemäß einheitlichem Schema teilweise Felder farbkodiert kenntlich gemacht. Die Werte in gelb hinterlegten Feldern weichen um mehr als 10% aber weniger als 20% vom Nominalwert ab, die Werte in den rot hinterlegten Feldern weichen um mehr als 20% vom Nominalwert ab.

8.3.1. Resultate zur Prüfung des Strukturkörpers nach DIN 6868-4

Es wurden insgesamt 27 Exemplare des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 untersucht. Die Stichprobe beinhaltet Prüfkörper der Hersteller iba dosimetry, pehamed, PTW und quart. Von einem Hersteller wurden 12 Exemplare des Prüfkörpers von einem 9 Exemplare sowie 4 bzw. 2 Exemplare der beiden anderen Hersteller untersucht. Bei den Herstellern, von denen vier bzw. zwei Exemplare untersucht wurden, war es nicht möglich, eine entsprechend größere Anzahl zu beschaffen. Die Resultate der Prüfkörper der Firma von welcher nur zwei Exemplare in der Stichprobe enthalten waren, sind jeweils als „Hersteller IV“ in den folgenden Tabellen beinhaltet. Durch den geringen Stichprobenumfang sind die statistischen Werte bei diesem Hersteller, insbesondere die Spanne der Daten, mit Bedacht wahrzunehmen.

Die Untersuchung der Bleistrichraster erfolgte abweichend von den sonstigen Untersuchungen an insgesamt 10 Exemplaren der Prüfkörper der Hersteller PTW und iba dosimetry. Der Grund für die abweichende Herangehensweise ist der, dass die Bleistrichraster bei allen auf dem deutschen Markt vertretenen Herstellern Zukaufprodukte sind. Sie werden alle von dem gleichen Lieferanten bezogen. Es geht in diesem Fall somit nicht um die konkrete Prüfung von Prüfkörpern eines Herstellers sondern um die Prüfung der Bleistrichraster, welche herstellerunabhängig sein sollten.

8.3.1.1. Qualitative Resultate

In Abbildung 70 sind exemplarisch einige relevante qualitative Auffälligkeiten in Radiographien von Exemplaren des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 dargestellt.

In Abbildung 70 a) sind exemplarisch Ausschnitte der Kupfer-Treppe des Prüfkörpers dargestellt. Es sind zwei Arten von Artefakten zu erkennen:

1. Die Kupfertreppe wird durch Materialabtragung aus einem Kupferblock hergestellt. Bei einigen Exemplaren bzw. Herstellern treten die Frässpuren deutlich durch unterschiedliche Signalwerte in den Bildern hervor.
2. Auf zweien der dargestellten Aufnahmen ist deutlich eine relevante Inhomogenität der Stufendicke zu erkennen. Dieses Artefakt wurde bei einer großen Anzahl von Prüfkörpern, insbesondere bei den Stufen mit dünnerer Materialdicke, beobachtet.

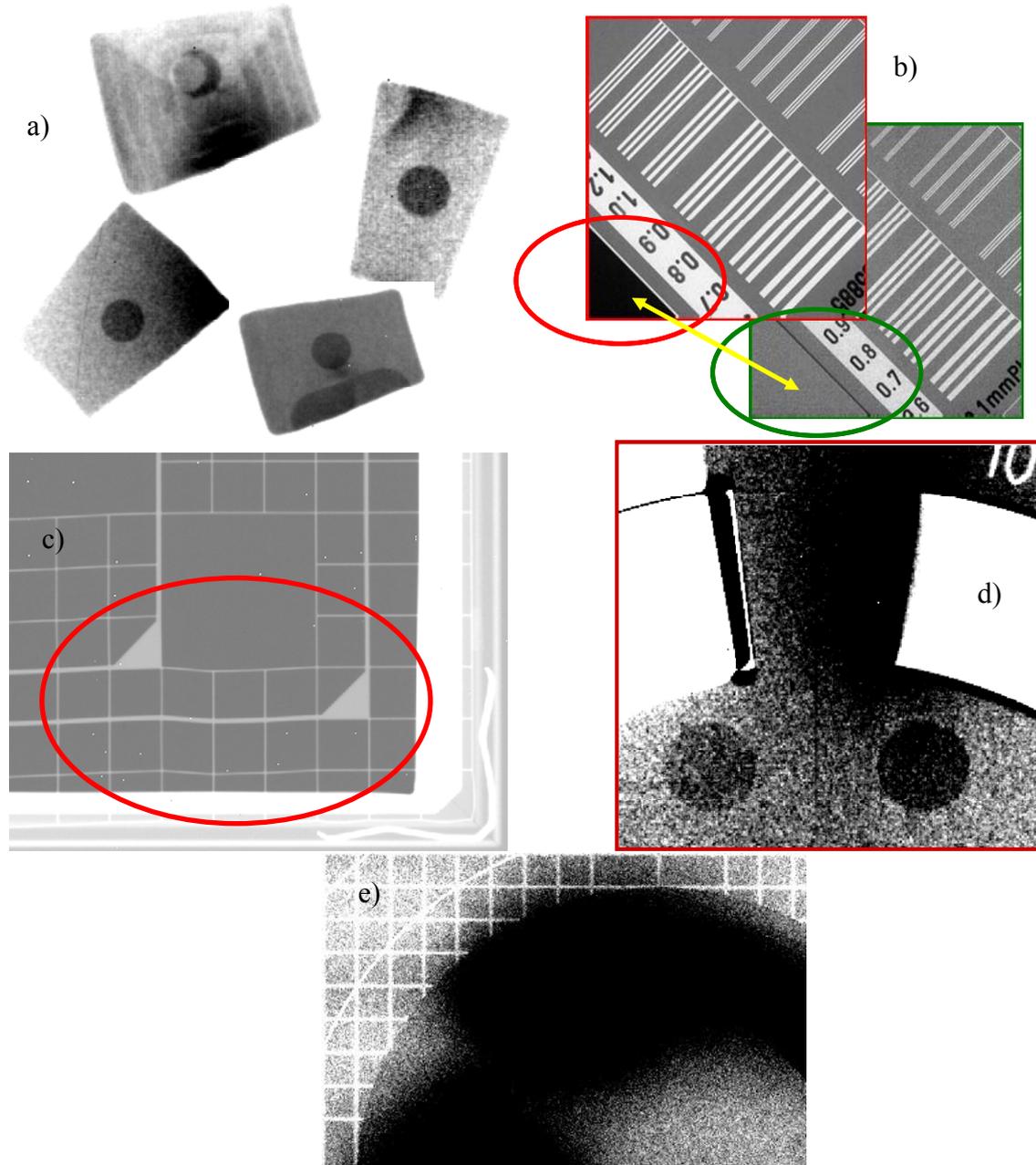


Abbildung 70: Abbildung relevanter qualitativer Auffälligkeiten in Radiographien von Exemplaren des Prüfkörpers nach DIN 6868-4; a) Fräsartefakte in den Stufen der Kupfer-Dynamiktreppe sowie Hinweise auf deutliche Dickenunterschiede innerhalb von Stufen, b) Hinweis auf relevante Dickenunterschiede in der Tiefe der Fräsung für das Bleistrichraster, c) Ausgeprägte Nichtlinearität der Rasterlinien, d) – e) Ausgeprägte Einstreuartefakte in den Bereich der Niedrigkontrastobjekte

Beide Artefakte haben zur Folge, dass der Nutzer der Prüfkörper nicht eine homogene Stufe abgebildet bekommt, sondern einen Signalwertbereich. Der visuelle Eindruck weicht dabei erwartungsgemäß von dem eines Objektes mit homogener Materialdicke ab. Bei den weiter unten zusammengefassten, quantitativen Resultaten wurde die Materialdicke in einem zentralen Bereich der Stufen, s. Abbildung 99, ausgewertet. Die angegebenen Materialdicken entsprechen somit dem Mittelwert aus einem für den praktischen Einsatz relevanten Bereich der Stufen. Es ist jedoch relevant zu wissen, dass es durchaus Bereiche der Stufen gibt, die ggf. auch wesentlich von der angegebenen Materialdicke abweichen.

In Abbildung 70 b) ist ein Artefakt zu erkennen, welches auf eine fehlerhafte Fräsungstiefe im Bereich des Bleistrichrasters hinweist. Im Normalfall, durch das grüne Oval gekennzeichnet, sollten die Signalwerte im Bereich des Rasters und daneben in etwa gleich groß sein. Im roten Bereich ist dieses offensichtlich nicht der Fall.

In Abbildung 70 c) ist eine ausgeprägte Nichtlinearität in den Rasterlinien zu erkennen.

In den Abbildungen Abbildung 70 d) – e) sind wesentliche Artefakte durch die Einstreuung von Strahlung aus Bereichen schwächerer Absorption in solche stärkerer Absorption zu erkennen. Diese Artefakte sind systemischer Natur und gehen auf die aktuelle Spezifikation der Prüfkörper in der zugehörigen Norm zurück. Sie sind nicht einem Hersteller anzulasten.

8.3.1.2. Prüfung der Niedrigkontrastbohrungen im Innenbereich

In Tabelle 18 sind die Resultate der Stichprobenprüfung der Niedrigkontrastbohrungen im Innenbereich des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 dargestellt.

Die Mittelwerte der Bohrungen in den untersuchten Prüfkörpern der Hersteller I, II weichen um bis zu 50 µm vom Nominalwert ab. Bei dem Hersteller IV weicht der Mittelwert der Stichprobe bei den Bohrungen bis zu 1 mm PMMA um bis zu 90 µm, bei den Bohrungstiefen darüber um bis zu 200 µm ab. Bei dem Hersteller III weicht der Mittelwert bei allen Bohrungstiefen um mindestens 150 µm, bei einigen bis zu mehr als 300 µm vom Nominalwert ab. Insbesondere gibt es bei den Herstellern II und III einzelne Prüfkörper, welche um mehr als 300 µm vom Nominalwert abweichen.

Entsprechend der theoretischen Abschätzungen, s. Abschnitt 5.1, sind Bohrungen, die sich in ihrer Tiefe um weniger als 200 µm unterscheiden, bei Konstanzprüfungsaufnahmen an klinisch verwendeten Röntgenanlagen kaum unterscheidbar, selbst wenn die aktuell bestehende Einstrahlung, s. Abbildung 47, nicht bestünde. Die Abweichungen von 300 µm und mehr sollten hingegen zu wahrnehmbaren Unterschieden in den Aufnahmen führen. Zudem ist auffallend, dass bei allen Herstellern mit Ausnahme des Herstellers I insbesondere im Bereich von Bohrungen kleiner Tiefe bei einigen Exemplaren Objekte um mehr als 20% vom Nominalwert abweichen. Bei dem Hersteller IV sind die Bohrungen dabei tendenziell tiefer als nominell gefordert. Die Objekte sind damit leichter erkennbar. Bei dem Hersteller II sind die Bohrungen tendenziell weniger tief. Die Objekte sind damit weniger gut detektierbar.

Die Bohrungstiefen bei den Prüfkörpern des Herstellers III scheinen im Mittel systematisch um 200 µm bis 300 µm größer als normativ festgelegt zu sein. Die Abstufung zwischen den einzelnen Objekten bleibt dabei im Wesentlichen erhalten. Der Einsatz zur relativen Beurteilung erscheint daher mit diesen Prüfkörpern unverändert möglich. Absolut werden jedoch andere Kontraste detektiert als bei den anderen Prüfkörpern. Durch die wesentlich tieferen Bohrungen sollten im Mittel mehr Objekte erkennbar sein als bei Prüfungen unter Verwendung der Prüfkörper anderer Hersteller.

		Materialdicke / mmPMMA							
nominelle Materialdicke		4	3,4	2,4	1,7	1,2	0,8	0,6	0,4
Hersteller I	Mittelwert	4,01	3,41	2,44	1,72	1,16	0,80	0,59	0,41
	Minimum	3,89	3,36	2,39	1,60	1,07	0,69	0,52	0,34
	Maximum	4,11	3,52	2,50	1,85	1,31	0,88	0,69	0,47
	Spanne	0,22	0,16	0,11	0,25	0,24	0,18	0,16	0,13
	rel. Spanne	5%	5%	5%	15%	20%	23%	28%	31%
Hersteller II	Mittelwert	4,03	3,42	2,41	1,69	1,16	0,85	0,61	0,38
	Minimum	3,94	3,35	2,34	1,62	1,04	0,81	0,55	0,17
	Maximum	4,09	3,52	2,52	1,75	1,26	0,88	0,68	0,43
	Spanne	0,14	0,17	0,18	0,13	0,22	0,08	0,13	0,26
	rel. Spanne	4%	5%	8%	8%	19%	9%	22%	70%
Hersteller III	Mittelwert	4,30	3,62	2,66	1,85	1,40	1,06	0,84	0,72
	Minimum	4,16	3,51	2,57	1,76	1,36	1,01	0,64	0,54
	Maximum	4,38	3,73	2,76	1,91	1,45	1,16	0,94	0,80
	Spanne	0,22	0,22	0,18	0,15	0,08	0,15	0,30	0,26
	rel. Spanne	5%	6%	7%	8%	6%	14%	36%	36%
Hersteller IV	Mittelwert	3,80	3,28	2,43	1,73	1,29	0,82	0,69	0,47
	Minimum	3,79	3,27	2,42	1,67	1,25	0,82	0,66	0,42
	Maximum	3,81	3,29	2,43	1,80	1,34	0,83	0,72	0,52
	Spanne	0,02	0,02	0,01	0,13	0,09	0,01	0,06	0,10
	rel. Spanne	1%	1%	0%	7%	7%	1%	9%	21%

Tabelle 18: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung der Niedrigkontrastbohrungen im Innenbereich des Prüfkörpers nach DIN 6868-4; die Werte in gelb hinterlegten Feldern weichen um mehr als 10% aber weniger als 20% vom Nominalwert ab, die Werte in den rot hinterlegten Feldern weichen um mehr als 20% vom Nominalwert ab. Zudem ist die absolute und relative Spanne der Werte angegeben.

In DIN 6868-4 ist für alle Bohrungstiefen einheitlich eine zulässige Fertigungstoleranz von 100 µm festgelegt. Bezogen auf diese Anforderung sind die Prüfkörper des Herstellers I unter Berücksichtigung der bestehenden Messunsicherheit als „normkonform“ zu bezeichnen. Bei den Herstellern II bis IV gibt es Exemplare die in einigen Bohrungstiefen die zulässige Toleranz zum Nominalwert überschreiten.

8.3.1.3. Prüfung der Niedrigkontrastbohrungen im Bereich der Kupfertreppe

In Tabelle 19 sind die Resultate der Stichprobenprüfung der Niedrigkontrastbohrungen im Bereich der Kupfertreppe des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 dargestellt.

Um eine ausreichende Anonymität der Hersteller zu wahren, sind die Resultate der einzelnen Prüfkörper dargestellt und nicht herstellerweise gruppiert. Aufgetragen ist jeweils der Mittelwert sowie das Minimum und Maximum aller 16 Bohrungen eines Prüfkörpers.

Die nominelle Tiefe der Bohrungen beträgt 2,5 mm. Die über sämtliche 16 Bohrungen innerhalb eines Prüfkörpers gemittelte Bohrungstiefe liegt bei den untersuchten Exemplaren zwischen 2,29 mm und 2,57 mm. Die mittlere Tiefe ist damit vor dem Hintergrund des Einsatzzwecks der Komponenten als im Einklang mit den Anforderungen anzusehen.

Es ist gleichwohl, insbesondere bei den drei letzten Exemplaren in der Liste, eine teilweise auffallend große Streuung innerhalb einzelner Exemplare der Prüfkörper festzustellen. Es ist zu vermuten, dass die Streuung nicht in allen Fällen auf unterschiedliche Bohrungstiefen zurückzuführen ist, sondern sich aus der angewandten Messmethode ergibt. Gemäß der angewandten Messmethode wird aus dem Kontrast eines Objektes im Verhältnis zu seiner Umgebung auf die Dicke, das heißt hier die Bohrungstiefe, geschlossen. Für den Fall, dass die Umgebung nicht mehr repräsentativ für das Signal ohne das entsprechende Objekt anzusehen ist, wird mit dieser Methode nicht die metrologisch korrekte Materialdicke bestimmt. Für den Anwender, welcher bei der Anwendung des Prüfkörpers nicht an konkreten Materialstärken sondern an Kontrasten interessiert ist, hat dieses jedoch keine Bedeutung. Der Anwender beobachtet in der Röntgenabbildung des Prüfkörpers einen Kontrast, der einem Objekt einer

Dicke entspricht, die innerhalb des Vorhabens ermittelt wird. In einigen Extremfällen ergab sich durch eine auffallend starke Inhomogenität der Materialdicke der Kupferstufen ein Kontrast, durch welchen eine Bohrung in Radiographien sogar als ein Bereich erscheint, welcher im Vergleich zur Umgebung scheinbar dicker ist.

Der Grund für die wesentliche Abweichung der gemessenen Materialdicke einiger Bohrungen vom Nominalwert ist in Abbildung 71 exemplarisch an einigen extremen Beispielen verdeutlicht.

Es ist zu erkennen, dass aufgrund einer ausgeprägten Inhomogenität der Kupferstufen die Objekte deutlich verfälscht wahrgenommen werden. Bei den beiden Objekten mit berechnet negativer Bohrungstiefe ist der anhand der Durchstrahlungsbilder berechnete Wert der Materialdicke neben der Darstellung angegeben. Es ist offensichtlich, dass derartige Objekte für den Anwender nicht den erwarteten Kontrast gegenüber der Umgebung liefern.

Mittelwert	Minimum	Maximum	Spanne
2,41	2,15	2,70	0,55
2,41	2,15	2,73	0,58
2,39	2,25	2,58	0,33
2,50	2,23	2,82	0,59
2,50	2,33	2,67	0,35
2,49	2,23	2,73	0,50
2,50	2,22	2,67	0,45
2,49	2,23	2,63	0,40
2,57	2,42	2,74	0,32
2,55	2,44	2,69	0,25
2,55	2,36	2,72	0,35
2,49	2,34	2,63	0,29
2,33	2,07	2,67	0,60
2,29	2,00	2,48	0,48
2,36	2,12	2,69	0,57
2,29	2,11	2,47	0,36
2,48	2,32	2,75	0,43
2,46	2,32	2,62	0,30
2,45	2,31	2,61	0,30
2,49	2,25	2,85	0,60
2,42	2,23	2,63	0,39
2,52	2,19	2,97	0,78
2,52	2,15	3,00	0,85
2,57	2,19	2,95	0,76
2,54	-0,57	3,56	4,14
2,40	-1,27	3,44	4,70
2,56	1,13	3,30	2,16

Tabelle 19: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung der Niedrigkontrastbohrungen im Bereich der Kupferstufen des Prüfkörpers nach DIN 6868-4. Die Resultate sind in dieser Tabelle nicht aggregiert sondern separat für jeden untersuchten Prüfkörper aufgetragen.

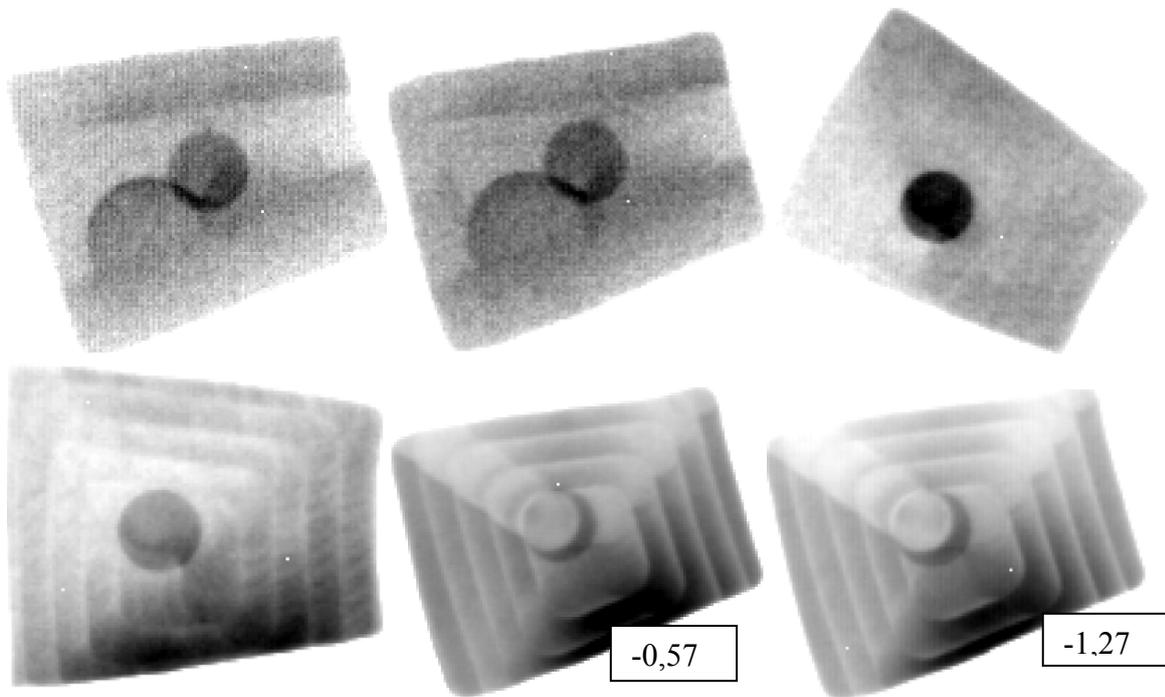


Abbildung 71: Beispiele von Niedrigkontrastbohrungen im Bereich der Kupfer-Dynamiktreppe von Exemplaren des Prüfkörpers nach DIN 6868-4, bei denen die Erkennbarkeit und damit die scheinbare Bohrungstiefe durch eine ausgeprägte Inhomogenität in der Materialdicke der Umgebung deutlich verändert wird.

8.3.1.4. Prüfung der Kupfer-Dynamiktreppe

In Tabelle 20 sind die Resultate der Stichprobenprüfung der Kupfer-Dynamiktreppe des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 dargestellt.

Die ermittelten Materialdicken entsprechen dabei der mittleren Dicke im Zentralteil der Kupferstufen, s. Abbildung 99. Aufgrund der bereits angesprochenen, teilweise großen Dickenunterschiede innerhalb der Stufen kann bei einigen Exemplaren die lokale Materialdicke, insbesondere im Randbereich, von diesem Mittelwert wesentlich verschieden sein.

Bei den Herstellern I bis III stimmen die Mittelwerte der Stufen mit einer nominellen Materialdicke zwischen 540 μm und 2,96 mm mit einer Abweichung von weniger als 2,5% mit dem Nominalwert überein. Die Abweichung liegt dabei zwischen etwa 15 μm bei 540 μm nomineller Stufendicke und etwa 70 μm bei 2,96 mm Stufendicke. Im Bereich der beiden dünnsten Stufen nimmt bei in etwa gleich bleibender mittlerer Abweichung die relative Abweichung zu. Im Bereich der beiden Stufen mit der größten Materialdicke weicht die mittlere Dicke bei den Exemplaren des Herstellers I um bis zu 175 μm oder 5% vom Nominalwert ab. Es gibt jedoch bei allen drei Herstellern einzelne Exemplare bei denen die Abweichung wesentlich größer ist. Die quantitativen Resultate sind hier konsistent mit den qualitativen Beobachtungen zu den Prüfkörpern.

Bei den Exemplaren des Herstellers IV sind die Stufen mit einer Nominaldicke zwischen 180 μm und 540 μm im Mittel systematisch um 40 μm bis 70 μm zu dick, die Stufen mit einer Nominaldicke zwischen 950 μm und 3,84 mm systematisch um 40 μm bis zu 790 μm zu dünn. Derart große Abweichungen vom Nominalwert führen zu Radiographien, welche eine deutlich andere Grauwertstufung zeigen als sie bei der Verwendung der Prüfkörper anderer Hersteller resultiert. Der mit Hilfe dieser Prüfkörper überprüfte Dynamikbereich ist wesentlich kleiner als bei der Verwendung der Prüfkörper anderer Hersteller.

In DIN 6868-4 ist für die Kupferstufen mit Materialdicken von bis zu 740 μm eine Fertigungstoleranz von 20 μm gestattet, bis zu 1,38 mm eine Fertigungstoleranz von bis zu 30 μm . Bei den Stufen größerer Materialdicke beträgt die zulässige Fertigungstoleranz einheitlich 50 μm . Bei dem Hersteller IV besteht die oben bereits angesprochene wesentliche Abweichung und damit ein deutliches Verlassen der zulässigen Fertigungstoleranzen. Die untersuchten Exemplare des Prüfkörpers erfüllen die Normanforderungen nicht. Aber auch die Exemplare der Hersteller I und II liegen bei den Objekten von 2,7 mm Dicke und darüber teilweise außerhalb der in der Norm gegebenen Spezifikation.

Formal sind damit einige der untersuchten Exemplare außerhalb der aktuell zulässigen Spezifikation nach DIN 6868-4. Bei der Bewertung der Absolutabweichung der Stufendicken von den zugehörigen Nominaldicken bleibt jedoch zu bedenken, dass es sich bei der Prüfung um eine visuelle und relative Prüfung handelt.

Die Spanne der Materialdicke zwischen den Exemplaren eines Herstellers ist deutlich unterschiedlich. Bei dem Hersteller III ist bei nahezu allen Stufendicken die Spanne kleiner als 50 μm . Bei den Herstellern I und II ist die Spanne bei nominellen Stufendicken bis zu 1,38 mm ebenso bei maximal etwa 50 μm , bei den Kupferstufen mit nominellen Materialdicken von 1,73 mm oder mehr wird die Spanne hingegen wesentlich größer. Hier gibt es z.B. bei dem Hersteller II Exemplare, die sich in der dicksten Stufe um 200 μm unterscheiden.

In Tabelle 21 sind die Resultate der Stichprobenprüfung der Kupfer-Dynamiktreppe des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 für das Subkollektiv dargestellt, welches dem Projektteam von den Herstellern aus Lagerbeständen direkt zur Verfügung gestellt wurde. Die Mittelwerte der Materialdicken an den einzelnen Stufen sind im Vergleich zur gesamten Stichprobe wenig geändert. Es ist jedoch auffallend, dass die Streuung zwischen den Exemplaren eines einzelnen Herstellers jeweils wesentlich kleiner ist als bei der Gesamtstichprobe. Vor allem bei dem Hersteller II ist die Variation der zur Verfügung gestellten und damit wahrscheinlich in kurzem Zeitraum gefertigten Exemplare deutlich kleiner als bei der Betrachtung über einen größeren Zeitraum.

Bei den direkt vom Hersteller zur Verfügung gestellten Exemplaren sind sämtliche Prüfkörper des Herstellers II als normkonform zu bezeichnen. Bei dem Hersteller III gibt es bei einem Exemplar eine relevante Abweichung im Bereich kleiner Materialdicken, bei dem Hersteller I eine Abweichung im Bereich großer Materialdicken.

nominelle Materialdicke		Materialdicke / mmCu							
		1,384	1,16	0,95	0,74	0,54	0,36	0,18	
Hersteller I	Mittelwert	1,387	1,157	0,935	0,750	0,553	0,374	0,191	
	Minimum	1,355	1,139	0,914	0,729	0,536	0,347	0,166	
	Maximum	1,418	1,170	0,958	0,765	0,574	0,392	0,218	
	Spanne	0,063	0,030	0,044	0,036	0,038	0,044	0,052	
	rel. Spanne	5%	3%	5%	5%	7%	12%	27%	
Hersteller II	Mittelwert	1,393	1,161	0,946	0,747	0,546	0,363	0,171	
	Minimum	1,375	1,143	0,932	0,731	0,532	0,353	0,155	
	Maximum	1,410	1,192	0,957	0,784	0,560	0,377	0,186	
	Spanne	0,035	0,049	0,024	0,053	0,028	0,024	0,032	
	rel. Spanne	3%	4%	3%	7%	5%	7%	18%	
Hersteller III	Mittelwert	1,383	1,145	0,935	0,736	0,532	0,359	0,158	
	Minimum	1,359	1,121	0,915	0,719	0,510	0,334	0,126	
	Maximum	1,409	1,170	0,955	0,753	0,558	0,389	0,196	
	Spanne	0,049	0,049	0,040	0,034	0,048	0,055	0,070	
	rel. Spanne	4%	4%	4%	5%	9%	15%	44%	
Hersteller IV	Mittelwert	1,291	1,097	0,910	0,740	0,581	0,418	0,249	
	Minimum	1,271	1,070	0,881	0,714	0,566	0,405	0,238	
	Maximum	1,311	1,125	0,939	0,766	0,596	0,430	0,261	
	Spanne	0,039	0,055	0,059	0,051	0,031	0,025	0,023	
	rel. Spanne	3%	5%	6%	7%	5%	6%	9%	
nominelle Materialdicke		Materialdicke / mmCu							
		3,48	3,22	2,96	2,7	2,45	2,21	1,96	1,73
Hersteller I	Mittelwert	3,304	3,094	2,888	2,639	2,415	2,180	1,947	1,736
	Minimum	3,242	3,022	2,782	2,540	2,341	2,106	1,885	1,673
	Maximum	3,403	3,196	2,988	2,720	2,535	2,248	2,012	1,793
	Spanne	0,162	0,174	0,206	0,179	0,194	0,142	0,127	0,120
	rel. Spanne	5%	6%	7%	7%	8%	7%	7%	7%
Hersteller II	Mittelwert	3,437	3,187	2,951	2,684	2,436	2,196	1,960	1,738
	Minimum	3,321	3,120	2,877	2,634	2,392	2,159	1,924	1,700
	Maximum	3,521	3,214	2,995	2,703	2,466	2,209	1,986	1,756
	Spanne	0,200	0,094	0,118	0,070	0,074	0,050	0,063	0,056
	rel. Spanne	6%	3%	4%	3%	3%	2%	3%	3%
Hersteller III	Mittelwert	3,430	3,229	2,932	2,678	2,409	2,183	1,932	1,706
	Minimum	3,408	3,193	2,921	2,653	2,380	2,149	1,913	1,678
	Maximum	3,454	3,291	2,950	2,721	2,424	2,203	1,947	1,720
	Spanne	0,047	0,098	0,029	0,067	0,044	0,055	0,034	0,042
	rel. Spanne	1%	3%	1%	3%	2%	3%	2%	2%
Hersteller IV	Mittelwert	2,689	2,532	2,338	2,142	1,970	1,848	1,726	1,588
	Minimum	2,655	2,498	2,267	2,043	1,875	1,799	1,704	1,574
	Maximum	2,723	2,566	2,410	2,241	2,066	1,898	1,748	1,602
	Spanne	0,069	0,069	0,143	0,199	0,191	0,099	0,044	0,028
	rel. Spanne	3%	3%	6%	9%	10%	5%	3%	2%

Tabelle 20: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung der Kupfer-Dynamiktreppe des Prüfkörpers nach DIN 6868-4; die Werte in gelb hinterlegten Feldern weichen um mehr als 10% aber weniger als 20% vom Nominalwert ab, die Werte in den rot hinterlegten Feldern weichen um mehr als 20% vom Nominalwert ab. Zudem ist die absolute und relative Spanne der Werte innerhalb der Stichprobe angegeben.

		Materialdicke / mmCu						
nominelle Materialdicke		1,384	1,16	0,95	0,74	0,54	0,36	0,18
Hersteller I	Mittelwert	1,373	1,150	0,940	0,748	0,556	0,368	0,189
	Minimum	1,355	1,139	0,923	0,729	0,536	0,347	0,166
	Maximum	1,397	1,166	0,958	0,765	0,574	0,387	0,210
	Spanne	0,042	0,027	0,035	0,036	0,038	0,040	0,044
	rel. Spanne	3%	2%	4%	5%	7%	11%	23%
Hersteller II	Mittelwert	1,403	1,171	0,953	0,756	0,552	0,369	0,180
	Minimum	1,394	1,158	0,949	0,745	0,547	0,366	0,176
	Maximum	1,410	1,192	0,957	0,784	0,560	0,377	0,186
	Spanne	0,016	0,034	0,008	0,039	0,013	0,011	0,010
	rel. Spanne	1%	3%	1%	5%	2%	3%	6%
Hersteller III	Mittelwert	1,375	1,136	0,928	0,730	0,523	0,349	0,145
	Minimum	1,359	1,121	0,915	0,719	0,510	0,334	0,126
	Maximum	1,402	1,163	0,953	0,751	0,546	0,377	0,179
	Spanne	0,042	0,042	0,038	0,033	0,036	0,043	0,053
	rel. Spanne	3%	4%	4%	5%	7%	12%	37%

		Materialdicke / mmCu							
nominelle Materialdicke		3,48	3,22	2,96	2,7	2,45	2,21	1,96	1,73
Hersteller I	Mittelwert	3,312	3,109	2,899	2,655	2,409	2,192	1,959	1,754
	Minimum	3,294	3,064	2,863	2,607	2,364	2,169	1,948	1,746
	Maximum	3,334	3,196	2,917	2,706	2,428	2,206	1,965	1,772
	Spanne	0,039	0,131	0,054	0,098	0,064	0,037	0,017	0,025
	rel. Spanne	1%	4%	2%	4%	3%	2%	1%	1%
Hersteller II	Mittelwert	3,497	3,209	2,978	2,699	2,450	2,206	1,974	1,751
	Minimum	3,488	3,198	2,964	2,689	2,440	2,199	1,963	1,746
	Maximum	3,521	3,214	2,995	2,703	2,466	2,209	1,986	1,756
	Spanne	0,033	0,016	0,031	0,014	0,026	0,010	0,023	0,010
	rel. Spanne	1%	0%	1%	1%	1%	0%	1%	1%
Hersteller III	Mittelwert	3,434	3,234	2,931	2,678	2,406	2,182	1,932	1,706
	Minimum	3,408	3,193	2,921	2,653	2,380	2,149	1,913	1,678
	Maximum	3,454	3,291	2,950	2,721	2,424	2,203	1,947	1,720
	Spanne	0,047	0,098	0,029	0,067	0,044	0,055	0,034	0,042
	rel. Spanne	1%	3%	1%	3%	2%	3%	2%	2%

Tabelle 21: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung Kupfer-Dynamiktreppe des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 für die direkt von den Herstellern zur Verfügung gestellten Exemplare; die Werte in gelb hinterlegten Feldern weichen um mehr als 10% aber weniger als 20% vom Nominalwert ab, die Werte in den rot hinterlegten Feldern weichen um mehr als 20% vom Nominalwert ab. Zudem ist die absolute und relative Spanne der Werte innerhalb der Stichprobe angegeben.

8.3.1.5. Prüfung der Rasterlinien

In Tabelle 22 sind die Resultate der Stichprobenprüfung der Rasterlinienabstände für die 260 mm Abstandsmarkierung des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 dargestellt.

Die Abstände werden von den Herstellern erwartungsgemäß präzise und sehr gut reproduzierbar erstellt. Auffallend ist dabei, dass bei den Hersteller I und II die Längen an allen Messpunkten sowie in beiden Richtungen um etwa 2 mm zu groß erscheinen, während sie bei den Prüfkörpern des Herstellers III mit 260 mm exakt dem Sollwert entsprechen. Für den praktischen Anwendungsfall erscheinen alle Exemplare gleichwohl gut geeignet.

		Länge / mm			
		horizontal - oben	horizontal - unten	vertikal - links	vertikal - rechts
Hersteller I	Mittelwert	262,4	262,3	262,3	262,4
	Minimum	262,2	262,1	262,2	262,2
	Maximum	262,5	262,5	262,5	262,5
	Spanne	0,3	0,4	0,3	0,3
	rel. Spanne	0,1%	0,2%	0,1%	0,1%
Hersteller II	Mittelwert	262,6	262,5	262,6	262,5
	Minimum	262,4	262,4	262,3	262,3
	Maximum	262,8	262,6	262,8	262,8
	Spanne	0,4	0,3	0,5	0,5
	rel. Spanne	0,2%	0,1%	0,2%	0,2%
Hersteller III	Mittelwert	260,1	260,2	260,0	260,1
	Minimum	260,0	260,2	259,9	259,9
	Maximum	260,4	260,3	260,2	260,2
	Spanne	0,4	0,1	0,3	0,3
	rel. Spanne	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%

Tabelle 22: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung der Rasterlinienabstände des Prüfkörpers nach DIN 6868-4

8.3.1.6. Prüfung des Bleistrichrasters

In Tabelle 23 sind die Resultate der Stichprobenprüfung der Steg- und Lückenbreiten der Bleistrichraster in dem Prüfkörper nach DIN 6868-4 dargestellt.

Der Mittelwert weicht in keinem Fall um mehr als 2% vom Nominalwert ab. Die Spanne ist in allen Fällen kleiner als 4%.

In Tabelle 24 sind die Resultate der Stichprobenprüfung der Dicke der Bleistege der Bleistrichraster in dem Prüfkörper nach DIN 6868-4 dargestellt.

LP / mm	Soll-Breite / μm	Ist-Breite der Stichprobe / μm		
		Mittelwert	Minimum	Maximum
5,0	100,0	100,6	99,0	102,5
4,6	108,7	110,6	109,0	111,9
4,3	116,3	117,3	116,2	120,1
4,0	125,0	125,2	123,7	127,0
3,7	135,1	135,7	134,1	137,2
3,4	147,1	148,6	147,7	150,2
3,1	161,3	161,1	159,6	161,9
2,8	178,6	180,6	179,6	181,3
2,5	200,0	199,2	197,9	200,2
2,2	227,3	230,5	228,8	231,7
2,0	250,0	250,8	248,2	253,6
1,8	277,8	279,7	276,9	283,0
1,6	312,5	310,0	304,3	313,7
1,4	357,1	350,9	345,1	353,1
1,2	416,7	415,9	409,7	418,2
1,0	500,0	499,6	492,3	503,1
0,9	555,6	554,5	546,2	559,5
0,8	625,0	625,1	621,9	629,9
0,7	714,3	715,1	711,5	719,4
0,6	833,3	834,4	830,1	841,8

Tabelle 23: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung der Linienbreiten des Bleistrichrasters des Prüfkörpers nach DIN 6868-4

LP / mm	Soll-Dicke / μm	Ist-Dicke der Stichprobe / μm		
		Mittelwert	Minimum	Maximum
5,0	100,0	90,5	88,4	93,5
4,6	100,0	86,3	84,9	88,4
4,3	100,0	88,2	86,1	91,1
4,0	100,0	89,6	86,8	92,7
3,7	100,0	92,2	90,2	94,6
3,4	100,0	88,7	85,8	91,1
3,1	100,0	90,1	87,4	92,5
2,8	100,0	91,7	90,3	94,1
2,5	100,0	93,3	91,8	97,9
2,2	100,0	89,7	88,0	93,7
2,0	100,0	91,5	89,7	97,1
1,8	100,0	93,4	91,4	98,7
1,6	100,0	88,4	84,0	92,0
1,4	100,0	88,3	87,0	91,8
1,2	100,0	90,2	89,4	92,8
1,0	100,0	89,9	87,7	92,2
0,9	100,0	90,1	87,4	93,1
0,8	100,0	91,3	88,7	94,3
0,7	100,0	90,1	87,2	93,8
0,6	100,0	93,1	90,8	96,7

Tabelle 24: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung der Dicke der Bleistege des Bleistrichrasters des Prüfkörpers nach DIN 6868-4

Im Mittel sind die Bleistege etwa 10 μm dünner als nominell gefordert. Der entsprechende Wert ist dabei explizit nur als Mittelwert zu verstehen. Lokal kann die Materialdicke innerhalb eines Bleistrichrasters relevant von diesem Mittelwert abweichen, was sich auch anhand der geometrischen Messungen, s. Anhang B.1.4, gezeigt hat. Die Dickenunterschiede innerhalb eines Bleistrichrasters sind anhand der geometrischen Messungen als etwa 6% anzunehmen.

8.3.1.7. Prüfung der Strukturkörperdicke

In Tabelle 25 sind die Resultate zur Stichprobenprüfung der Strukturkörperdicke des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 dargestellt.

Die zur Berechnung der statistischen Größen herangezogenen Exemplare des Prüfkörpers erfüllen alle gut die in der Norm genannte, erlaubte Fertigungstoleranz von 50 μm Kupfer.

Neben den zur Berechnung der statistischen Größen herangezogenen Exemplaren, waren in der Stichprobe gleichwohl zwei Prüfkörper enthalten, welche so weit von den anderen Exemplaren abweichen, dass sie nicht in der Berechnung berücksichtigt wurden. Bei diesen Exemplaren wurde eine Strukturkörperdicke von 1,44 mm bzw. 1,64 mm Kupfer gemessen.

		gesamte Stichprobe
nominelle Materialdicke / mmCu		1,5
Hersteller I	Mittelwert	1,500
	Minimum	1,472
	Maximum	1,540
	Spanne	0,068
	rel. Spanne	5%
Hersteller II	Mittelwert	1,514
	Minimum	1,507
	Maximum	1,526
	Spanne	0,018
	rel. Spanne	1%
Hersteller III	Mittelwert	1,509
	Minimum	1,499
	Maximum	1,521
	Spanne	0,021
	rel. Spanne	1%
Hersteller IV	Mittelwert	1,493
	Minimum	1,492
	Maximum	1,494
	Spanne	0,002
	rel. Spanne	0%

Tabelle 25: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung der Strukturkörperdicke des Prüfkörpers nach DIN 6868-4

8.3.2. Resultate der Prüfung des DSA-Prüfkörpers nach DIN 6868-4

Es wurden insgesamt 24 Exemplare des DSA-Prüfkörpers nach DIN 6868-4 untersucht. Die Stichprobe beinhaltet Prüfkörper der Firmen PTW, quart und iba dosimetry. Von einem Hersteller wurden 10 Exemplare des Prüfkörpers, von einem 12 Exemplare sowie 2 Exemplare von dem dritten Hersteller untersucht. Es war nicht möglich eine größere Anzahl an Exemplaren der Prüfkörper des Herstellers mit den zwei untersuchten Exemplaren zu beschaffen. Die Resultate der Prüfkörper des Herstellers, von welchem nur zwei Exemplare in der Stichprobe enthalten waren, sind jeweils als „Hersteller III“ in den folgenden Tabellen beinhaltet. Durch den geringen Stichprobenumfang sind die statistischen Werte bei diesem Hersteller, insbesondere die Spanne der Daten, mit Bedacht wahrzunehmen.

8.3.2.1. Qualitative Resultate

In Abbildung 72 sind einige qualitative Auffälligkeiten von Exemplaren des DSA-Prüfkörpers dargestellt. In der Abbildung 72 a) ist zu erkennen, dass sich die Aluminium-Niedrigkontraststreifen nach oben hin verjüngen. Dieses ist gemäß Normung nicht vorgesehen. Im linken Teil der Abbildung 72 b) ist eine Abschattung zu erkennen. Diese setzt sich, wie in dieser aus mehreren Teilabbildungen zusammengesetzten Abbildung zu erkennen ist, über mehrere Stufen der Kupfertreppe hinweg fort. Es ist naheliegend, dass hier eine Beschädigung bzw. Deformation an einer der eingebauten Kupferplatten vorliegt. Nachdem die Prüfung nicht-invasiv erfolgte, lässt sich dieses aber nicht abschließend entscheiden.

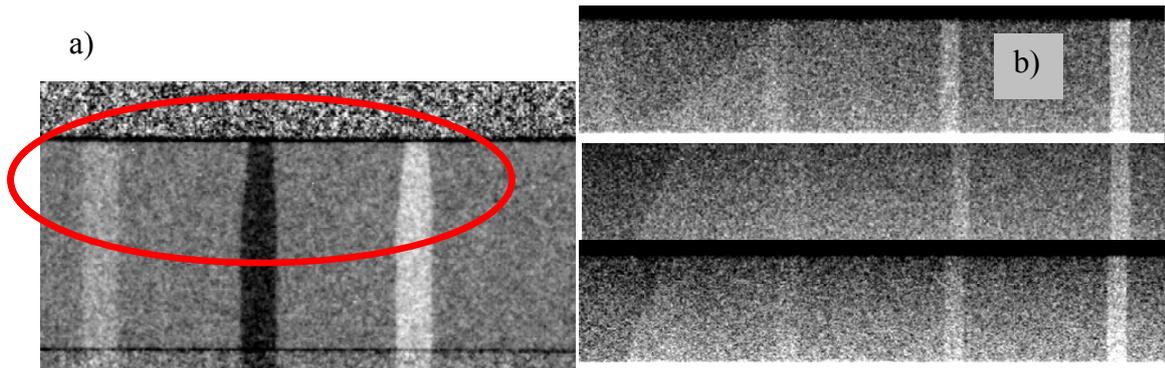


Abbildung 72: qualitative Auffälligkeiten in Radiographien von Exemplaren des DSA-Prüfkörpers. a) die Niedrigkontrastobjekte verjüngen sich nach oben hin; b) im linken Teil ist eine Abschattung, wahrscheinlich durch einen Mangel an einer der verbauten Kupferplatten, zu erkennen.

In Abbildung 72 sind zwei Photographien von Aluminium-Niedrigkontraststreifen eines DSA-Prüfkörpers dargestellt. Der entsprechende Prüfkörper wurde in Abstimmung mit dem Eigentümer hierzu geöffnet. Es ist zu erkennen, dass an einer Stelle ein Aluminiumstreifen verbogen und nicht auf der PMMA-Unterlage befestigt vorlag. Bei einer Durchstrahlung derartiger Objekte resultiert auch bei korrekter Materialdicke aufgrund des Zusammenbaus des Prüfkörpers für den Anwender ein anderer Kontrast und damit eine scheinbar andere Materialdicke.

8.3.2.2. Prüfung der Aluminium-Niedrigkontrastobjekte

In Tabelle 26 sind die Resultate der Stichprobenprüfung der Aluminium-Niedrigkontrastobjekte des DSA-Prüfkörpers nach DIN 6868-4 dargestellt.

Die Mittelwerte der Materialdicken stimmen bei beiden Herstellern für alle vier Aluminiumdicken im Rahmen der Messunsicherheit mit dem Nominalwert überein.

Es gibt gleichwohl einige Prüfkörper, insbesondere bei Hersteller I, welche deutlich von diesem Mittelwert abweichen. Die Messunsicherheit bei den Aluminiumstreifen des DSA-Prüfkörpers ist aufgrund des innerhalb des Vorhabens angewendeten Messprozesses im Vergleich zu den sonstigen untersuchten Komponenten groß. Das hat zur Folge, dass nur Abweichungen der Materialdicke vom jeweiligen Nominalwert als statistisch signifikant anzusehen sind, wenn sie größer als $20\ \mu\text{m}$ sind. Bei dem $447\ \mu\text{m}$ dicken Objekt an der Position des Aluminium-Streifens mit der größten Materialdicke in einem Prüfkörper des Herstellers I sowie bei dem $22\ \mu\text{m}$ dicken Objekt an der Position des dünnsten Aluminium-Streifens in einem anderen der untersuchten Prüfkörper liegt eine entsprechend signifikante Abweichung aber in jedem Fall vor. Gemäß der theoretischen Überlegungen, s. Abschnitt 5, sind diese Unterschiede in Durchstrahlungsbildern erwartungsgemäß wahrzunehmen.



Abbildung 73: Detail der Aluminiumstreifen aus einem DSA-Prüfkörper; die relevante Verbiegung des vorderen Streifens ist gut zu erkennen

nominelle Materialdicke		Materialdicke / mmAl			
		0,4	0,2	0,1	0,05
Hersteller I	Mittelwert	0,417	0,198	0,097	0,043
	Minimum	0,403	0,172	0,075	0,022
	Maximum	0,447	0,221	0,112	0,056
	Spanne	0,044	0,049	0,037	0,034
	rel. Spanne	10%	25%	38%	80%
Hersteller II	Mittelwert	0,418	0,210	0,097	0,053
	Minimum	0,401	0,205	0,084	0,038
	Maximum	0,433	0,220	0,107	0,063
	Spanne	0,032	0,015	0,023	0,025
	rel. Spanne	11%	14%	17%	8%

Tabelle 26: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung der Aluminium-Niedrigkontrastobjekte der DSA-Prüfkörper nach DIN 6868-4; die Werte in gelb hinterlegten Feldern weichen um mehr als 10% aber weniger als 20% vom Nominalwert ab, die Werte in den rot hinterlegten Feldern weichen um mehr als 20% vom Nominalwert ab.

8.3.2.3. Prüfung der Kupfer-Dynamiktreppe

In Tabelle 27 sind die Resultate der Stichprobenprüfung der Kupfertreppe des DSA-Prüfkörpers nach DIN 6868-4 dargestellt.

Bei dem Hersteller I ist der Mittelwert der untersuchten Exemplare mit kleiner Abweichung im Einklang mit der Normvorgabe. Bei den Stufen mit nominellen Materialdicken von bis zu 800 µm liegt die Abweichung im einstelligen Mikrometerbereich. Bei den größeren Materialdicken beträgt sie bis zu etwa 30 µm.

Bei dem Hersteller II sind die gemessenen Materialdicken sämtlicher Stufen systematisch um 35 µm bis 50 µm Kupfer dünner als der jeweilige Nominalwert. Dieses deutet auf einen Unterschied hin, welcher ggf. nicht in der Kupfertreppe sondern in dem PMMA-Teil des Prüfkörpers begründet ist. Entsprechendes ist anhand der fertig zusammengesetzten Prüfkörper nicht nicht-invasiv zu entscheiden.

Bei dem Hersteller III hat die Kupfertreppe augenscheinlich zu große Materialdickenunterschiede zwischen den Stufen. Bei der ersten Stufe ist die mittlere Materialdicke um etwa 32 µm dünner als der Nominalwert. Bei den Stufen mit nominellen Materialdicken von 600 µm bzw. 800 µm stimmen die gemessenen mit den nominellen Materialdicken gut überein. Bei der Stufe einer nominellen Dicke von 1,4 mm ist die mittlere gemessene Stufendicke etwa 20 µm oberhalb der Nominaldicke.

Die Herstellungsstreuung ist bei allen Herstellern gering. Dieses ist vor dem Hintergrund, wie die Kupfertreppen bei der Herstellung entstehen, wenig verwunderlich. Bei der Herstellung werden Kupferplatten, passender Dicke aufeinandergestapelt und dann fest miteinander verbunden. Die Ausgangsprodukte sind dabei mit hoher Genauigkeit der Materialdicke als Zukaufprodukte verfügbar. Hierin unterscheidet sich diese Kupfertreppe von denjenigen der Prüfkörper nach DIN 6868-4 und DIN 6868-13, bei denen die Treppe aus einem Kupferblock herausgefräst wird.

Vor dem Hintergrund des Nutzungszwecks scheinen die Kupfer-Dynamiktreppe, mit Ausnahme der weiter unten noch angesprochenen Ausreißer, s. Tabelle 29, gut brauchbar.

In Tabelle 28 sind die Resultate der Exemplare zusammengefasst, die direkt von den Herstellern zur Verfügung gestellt wurden. Die Prüfkörper, welche direkt von den Herstellern zur Verfügung gestellt wurden, unterscheiden sich nicht relevant von den sonstigen, von Anwendern erhaltenen Exemplaren.

Neben den Exemplaren der Prüfkörper, deren Resultate in Tabelle 27 und Tabelle 28 zusammengefasst sind, waren in der Stichprobe zwei Exemplare enthalten, welche wesentlich von dem Rest abweichen. Unter Berücksichtigung der Herstellungsweise der Kupfertreppen verwundern die bei diesen Prüfkörpern erhaltenen Resultate nicht. Die Resultate der beiden Exemplare sind in Abbildung 29 dargestellt. Die Werte fließen, da es sich um offensichtlich fehlerhafte Exemplare handelt nicht in die Mittelungen in Tabelle 27 sowie Tabelle 28 ein. In beiden Fällen ist zu erkennen, dass die nominelle Stufenhöhe von 200 µm an einer Stelle in der Kupfer-Dynamiktreppe unterbrochen ist. Im Fall des Exemplars dessen Messwerte in der oberen Zeile aufgetragen sind, wurden wahrscheinlich bei der Stufe mit einer nominellen Dicke von 600 µm 400 µm anstelle der vorgesehenen 200 µm Kupfer ergänzt. Bei dem Exemplar in der unteren Zeile scheint dieses bei der Stufe mit nominell 1 mm Kupfer der Fall zu sein. Die sonstigen Stufen wurden regulär als 200 µm Platten eingebaut.

		Materialdicke / mmCu						
nominelle Materialdicke		1,4	1,2	1	0,8	0,6	0,4	0,2
Hersteller I	Mittelwert	1,368	1,176	0,982	0,793	0,596	0,401	0,202
	Minimum	1,349	1,160	0,969	0,779	0,583	0,393	0,196
	Maximum	1,401	1,194	1,000	0,810	0,609	0,410	0,210
	Spanne	0,053	0,034	0,031	0,031	0,026	0,017	0,014
	rel. Spanne	4%	3%	3%	4%	4%	4%	7%
	Mittelwertsverschiebung	-0,035	-0,027	-0,021	-0,010	-0,007	-0,002	-0,001
Hersteller II	Mittelwert	1,350	1,151	0,955	0,764	0,563	0,366	0,165
	Minimum	1,319	1,126	0,936	0,748	0,549	0,353	0,152
	Maximum	1,383	1,182	0,984	0,789	0,585	0,385	0,181
	Spanne	0,064	0,055	0,049	0,041	0,036	0,032	0,029
	rel. Spanne	5%	5%	5%	5%	6%	9%	18%
	Mittelwertsverschiebung	-0,053	-0,052	-0,048	-0,039	-0,040	-0,037	-0,038
Hersteller III	Mittelwert	1,421	1,233	1,020	0,808	0,593	0,381	0,168
	Minimum	1,417	1,230	1,014	0,799	0,585	0,372	0,159
	Maximum	1,425	1,236	1,025	0,816	0,600	0,390	0,176
	Spanne	0,007	0,006	0,011	0,017	0,015	0,018	0,017
	rel. Spanne	1%	0%	1%	2%	3%	5%	10%
	Mittelwertsverschiebung	0,018	0,030	0,017	0,005	-0,010	-0,022	-0,035

Tabelle 27: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung der Kupfer-Dynamiktreppe der DSA-Prüfkörper nach DIN 6868-4; die Werte in gelb hinterlegten Feldern weichen um mehr als 10% aber weniger als 20% vom Nominalwert ab, die Werte in den rot hinterlegten Feldern weichen um mehr als 20% vom Nominalwert ab. Zudem ist die absolute und relative Spanne der Werte angegeben.

		Materialdicke / mmCu						
nominelle Materialdicke		1,4	1,2	1	0,8	0,6	0,4	0,2
Hersteller I	Mittelwert	1,368	1,176	0,982	0,793	0,596	0,401	0,202
	Minimum	1,349	1,160	0,969	0,779	0,583	0,393	0,196
	Maximum	1,401	1,194	1,000	0,810	0,609	0,410	0,210
	Spanne	0,053	0,034	0,031	0,031	0,026	0,017	0,014
	rel. Spanne	4%	3%	3%	4%	4%	4%	7%
	Mittelwertsverschiebung	-0,035	-0,027	-0,021	-0,010	-0,007	-0,002	-0,001
Hersteller II	Mittelwert	1,358	1,157	0,961	0,768	0,567	0,370	0,168
	Minimum	1,331	1,133	0,939	0,750	0,552	0,356	0,157
	Maximum	1,383	1,182	0,984	0,789	0,585	0,385	0,181
	Spanne	0,052	0,049	0,045	0,039	0,033	0,029	0,024
	rel. Spanne	4%	4%	5%	5%	6%	8%	14%
	Mittelwertsverschiebung	-0,045	-0,046	-0,042	-0,035	-0,036	-0,033	-0,035

Tabelle 28: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung der von den Herstellern zur Verfügung gestellten Exemplare der Kupfertreppe der DSA-Prüfkörper nach DIN 6868-4; die Werte in gelb hinterlegten Feldern weichen um mehr als 10% aber weniger als 20% vom Nominalwert ab, die Werte in den rot hinterlegten Feldern weichen um mehr als 20% vom Nominalwert ab. Zudem ist die absolute und relative Spanne der Werte angegeben.

	Materialdicke / mmCu						
Nominaldicke	1,4	1,2	1	0,8	0,6	0,4	0,2
DSA1	1,58	1,38	1,18	0,99	0,78	0,41	0,21
DSA2	1,52	1,32	1,12	0,75	0,55	0,36	0,16

Tabelle 29: Materialdicke der Kupfer-Dynamiktreppe von zwei Exemplaren des DSA-Prüfkörpers, welche besonders stark von der Spezifikation nach DIN 6868-4 abweichen. In der zweiten Zeile sind die Nominaldicken der Stufen angegeben, in den Zeilen 3 und 4 die bei den als DSA1 und DSA2 bezeichneten Prüfkörpern gemessenen Dicken

8.3.3. Resultate der Prüfung des Strukturkörpers nach DIN 6868-13

Es wurden insgesamt 31 Exemplare des Prüfkörpers nach DIN 6868-13 untersucht. Die Stichprobe beinhaltet Exemplare der Firmen pehamed, iba dosimetry und PTW. Von einem Hersteller wurden 13 Exemplare des Prüfkörpers sowie jeweils 9 Exemplare von den beiden anderen Herstellern untersucht.

Die Untersuchung der Bleistrichraster erfolgte abweichend davon an 5 Exemplaren der Prüfkörper des Herstellers iba dosimetry. Weitere Messungen konnten aufgrund von Problemen bei dem für die Messaufgabe zuständigen Projektpartner, BAM, nicht ausgewertet werden. Von den vorhandenen Messungen wurden abweichend von der Untersuchung des Bleistrichrasters der Prüfkörper nach DIN 6868-4 keine Materialdicken ermittelt.

8.3.3.1. Qualitative Resultate

Bei den Prüfkörpern nach DIN 6868-13 wurden im Vergleich zu den anderen Prüfkörpern wenige qualitative Auffälligkeiten anhand der Durchstrahlungsaufnahmen festgestellt.

In Abbildung 74 sind zwei qualitative Auffälligkeiten dargestellt. Es handelt sich in beiden Fällen um Einstreuartefakte, welche unabhängig von einzelnen Exemplaren allgemein bzw. herstellerspezifisch bei allen dort produzierten Prüfkörpern auffallen. Im linken Abbildungsteil ist die Signaleinstreuung aus dem Außenbereich des Prüfkörpers in den Bereich der Niedrigkontrastobjekte dargestellt. Im rechten Teil ist die Einstreuung aus den Rastermarkierungen dargestellt, welche bei einem der Hersteller als Schnitte in den PMMA-Grundkörper des Strukturkörpers realisiert sind. Bei den Herstellern, welche mit einer Rasterplatte arbeiten, auf der Hochkontrastmarkierungen aufgebracht sind, treten diese Einstreuungen nicht auf.

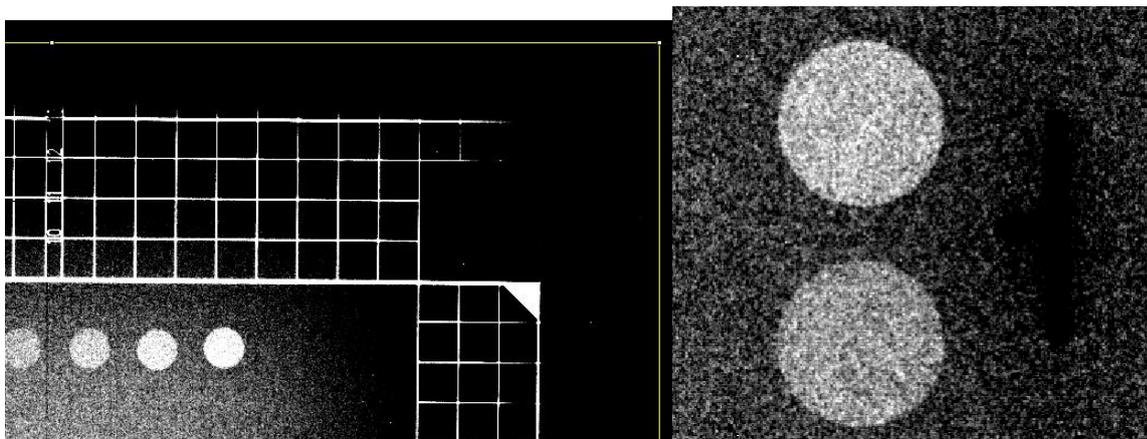


Abbildung 74: Beispiele qualitativer Auffälligkeiten bei Exemplaren des Prüfkörpers nach DIN 6868-13; Es handelt sich in beiden Fällen um Einstreuartefakte in den Bereich der Niedrigkontrastobjekte; im linken Teil aus dem Außenbereich des Prüfkörpers, im rechten Teil der Abbildung aus den Rastermarken bei einem der Hersteller.

8.3.3.2. Prüfung der Aluminium-Niedrigkontrastobjekte

In Tabelle 30 sind die Resultate der Stichprobenprüfung der Aluminium-Niedrigkontrastobjekte des Prüfkörpers nach DIN 6868-13 dargestellt.

In DIN 6868-13 ist, abweichend von allen anderen innerhalb des Vorhabens untersuchten Spezifikationen, für die Niedrigkontrastobjekte ein zu erreichender Kontrast bei definierten Expositionsparametern angegeben. Innerhalb der Norm sind Aluminium-Materialdicken angegeben, mit denen sich die spezifizierten Kontrastwerte erreichen lassen. An diesem Material und den in der Norm angegebenen Materialdicken orientieren sich alle drei Hersteller.

Es ist auffallend, dass die untersuchten Exemplare der Prüfkörper der drei Hersteller in ganz unterschiedlichem Maß die Spezifikation der Norm erfüllen. Bei dem Hersteller III wird die Spezifikation der Norm im Mittel mit einer maximalen Abweichung von 11 μm bei den Objekten mit nominell 150 μm Dicke eingehalten. Bei den Prüfkörpern des Herstellers I ist die aus den Röntgenkontrasten berechnete Materialdicke der Niedrigkontrastobjekte im Mittel um zwischen 20 μm und 37 μm dünner als der Nominalwert. Bei den Prüfkörpern des Herstellers II sind die Materialdicken der Niedrigkontrastobjekte um 37 μm bis 87 μm dicker als der Nominalwert.

Neben den systematischen Abweichungen, führt die Herstellungsstreuung, welche bei allen Herstellern zwischen etwa 20 μm bei dünneren und 70 μm bis 125 μm bei dickeren Objekten liegt, zu noch weit größerer Abweichung der Dicke einzelner Objekte vom jeweiligen Nominalwert. In der farbcodierten Darstellung ist dabei zu erkennen, dass bei den untersuchten Exemplaren des Herstellers III nur wenige um mehr als 10 % vom Nominalwert abweichen. Im Gegensatz dazu weichen bei dem Hersteller II in vielen Fällen Exemplare bei zahlreichen der Materialdicken der Niedrigkontrastobjekte um mehr als 20% vom Nominalwert ab. Ergänzend zur „normalen“ Herstellungsstreuung fallen zwei Exemplare des Prüfkörpers auf, bei denen einzelne Objekte weit mehr als üblich von den sonstigen Exemplaren des jeweiligen Herstellers abweichen. Bei den 700 μm Objekten betrifft dieses ein Exemplar des Herstellers II, bei den Objekten mit einer nominellen Materialdicke von 100 μm bzw. 150 μm Nominaldicke ist jeweils ein Exemplar des Herstellers I betroffen.

Die teilweise große Abweichung von der Norm-Spezifikation äußert sich in deutlich unterschiedlichen Resultaten von Prüfungen, die mit Exemplaren der Prüfkörper der drei Hersteller durchgeführt werden. Das sollte vermieden werden. Dabei ist jedoch zu erwähnen, dass der Prüfkörper nach DIN 6868-13 für Konstanzprüfungszwecke eingesetzt wird. Daher haben Unterschiede in den Absolutwerten nicht in dem Maß Auswirkungen auf die Prüfergebnisse. Eine Aussage über die Komponenten entsprechender Prüfkörper, die bei Abnahmeprüfungen eingesetzt werden ist nicht direkt möglich.

nominelle Materialdicke		Materialdicke / mmAl					
		0,70	0,50	0,35	0,25	0,15	0,10
Hersteller I	Mittelwert	0,663	0,463	0,332	0,223	0,127	0,080
	Minimum	0,633	0,446	0,315	0,214	0,115	0,063
	Maximum	0,722	0,500	0,348	0,241	0,146	0,097
	Spanne	0,090	0,055	0,033	0,026	0,031	0,034
	rel. Spanne	14%	12%	10%	12%	25%	42%
Hersteller II	Mittelwert	0,787	0,541	0,432	0,321	0,187	0,143
	Minimum	0,760	0,529	0,411	0,315	0,178	0,125
	Maximum	0,885	0,590	0,444	0,329	0,200	0,156
	Spanne	0,125	0,061	0,032	0,014	0,023	0,030
	rel. Spanne	16%	11%	8%	4%	12%	21%
Hersteller III	Mittelwert	0,692	0,503	0,351	0,248	0,161	0,097
	Minimum	0,659	0,487	0,324	0,230	0,149	0,083
	Maximum	0,731	0,516	0,362	0,261	0,169	0,110
	Spanne	0,071	0,029	0,038	0,031	0,020	0,027
	rel. Spanne	10%	6%	11%	12%	13%	27%

Tabelle 30: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung der Aluminium-Niedrigkontrastobjekte des Prüfkörpers nach DIN 6868-13; die Werte in gelb hinterlegten Feldern weichen um mehr als 10% aber weniger als 20% vom Nominalwert ab, die Werte in den rot hinterlegten Feldern weichen um mehr als 20% vom Nominalwert ab. Zudem ist die absolute und relative Spanne der Werte angegeben.

8.3.3.3. Prüfung der Kupfer-Dynamiktreppe

In Tabelle 31 sind die Resultate der Stichprobenprüfung der Kupfer-Dynamiktreppe des Prüfkörpers nach DIN 6868-13 dargestellt.

Bei den Objekten mit nominellen Materialdicken von bis zu 1,4 mm weicht der Mittelwert der Materialdicke bei allen Herstellern um weniger als 30 µm vom Nominalwert ab. Bei den beiden Stufen mit nominellen Materialdicken von 1,85 mm bzw. 2,3 mm weicht der Mittelwert teilweise bis zu etwa 80 µm vom Nominalwert ab.

Diesen systematischen Abweichungen ist die Herstellungsstreuung überlagert. Dadurch ergibt es sich, dass bei den Prüfkörpern der Hersteller I und II einzelne Exemplare untersucht wurden, bei denen einige Stufen um bis zu 160 µm vom Nominalwert abweichen.

nominelle Materialdicke		Materialdicke / mmCu					
		2,3	1,85	1,4	1	0,65	0,3
Hersteller I	Mittelwert	2,378	1,900	1,414	1,030	0,675	0,322
	Minimum	2,316	1,866	1,380	1,011	0,640	0,286
	Maximum	2,458	1,941	1,457	1,101	0,723	0,358
	Spanne	0,141	0,074	0,076	0,090	0,083	0,072
	rel. Spanne	6%	4%	5%	9%	12%	23%
Hersteller II	Mittelwert	2,255	1,848	1,390	0,997	0,678	0,324
	Minimum	2,159	1,763	1,314	0,966	0,632	0,274
	Maximum	2,407	2,022	1,553	1,050	0,750	0,386
	Spanne	0,247	0,259	0,240	0,084	0,118	0,112
	rel. Spanne	11%	14%	17%	8%	17%	35%
Hersteller III	Mittelwert	2,356	1,887	1,401	1,005	0,643	0,303
	Minimum	2,285	1,854	1,366	0,959	0,609	0,277
	Maximum	2,409	1,910	1,430	1,032	0,663	0,321
	Spanne	0,124	0,056	0,064	0,073	0,054	0,044
	rel. Spanne	5%	3%	5%	7%	8%	15%

Tabelle 31: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung der Kupfer-Dynamiktreppe des Prüfkörpers nach DIN 6868-13; die Werte in gelb hinterlegten Feldern weichen um mehr als 10% aber weniger als 20% vom Nominalwert ab, die Werte in den rot hinterlegten Feldern weichen um mehr als 20% vom Nominalwert ab. Zudem ist die absolute und relative Spanne der Werte angegeben.

		Materialdicke / mmCu					
nominelle Materialdicke		2,3	1,85	1,4	1	0,65	0,3
Hersteller I	Mittelwert	2,341	1,876	1,390	1,014	0,673	0,316
	Minimum	2,316	1,866	1,380	1,012	0,669	0,313
	Maximum	2,360	1,892	1,398	1,016	0,679	0,319
	Spanne	0,044	0,025	0,018	0,004	0,011	0,006
	rel. Spanne	2%	1%	1%	0%	2%	2%
Hersteller II	Mittelwert	2,188	1,809	1,364	0,970	0,667	0,323
	Minimum	2,159	1,763	1,314	0,966	0,632	0,316
	Maximum	2,234	1,891	1,466	0,974	0,684	0,326
	Spanne	0,074	0,128	0,152	0,008	0,053	0,010
	rel. Spanne	3%	7%	11%	1%	8%	3%
Hersteller III	Mittelwert	2,378	1,892	1,401	1,002	0,643	0,308
	Minimum	2,342	1,864	1,366	0,959	0,609	0,293
	Maximum	2,409	1,910	1,430	1,032	0,663	0,315
	Spanne	0,067	0,047	0,064	0,073	0,054	0,022
	rel. Spanne	3%	2%	5%	7%	8%	7%

Tabelle 32: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Kupfer-Dynamiktreppe des Prüfkörpers nach DIN 6868-13 für die von den Herstellern bereitgestellten Exemplare; die Werte in gelb hinterlegten Feldern weichen um mehr als 10% aber weniger als 20% vom Nominalwert ab, die Werte in den rot hinterlegten Feldern weichen um mehr als 20% vom Nominalwert ab. Zudem ist die absolute und relative Spanne der Werte angegeben.

Die teilweise wesentlichen Unterschiede in der Materialdicke sind in Durchstrahlungsbildern im Vergleich sicherlich festzustellen. Aufgrund der qualitativen Auswertung der Prüfergebnisse unter Nutzung der Kupfer-Dynamiktreppe ist gleichwohl anzunehmen, dass viele der untersuchten Exemplare für den Prüfzweck einsetzbar sind.

In Tabelle 32 sind die Resultate der Stichprobenprüfung der Kupfer-Dynamiktreppe des Prüfkörpers nach DIN 6868-13 für das Subkollektiv zusammengefasst, welches dem Projektteam von den Herstellern aus Lagerbeständen direkt zur Verfügung gestellt wurde. Der Mittelwert ist im Vergleich zur gesamten Stichprobe wenig geändert. Es ist jedoch auffallend, dass der Dickenunterschied der einzelnen Exemplare bei den Herstellern I und II, welche in der Gesamtstichprobe eine vergleichsweise große Fertigungsstreuung aufwiesen, wesentlich kleiner wurde. Dieses weist darauf hin, dass die Fertigungsstreuung innerhalb einer Charge deutlich kleiner ist als bei einem größeren Zeitraum.

Neben den bislang berücksichtigten Prüfkörpern wurde ein Exemplar des Prüfkörpers untersucht, welches so stark von der Norm-Spezifikation abwich, dass es bei der Berechnung der statistischen Größen nicht berücksichtigt wurde. Die Materialdicke der Stufen der Kupfer-Dynamiktreppe dieses Exemplars ist in Tabelle 33 aufgelistet. Bis zu einer nominellen Materialdicke von 1 mm Kupfer sind die Dicken bei diesem Exemplar in Übereinstimmung mit den Vorgaben. Danach weicht die Dicke zunehmend weiter ab. Bei der dicksten Stufe besteht ein Unterschied von etwa 450 µm. Ein derartiger Prüfkörper ist wahrscheinlich auch für den qualitativen Einsatz, für den die Kupfertreppe aktuell eingesetzt wird, nicht verwendbar. Grund ist, dass der Dynamikbereich des Röntgensystems durch die wesentlich zu dünnen Stufen nicht in dem Maß getestet wird, wie bei anderen Prüfkörpern.

		Materialdicke / mmCu					
Nominaldicke		2,3	1,85	1,4	1	0,65	0,3
PK1		1,85	1,61	1,31	1,03	0,70	0,28

Tabelle 33: Materialdicke der Kupfer-Dynamiktreppe eines Prüfkörpers nach DIN 6868-13, welche besonders stark von der Spezifikation der DIN 6868-13 abweicht. In der zweiten Zeile ist die Nominaldicke der Treppenstufen angegeben, in Zeile drei die Messwerte des als PK1 bezeichneten, auffälligen Prüfkörpers.

8.3.3.4. Prüfung der Rasterlinien

In Tabelle 34 sind die Resultate der Stichprobenprüfung der Rasterlinienabstände für die 260 mm Abstandsmarkierung des Prüfkörpers nach DIN 6868-13 dargestellt. Die Abstände werden von den Herstellern erwartungsgemäß präzise und sehr gut reproduzierbar erstellt. Für den praktischen Anwendungszweck erscheinen alle Exemplare gut geeignet.

8.3.3.5. Prüfung des Bleistrichrasters

In Tabelle 35 sind die Resultate zur Stichprobenüberprüfung der Steg- und Lückenbreiten des Bleistrichrasters in dem Prüfkörper nach DIN 6868-13 dargestellt.

		Länge / mm			
		horizontal - oben	horizontal - unten	vertikal - links	vertikal - rechts
Hersteller I	Mittelwert	258,9	258,9	258,9	258,9
	Minimum	258,8	258,7	258,8	258,6
	Maximum	259,3	259,2	259,2	259,3
	Spanne	0,5	0,5	0,4	0,8
	rel. Spanne	0,2%	0,2%	0,2%	0,3%
Hersteller II	Mittelwert	259,2	259,2	259,2	259,1
	Minimum	259,0	259,0	259,0	258,9
	Maximum	259,3	259,5	259,3	259,3
	Spanne	0,4	0,5	0,3	0,4
	rel. Spanne	0,1%	0,2%	0,1%	0,2%
Hersteller III	Mittelwert	260,0	260,0	260,0	259,9
	Minimum	259,8	259,7	259,9	259,8
	Maximum	260,2	260,2	260,2	260,1
	Spanne	0,4	0,4	0,3	0,3
	rel. Spanne	0,2%	0,2%	0,1%	0,1%

Tabelle 34: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung der Rasterlinienabstände des Prüfkörpers nach DIN 6868-13

LP / mm	Soll-Breite / μm	Ist-Breite der Stichprobe / μm		
		Mittelwert	Minimum	Maximum
5,0	100,0	97,6	96,2	98,4
4,6	108,7	107,1	105,7	107,7
4,3	116,3	114,7	114,1	115,4
4,0	125,0	124,3	123,2	125,3
3,7	135,1	133,5	131,8	135,4
3,4	147,1	146,6	146,2	147,4
3,1	161,3	159,4	158,2	160,7
2,8	178,6	180,0	178,0	181,2
2,5	200,0	199,1	196,1	200,6
2,2	227,3	226,6	224,3	228,1
2,0	250,0	249,4	247,2	251,5
1,8	277,8	277,6	273,4	279,8
1,6	312,5	296,4	294,8	297,2
1,4	357,1	354,1	352,9	355,2
1,2	416,7	397,2	396,1	398,1
1,0	500,0	495,1	493,9	497,8
0,9	555,6	545,5	543,8	548,2
0,8	625,0	621,6	619,3	623,4
0,7	714,3	699,3	697,4	701,6
0,6	833,3	829,9	825,3	832,9

Tabelle 35: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung der Linienbreiten des Bleistrichrasters des Prüfkörpers nach DIN 6868-13

Der Mittelwert weicht bei den Strukturen größer oder gleich 1,8 LP/mm um nicht mehr als 2% vom Nominalwert ab. Bei den Strukturen niedrigerer Frequenz, z.B. bei 1,6 LP/mm oder 1,2 LP/mm beträgt die mittlere Abweichung etwa 5%. Die Spanne der Prüfkörper in der Stichprobe ist in allen Fällen kleiner als 3%.

Für die praktische Anwendung scheinen sämtliche der untersuchten Exemplare gut geeignet zu sein.

8.3.3.6. Prüfung der Strukturkörperdicke

In Tabelle 36 sind sowohl die Resultate zur Stichprobenüberprüfung der Strukturkörperdicke sämtlicher untersuchter Prüfkörper nach DIN 6868-13, als auch die Resultate zur Dicke der Strukturkörper derjenigen Exemplare dargestellt, die direkt von den Herstellern zur Verfügung gestellt wurden.

Die mittlere Dicke der Strukturkörper des Herstellers I liegt um etwa 20 µm oberhalb der Spezifikation, die des Herstellers II um etwa 15 µm darunter.

Die Abweichungen vom Normwert sind bei sämtlichen Prüfkörpern im Hinblick auf den Anwendungszweck vernachlässigbar gering.

Im Vergleich ist zu erkennen, dass die verwendeten Materialien zur Herstellung des Strukturkörpers chargenabhängig leicht variieren. Bei den Herstellern I und II ist Streubreite der Materialdicke in der Stichprobe um mindestens einen Faktor 10 oberhalb der Spanne bei den direkt vom Hersteller erhaltenen Exemplaren.

8.3.4. Resultate der Prüfung der Schwächungskörper

Die Strukturkörper der Normen DIN 6868-4 sowie DIN 6868-13 werden bei den Qualitätssicherungsprüfungen an Röntgenanlagen stets zusammen mit einem Schwächungskörper eingesetzt. Alternativ kann entweder ein Schwächungskörper aus 25 mm Aluminium oder eine Kombination zweier Schwächungskörper mit 30 mm PMMA und 1 mm Kupfer eingesetzt werden.

		gesamte Stichprobe	Prüfkörper des Herstellers
nominelle Materialdicke / mmCu		1	1
Hersteller I	Mittelwert	1,021	1,005
	Minimum	0,999	1,000
	Maximum	1,093	1,009
	Spanne	0,094	0,009
	rel. Spanne	9%	1%
Hersteller II	Mittelwert	0,986	0,958
	Minimum	0,956	0,956
	Maximum	1,043	0,962
	Spanne	0,087	0,005
	rel. Spanne	9%	1%
Hersteller III	Mittelwert	0,997	1,005
	Minimum	0,972	0,998
	Maximum	1,009	1,009
	Spanne	0,037	0,011
	rel. Spanne	4%	1%

Tabelle 36: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung der Strukturkörperdicke des Prüfkörpers nach DIN 6868-13 einerseits für sämtliche untersuchten Prüfkörper sowie für das Kollektiv der Prüfkörper, die direkt von den Herstellern erhalten wurden.

Die drei Hersteller, welche primär die auf dem deutschen Markt verfügbaren Prüfkörper nach DIN 6868-4 sowie 6868-13 herstellen, bieten zusammen mit ihren Prüfkörpern vornehmlich jeweils einen Schwächungskörpertypen an. Von diesem bevorzugten Schwächungskörpertyp wird nur in Einzelfällen abgewichen. Dieses hat zur Folge, dass bei der Stichprobe jeweils von jedem Hersteller bevorzugt die Exemplare eines Schwächungskörpertyps stammen. Von den anderen Schwächungskörpertypen konnten nur schwer, wenn überhaupt, Exemplare erhalten werden.

Eine Firma bietet abweichend von dem Vorgehen bei den beiden anderen Herstellern einen Kombinationsprüfkörper an, welcher untrennbar verbunden eine Kupfer- und eine PMMA-Komponente enthält. Exemplare dieses Prüfkörpers stammen daher ausschließlich von dieser Firma.

8.3.4.1. Qualitative Resultate

Bei den untersuchten Exemplaren der Schwächungskörper wurden wenige offensichtliche Artefakte festgestellt. In einem Fall wurde von einem Anwender jedoch ein Exemplar eines Kupfer-Schwächungskörpers mit ganz ausgeprägter Binnenstruktur zur Verfügung gestellt. In Abbildung 75 ist ein Durchstrahlungsbild des entsprechenden Schwächungskörpers dargestellt.

Die Struktur, welche sich auch in einer relevanten Abweichung der gemessenen von der nominellen Kupferdicke äußert, war bei dem normalen Umgang mit dem Schwächungskörper von außen nicht zu erkennen.

8.3.4.2. Prüfung der PMMA-Schwächungskörper

Es wurden insgesamt 17 PMMA-Schwächungskörper untersucht. Die Stichprobe beinhaltet Exemplare der Firmen iba dosimetry und PTW. 15 Exemplare der Stichprobe stammen von einem Hersteller, 2 Exemplare von dem anderen Hersteller.

In Tabelle 37 sind die Resultate der Stichprobe zusammengestellt. Die Materialdicke der Exemplare des Herstellers I weicht um weniger als 450 μm vom Nominalwert ab, die Exemplare des Herstellers II haben eine etwas größere Streubreite. Die Abweichung vom Nominalwert kann hier bis zu etwa 850 μm betragen.

Die Abweichung vom Nominalwert sollte gleichwohl in allen Fällen zu keiner Einschränkung im Einsatz des Prüfkörpers führen, insbesondere da der in Verbindung mit dem PMMA eingesetzte Kupfer-Schwächungskörper weit stärker zur Schwächung der Einfallstrahlung sowie zur Modulation des Spektrums beiträgt.

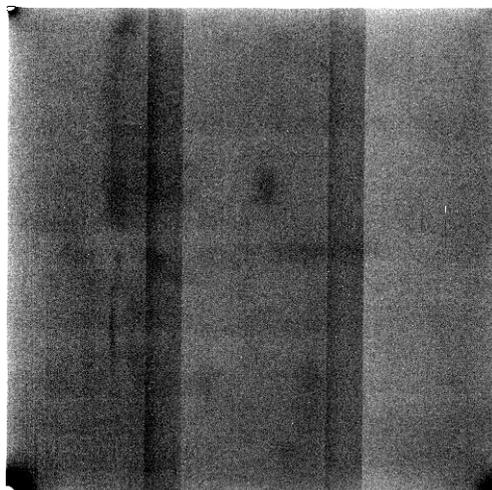


Abbildung 75: Abbildung eines Kupfer-Schwächungskörpers mit relevanter Binnenstruktur

nominelle Materialdicke / mmPMMA		30
Hersteller I	Mittelwert	30,062
	Minimum	29,743
	Maximum	30,421
	Spanne	0,678
	rel. Spanne	2%
Hersteller II	Mittelwert	30,177
	Minimum	29,515
	Maximum	30,840
	Spanne	1,325
	rel. Spanne	4%

Tabelle 37: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung der PMMA-Schwächungskörper der Prüfkörper nach DIN 6868-4 sowie DIN 6868-13

Es wurden 8 Exemplare des PMMA-Schwächungskörpers untersucht, welcher in Verbindung mit dem Testeinsatz AP verwendet wird.

In Tabelle 38 sind die Resultate der Stichprobe zusammengestellt. Die mittlere Dicke der Schwächungskörper ist etwa 2,5% oberhalb des Nominalwertes. Die Abweichung vom Nominalwert sollte in allen Fällen zu keiner Einschränkung im Einsatz des Prüfkörpers führen.

Der CDMAM-Prüfkörper wird bei den Prüfkörperaufnahmen zusammen mit vier PMMA-Platten von jeweils 10 mm exponiert. Dabei ist der CDMAM-Prüfkörper in der Mitte zwischen je 2 Platten positioniert. Es wurden 11 Sätze von je 4 PMMA-Platten untersucht.

Die Resultate sind in Tabelle 39. dargestellt. Im linken Teil der Tabelle sind die Resultate für jeweils einzelne Platten zusammengestellt, im rechten Teil sind die Messwerte der 4 PMMA-Platten eines ganzen Satzes zusammengefasst.

Die Streuung einzelner Platten sowie auch zwischen unterschiedlichen Sätzen von je vier Platten ist auffallend groß. Einzelplatten können um mehr als 10% vom Nominalwert abweichen. Auch bei Betrachtung eines ganzen Satzes von PMMA-Platten wird die Streubreite nicht wesentlich kleiner. Auch hier liegt eine Abweichung von maximal etwa 10% vor.

Vor dem Hintergrund, dass bei der Konstanzprüfung unter Verwendung des CDMAM-Prüfkörpers eine Maximaldosis für die Aufnahme nicht überschritten werden darf, erscheint es wünschenswert, die Streubreite der Herstellung zu reduzieren. Es scheint, als wären aktuell Prüfsätze im Einsatz, bei welchen bei gleicher Einfallsdosis eine relevant andere Detektordosis mit entsprechender Auswirkung auf die Bildqualität resultiert. Dieses darf nicht der Fall sein!

Wenn bei einer Prüfung ein PMMA-Satz mit kleiner Gesamtdicke mit einem Exemplar des CDMAM-Prüfkörpers mit großen und eher dickeren Goldplättchen kombiniert wird sind relevant andere Resultate zu erwarten als bei einem PMMA-Satz mit größerer Materialdicke in Kombination mit einem CDMAM-Prüfkörper mit kleineren und ggf. leicht dünneren Goldplättchen.

nominelle Materialdicke / mmPMMA		40
Mittelwert		40,95
Minimum		40,63
Maximum		41,28
Spanne		0,65
rel. Spanne		2%

Tabelle 38: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung der PMMA-Schwächungskörper des Testeinsatzes AP

	eine Platte	ein Satz
nominale Materialdicke / mmPMMA	10	40
Mittelwert	10,16	40,64
Minimum	9,50	38,85
Maximum	11,20	43,96
Spanne	1,71	5,11
rel. Spanne	17%	13%

Tabelle 39: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung der PMMA-Schwächungskörper die zusammen mit dem CDMAM-Prüfkörper verwendet werden. Links: Werte für jeweils eine Platte; rechts: Werte für einen Satz aus jeweils 4 Platten

8.3.4.3. Prüfung der Aluminium-Schwächungskörper

Es wurden insgesamt 18 Aluminium-Schwächungskörper untersucht. Die Stichprobe beinhaltet Exemplare der Firmen iba dosimetry und PTW. 11 Exemplare der Stichprobe stammen von einem Hersteller, 6 von einem zweiten und 1 Exemplar von einem dritten Hersteller.

In Tabelle 40 sind die Resultate der Stichprobe zusammengestellt. Nachdem von einem der Hersteller nur ein Exemplar des Schwächungskörpers zur Verfügung stand, wurden für diesen keine weiteren statistischen Größen berechnet.

Die untersuchten Exemplare des Schwächungskörpers der Hersteller II und III zeigen wenig Auffallendes. Sie sind im Mittel etwas dünner als der Nominalwert, für die Nutzung aber sicherlich ohne Einschränkung geeignet.

Interessanter ist die Verteilung bei dem Hersteller I. Hier scheint es drei Subgruppen des Schwächungskörpers innerhalb der Stichprobe zu geben. Die vom Hersteller zur Verfügung gestellten Exemplare des Schwächungskörpers stimmen gut mit den Normvorgaben überein. Auch ist die Fertigungsschwankung gering. Es wurden jedoch auch jeweils mehrere, von Anwendern erhaltene, Schwächungskörper untersucht, welche sich einer von zwei weiteren Serien zuordnen lassen. Beide Serien unterscheiden sich in der mittleren Materialdicke. In beiden Fällen ist die Materialdicke jedoch relevant, bis zu 15%, zu hoch. Für den Einsatz bei Konstanzprüfungen mag es bei Verwendung dieser Schwächungskörper keine Einschränkung geben, ein Einsatz im Rahmen von Abnahmeprüfungen ist jedoch in Frage zu stellen.

		gesamte Stichprobe	Prüfkörper des Herstellers	vorherige Serie I	Vorherige Serie II
nominale Materialdicke / mmAl		25	25	25	25
Hersteller I	Mittelwert	26,7	25,4	27,4	28,6
	Minimum	25,3	25,3	27,3	28,5
	Maximum	28,8	25,4	27,5	28,8
	Spanne	3,5	0,1	0,3	0,3
	rel. Spanne	13%	0%	1%	1%
Hersteller II	Mittelwert	24,1			
	Minimum	24,0			
	Maximum	24,2			
	Spanne	0,2			
	rel. Spanne	1%			
Hersteller III	Mittelwert	24,6			
	Minimum				
	Maximum				
	Spanne				
	rel. Spanne				

Tabelle 40: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung der Aluminium-Schwächungskörper nach DIN 6868-4 sowie DIN 6868-13

8.3.4.4. Prüfung der Kupfer-Schwächungskörper

Es wurden 7 Exemplare des Kupfer-Schwächungskörpers nach DIN 6868-4 bzw. DIN 6868-13 untersucht, die alle von einem Hersteller stammen. Die Resultate sind in Tabelle 41 zusammengestellt. 6 der Exemplare weisen eine sehr geringe Fertigungsstreuung auf und stimmen auch gut mit dem Nominalwert überein. Unter Verwendung dieser Prüfkörper wurden die statistischen Größen berechnet. Der siebte Schwächungskörper, dessen Durchstrahlungsbild als Abbildung 75 dargestellt ist, wurde nicht in der Berechnung berücksichtigt. Die Materialdicke dieses Schwächungskörpers ist, wie aus der Abbildung zu ersehen ist, lokal sehr unterschiedlich. Im Mittel beträgt die Dicke etwa 0,94 mm.

8.3.4.5. Prüfung der Kupfer-PMMA-Kombinationsschwächungskörper

Es wurden 5 Exemplare des Kupfer-PMMA-Kombinationsschwächungskörpers untersucht. Die Resultate sind in Tabelle 42 zusammengestellt. Hierbei ist die Abweichung der gemessenen Signalwerte, bezogen auf die nominelle Dicke der Kupfer-Komponente aufgetragen. Innerhalb der Stichprobe sind zwei Serien von Schwächungskörpern zu unterscheiden. Während eine Teilserie im Mittelwert sehr gut dem Nominalwert entspricht, weicht die andere um etwa 180 µm Kupfer bzw. mehr als 10% vom Nominalwert ab.

Für den Einsatz bei Konstanzprüfungen mag es bei Verwendung der Schwächungskörper der zweiten Gruppe keine Einschränkung geben, ein Einsatz im Rahmen von Abnahmeprüfungen ist jedoch in Frage zu stellen.

8.4. Der CTDI-Prüfkörper nach DIN EN 60601-2-44

In der Stichprobe wurden insgesamt 10 CTDI-Prüfkörper der Firma PTW sowie 9 Prüfkörper der Firma iba dosimetry untersucht. Jeweils fünf der untersuchten Prüfkörper beider Firmen wurden direkt von diesen zur Verfügung gestellt. Die weiteren Exemplare stammten von Anwendern.

8.4.1. Resultate der Prüfung der Geometrie

In Tabelle 43 ist für die Exemplare des Prüfkörpertyps der Firma PTW der Mittelwert der Messwerte der Konformitätsprüfung für die in DIN EN 60601-2-44 definierten geometrischen Größen aufgelistet. In Tabelle 44 sind entsprechende Werte für die untersuchten Exemplare des Prüfkörpertyps der Firma iba dosimetry aufgetragen. Die in den Tabellen angegebene Spanne entspricht dem Unterschied des Exemplars mit dem größten zu dem mit dem kleinsten Wert.

nominalle Materialdicke / mmCu	1
Mittelwert	0,989
Minimum	0,984
Maximum	0,995
Spanne	0,011
rel. Spanne	1%

Tabelle 41: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung der Kupfer-Schwächungskörper nach DIN 6868-4 sowie DIN 6868-13

	Teilserie I	Teilserie II
Mittelwert	0,01	-0,18
Minimum	0,01	-0,18
Maximum	0,02	-0,18

Tabelle 42: Resultate (Mittelwert, Minimum, Maximum) der Stichprobenprüfung der Kupfer-PMMA-Kombinationsschwächungskörper

In keinem Fall weicht der Messwert für eine Messgröße um mehr als 500 µm vom Nominalwert ab. Vor dem Hintergrund der theoretischen Überlegungen zum Einfluss unterschiedlicher Größen auf das Messergebnis von Messungen des CTDI_w, s. Abschnitt 5.2, sind sämtliche untersuchten Exemplare beider Prüfkörpertypen sicher akzeptabel. Vor dem Hintergrund der bei der Prüfung festgestellten geringen Fertigungsstreuung bei beiden Herstellern ist kaum anzunehmen, dass Exemplare des CTDI-Prüfkörpers existieren, welche in einem Umfang von den Nominalwerten abweichen, der für den Einsatzzweck bedeutend ist.

PTW			
Kopfphantome			
Durchmesser / mm			
Zylinder Nr.	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
1	159,943	0,117	0,031
rad. Abstand zur Mitte / mm			
Zylinder Nr.	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
2	70,045	0,651	0,218
3	70,106	0,170	0,031
4	70,078	0,810	0,204
5	69,996	0,307	0,041
6	0,194	0,362	0,098
Höhe des PK			
Zylinder Nr.	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
	150,025	0,138	0,045

PTW			
Körperphantome			
Durchmesser / mm			
Zylinder Nr.	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
1	320,062	0,087	0,017
rad. Abstand zur Mitte / mm			
Zylinder Nr.	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
2	150,131	0,593	0,028
3	150,222	0,303	0,043
4	149,976	0,206	0,026
5	149,912	0,339	0,028
6	0,082	0,087	0,027
Höhe des PK			
Zylinder Nr.	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
	150,013	0,043	0,015

Tabelle 43: Mittelwert der Messwerte der Konformitätsprüfung für die in DIN EN 60601-2-44 definierten geometrischen Größen von Exemplaren des CTDI-Prüfkörpers der Firma PTW. Die Messwerte weiterer geometrischer Größen sind in Anlage E.1 aufgelistet.

iba dosimetry			
Kopfphantome			
Durchmesser / mm			
Zylinder Nr.	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
1	159,819	0,114	0,037
rad. Abstand zur Mitte / mm			
Zylinder Nr.	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
2	70,029	0,151	0,027
3	70,065	0,216	0,063
4	70,028	0,253	0,058
5	70,001	0,222	0,049
6	0,062	0,168	0,036
Höhe des PK			
Zylinder Nr.	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
	150,041	0,225	0,082

iba dosimetry			
Körperphantome			
Durchmesser / mm			
Zylinder Nr.	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
1	320,206	0,494	0,185
rad. Abstand zur Mitte / mm			
Zylinder Nr.	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
2	150,053	0,296	0,062
3	150,042	0,240	0,058
4	150,057	0,302	0,060
5	150,058	0,130	0,033
6	0,055	0,106	0,032
Höhe des PK			
Zylinder Nr.	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
	150,240	0,275	0,101

Tabelle 44: Resultate der Konformitätsprüfung von Exemplaren des CTDI-Prüfkörpers der Firma iba dosimetry. Es sind nur die in DIN EN 60601-2-44 definierten geometrischen Größen aufgelistet. Die Messwerte weiterer geometrischer Größen sind in Anlage E.2 aufgelistet.

8.4.2. Resultate der Prüfung der Materialeigenschaft

In Tabelle 4 sind für die in der Stichprobe untersuchten 10 Exemplare des CTDI-Prüfkörpers der Firma iba dosimetry Mittelwert, Minimum und Maximum der Dichte der acht Segmente angegeben, welche bei der Analyse der Daten, s. Abschnitt 6.4.4, betrachtet wurden. In Tabelle 46 sind entsprechende Werte für die untersuchten Exemplare der Prüfkörper der PTW angegeben. Die Prüfkörper mit der Kennzeichnung PK1 bis PK5 entsprechen jeweils den fünf von den Herstellern aus Lagerbeständen zur Verfügung gestellten Exemplaren. Die weiteren Prüfkörper stammen von Anwendern.

Sämtliche untersuchten Exemplare der Prüfkörper erfüllen die Anforderungen der DIN EN 60601-2-44 sowohl für den Mittelwert der Materialdichte, wie auch für das Segment mit der niedrigsten sowie der höchsten mittleren Dichte.

Im Mittel liegt die Materialdichte der Prüfkörper der Firma iba dosimetry um 3 mg/cm^3 oberhalb derjenigen der Firma PTW. Der Unterschied ist klein, jedoch systematisch.

Bei beiden Herstellern stimmt die gemessene Materialdichte der jeweils fünf zur Verfügung gestellten Exemplare des Prüfkörpers bis auf 1 mg/cm^3 überein. Die Produktvariation auf kurzer Zeitskala scheint damit niedrig zu sein. Die Dichtewerte der von den Anwendern erhalten Prüfkörper weichen um maximal 6 mg/cm^3 voneinander ab. Es besteht offensichtlich eine leichte zeitliche Änderung der Dichte der verwendeten Materialien. Die Variation ist für beide Firmen in etwa gleich groß.

In Tabelle 47 ist eine weitere Auswertung des Mittelwertes, Maximums sowie Minimums der mittleren Dichte der fünf von der Firma iba dosimetry zur Verfügung gestellten Exemplare aufgetragen.

Im Unterschied zu der Analyse, deren Resultate in Tabelle 45 aufgetragen sind, wurden hier die einzelnen Segmente schichtweise betrachtet. Die Mittelung über den Zentralbereich des Prüfkörpers entfällt. Es ist zu erkennen, dass bei dieser Auswertung der Minimal- und Maximalwert um bis zu 5 mg/cm^3 von dem Mittelwert abweichen, im Unterschied zu maximal 1 mg/cm^3 im ersten Fall. Die Anforderungen der DIN EN 60601-2-44 werden immer noch in allen Fällen erfüllt. Es ist aber zu erahnen, dass bei einer weiteren Verkleinerung der betrachteten Volumenbereiche es allein durch eine natürliche Schwankung der Daten vorkommen kann, dass Bereiche aus dem in der Norm angegebenen Toleranzbereich herausfallen.

	PK1	PK2	PK3	PK4	PK5	PK6	PK7	PK8	PK9	PK10
min(Dichte) / g/cm^3	1,191	1,192	1,192	1,192	1,193	1,193	1,193	1,190	1,188	1,194
max(Dichte) / g/cm^3	1,193	1,194	1,193	1,194	1,194	1,194	1,194	1,192	1,190	1,196
Mittelwert(Dichte) / g/cm^3	1,192	1,193	1,192	1,193	1,193	1,194	1,194	1,191	1,189	1,195

Tabelle 45: Resultate der Konformitätsprüfung von Exemplaren des CTDI-Prüfkörpers der Firma iba dosimetry

	PK1	PK2	PK3	PK4	PK5	PK6	PK7	PK8	PK9
min(Dichte) / g/cm^3	1,189	1,189	1,189	1,190	1,189	1,186	1,190	1,190	1,194
max(Dichte) / g/cm^3	1,190	1,190	1,190	1,190	1,190	1,190	1,191	1,191	1,195
Mittelwert(Dichte) / g/cm^3	1,190	1,189	1,189	1,190	1,190	1,188	1,191	1,191	1,194

Tabelle 46: Resultate der Konformitätsprüfung von Exemplaren des CTDI-Prüfkörpers der Firma PTW

	PK1	PK2	PK3	PK4	PK5
min(Dichte) / g/cm^3	1,190	1,189	1,189	1,190	1,189
max(Dichte) / g/cm^3	1,197	1,196	1,195	1,197	1,196
Mittelwert(Dichte) / g/cm^3	1,192	1,193	1,192	1,193	1,193

Tabelle 47: Resultate für die Prüfkörper PK1 bis PK5 der Firma iba dosimetry bei Auswertung einzelner Schichten

Die statistische Analyse der Daten im Hinblick auf Cluster von Luftbläschen oder Risse in den Prüfkörpern wies keine Auffälligkeiten auf. Die visuelle Begutachtung der Prüfkörper stützt dieses Resultat.

9. Aufwand der Messprozeduren sowie bestehende Optimierungsmöglichkeiten

9.1. Die Strukturkörper des CDMAM 3.4 sowie der Testeinsatz AP nach PAS1054 (Erläuterungen zur Anwendung – 10/2005)

9.1.1. Aufwand der Messprozedur unter Studienbedingungen

Die Zeit für die Untersuchung eines CDMAM-Prüfkörpers sowie des Testeinsatzes AP setzt sich aus der Zeit für die Vorbereitung der Messung, der Messzeit sowie der Zeit für die Datenanalyse zusammen. In Tabelle 48 sind die Hauptzeitanteile bei der Untersuchung der CDMAM-Prüfkörper sowie von Exemplaren des Testeinsatzes AP aufgelistet.

Insgesamt wird bei Anwendung der Prüfmethode aktuell eine Röhrennutzungszeit von etwa 11 Stunden für eine Untersuchung eines CDMAM-Prüfkörpers sowie von 3 Stunden für die Untersuchung eines Exemplars des Testeinsatzes AP benötigt. Die Zeit für eine Analyse der Objektdicken beträgt etwa acht Stunden bzw. zwei Stunden, die Analyse der Objektgrößen vier Stunden bzw. eine Stunde.

9.1.2. Bestehende Optimierungsmöglichkeiten

Bei prinzipiell gleichbleibendem Untersuchungsvorgehen sind bei einer Anwendung der Messprozedur außerhalb einer Studienumgebung, wie sie innerhalb des Vorhabens bestand, folgende Änderungen zu empfehlen:

1. Verwendung einer leistungsstärkeren Röntgeneinrichtung:

Es sind grundsätzlich leistungsstärkere Röntgeneinrichtungen, als die innerhalb des Vorhabens verfügbare, auf dem Markt erhältlich. Die Messzeit ließe sich bei Verwendung einer geeigneten Röntgenanlage bei gleicher Messunsicherheit und Anzahl an untersuchten Objekten um etwa 25% reduzieren.

Arbeitsschritt	Zeitlicher Aufwand / h
Vorbereitung (Röntgenröhre aufwärmen, Untergrundmessung)	1 bis 1,5
Messzeit CDMAM-Prüfkörper (+ Zeit für die Manipulation der Probe)	8 (+2)
Messzeit Testeinsatz AP (+ Zeit für die Manipulation der Probe)	2 (+1)
Dickenanalyse CDMAM-Prüfkörper	8
Dickenanalyse Testeinsatz AP	2
Analyse der Objektformen und –größen beim CDMAM-Prüfkörper	4
Analyse der Objektformen und –größen beim Testeinsatz AP	1

Tabelle 48: Auflistung des bei der Untersuchung CDMAM-Prüfkörpers sowie bei Exemplaren des Testeinsatzes AP anfallenden zeitlichen Aufwands

2. Verwendung eines anderen Röntgendetektors:

Der innerhalb des Vorhabens verwendete Röntgendetektor weist bei längeren Messzeiten ein lokal zeitlich veränderliches Ansprechverhalten auf. Dieses wurde messtechnisch berücksichtigt. Ein anderer Röntgendetektor mit größerer Quanteneffizienz und geringerer lokal zeitlicher Änderung des Ansprechverhaltens würde es ermöglichen die Messzeit sowie die Messunsicherheit weiter zu reduzieren. Untersuchungen dazu, wie weit beide Größen verringert werden können, wurden im Rahmen des Vorhabens nicht angestellt.

3. Automatisierung des Messvorgangs:

Die Positionierung der Proben erfolgte innerhalb des Vorhabens manuell. Eine Automatisierung war aufgrund der geringen Anzahl an Proben und dem begrenzten Finanzvolumen des Projektes nicht sinnvoll. Eine vollständige Automatisierung der Probenpositionierung würde die Zeit für die die Messung durchführende Person um etwa 1,5 Stunden verringern.

4. Automatisierung der Auswertung:

Die Auswertung der Objektdicken erfolgte innerhalb des Vorhabens semi-automatisch, die Auswertung der Objektgrößen manuell. Eine Automatisierung war aufgrund der geringen Anzahl an Proben und dem begrenzten Finanzvolumen des Projektes nicht sinnvoll. Bei vollständiger Automatisierung unter Nutzung einer Mustererkennung ließe sich die Zeit für die Datenanalyse um mehr als 75% reduzieren.

5. Reduzierung der Anzahl der Messpunkte:

Innerhalb des Vorhabens wurden bei jedem CDMAM-Prüfkörper die Materialdicke von 56 Goldplättchen mit nominellen Dicken zwischen 40 nm und 2 µm untersucht. Die Resultate, s. Tabelle 11, weisen jedoch darauf hin, dass innerhalb eines Prüfkörpers die reale Materialdicke bei Plättchen unterschiedlicher Position oder Größe aber gleicher nomineller Dicke nur wenig schwankt. Es erscheint daher möglich, die Anzahl der Messpunkte ohne wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit um z.B. einen Faktor zwei zu reduzieren. Der zeitliche Gewinn könnte in längere Messzeiten zur Verringerung der Unsicherheit oder eine kürzere Gesamtmesszeit zur Verringerung des Aufwands fließen.

In Summe bestehen zahlreiche noch nicht genutzte Optimierungsmöglichkeiten, die es ermöglichen den Aufwand der Messung ohne Einschränkung der Genauigkeit um mehr als 75% zu reduzieren. Bei Nutzung der Optimierungsmöglichkeiten erscheint es realistisch, eine Stückprüfung eines CDMAM-Prüfkörpers für etwa 400€ durchzuführen.

9.2. Die Strukturkörper der Normen DIN 6868-13 und DIN 6868-4 (inkl. DSA-Prüfkörper) sowie die zugehörigen Schwächungskörper

9.2.1. Aufwand der Messprozedur unter Studienbedingungen

Der Aufwand für die Untersuchung der Prüfkörper nach DIN 6868-4 (inkl. DSA) und DIN 6868-13 sowie den zugehörigen Schwächungskörpern setzt sich aus dem Teil für die Durchführung der Messungen sowie dem für die Auswertung zusammen. Insbesondere die Messzeiten unterscheiden sich dabei zwischen den einzelnen Prüfkörper, jeweils in Abhängigkeit der unterschiedlich großen Anzahl an Einzelaufnahmen, welche für einen Gesamtdatensatz benötigt werden. Ergänzend zu dem Aufwand, der für einen einzelnen

Prüfkörper benötigt wird, bestehen Allgemeinaufwendungen z.B. für die Sicherstellung der Stabilität der Prüfkörperaufnahmen und Erstellung jeweils neuer Homogenitätskorrekturmatriizen. Die Allgemeinaufwendungen wurden in dem geschätzten Zeitaufwand für die Prüfungen mit berücksichtigt.

In Tabelle 40 ist der geschätzte, zeitliche Aufwand für eine Prüfung der einzelnen Prüfkörper zusammengestellt.

9.2.2. Bestehende Optimierungsmöglichkeiten

Es ist nicht realistisch, dass die Messzeit im relevanten Umfang gesenkt werden kann. Bei einer hohen Stückzahl an Prüfungen wäre der Anteil der Allgemeinaufwendungen, welcher in den Messzeiten der Tabelle mit jeweils 0,25 h berücksichtigt ist, sicherlich geringer. Allein aufgrund der Konzeption der Prüfkörper ist es aber in vielen Fällen notwendig, eine hohe Anzahl an Einzelaufnahmen durchzuführen, um alle relevanten Objekte ohne eine relevante Beeinflussung durch benachbarte Strukturen untersuchen zu können. Um ein ausreichend gutes Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu erhalten, muss dabei jede Einzelaufnahme mehrfach wiederholt werden. Eine Verringerung des Aufwands um mehr als 10% bis 15% unter Routinebedingungen ist daher nicht anzunehmen.

Bei der Auswertungszeit ist sicherlich noch Potential zur Optimierung vorhanden. Unter Studienbedingungen wurden etliche Teile der Auswertung manuell durchgeführt. Die Entwicklung einer Automatisierung wäre hier gegenüber der Anzahl untersuchter Exemplare nicht angemessen gewesen. Bei einer Routinetätigkeit ist eine weitergehende Automatisierung der Auswertung sicherlich denkbar und kann zu einer relevanten Zeitersparnis führen. Nachdem die Auswertungszeit allgemein aber schon jetzt in den manuellen Prozessen so stark optimiert ist, dass von einer halben Stunde Auswertungszeit je Prüfkörper ausgegangen werden kann, ist es fraglich, ob sich der Zeitaufwand für die Entwicklung der Automatisierung lohnt.

Es scheint realistisch, anzunehmen, dass Stückprüfungen der Prüfkörper für etwa 200€ bis 300 € durchzuführen sind.

9.3. Der CTDI-Prüfkörper nach DIN EN 60601-2-44

9.3.1. Aufwand der Messprozedur unter Studienbedingungen

Der Aufwand für die Untersuchung der CTDI-Prüfkörper setzt sich aus dem Aufwand für die Prüfung der Geometrie und dem Aufwand für die Prüfung der Materialeigenschaften zusammen.

Prüfkörper	Messzeit / h	Auswertungszeit / h	Allg. Prüfkörperhandlung (Annahme / Versand) / h
Strukturkörper nach DIN 6868-4	1,25	0,5	0,25
DSA-Prüfkörper nach DIN 6868-4	0,75	0,5	0,25
Strukturkörper nach DIN 6868-13	1	0,5	0,25
Schwächungskörper	,33	0,5	0,25

Tabelle 49: Auflistung der bei der Untersuchung der Geometrie der Prüfkörper nach DIN 6868-4 (inkl. DSA) sowie DIN 6868-13 anfallenden zeitlichen Aufwendungen

Der Aufwand der Prüfung der Geometrie setzt sich aus den Gemeinkosten, wie z.B. die Rüstzeit, Kalibrierung, den Maßabgleich sowie die Dokumentation, die einmal je Messpaket anfallen, und den Kosten für die Untersuchung einzelner Prüfstücke zusammen. Die Kosten sind in Tabelle 50 aufgelistet.

Es besteht kein Grund, anzunehmen, dass die Kosten im Routinebetrieb von denen im Projektzeitraum abweichen.

Der Aufwand für die Prüfung der Materialeigenschaften der CTDI-Prüfkörper setzt sich aus dem Aufwand für die Messung und dem für die Datenanalyse zusammen. Der Zeitaufwand, der unter Nutzung der innerhalb des Projektes entwickelten bzw. leicht zu ergänzenden Möglichkeiten der Automatisierung realistisch ist, ist in Tabelle 51 aufgelistet.

9.3.2. Bestehende Optimierungsmöglichkeiten

Es bestehen in kleinerem Umfang Möglichkeiten, die Datenanalyse der Prüfung der Materialeigenschaft der CTDI-Prüfkörper weiter zu automatisieren.

Bei einer Anwendung der Prüfungen in der Routine sind darüber hinaus insbesondere folgende Möglichkeiten zur Optimierung zu bedenken:

1. Um Gemeinkosten niedrig zu halten, die mit der Vorbereitung und Analyse der Daten einhergehen, sollten die Messungen zeitlich gebündelt für einige Prüfstücke durchgeführt werden.
2. Es wäre zu überlegen, ob es möglich ist, aus einer Produktionsserie von Prüfkörpern nur ein Exemplar auf die Materialeigenschaften hin zu untersuchen. Es wäre zu vermuten, dass innerhalb einer Produktionsserie die Materialeigenschaft des PMMA nur gering schwankt. Hierzu wurden jedoch keine Untersuchungen im Rahmen des Vorhabens angestellt.

Es scheint realistisch, anzunehmen, dass die Stückprüfung eines Satzes von Kopf- und Körperphantom der CTDI-Prüfkörper für etwa 400€ bis 450 € durchzuführen ist.

Arbeitsschritt	Kosten
Gemeinkosten, z.B. für Rüstzeiten, Kalibrierung, Maßabgleich oder Dokumentation	240 € je Messpaket
Untersuchung eines Prüfkörperpaares aus Kopf- und Körperphantom	240 € je Prüfkörperpaar innerhalb eines Messpaketes

Tabelle 50: Auflistung der bei der Untersuchung der Geometrie von CTDI-Prüfkörpern anfallenden Kosten

Arbeitsschritt	Zeitaufwand / h
Messung	0,75
Datenanalyse und Dokumentation	0,75
Allgemeines Prüfkörperhandling (Annahme, Versand)	0,25

Tabelle 51: Auflistung des bei den Untersuchung der Materialeigenschaft von CTDI-Prüfkörpern anfallenden Zeitaufwandes

10. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

10.1. Allgemeines

Die Schlussfolgerungen und Empfehlungen beziehen sich auf folgende Teilbereiche:

1. grundlegende Eignung der Messprozedur:

Es wird bewertet, in wie weit die im Rahmen des Vorhabens gewählte Messprozedur, ggf. unter Berücksichtigung der unter Abschnitt 9 genannten Optimierungsmöglichkeiten, für den Einsatzzweck, d.h. eine in der Routine anwendbare Prüfung der Konformität von Prüfkörpern mit deren Norm-Spezifikation, geeignet erscheint.

2. Norm-Konformität und Fertigungsstreuung:

Es wird vor dem Hintergrund der Resultate der Stichprobe bewertet, in wie weit die aktuell auf dem Markt verfügbaren Exemplare der Prüfkörper, ggf. auch einzelne Komponenten der Prüfkörper, den Spezifikationen der jeweiligen Norm entsprechen und wie groß die Fertigungsstreuung ist.

3. Allgemeine Hinweise:

Es werden, soweit innerhalb des Vorhabens Probleme in diesem Bereich offenbar geworden sind, Hinweise zur Spezifikation der Prüfkörper in den jeweiligen Normen sowie ggf. zur Eignung der gewählten Prüfkörper gegeben. Auch werden teilweise die in den Normen festgelegte Spezifikation der Prüfkörper sowie die zulässigen Fertigungstoleranzen kritisch betrachtet.

10.2. Empfehlungen, welche mehrere Prüfkörper betreffen

Bei kritischer Durchsicht der Normen sowie für die untersuchten Mammographie Prüfkörper der PAS 1054 und des Datenblattes des CDMAM-Prüfkörpers fallen einige, grundsätzliche Probleme auf. Diese Probleme werden im Folgenden gesammelt aufgeführt, um unnötige Wiederholungen bei mehreren Prüfkörpern zu vermeiden.

1. Definition von Objekten nach Geometrie und Material ohne weitere Spezifikationen:

In einigen Fällen werden Objekte von Prüfkörpern, bei denen anhand der Durchstrahlungsaufnahmen Kontraste ausgewertet werden, definiert, ohne dass das Material oder die Objektdicke ausreichend genau mit einer zulässigen Toleranz spezifiziert sind. Dieses erscheint weniger sinnvoll. Es führt potentiell zu einer größeren Streuung bei der Fertigung von Prüfkörpern. Es resultieren Prüfkörper mit unterschiedlichen Eigenschaften und dadurch unterschiedlichen Resultaten beim Einsatz in Prüfungen.

Es wäre empfehlenswert, anstelle der Materialdicken Schwächungswerte oder Kontraste unter der Annahme definierter Expositionsbedingungen anzugeben. Hierdurch würden auch Diffusionszonen oder Haftsichten berücksichtigt, die anderenfalls nicht in den Spezifikationen auftreten.

2. Definition der Objektraueheit:

Die Komponenten der Prüfkörper sind nur im Hinblick auf einen Wert, z.B. die Materialdicke, spezifiziert. Es ist nicht angegeben, in welchem Umfang vor allem bei größeren Objekten lokal Abweichungen von diesem Wert auftreten dürfen.

Die Prüfkörper sind als Multischichtsysteme aufgebaut. Lokale Variationen einzelner Komponenten, welche eigentlich untergeordnete Bedeutung haben, z.B. Schwächungskörper, können bei größerer Objektraueheit Einfluss auf den Kontrast und damit die Erkennbarkeit von anderen Objekten nehmen. Innerhalb des Vorhabens wurde, vor allem bei den Dynamiktreppen, festgestellt, dass die Stufen lokal, insbesondere im Randbereich, relevant von den innerhalb der zugehörigen Norm spezifizierten Dicken abweichen. Es erscheint sinnvoll, einen Zentralbereich zu definieren, den der Anwender erwartungsgemäß auch bei den Prüfkörperaufnahmen auswertet. In diesem sollten höhere Anforderungen an die Rauheit oder die zulässige Abweichung von der Spezifikation gestellt werden, als im Randbereich.

3. Definition der Objektform:

In einigen Fällen, z.B. im dünnen Bereich der Dynamiktreppen sowie bei den Aluminiumstreifen des DSA-Prüfkörpers, wurde festgestellt, dass die Komponenten deutlich von einer idealen Positionierung senkrecht zur Strahleinfallsrichtung abweichen können. Sie waren entweder gebogen oder teilweise geknittert. Beides führt zu einer Änderung der resultierenden Röntgenabbildungen. Es erscheint sinnvoll, eine maximal zulässige Abweichung von der idealen Positionierung der Komponenten zu definieren.

4. Anordnung der Komponenten in Strahlrichtung:

Die Prüfkörper sind als Multischichtsysteme aufgebaut. Es ist dabei nicht auszuschließen, dass das Röntgenabbild relevant von der Lage der Komponenten in Strahlrichtung zueinander beeinflusst wird. Es erscheint sinnvoll, innerhalb der Normen, die exakte Lage der einzelnen Komponenten und insbesondere die Lage im Bezug zu anderen Komponenten zu spezifizieren.

5. Laterale Anordnung von Komponenten:

In den Röntgenabbildungen der Prüfkörper fallen zahlreiche Abbildungsartefakte auf, welche sich dadurch ergeben, dass Materialien deutlich unterschiedlicher linearer Schwächung unmittelbar nebeneinander liegen. Insbesondere in der Umgebung der dünnen Bereiche Dynamiktreppen ist eine deutliche Überstrahlung in die Umgebung zu erkennen. Diese beeinflusst die Abbildung dortiger Komponenten. Im Fall des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 sind die Niedrigkontrastobjekte in diesem Bereich dadurch prinzipiell nicht sichtbar. Es sollte bei der Konzeption des Aufbaus von Prüfkörpern an Mustern kritisch die Beeinflussung der einzelnen Komponenten innerhalb des Prüfkörpers untereinander geprüft werden. Niedrigkontrastobjekte sollten stets in Bereichen der Prüfkörper positioniert werden, die frei von Einstrahlungsartefakten sind.

10.3. Die Strukturkörper des CDMAM 3.4 sowie der Testeinsatz AP nach PAS1054 (gemäß der Erläuterungen zur Anwendung – 10/2005)

10.3.1. Grundlegende Eignung der Messprozedur

Die entwickelte Messprozedur erscheint geeignet, um in der Routine CDMAM-Prüfkörper sowie Exemplare des Testeinsatzes AP auf deren Übereinstimmung mit den jeweiligen Spezifikationen zu prüfen.

Die Messunsicherheit ist ausreichend, um relevante Abweichungen von den bestehenden Prüfkörperspezifikationen festzustellen. Hierzu ist eine relative Messung ausreichend. Die

Unsicherheit der absoluten Messung der Golddicke erscheint auch ausreichend klein. Hierbei ist gleichwohl zu berücksichtigen, dass ein systematischer Fehler an dieser Stelle keinen Einfluss auf die Eignung des CDMAM-Prüfkörpers hat. Der Grund hierfür ist folgender: Der Prüfkörper wird exklusiv von einem Hersteller produziert. In der Spezifikation des Prüfkörpers werden Materialdicken angegeben. Auf den vom Hersteller angegebenen Materialdicken basieren sämtliche gültigen Grenzwerte für Prüfungen von Mammographieanlagen. Selbst eine systematische Abweichung der Golddicken in den Prüfkörpern gegenüber der Spezifikation im Datenblatt hätte keine Auswirkung, da die Grenzwerte ohne Wissen um reale Materialdicken einzig auf Basis der Angaben im Datenblatt festgelegt wurden. Im Unterschied dazu ist die Fertigungsstreuung bei dem Prüfkörper von großer Bedeutung für die Eignung einzelner Exemplare. Derartige Abweichungen vom Mittelwert führen dazu, dass Resultate von Prüfungen zur Eignung von Mammographieanlagen Prüfkörper-abhängig sind. Derartige Unterschiede lassen sich sicher detektieren.

Das innerhalb des Vorhabens genutzte Messvorgehen lässt sich im Hinblick auf den benötigten Zeitaufwand für die Messung und Datenanalyse durch die Wahl anderer Gerätetechnik sowie Automatisierungen noch deutlich optimieren. Selbst dann, wenn nur ein Teil der in Abschnitt 9.1.2 genannten Optimierungsmöglichkeiten genutzt wird, ist zu erwarten, dass der zeitliche Aufwand dem Wert des Prüfkörpers sowie seiner Bedeutung angemessen sein wird. Die Kosten einer Prüfung werden erwartungsgemäß im Bereich weniger hundert Euro liegen.

10.3.2. Norm-Konformität und Fertigungsstreuung

Die beiden untersuchten Prüfkörpertypen, der CDMAM-Prüfkörper sowie der Testeinsatz AP, bewegen sich auf grundsätzlich unterschiedlichen Qualitätsniveaus in Bezug auf die Norm-Konformität und Fertigungsstreuung.

Die Goldplättchen in den untersuchten CDMAM-Prüfkörpern sind meistens gut zylinderförmig. Die gemessene Golddicke von Objekten nominell gleicher Dicke und Größe innerhalb eines Exemplars des Prüfkörpers ist im Rahmen der Messunsicherheit als gleich anzusehen. Mit Ausnahme der Objekte mit einem nominellen Durchmesser von 80 μm ist die Materialdicke auch bei Objekten unterschiedlicher Größe bei nominell gleicher Materialdicke als gleich anzusehen. Die Streuung der Dicke der Goldplättchen mit Nominaldicken von weniger als 100 nm ist im Rahmen der Messunsicherheit nicht auflösbar. Bei größeren Materialdicken sind die Unterschiede signifikant. Bei einer nominellen Materialdicke von 2 μm beträgt die Spanne zwischen dem Objekt mit der kleinsten und dem mit der größten gemessenen Materialdicke 230 nm. Es ist zu vermuten, dass die Streuung der Plättchendicke bei den Goldobjekten ab etwa 1 μm nomineller Dicke so groß ist, dass diese bei Auswertungen von CDMAM-Aufnahmen zu relevant unterschiedlichen Ergebnissen führen kann. Es gibt Hinweise aus dem qualitätsgesicherten, organisierten Mammographiescreening, die einen derartigen, Prüfkörper-abhängigen Einfluss feststellen, ohne ihn quantifizieren oder die Ursache ermitteln zu können.

Mit Ausnahme der Objekte mit einem Durchmesser von 80 μm bzw. 100 μm wurden keine Hinweise darauf gefunden, dass die Goldplättchen des CDMAM relevant von einer idealen Kreisform bzw. relevant von dem nominellen Durchmesser abweichen. Bei diesen Objekten unterscheiden sich gleichwohl 35% der untersuchten Exemplare um mehr als 10 μm in den Hauptachsen. Zudem weichen etwa 62% der untersuchten Exemplare mit 80 μm oder 100 μm nominellem Durchmesser um mehr als 10% von der nominellen Fläche ab. Auch wenn aus den beobachteten Abweichungen Probleme in der Anwendung der Prüfkörper zu prognostizieren sind, sind die festgestellten Abweichung in der Plättchengröße im Einklang

mit der vom Hersteller vorgegebenen Spezifikationen und somit nicht als Mangel der Produkte anzusehen.

Es ist zu überlegen, ob perspektivisch der Prüfkörper abhängige Einfluss bei der Analyse der CDMAM-Aufnahmen innerhalb der Mammographie-Qualitätssicherung berücksichtigt werden soll. Entsprechendes wäre z.B. durch einen Prüfkörper-abhängigen Kalibrierfaktor möglich, der auf das Resultat bei der elektronischen Auswertung von CDMAM-Aufnahmen angewendet wird. Das Vorgehen entspräche in etwa dem bei der Dosismessung durch Dosimeter. Auch diese werden vor dem Inverkehrbringen durch Kalibrierfaktoren auf einander abgeglichen. Die Kalibrierfaktoren könnten anhand von Messungen der Materialdicke ermittelt werden. Es ist aber gleichermaßen denkbar, die Kalibrierfaktoren anhand von CDMAM-Aufnahmen im Vergleich zu einigen, genau bekannten Referenz-Prüfkörpern zu erstellen. Im letzteren Fall würden die Materialdicke der Goldplättchen sowie deren Größe nicht bekannt sein. Der Einsatzzweck der Prüfkörper wäre jedoch gewahrt.

Die im Rahmen der Stichprobe untersuchten Exemplare des Testeinsatzes AP haben alle relevante Mängel im Hinblick auf die Objektform bzw. die Materialdicke. Insbesondere die Goldplättchen mit einer nominellen Materialdicke von 1,8 µm weichen in mehr als 50% der untersuchten Prüfkörperexemplare deutlich von einer Zylinderform ab. Es wurde kein Prüfkörper untersucht, bei dem die Dicke sämtlicher Goldplättchen als unkritisch im Hinblick auf die Norm-Spezifikation zu bewerten ist.

Für eine Relativprüfung, wie sie Konstanzprüfungen darstellen, ist der Prüfkörper wahrscheinlich geeignet, da in dem Fall nicht die absolute Qualität des Systems bewertet wird, sondern ausschließlich in einem Trend Veränderungen festgestellt werden müssen. Es ist dabei jedoch weiterhin als kritisch anzusehen, dass insbesondere das Objekt mit einem nominellen Durchmesser von 100 µm oftmals allein aufgrund der Fertigung des Prüfkörpers nicht sichtbar ist. Es ist damit mit dem Prüfkörper keine Prüfung der Bildqualität von Mammographieanlagen in dem Bereich kleiner Objekte möglich. Für eine Abnahmeprüfung, bei der entschieden wird, ob eine Röntgeneinrichtung für ihren Bestimmungszweck geeignet ist, erscheint der Testeinsatz AP grundsätzlich ungeeignet.

10.3.3. Allgemeine Hinweise

Folgende, insbesondere den Normungsprozess betreffende Dinge fallen bei der genaueren Befassung mit den Mammographieprüfkörpern auf:

1. Die Spezifikation des Testeinsatzes AP in den „Erläuterungen zu PAS 1054“ [3] sieht eine zulässige Fertigungstoleranz von 10 nm für sämtliche Plättchendicken vor. Die dort aufgestellte Forderung ist aus folgenden Gründen als problematisch anzusehen:
 - a. Eine Überprüfung der in den Erläuterungen zu PAS 1054 aufgestellten Forderung würde erfordern, dass Messungen mit einer erweiterten Unsicherheit von 3 nm durchgeführt werden. Es ist nicht ersichtlich, dass dieses mit vertretbarem Aufwand durch irgendeine Messmethode möglich wäre.
 - b. Beide Prüfkörper, insbesondere der Testeinsatz AP, für den die Forderung aufgestellt wurde, halten die Forderung insbesondere bei den dickeren Objekten deutlich nicht ein. Eine derart präzise Fertigung über den Gesamtbereich der Materialdicken einzuhalten ist in der Routine als aktuell nicht realisierbar anzunehmen.
 - c. Es gibt keine Evidenz, dass eine Fertigungstoleranz von 0,5% relevant für die Prüfung der Qualität von Röntgeneinrichtungen, selbst von Mammographieeinrichtungen, ist.

Es wäre empfehlenswert, zulässige Fertigungstoleranzen zu verwenden, die sich an der für die Qualitätssicherung relevanten Genauigkeit orientieren und sich messtechnisch überprüfen lassen.

2. Für die Goldplättchen werden Materialdicken in der Produktspezifikation angegeben. Hierdurch wird die Freiheit der Hersteller ohne Not eingeschränkt. Zudem ist die Vorgabe einer Materialdicke ohne weitere Angaben, wie z.B. einer Flächenbelegung (in g/cm^2) oder einer Materialreinheit bei Angabe der möglichen Verunreinigungen nicht sinnvoll. In dem Datenblatt des CDMAM-Prüfkörpers wird die Gold-Reinheit spezifiziert, das ist bei dem Testeinsatz AP nicht der Fall. Eine Materialdicke wird in beiden Fällen nicht angegeben.

Es wäre empfehlenswert, anstelle der Materialdicken Schwächungswerte oder Kontraste unter der Annahme definierter Expositionsbedingungen anzugeben. Hierdurch würden auch Diffusionszonen oder Haftsichten berücksichtigt, die anderenfalls nicht in den Spezifikationen auftreten. Weiterhin wäre es empfehlenswert, wenn in der Spezifikation der Materialdicke eine zulässige Rauheit bzw. Variation der Dicke über den Objektbereich angegeben würde. Ohne dieses besteht keine Klarheit darüber, ob der spezifizierte Wert an allen Stellen des Objektes oder nur im Mittel einzuhalten ist bzw. wie groß Unterschiede innerhalb eines Objektes sein dürfen. Entsprechendes hat aber großen Einfluss auf die Objekterkennbarkeit.

3. Im Datenblatt des CDMAM-Prüfkörpers wird sehr detailliert spezifiziert, welche Form- und Größenabweichungen sowie Abweichungen von der Zylinderform bei den Goldplättchen zu erwarten sind. Bei dem Testeinsatz AP wird nur eine zulässige Größentoleranz definiert, ohne die dreidimensionale Objektform zu berücksichtigen.

Es wäre empfehlenswert, neben dem Objektdurchmesser Anforderungen an die dreidimensionale Objektform zu stellen. Zudem sollte definiert werden, bei welcher Höhe bezogen auf das Maximum die Objektgröße festgelegt wird.

4. Aktuell ist zur Spezifikation der Größe der Objekte deren Durchmesser angegeben. Es erscheint sinnvoll zu sein, hier eine erlaubte Abweichung von der Kreisform sowie eine erlaubte Abweichung der Fläche von der Nominalfläche des Goldplättchens anzugeben.
5. Für die Trägermaterialien des CDMAM sowie des Testeinsatzes AP sind keine Fertigungstoleranzen, insbesondere auch keine Angaben zu lokaler Rauheit angegeben. Es wäre empfehlenswert, das Material, die Dicke nebst zulässiger Fertigungstoleranz sowie eine mögliche Materialbearbeitung in die Prüfkörperspezifikation aufzunehmen.

6. Für die PMMA-Haube des CDMAM-Prüfkörpers sowie die Hülle des Testeinsatzes AP werden keine Fertigungstoleranzen gegeben. Die Dicke des Testeinsatzes AP sowie das zu verwendende Material sind in der PAS 1054 nicht spezifiziert.

Es wäre empfehlenswert, das Material sowie die Dicke nebst zulässiger Fertigungstoleranz in die Prüfkörperspezifikation aufzunehmen.

7. Bei der qualitativen Analyse der Aufnahmen fielen etliche Artefakte auf, die von stark absorbierenden Strukturen stammen. Da die Strukturen eine für die Auswertung relevante Größe haben, können hierdurch Fehlentscheidungen resultieren. Derartige Strukturen werden aktuell in der Spezifikation nicht berücksichtigt.

Es wäre empfehlenswert, zu fordern, dass in den Auswertebereichen keine Artefakte von ähnlicher Größe wie die zu bewertenden Objekte sein dürfen.

10.4. Die Strukturkörper der Normen DIN 6868-13 und DIN 6868-4 (inkl. DSA-Prüfkörper) sowie die zugehörigen Schwächungskörper

10.4.1. Grundlegende Eignung der Messprozedur

Die entwickelte Messprozedur erscheint geeignet, um in der Routine Prüfkörper der Normen DIN 6868-4 sowie DIN 6868-13 auf ihre Übereinstimmung mit den in den Normen festgelegten Spezifikationen zu prüfen.

Die Messunsicherheit ist ausreichend klein, um relevante Abweichungen eines Objektes von seiner Spezifikation in der zugehörigen Norm festzustellen.

Der Aufwand ist in einer dem Wert der Prüfkörper angemessenen Höhe.

10.4.2. Norm-Konformität und Fertigungsstreuung

In der Stichprobenprüfung fielen etliche, zum Teil gravierende Mängel von Prüfkörpern auf. Diese lassen sich grob in folgende Gruppen gliedern:

1. Systematische Abweichung von Komponenten der Prüfkörper eines Herstellers von der Norm-Spezifikation: In diesem Fall unterscheidet sich die mittlere Materialdicke der Objekte systematisch von der in der zugehörigen Norm gegebenen Spezifikation. Entsprechendes trifft z.B. für die durch Bohrungen im PMMA-Grundkörper realisierte Niedrigkontrastelemente bei den Exemplaren des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 vom Hersteller III zu, s. Tabelle 18.
2. Große Fertigungsstreuung von Komponenten der Prüfkörper eines Herstellers: In diesem Fall ist die mittlere Materialdicke aller von dem entsprechenden Hersteller untersuchten Komponenten in den Prüfkörpern möglicherweise nicht einmal so stark gegenüber dem Nominalwert verschoben. Die individuellen Komponenten weichen jedoch teilweise deutlich voneinander ab. Entsprechendes trifft z.B. für die Niedrigkontrastobjekte bei den Exemplaren des Prüfkörpers nach DIN 6868-13 vom Hersteller I zu, s. Tabelle 30.
3. Offensichtliche Fehler bei dem Bau einzelner Prüfkörper: In diesem Fall weichen einzelne Prüfkörper ganz deutlich von allen anderen untersuchten Exemplaren des Herstellers ab. Entsprechendes trifft z.B. für die beiden DSA-Prüfkörper zu, deren Resultate in Tabelle 33 zusammengetragen sind. Die Abweichung lässt sich in diesem Fall gut Mängeln innerhalb des manuellen Fertigungsprozesses zuordnen.

Neben den quantitativen Abweichungen von den Spezifikationen der zugehörigen Normen wurden zahlreiche qualitative Mängel bei der Fertigung der Prüfkörper festgestellt. Exemplarisch wird hier auf die große Inhomogenität der Kupferstufen des Prüfkörpers nach DIN 6868-4, s. Abbildung 71, hingewiesen.

Allgemein ist es auffallend bei welcher großer Anzahl der untersuchten Prüfkörper relevante Mängel festgestellt wurden. Wenn die Stichprobe als repräsentativ anzunehmen ist und es gibt zunächst einmal keinen Grund dieses nicht anzunehmen, so ist von einem relevanten Anteil potentiell weniger geeigneter Prüfkörper auszugehen, welche sich aktuell bei Betreibern in der Nutzung befinden.

Es ist neben den oben erwähnten Dingen auf eine Sache in Bezug auf den Einsatzzweck der Prüfkörper hinzuweisen: Zahlreiche der Prüfungen zu denen die Prüfkörper eingesetzt werden, z.B. die Dynamiktreppen, sind qualitative Prüfungen. Abweichungen eines Prüfkörpers von einer Spezifikation fallen bei diesen Prüfungen weniger stark ins Gewicht, als bei quantitativen Prüfungen oder Prüfungen unter Verwendung der

Niedrigkontrastobjekte. Entsprechendes wurde bereits bei der Diskussion der Resultate berücksichtigt.

10.4.3. Allgemeine Hinweise

Folgende, insbesondere den Normungsprozess betreffende Dinge, fallen bei der genaueren Befassung mit den Prüfkörpern nach DIN 6868-4 sowie DIN 6868-13 auf:

1. Einzig für die Niedrigkontrastobjekte im Prüfkörper nach DIN 6868-13 ist normativ ein Kontrast als relevante Größe angegeben. Ein zu erwartender Kontrast findet sich ansonsten höchstens erläuternd zu den in der Spezifikation angegebenen Materialdicken. Dieses erscheint problematisch. Die für den Anwendungszweck relevante Größe ist in vielen Fällen ein Kontrast. Es erscheint sinnvoll, dass dieser vom Hersteller in seinen Prüfkörpern mit einer zulässigen Toleranz erreicht wird, die hierzu eingesetzten Materialien sollten dem Hersteller überlassen bleiben.
2. Aktuell werden nur für wenige Komponenten Toleranzwerte in der zugehörigen Norm angegeben. Dem Hersteller fehlt damit eine direkte Vorgabe, innerhalb welchen Toleranzbereichs die gefertigten Komponenten liegen müssen.
3. Bei den Prüfkörpern befinden sich aktuell Objekte deutlich unterschiedlicher Schwächung in räumlicher Nähe. Es kommt hier zu Überstrahlungen von einem Bereich in den anderen. In einigen Fällen, s. Abbildung 47, werden durch die Überstrahlung Objekte vollständig überdeckt. Sie sind prinzipiell ohne eine Änderung des aktuellen Prüfkörperdesigns nicht sichtbar.
4. In den beiden Normen DIN 6868-4 und DIN 6868-13 sind ähnliche Dinge unterschiedlich spezifiziert. Zu nennen ist z.B. die unterschiedliche Dicke der zu verwendenden Bleistrichraster. Es erscheint unplausibel, dass wirklich Raster zweier unterschiedlicher Materialdicken verwendet werden müssen. Andererseits führt diese Dopplung zu erhöhtem Aufwand auf Seiten der Hersteller und damit erhöhten Kosten. In wie weit Bleistrichraster im Zeitalter der Digitaltechnik ohnehin eine sinnvolle Messung der Bildqualität darstellen ist eine andere Sache auf die an dieser Stelle nur hingewiesen wird, ohne sie weiter zu diskutieren.
5. Die aktuellen Norm-Spezifikationen sind an einigen Stellen im Hinblick auf den konkreten Aufbau der Prüfkörper nicht präzise. Dieses führt zu unterschiedlichen Detaillösungen bei verschiedenen Herstellern. Hier erscheint eine Vereinheitlichung sinnvoll.
6. Die Dicke sowie das Material der Rasterplatte sind weder in DIN 6868-4 noch in DIN 6868-13 definiert. Dieses ist erstaunlich und erscheint unplausibel.
7. Der Prüfkörper nach DIN 6868-4 wird für die Prüfung von Durchleuchtungseinrichtungen eingesetzt. Bei Anlagen mit einem kleinen Bildformat bestehen bei der Verwendung dieses Prüfkörpers gleichwohl Probleme, sämtliche relevanten Prüfkörperteile gleichzeitig abzubilden. Hier sollte überlegt werden, das Design ggf. in entsprechender Richtung zu ändern.

Vor dem Hintergrund der zahlreichen strukturellen Probleme, die aus dem Design der Prüfkörper stammen, erscheint es sinnvoll, zu fordern, dass alle neue spezifizierten Prüfkörper unabhängig von dem jeweiligen Normungsgremium auf die praktische Anwendbarkeit hin begutachtet werden.

Aufgrund der zahlreichen in der Stichprobe festgestellten Mängel an Exemplaren der Prüfkörper erscheint es allgemein notwendig, zu fordern, dass Prüfkörper vor ihrem

Inverkehrbringen von einer unabhängigen Stelle überprüft werden. Die Forderung nach einer Stückprüfung scheint sinnvoll und dem Einsatzzweck angemessen.

10.5. Der CTDI-Prüfkörper nach DIN EN 60601-2-44

10.5.1. Grundlegende Eignung der Messprozedur

Die entwickelte Messprozedur erscheint geeignet, um in der Routine CTDI-Prüfkörper auf die Übereinstimmung mit der in DIN EN 60601-2-44 festgelegten Spezifikationen zu prüfen.

Die Messunsicherheit ist ausreichend, um relevante Fertigungstoleranzen festzustellen.

Der Aufwand ist in einer dem Wert des Prüfkörpers angemessenen Höhe.

10.5.2. Norm-Konformität und Fertigungsstreuung

Alle untersuchten Exemplare des CTDI-Prüfkörpers erfüllen die bestehenden Anforderungen. Die theoretischen Vorüberlegungen, s. Abschnitt 5.2, zeigen, dass vergleichsweise geringe Anforderungen genügen, um den Einsatzzweck des Prüfkörpers nicht zu gefährden.

10.5.3. Allgemeine Hinweise

Folgende, insbesondere den Normungsprozess betreffende Dinge fallen bei der genaueren Befassung mit den CTDI-Prüfkörpern auf:

1. Die Spezifikation des CTDI-Prüfkörpers enthält keine Fertigungstoleranz für die Geometrie. Anhand der theoretischen Vorüberlegungen zu den im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Untersuchungen erscheint es sinnvoll, folgende Toleranzen zuzulassen:
 - a. Länge des Phantoms: $\pm 1 \text{ cm}$
 - b. Durchmesser des Phantoms: $\pm 1 \text{ mm}$
 - c. Radiale Position der Mittenachse der Bohrungen für die CTDI-Kammer $\pm 1 \text{ mm}$
 - d. Verkippung der Mittenachse der Bohrungen für die CTDI-Kammer gegen die Zylinderachse: $\pm 1^\circ$
2. In der Norm wird aktuell nur die radiale Entfernung der Mittenachse der Bohrungen für die CTDI-Kammer in Bezug auf die Prüfkörperoberfläche spezifiziert. Es wird keine Angabe zum Durchmesser der Bohrungen gemacht. In der Praxis hat das dazu geführt, dass die beiden auf dem deutschen Markt vertretenen Firmen unterschiedliche Bohrungsdurchmesser, etwa 9,1 mm bzw. 12,6 mm, verwenden. Der CTDI-Wert der Messung wird stark von den Messwerten der peripher gelegenen Messkammern bestimmt. Je weniger absorbierendes Material oberhalb der Kammern liegt, umso größer wird daher erwartungsgemäß der gemessene CTDI-Wert. Die Festlegung eines einheitlichen Bohrungsdurchmessers bzw. eines erlaubten Intervalls erscheint sinnvoll.
3. Die in der Spezifikation angegebene Fertigungstoleranz für die Materialdichte führt gemäß der theoretischen Abschätzung zu einer Unsicherheit von etwa 0,3%. Diese Anforderung wird zwar von den Herstellern eingehalten, erscheint jedoch unnötig streng.
4. Die Fertigungstoleranz für die Materialdichte nennt kein Volumen, in dem die Dichte einzuhalten ist. Kleine Dichteschwankungen oder Bläschen haben jedoch keine nennenswerte Auswirkung auf die Eignung des Prüfkörpers. Zudem wird eine

Überprüfung der Norm-Konformität unnötig aufwändig, wenn Volumina im Bereich einige Kubikmillimeter zu untersuchen sind.

5. Es besteht aktuell keine Anforderung an eine Artefaktfreiheit. Risse oder Aggregate von Bläschen sind aktuell, je nach Interpretation der Anforderungen an die Dichte des Materials möglich. Eine Anforderung an Artefaktfreiheit erscheint sinnvoll.

11. Zusammenfassung und Ausblick

Entsprechend den Anforderungen der Röntgenverordnung und abgeleiteter Richtlinien muss an Röntgeneinrichtungen zur Untersuchung von Menschen sichergestellt sein, dass die erforderliche Bildqualität mit möglichst geringer Strahlenexposition erreicht wird (§16 Abs. 2 Satz 1 RöV). Hierzu sind vor der Inbetriebnahme einer Röntgeneinrichtung eine Abnahmeprüfung sowie danach in regelmäßigen Abständen Konstanzprüfungen durchzuführen. Prüfkörper nehmen bei Abnahme- und Konstanzprüfungen eine zentrale Rolle ein.

Der Aufbau der Prüfkörper sowie die zu verwendenden Materialien sind neben den Prüfverfahren in den entsprechenden DIN-Normen spezifiziert. Prüfkörper werden von Firmen auf Basis der in den Normen gegebenen Informationen im Rahmen der firmeneigenen Qualitätssicherung hergestellt und in Verkehr gebracht.

Es gibt aus vorherigen Untersuchungen des Normenausschusses Radiologie (NAR) sowie Beobachtungen von Nutzern der Prüfkörper Hinweise darauf, dass nicht alle Exemplare der auf dem Markt erhältlichen Prüfkörper ihren Norm-Spezifikationen genügen. Gleichwohl besteht bis heute kein Hersteller unabhängiges System zur Prüfung der Konformität von Prüfkörpern mit ihren in den Normen gegebenen Spezifikationen.

Innerhalb des Vorhabens wurde exemplarisch für einige Prüfkörpertypen eine Methode entwickelt, welche es ermöglicht, zerstörungsfrei die Konformität von Prüfkörpern zu überprüfen. Betrachtet wurden drei Gruppen von Prüfkörpern: die Mammographie-Prüfkörper CDMAM sowie Testeinsatz AP, die Prüfkörper der konventionellen Röntgendiagnostik, welche in den Normen DIN 6868-4 und DIN 6868-13 festgelegt sind sowie der CTDI-Prüfkörper welcher in der Norm DIN EN 60601-2-44 festgelegt ist. Ergänzend wurden die zusammen mit den Strukturkörpern verwendeten Schwächungskörper untersucht.

Die Strukturkörper der untersuchten Prüfkörper, mit Ausnahme des CTDI-Prüfkörpers, welcher ausschließlich für dosimetrische Prüfungen eingesetzt wird, enthalten Komponenten, welche im Durchstrahlungsbild zu unterschiedlich großen Signalen führen. Diese Signale, bzw. im Bild dann Grauwerteunterschiede, werden z.B. im Hinblick auf den Dynamikbereich bzw. das Niedrigkontrastaufklärungsvermögen des bildgebenden Systems ausgewertet.

Eine zerstörungsfreie Prüfung setzt voraus, dass, ohne die Integrität des Prüfkörpers zu zerstören, Informationen über die im Innern des Prüfkörpers gelegenen Strukturen erhalten werden. In vielen Fällen handelt es sich dabei um die Information über eine Materialdicke in Strahlrichtung. Innerhalb des Vorhabens wurde dieser Zusammenhang zwischen der Materialdicke und dem Signalwert von Röntgendurchstrahlungsaufnahmen zur Prüfung der Konformität unbekannter Prüfstücke ausgenutzt.

Damit eine Prüfung unbekannter Prüfstücke möglich ist, muss für jede einzelne Komponente der Prüfkörper der Zusammenhang zwischen dem Signalwert und der Materialdicke bekannt sein. Durch die innerhalb des Vorhabens verwendete Herangehensweise wird neben der Materialdicke als weiteren Einflussfaktor die Reinheit der verwendeten Materialien berücksichtigt. Dieses ist im Hinblick auf den resultierenden Kontrast sinnvoll. Der Grund hierfür ist, dass z.B. bei einer mit einem großen Anteil an schweren Elementen verunreinigten

Komponente auch bei ansonsten korrekter Materialdicke ein deutlich abweichendes Signal in Durchstrahlungsaufnahmen resultiert.

Innerhalb des ersten Teils des Vorhabens wurde der Zusammenhang zwischen den Signalwerten in Durchstrahlungsbildern und den Eigenschaften von Komponenten der Prüfkörper ermittelt.

Die Arbeiten basieren auf Referenz-Prüfkörpern bei denen eine genaue Kenntnis über den Zusammenhang zwischen der Materialdicke und dem resultierenden Signalwert von Komponenten besteht. Unter der Annahme, dass die Anforderungen an die Materialreinheit erfüllt sind, wird anhand dieser Informationen auf die Ausdehnung von Komponenten in unbekanntem Prüfkörpern geschlossen.

Es wurden Referenz-Prüfkörper festgelegt und mit hoher Genauigkeit geometrisch charakterisiert. Als Referenz-Prüfkörper wurden leicht modifizierte Exemplare der „normalen“ Prüfkörper des jeweils untersuchten Typs verwendet.

Die geometrische Charakterisierung aller Prüfkörper mit Ausnahme des CDMAM-Referenzprüfkörpers erfolgte mittels Koordinatenmesstechnik. Hierzu wurden in Abhängigkeit der untersuchten Komponente unterschiedliche Messmethoden, meist taktile Messtechniken, angewendet. Der aus der geometrischen Charakterisierung resultierende Beitrag zur Messunsicherheit ist mit Ausnahme der Dickenmessung an den Kupferobjekten klein gegenüber dem Beitrag der Durchstrahlungsmessungen. Allgemein beträgt die erweiterte Unsicherheit der Messungen an den Objekten aus Kupfer oder Aluminium $2\ \mu\text{m}$ und die bei den PMMA-Objekten zwischen $5\ \mu\text{m}$ und $10\ \mu\text{m}$.

Der CDMAM-Referenzprüfkörper enthält Goldobjekte, welche zu dünn sind, um mittels Koordinatenmesstechnik untersucht zu werden. Idealerweise würden derartige Strukturen mittels Rasterkraftmikroskopie untersucht. Das Vorgehen scheiterte jedoch an der extrem großen Rauheit, R_z bis zu $2\ \mu\text{m}$, der Oberfläche der Prüfkörper. Die Präzision der Messung ist bei diesen Objekten durch das Objekt limitiert und im Hinblick auf die notwendige Messgenauigkeit zu klein. Die Objekte wurden daher durch Röntgenfluoreszenzmessungen am BESSY-Speicherring untersucht.

Für die Durchstrahlungsuntersuchungen wurden zwei unterschiedliche Röntgenanlagen verwendet: eine Mikrofokus-Röntgenanlage sowie eine klinisch genutzte Röntgenanlage der Humanmedizin. Die Mikrofokus-Röntgenanlage bietet die Möglichkeit einer sehr starken Objektvergrößerung ohne relevante, zusätzliche Unschärfe der Abbildung. An der Mikrofokusanlage wurden daher die Objekte untersucht, die potentiell sehr kleine Strukturen enthalten. An der Anlage wurden die Mammographieprüfkörper sowie die Bleistrichraster untersucht. Die sonstigen Komponenten und Prüfkörper wurden an der klinischen Röntgenanlage untersucht.

Beide Röntgeneinrichtungen wurden vor den eigentlichen Untersuchungen genau charakterisiert, um die Eigenschaften der jeweiligen Röntgenröhre sowie des Detektors, auch in zeitlicher Hinsicht, zu verstehen.

Bei den Untersuchungen wurde nach Möglichkeit der Signalwertkontrast zwischen dem Ort des untersuchten Objekts und einem Vergleichsort untersucht. In einigen Fällen bei der Untersuchung der Prüfkörper nach DIN 6868-4 (inkl. DSA) bzw. DIN 6868-13, bei denen kein Vergleichsort verfügbar war, wurde direkt der Signalwert ausgewertet. Die Verwendung der Signalwertkontraste hat den Vorteil, dass mögliche Schwankungen in der Strahlungsleistung der Röntgenröhre zwischen dem Zeitpunkt der Untersuchung des Referenzprüfkörpers und dem Zeitpunkt der Untersuchung eines unbekanntem Prüfkörpers direkt korrigiert werden. Die verwendete Röntgeneinrichtung zeigte sich als zeitlich sehr stabil. Daher waren beide Herangehensweise prinzipiell möglich.

Bei dem CTDI-Prüfkörper besteht nicht das bei den sonstigen Prüfkörpern vorhandene Problem, dass sich relevante Komponenten des Prüfkörpers in dessen Inneren, ohne die Möglichkeit einer externen, geometrischen Prüfung befinden. Bei diesem Prüfkörper zeigte sich eine direkte Prüfung der Geometrie durch taktile Koordinatenmesstechnik als sinnvollste Herangehensweise. Die Dichte des Materials, welche relevanten Einfluss auf den gemessenen CTDI-Wert hat, wurde mittels computertomographischer Schnittbilder untersucht. Hierbei wurde der Zusammenhang zwischen der gemessenen CT-Zahl und der Materialdichte ausgenutzt. Kalibriert wurde der Zusammenhang mit einem Prüfkörper (AAPM-Phantom), welcher Einsätze bekannter Materialien enthält.

Die resultierende erweiterte Messunsicherheit ($k=2$) der gesamten Prüfkette liegt für die Prüfkörper der konventionellen Röntgendiagnostik sowie die Schwächungskörper, unter Einbeziehung der Unsicherheit aus der Geometriemessung, mit wenigen Ausnahmen unterhalb von 5%. Grundsätzlich ist die Unsicherheit bei der Untersuchung der meisten Komponenten durch die Anzahl der Wiederholungsmessungen limitiert. Es wurde innerhalb des Vorhabens eine auf eine effiziente Herangehensweise optimierte Prüfung entwickelt. Bei Bedarf lässt sich die Messunsicherheit der meisten Komponenten noch relevant verringern.

Die Messunsicherheit der Untersuchung der Mammographie-Prüfkörper setzt sich aus zwei Hauptteilen zusammen. Ein Teil ist systematischer Natur. Er resultiert im Wesentlichen aus der Genauigkeit, mit der die Materialdicke im Referenz-Prüfkörper bekannt ist. Die erweiterte Messunsicherheit durch diesen Beitrag beträgt etwa 8%. Ein zweiter Teil resultiert aus der Reproduzierbarkeit der Messungen. Dieser Beitrag bestimmt, welche Herstellungsunterschiede noch aufgelöst werden können. Der Beitrag beträgt 10 nm bei der Untersuchung von Objekten kleiner 100 nm und 30 nm bei den Objekten größerer Dicke. Er ist durch aufwändigere Messungen prinzipiell reduzierbar, wurde für das Vorhaben jedoch als in dieser Größe sinnvoll festgelegt.

Nach der Entwicklung einer Messprozedur für die Untersuchung aller Komponenten der betrachteten Prüfkörper wurde diese an einer Stichprobe von auf dem Markt erhältlichen Prüfkörpern praktisch angewendet. Es wurde für jeden Prüfkörpertyp und Hersteller ein Stichprobenumfang von etwa 10 Exemplaren angestrebt. Für zahlreiche Prüfkörper konnte dieser Umfang erreicht werden. Bei einigen Herstellern und Prüfkörpertypen war es jedoch nicht möglich war, eine entsprechend große Anzahl an Exemplaren zu beschaffen und zu untersuchen.

Die Anwendung der Messprozedur in der Stichprobenprüfung verlief erfolgreich. Es ist anzunehmen, dass die entwickelten Methoden, ggf. mit leichter Modifikation oder Optimierung, gut bei Prüfungen in der Routine einsetzbar sind.

Bei der Stichprobe wurden einige relevante Probleme der aktuell im Bereich der konventionellen Röntgendiagnostik verwendeten Prüfkörper offenbar:

1. In einem relevanten Anteil der Prüfkörpern bestehen qualitative, zum Teil durch die in der Norm gegebene Spezifikation bedingte, strukturelle Mängel, z.B. deutlich unebene Objekte, Überstrahlungen, fehlerhafte Strukturen, die einen Einsatz der Exemplare in Frage stellen.
2. Bei nahezu allen untersuchten Objekten der Prüfkörper gibt es mindestens einen Hersteller, bei den die in den Prüfkörpern enthaltenen Objekte systematisch und von der Größe her relevant vom Nominalwert abweichen.
3. Bei einigen Herstellern besteht eine relevant große Streuung in der Fertigung der Produkte.

4. In einigen Fällen wurden Ausreißer gefunden, welche, wahrscheinlich durch einen fehlerhaften Zusammenbau des Exemplars, wesentlich von den sonstigen Exemplaren des Herstellers abweichen.

Es ist auffallend, dass bei den untersuchten Komponenten jeweils auch bei mindestens einem Hersteller keine relevante systematische Verschiebung und auch keine große Fertigungsstreuung bestanden. Eine entsprechend präzise Fertigung scheint damit in allen Fällen möglich zu sein.

Sämtliche der untersuchten CTDI-Prüfkörper sind für ihren Einsatzzweck sicherlich gut geeignet.

Bei den Prüfkörpern der Mammographie wurden gravierende Mängel festgestellt. Von den untersuchten Exemplaren des Testeinsatzes AP erscheint keines wirklich für den Einsatzzweck geeignet zu sein. In den meisten Fällen sind einzelne der Goldobjekte deutlich fehlerhaft gefertigt. Eine Nutzung dieses Prüfkörpers ist daher grundlegend in Frage zu stellen. Bei dem CDMAM-Prüfkörper sind die Abweichungen der Materialdicke sowie der Objektgröße von der Spezifikation wesentlich geringer. Sie bewegen sich in der Größe der vom Hersteller angegebenen Fertigungstoleranz von 10 % in Bezug auf die Materialdicke und 10 µm in Bezug auf die Objektdurchmesser. Gleichwohl sind die Prüfmethode unter Einsatz des CDMAM so fein, dass derartige, kleine Unterschiede bei dem Routineeinsatz des Prüfkörpers auffallen. Es ist nicht zu erwarten, dass die Fertigungsstreuung wesentlich verringert werden kann. Insofern sind andere Methoden zu überlegen, um den beobachteten Einfluss von Fertigungstoleranzen auf den Signalwert zu korrigieren, z.B. ein Kalibrierungsprozess sämtlicher CDMAM-Exemplare vor der Nutzung zur Qualitätssicherung.

Über die konkreten Resultate in Bezug auf einzelne Exemplare der Prüfkörper hinaus wurden bei den Prüfkörpern nach DIN 6868-4 und DIN 6868-13 qualitative Mängel festgestellt, z.B. relevante Überstrahlungsartefakte sowie ungenaue Spezifikationen des Prüfkörperaufbaus in den Normen, welche in der Normung anzugehen wären.

Zusammenfassend bleibt festzustellen: Eine zerstörungsfreie Prüfung der Konformität von Prüfkörpern ist mit vertretbarem Aufwand und ausreichender Genauigkeit möglich.

Bei den aktuell auf dem Markt erhältlichen Exemplaren der untersuchten Prüfkörper gibt es in einem auffallend großen Anteil Mängel, welche die Möglichkeit des Einsatzes der entsprechenden Prüfkörper bezogen auf die Intention der zugehörigen Norm zumindest in Frage stellen.

Die festgestellten Mängel und die bestehende Möglichkeit lassen es als sinnvoll erscheinen, einen externen Qualitätssicherungsprozess ggf. in der Routine durchzuführen. Es gibt in Deutschland ein ausgeklügeltes System der Qualitätssicherung in der Röntgendiagnostik. Ohne Prüfmittel auf die dabei vertrauensvoll zurückgegriffen werden kann, hat dieses gleichwohl eine relevante Schwäche. Es ist dabei ggf. auch relevant, zu bedenken, dass es bei den Herstellerfirmen aber auch in der Fachwelt aktuell keine einheitliche Meinung darüber besteht, ob Prüfkörper der Röntgendiagnostik als Medizinprodukte anzusehen sind oder nicht.

Abschließend ist zu erwähnen, dass die vorgenommene Stichprobe in keinem Fall als vollständig im Hinblick auf die relevant im Bereich der Röntgendiagnostik verwendeten Prüfkörper anzusehen ist. So fehlen einige Prüfkörper, vor allem für die Abnahmeprüfungen, aus dem Bereich der Röntgendiagnostik. Zudem wurde der Gesamtbereich der in der Zahnmedizin verwendeten Prüfkörper nicht betrachtet. Dieses ist als problematisch anzusehen. Auf entsprechende Prüfkörper bzw. klinischen Bereiche sollten daher die innerhalb des Vorhabens entwickelten Methoden zukünftig erweitert und angewendet werden.

12. Danksagung

Das Projektteam bedankt sich bei allen Anwendern der untersuchten Prüfkörper sowie den Herstellerfirmen, welche durch ihre Bereitschaft, die eigenen Prüfkörper für die Testes zur Verfügung zu stellen, die Prüfung sowie die damit erreichten Ergebnisse erst möglich gemacht haben. Insbesondere bedanken wir uns bei der Firma PTW (Freiburg), welche uns innerhalb des gesamten Prozesses der Spezifikation und Fertigung der Referenz-Prüfkörper unterstützend begleitet hat. Auch gilt unser besonderer Dank der Firma Philips, welche den Zugang zu den Rohdaten des Röntgendetektors und damit letztlich erst die Durchführung der Arbeit ermöglicht hat.

Die Studie wurde mit Unterstützung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und des Bundesamtes für Strahlenschutz im Rahmen des Umweltforschungsplans unter der Nummer 3608S20001 durchgeführt.

13. Literatur

- [1] Datenblatt des CDMAM-Prüfkörpers
- [2] C. Blendl, K-P. Hermann, T. Mertelmeier; PAS1054: Anforderungen und Prüfverfahren für digitale Mammographie-Einrichtungen, März 2005
- [3] Normenausschuss Radiologie (NAR) im Deutschen Institut für Normung e.V. (DIN), Anforderungen und Prüfverfahren für digitale Mammographie-Einrichtungen - Erläuterungen zur Anwendung von PAS1054, Oktober 2005
- [4] NAR im DIN, DIN 6868-13: Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben – Teil 13: Konstanzprüfung bei Projektionsradiographie mit digitalen Bildempfänger-Systemen, März 2012
- [5] NAR im DIN, DIN 6868-4: Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben – Teil 4: Konstanzprüfung an medizinischen Röntgeneinrichtungen zur Durchleuchtung, Oktober 2007
- [6] DKE im DIN und VDE sowie NAR im DIN, DIN EN 60601-2-44: Medizinische elektrische Geräte – Teil 2-44: Besondere Festlegungen für die Sicherheit einschließlich der wesentlichen Leistungsmerkmale von Röntgeneinrichtungen für die Computertomographie, Februar 2010
- [7] NAR im DIN, DIN EN 61223-3-5: Bewertung und routinemäßige Prüfung in Abteilungen für medizinische Bildgebung – Teil 3-5: Abnahmeprüfungen – Leistungsmerkmale zur Bildgebung von Röntgeneinrichtungen für Computertomographie, August 2005
- [8] J.H. Hubbell, S.M. Sletzer, Tables of X-ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV zu 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest, <http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm>
- [9] Datenblatt des AAPM CT Performance Phantoms
- [10] Internationale Organisation für Normung, ISO/IEC Guide 98-3:2008: Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement. ISO, Genf 2008, ISBN 92-67-10188-9
- [11] GUM Workbench, www.Gum.dk
- [12] C. Keck, M. Franke, H. Schwenke; Werkstückeinflüsse in der Koordinatenmesstechnik; Technisches Messen 71 (2004), 81 - 92

[13] DIN, DIN EN ISO 4287: Geometrische Produktspezifikation (GPS) –
Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und
Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit, Juli 2010

Anlage A. Spezifikation der Prüfkörper in den entsprechenden Normen

A.1. Spezifikation des CDMAM-Prüfkörpers 3.4 (aus [1])

Technical specifications

The Artinis CDMAM phantom consists of an aluminum base with gold discs (99.99% pure gold) of various thickness and diameter. The gold discs are arranged in a matrix of 16 rows by 16 columns. Within a row the disc diameter is constant, with (partly) logarithmic increasing thickness and within a column the thickness of the discs is constant and the diameter increases logarithmic. The thickness is between 0.03 and 2.00 μm and the diameter is 0.06 between 2.0 mm. Each square contains two identical discs (same thickness, same diameter), one in the center and one in a randomly chosen corner. The total matrix is rotated by 45 degrees and the corners of the matrix are skipped. The matrix grid is silkscreen printed with X-ray contrasting paint.

The aluminium base (0.05 mm thick Al 1050, 99.5% pure aluminum) is attached to a Plexiglas® cover (5 mm, PMMA). Under normal mammography-radiation conditions (Mo anode, 30 mm Mo filter, 28 kV) the aluminum base and PMMA cover together have an equivalent PMMA thickness of 10 mm. The phantom is delivered with 4 PMMA plates, each 10 mm thickness, which are used for the simulation of different breast thicknesses. Every plate has an engraved marker with lead inlet for identification. The phantom and Plexiglas® plates match the standard mammography film size (18 x 24 cm). The actual attenuation of the CDMAM Phantom depends on the configuration of the phantom and Plexiglas® plates. The effective energy of the phantom plane will be higher when more Plexiglas® is added to the top and bottom of the phantom.

A.2. Spezifikation des Testeinsatzes AP nach PAS1054 (Erläuterungen zur Anwendung – 10/2005) (aus [2] und [3])

Testeinsatz AP

Die Dicken der im Testeinsatz AP enthaltenen Goldplättchen wurden auf folgende Werte korrigiert:

(0,120 \pm 0,01) μm ; (0,150 \pm 0,01) μm ; (0,250 \pm 0,01) μm ; (0,500 \pm 0,01) μm ;
(1,800 \pm 0,01) μm .

Die dazu gehörigen Durchmesser der Goldplättchen sind:

(2,00 \pm 0,02) mm; (1,00 \pm 0,02) mm; (0,500 \pm 0,015) mm; (0,25 \pm 0,01) mm und
(0,10 \pm 0,01) mm.

Zusätzlich wurde der Aluminiumträger durch einen Träger aus 0,5 mm dickem PMMA ersetzt.

Die Anforderung an die Erkennbarkeit von mindestens 4 Strukturelementen bleibt unverändert (siehe Anhang B, Prüfpunkt 8.1.2).

A.3. Spezifikation des Prüfkörpers nach DIN 6868-13 (aus [4])

Prüfkörper

Ein Prüfkörper muss verwendet werden, der den folgenden Festlegungen entspricht:

Der Prüfkörper muss aus einem Schwächungskörper und ein bzw. zwei Strukturkörpern bestehen.

Der homogene Schwächungskörper muss entweder aus Aluminium, 25 mm dick und mit einem Massenanteil von 99,4 %, oder aus Acrylglas, 30 mm dick, und Kupfer, 1 mm dick, bestehen.

Verwendete Strukturkörper:

Strukturkörper für Ortsauflösung und Lichtfeld und Strahlenfeld nach dieser Norm, siehe Bild A.1. Das Bleistrichraster ist diagonal angeordnet und enthält Liniengruppen von 0,6 bis 5,0 Lp/mm bei einer Abstufung von Gruppe zu Gruppe kleiner gleich 20 %, Bleifolie (50 ± 5) μm dick, Linien (15 ± 2) mm lang, je Liniengruppe mindestens drei Schlitze in der Bleifolie.

Bei diesem Strukturkörper dürfen die einzelnen Komponenten in einen Strukturkörper aus Acrylglas eingebracht werden, der zusätzlich zum Strukturkörper nach DIN V 6868-58 benutzt wird. Die Gesamtdicke des Strukturkörpers darf 5 mm nicht überschreiten.

Strukturkörper für Kontrastauflösung nach DIN V 6868-58.

Es ist auch zulässig, die beiden Strukturkörper zusammenzufassen (siehe Bild A.2).

Dabei ist es nicht zulässig, die Treppe für den Dynamikumfang und die Niedrigkontrastobjekte in das Acrylglas einzulassen.

A.4. Spezifikation des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 (aus [5])

PRÜFKÖRPER für Durchleuchtungs- und Aufnahmemodus

Es muss ein PRÜFKÖRPER verwendet werden, der den folgenden Festlegungen entspricht.

Der PRÜFKÖRPER muss aus einem oder mehreren homogenen Schwächungskörpern und dem eigentlichen Strukturkörper nach dieser Norm bestehen (siehe Bild A.1).

Der Schwächungskörper muss aus einem oder mehreren homogenen Körpern aus PMMA (Polymethylmetacrylat) mit einer Gesamtdicke von 30 mm bestehen und zusätzlich 1 mm Kupfer, wahlweise kann auch ein strahlerseitig montierter Schwächungskörper aus 25 mm Aluminium mit einer Reinheit von 99,5 % nach DIN EN 573-3 verwendet werden.

Der verwendete Strukturkörper fasst die nachfolgend spezifizierten Komponenten mechanisch zu einer Einheit zusammen, deren Dicke 18,5 mm beträgt:

- eine Kupferplatte, 1,5 mm dick, mindestens 200 mm × 200 mm Kantenlänge; am Ort des Auflösungsstests ist die Dicke der Kupferplatte auf 1,1 mm zu verringern.
- eine Kupfertreppe zur Bestimmung des Dynamikumfangs (Nr. 2 in Bild A.1), 150 mm Außen- und 110 mm Innendurchmesser, mit 17 Stufen entsprechend den in der Tabelle A.1 spezifizierten Dicken. In den Dicken-Angaben ist die Dicke der Kupferplatte (1,5 mm) enthalten, d. h. in den Stufen Nr. 1 bis 8 ist die Dicke der Kupferplatte entsprechend reduziert;
- ein Auflösungstest mit 100 µm Blei und einem Ortsfrequenzbereich bis 5 Lp/mm zur Bestimmung des LINIENPAAR-AUFLÖSUNGSVERMÖGENS, mit mindestens je 3 Perioden in den Auflösungen 0,6 Lp/mm, 0,7 Lp/mm, 0,8 Lp/mm, 0,9 Lp/mm, 1,0 Lp/mm, 1,2 Lp/mm, 1,4 Lp/mm, 1,6 Lp/mm, 1,8 Lp/mm, 2,0 Lp/mm, 2,2 Lp/mm, 2,5 Lp/mm, 2,8 Lp/mm, 3,1 Lp/mm, 3,4 Lp/mm, 3,7 Lp/mm, 4,0 Lp/mm, 4,3 Lp/mm, 4,6 Lp/mm, 5,0 Lp/mm, wobei die hohen Ortsfrequenzen zur Bildmitte zu positionieren sind;
- eine Platte aus PMMA, 17 mm dick, in welche Kupfertreppe, Auflösungstest und Detailkontrast-Objekte eingelassen sind. Die Tiefe der Tasche am Ort der Dynamikstufen 1 bis 8 beträgt 13 mm und am Ort der Dynamikstufen 10 bis 17 beträgt sie 5,0 mm;

Tabelle A.1 — Dicken und Grenzabmaße der Dynamikstufen in mm

Stufe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Kupfer-Dicke	0,00	0,18	0,36	0,54	0,74	0,95	1,16	1,38	1,50	1,73	1,96	2,21	2,45	2,70	2,96	3,22	3,48
Grenzabmaße Kupfer	-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-
PMMA-Dicke	4,0								17	12							

ANMERKUNG 1 Bei einer RÖNTGENRÖHRENSPANNUNG von 75 kV und bei Verwendung eines 25 mm dicken Schwächungskörpers aus Aluminium ergeben sich folgende Werte für die DYNAMIK der einzelnen Stufen, bezogen auf die Referenzstufe 9 (Bild A.1):

Stufe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
DYNAMIK	16,0	11,3	8,0	5,66	4,00	2,83	2,00	1,41	1,00	1/ 1,41	1/ 2,00	1/ 2,83	1/ 4,00	1/ 5,66	1/ 8,00	1/ 11,3	1/ 16

- eine Reihe von 8 kreisrunden Detailkontrast-Objekten mit Durchmesser 10 mm (Nr. 6 in Bild A.1) im homogenen Innenfeld (Nr. 7 in Bild A.1) zur Bestimmung der KONTRASTAUFLÖSUNG im Arbeitspunkt. Objektiefen sind in Tabelle A.2 enthalten;

Tabelle A.2 — Tiefen der Detailkontrastobjekte in PMMA in mm ± 0,1

Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8
Tiefe in mm	0,4	0,6	0,8	1,2	1,7	2,4	3,4	4,0

ANMERKUNG 2 Bei einer RÖNTGENRÖHRENSPANNUNG von 75 kV und bei Verwendung eines 25 mm dicken Schwächungskörpers aus Aluminium ergeben sich folgende Werte für den KONTRAST der einzelnen Detailkontrastfelder, bezogen auf die Referenzstufe 9 (Bild A.1):

Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8
KONTRAST	0,9 %	1,3 %	1,8 %	2,8 %	4 %	5,6 %	8,0 %	9,4 %

- eine Reihe von 16 kreisrunden Detailkontrast-Objekten mit einem Durchmesser von 4 mm (Nr. 3 in Bild A.1) und einer Tiefe von 2,5 mm im PMMA am Ort jeder Stufe der Kupfertreppe (Nr. 2 in Bild A.1) zur Abschätzung der KONTRASTAUFLÖSUNG in jeder Stufe der Kupfertreppe;
- ein kV-Prüffeld zur groben Bestimmung der STRAHLUNGSQUALITÄT aus Ytterbium, 0,78 mm dick (Nr. 4 in Bild A.1), das nicht durch die Kupferplatte abgedeckt sein darf.

ANMERKUNG 3 Das kV-Prüffeld schlägt bei einer RÖNTGENRÖHRENSPANNUNG von etwa 75 kV um, wenn ein 25 mm dicker Schwächungskörper aus Aluminium verwendet wird.

A.5. Spezifikation des DSA-Prüfkörpers nach DIN 6868-4 (aus [5])

PRÜFKÖRPER für digitale Subtraktionsangiographie

B.1 Anforderungen an den PRÜFKÖRPER

Es muss ein PRÜFKÖRPER verwendet werden, der den folgenden Festlegungen entspricht. Die möglichen Prüfkörper sind in den Bildern B.1 und B.2 dargestellt.

Der PRÜFKÖRPER muss mindestens 7 Stufen gleicher Höhe und gleichen Materials aufweisen, welche bei einer Exposition mit einer RÖNTGENRÖHRENSPANNUNG von etwa 70 kV einen Schwächungsumfang (Dynamikbereich) von mindestens 1:15 überdecken.

Es müssen PRÜFSTRUKTUREN für die Repräsentanz von Gefäßen vorhanden sein, welche während der Aufnahme einer Serie in das Feld eingebracht bzw. im Feld verschoben werden können. Die PRÜFSTRUKTUREN müssen Füllungen im Variationsbereich von 5 mg bis 10 mg Jod je ml bei Gefäßdurchmessern von 1 mm bis 4 mm simulieren. Die PRÜFSTRUKTUREN für die Simulation des Gefäßkontrastes müssen solche Abmessungen haben, dass das Prüfergebnis nicht durch das Auflösungsvermögen beeinflusst wird.

Die Prüfung gilt dann als von der Auflösung hinreichend unabhängig, wenn die Abmessungen der Gefäßsimulation in beiden Richtungen mindestens 5 Pixel groß sind.

Die Gesamtschwächung der PRÜFSTRUKTUR im Bereich der mittleren Stufe muss so bemessen sein, dass sie sich bei etwa 70 kV um nicht mehr als $\pm 12\%$ von der Gesamtschwächung des PRÜFKÖRPERS nach dieser Norm unterscheidet.

Soll die Logarithmierstufe der Einrichtung ebenfalls geprüft werden, so muss der PRÜFKÖRPER einen Kontrast-sprung enthalten, welcher die Gefäßsimulation nebeneinander auf der niedrigsten und der höchsten der 7 Stufen zur Prüfung des Dynamikbereichs enthält.

B.2 DSA-Prüfkörper

Grundkörper:

150 mm × 150 mm × 57 mm PMMA mit Aussparung von 10 mm Tiefe und 90 mm Breite.

Einsatz:

Zur Subtraktion verschiebbarer Acrylglas-Einsatz mit Aluminium-Streifen zur Gefäßsimulation. Die Gefäßsimulation besteht aus 4 Streifen von 10 mm Breite mit jeweils 10 mm Zwischenraum und Rand. Die Dicke der Trägerplatte ist 9,5 mm bis 10 mm. Die Streifen bestehen aus Aluminium mit einer Reinheit von 99,5% nach DIN EN 573-3 und haben Dicken von 0,05 mm, 0,1 mm, 0,2 mm und 0,4 mm.

Dynamiktreppe:

0,2 mm bis 1,4 mm Cu-Treppe, welche orthogonal zur Längsrichtung des Einsatzes angeordnet ist.

B.3 DSA-Prüfkörper mit Prüfstufe für LOGARITHMIERUNG

Grundkörper:

150 mm × 150 mm × 57 mm PMMA mit Aussparungen von 10 mm Tiefe und 90 mm Breite.

Einsatz:

Zur Subtraktion verschiebbarer PMMA-Einsatz mit Aluminium-Streifen zur Gefäßsimulation. Die Gefäßsimulation besteht aus 4 Streifen von 3 mm Breite mit jeweils 23 mm Zwischenraum und Rand. Die Dicke der Trägerplatte beträgt 5,8 mm. Die Streifen bestehen aus Al 99,5 und haben Dicken von 0,05 mm, 0,1 mm, 0,2 mm und 0,4 mm.

Dynamiktreppe:

0,2 mm bis 1,4 mm Cu-Treppe mit anschließender Kontraststufe von 0,2 mm Kupfer. Die Stufen der Treppe verlaufen orthogonal zur Gefäßsimulation.

Bei der Anwendung dieses PRÜFKÖRPERS darf die Pixelgröße höchstens 0,6 mm betragen.

A.6. Spezifikation des CTDI-Prüfkörpers nach DIN EN 60601-2-44 (aus [7])

203.108 Dosimetrie-PHANTOM

Das Dosimetrie-PHANTOM muss aus einem PMMA-Zylinder mit einer Dichte von $(1,19 \pm 0,01) \text{ g/cm}^3$ und einem Durchmesser von 160 mm für Kopfaufnahmen oder 320 mm für Körperaufnahmen bestehen. Die Länge des PHANTOMS muss mindestens 140 mm betragen. Das PHANTOM muss länger als die Länge des empfindlichen Volumens des für die Messungen verwendeten STRAHLUNGSEKTEKTORS sein. Im PHANTOM müssen Löcher vorhanden sein, die gerade groß genug sind, um den STRAHLUNGSEKTEKTOR aufnehmen zu können. Diese Löcher müssen parallel zur Symmetrieachse des PHANTOMS liegen, und die Mittelpunkte der Löcher müssen im Zentrum und 10 mm unter der Oberfläche des PHANTOMS in 90°-Abständen angebracht sein.

Die Löcher, die während der Messung nicht benutzt werden, sind mit passenden Einsätzen, bestehend aus demselben Material wie das PHANTOM, zu füllen.

Anlage B. An den Referenz-Prüfkörpern gemessene Materialdicken

Alle Messwerte sind, in diesem Abschnitt sind, soweit nicht explizit anders angegeben in der Einheit Mikrometer protokolliert.

B.1. Strukturkörper nach DIN 6868-4

B.1.1. Kupferplatte des Grundkörpers sowie Kupfer-Stufen der Dynamiktreppe

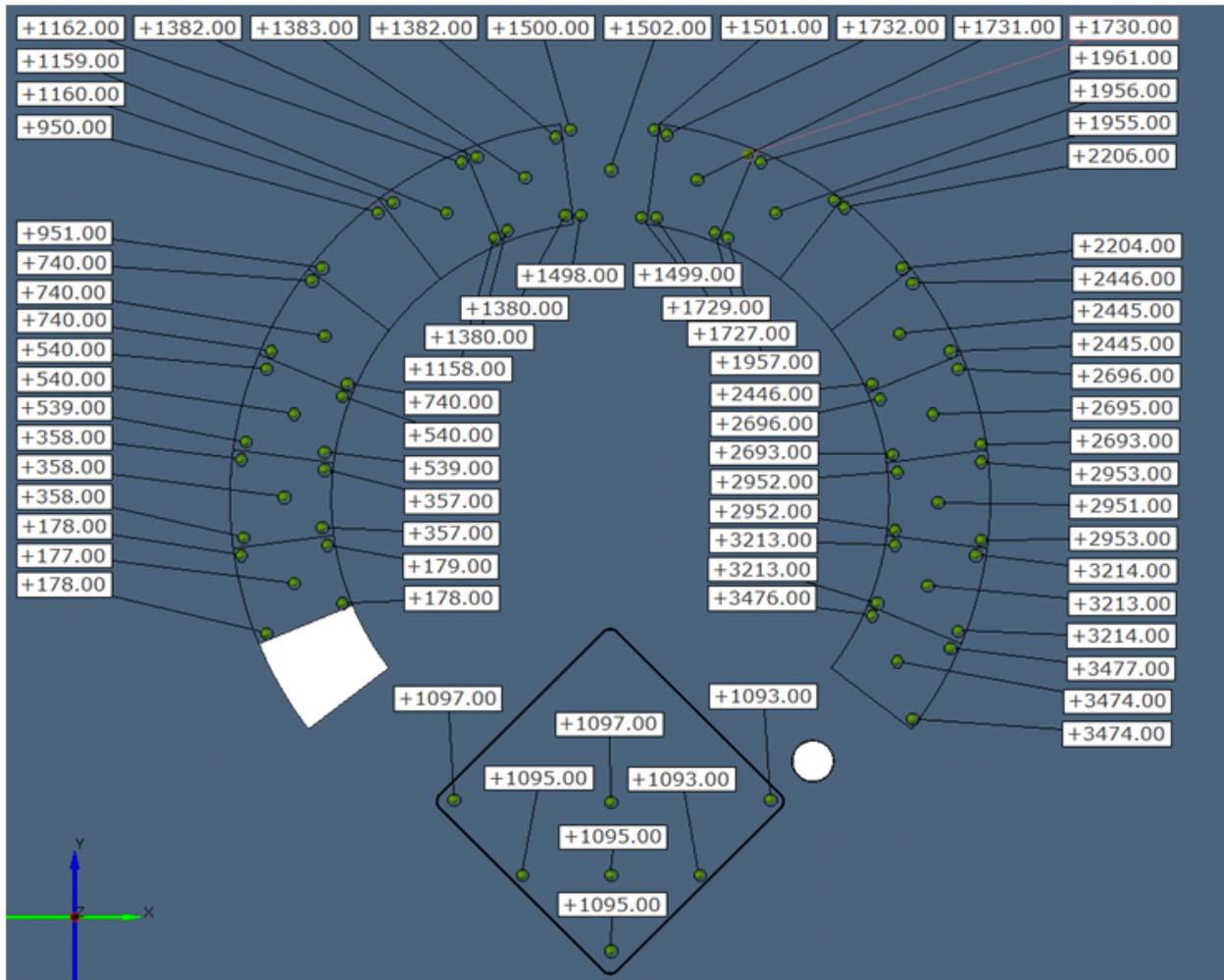


Abbildung 76: Abbildung der Kupfer-Basisplatte des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 mit der integrierten Kupfer-Dynamiktreppe; die Punkte markieren die Antastpunkte der taktilen Dickenmessung, die an den Antastpunkten gemessene Materialdicke ist in Mikrometern angegeben.

B.1.2. Niedrigkontrastbohrungen im PMMA

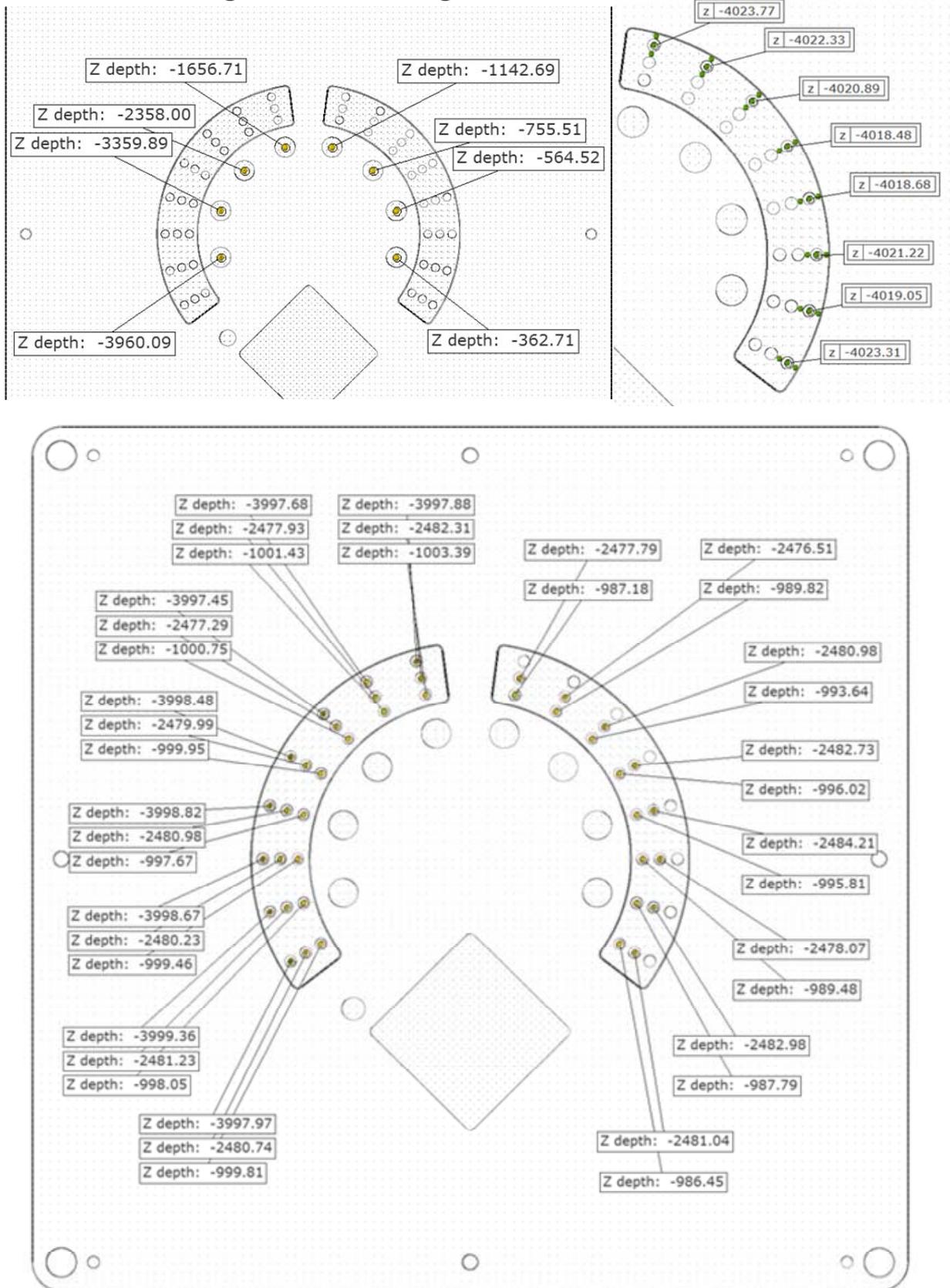


Abbildung 77: Abbildung des PMMA-Grundblocks mit den durch Bohrungen realisierten Niedrigkontrastobjekten; die Punkte markieren die Antastpunkte der taktilen Dickenmessung, der an den Antastpunkten gemessene Unterschied der Materialdicke im Vergleich zu dem Bereich neben den Bohrungen ist in Mikrometern angegeben.

B.1.3. Dicke des PMMA in dem Grundblock des Prüfkörpers

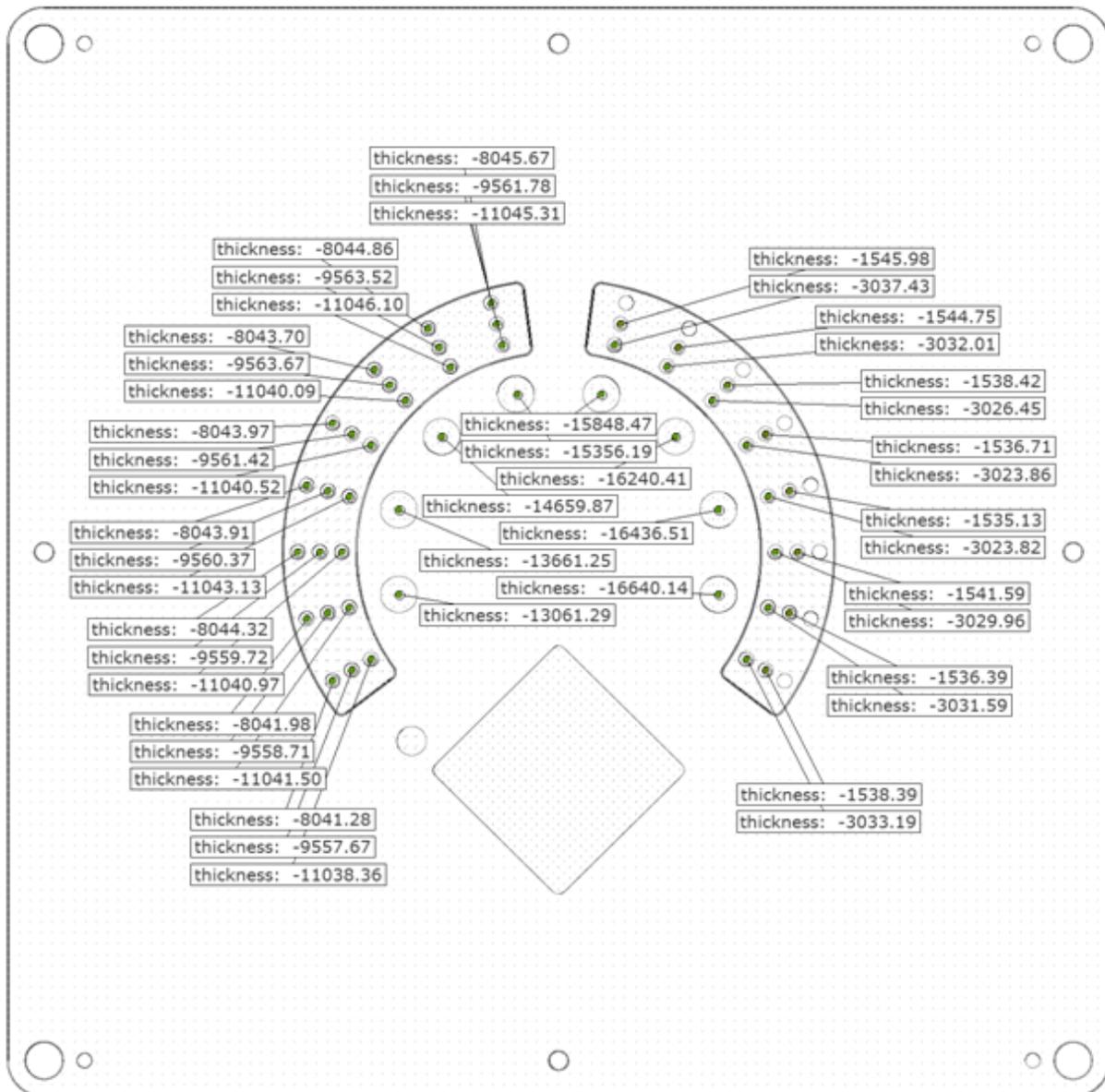
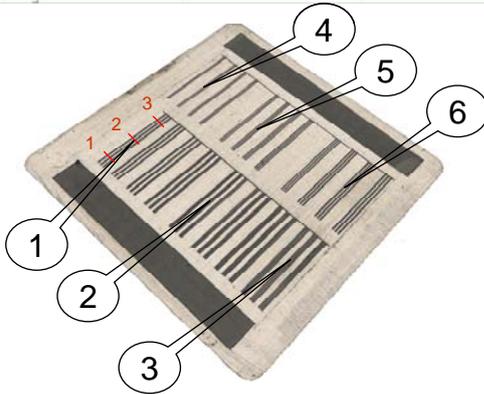


Abbildung 78: Abbildung des PMMA-Grundblocks des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 mit den durch Bohrungen realisierten Niedrigkontrastobjekten; die Punkte markieren die Antastpunkte der taktilen Dickenmessung, die an den Antastpunkten gemessene Materialdicke ist in Mikrometern angegeben

B.1.4. Dicke des Bleistrichrasters



Bleistrichraster 100 µm (DIN 6868-4)			
Profilschnitt Messort	1	2	3
1	92,351	94,133	92,539
2	93,067	90,094	93,777
3	93,708	92,647	95,637
4	97,169	96,535	94,528
5	94,498	93,595	90,185
6	104,08	96,146	92,496

Abbildung 79: unten links: Abbildung eines Bleistrichrasters mit Angabe der sechs Strichfrequenzen, in denen die Materialdicke untersucht wurde. An jeder Strichfrequenz wurde die Materialdicke an den exemplarisch als 1 bis 3 gekennzeichneten Positionen gemessen; oben links: Profillinie längs einer Messbahn, die Einheit der y-Skala sind Mikrometer; rechts: Resultate der Messung der Bleidicke an den in der Abbildung unten links bezeichneten Messorten.

B.1.5. Abstand der Linien im Bleistrichraster

LP/mm	Breite der Lücken $d_{Lü}$ in mm	Breite der Bleilinen d_{L_i} in mm	Abstand der Bleilinen in mm	Sollwert in mm
0,6	0,8286	0,8396	1,6706	1,6667
0,7	0,7109	0,7187	1,4292	1,4286
0,8	0,6212	0,6280	1,2489	1,2500
0,9	0,5507	0,5612	1,1119	1,1111
1,0	0,4955	0,5036	0,9985	1,0000
1,2	0,4097	0,4199	0,8310	0,8333
1,4	0,3468	0,3554	0,6972	0,7143
1,6	0,3074	0,3106	0,6205	0,6250
1,8	0,2716	0,2884	0,5625	0,5556
2,0	0,2433	0,2565	0,4992	0,5000
2,2	0,2257	0,2337	0,4592	0,4545
2,5	0,1962	0,2040	0,3995	0,4000
2,8	0,1766	0,1831	0,3591	0,3571
3,1	0,1561	0,1657	0,3198	0,3226
3,4	0,1217	0,1797	0,2639	0,2941
3,7	0,1289	0,1427	0,2710	0,2703
4,0	0,1206	0,1295	0,2511	0,2500
4,3	0,1094	0,1224	0,2315	0,2326
4,6	0,1045	0,1173	0,2225	0,2174
5,0	0,0900	0,1101	0,2007	0,2000

Abbildung 80: Resultate der Messung der Steg- und Lückenbreiten des Bleistrichrasters im Prüfkörper nach DIN 6868-4

B.1.6. Linienabstand Rasterplatte

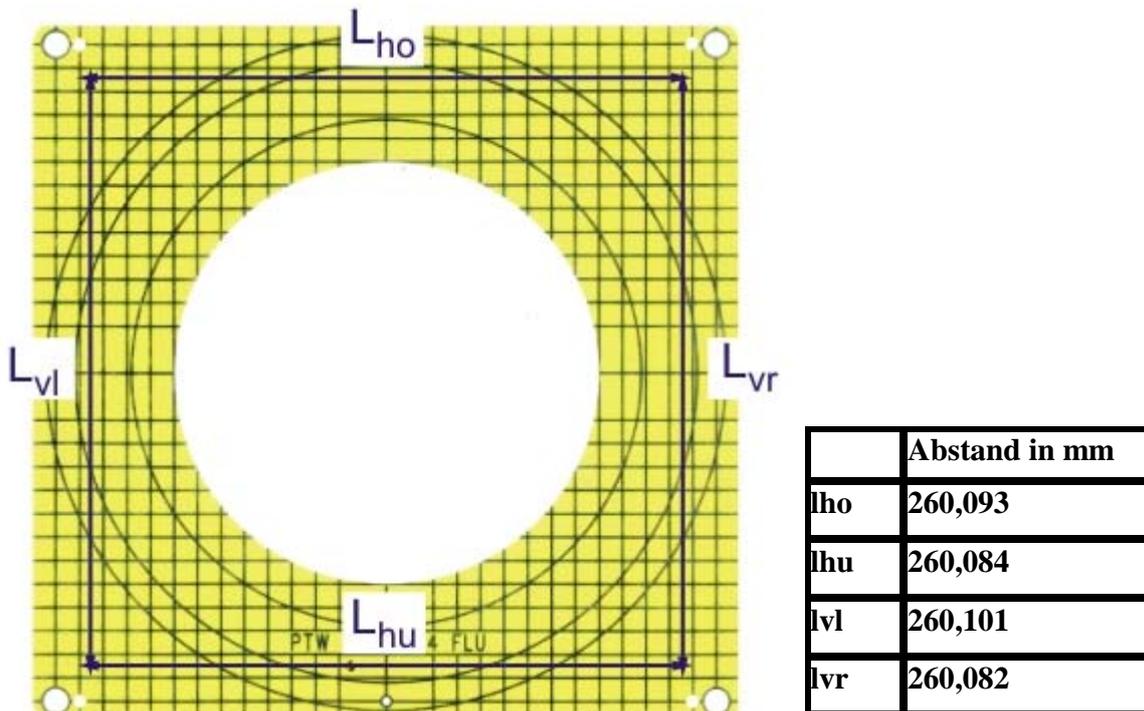


Abbildung 81: links: Abbildung der Rasterplatte mit überlagerter Angabe der gemessenen Distanzen; rechts: Resultate der Abstandsmessungen

B.2. Strukturkörper nach DIN 6868-13

B.2.1. Kupfer-Stufen der Dynamiktreppe

2.348	2.350	1.893	1.900	1.445	1.447	1.045	1.034	0.694	0.680	0.277	0.322
	2.347		1.890		1.447		1.045		0.693		0.335
2.347	2.347	1.895	1.898	1.445	1.442	1.045	1.034	0.695	0.681	0.329	0.316

Abbildung 82: Schemazeichnung der Kupfer-Dynamiktreppe des Prüfkörpers nach DIN 6868-13 mit beinhalteten Resultaten der taktilen Dickenmessung. Die Messung wurde an den Orten durchgeführt, an welchen die Resultate angegeben sind. Sämtliche Messwerte sind in der Einheit Millimeter angegeben

Die in den folgenden Bildern visualisierte Topologie verdeutlicht die in Komponenten der Prüfkörper auftretenden Dickenunterschiede. Die Absolutwerte weichen von den oben aufgeführten Messungen am Dickenmessplatz ab. Dieses ist in dem untersuchten Objekt begründet. Die Absolutwerte sind bei diesem Objekt in Verbindung mit der flächenhaften Messmethode mit einer größeren Unsicherheit verbunden.

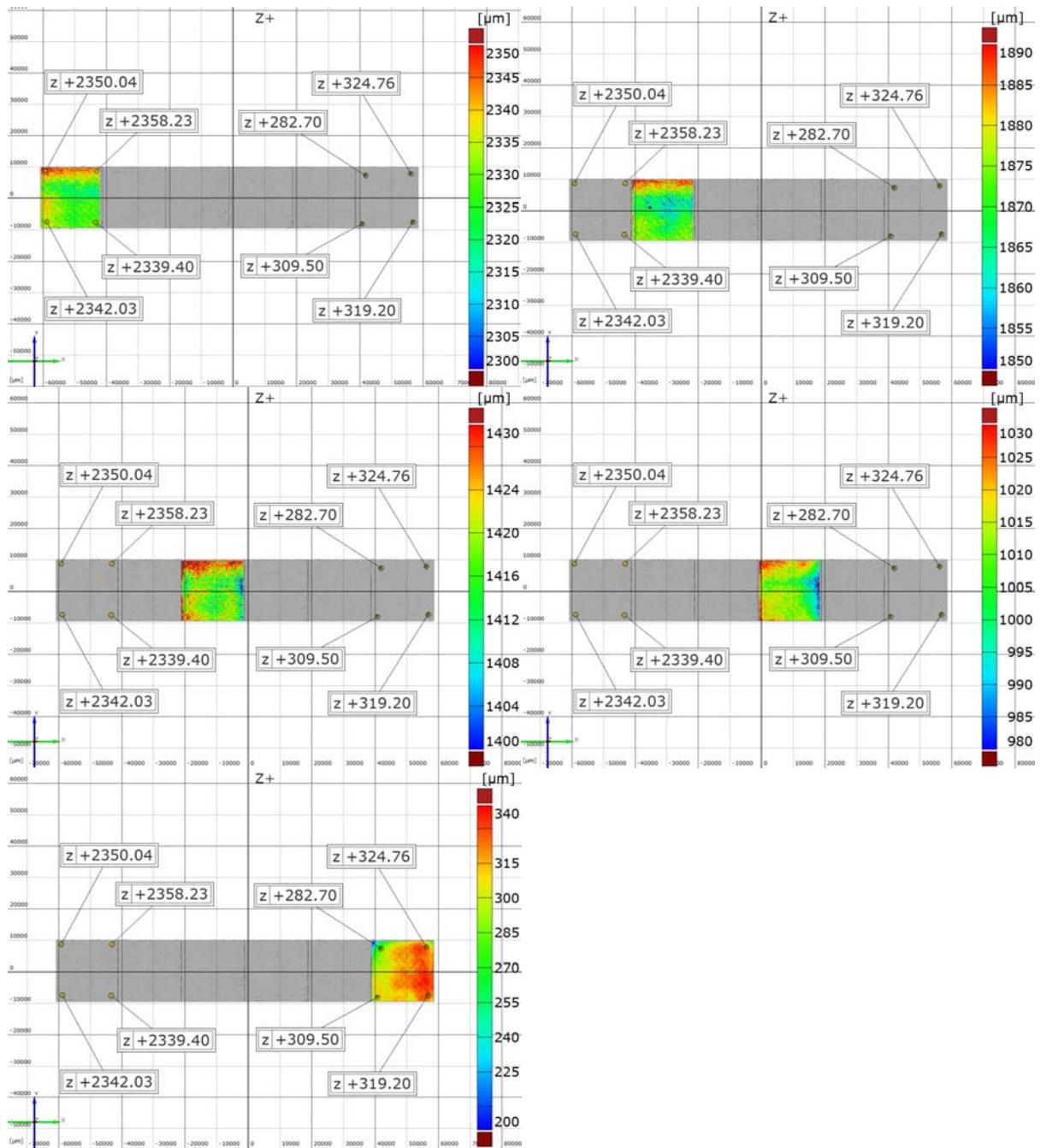


Abbildung 83: Farbcodierte Darstellung der flächenhaften Messung der Materialdicke der Stufen der Kupfer-Dynamiktreppe im Prüfkörper nach DIN 6868-13; die Messung hat die Intention, die Oberflächentopologie der Stufen zu visualisieren, die in den Abbildungen angegebenen Dickenwerte sind aufgrund der Messmethode und der Oberflächentopologie der untersuchten Objekte mit größerer Unsicherheit behaftet als die taktilen Messungen, s. Abbildung 104.

B.2.2. Niedrigkontrastobjekte aus Aluminium

Objekt	1	2	3	4	5
0,10	0,1002	0,1007	0,1001	0,1009	0,1003
0,15	0,1503	0,1505	0,1506	0,1507	0,1506
0,25	0,2319	0,2329	0,2347	0,2374	0,2332
0,35	0,3458	0,3489	0,3485	0,3475	0,3474
0,50	0,5008	0,4984	0,5024	0,5131	0,5111
0,70	0,6908	0,6984	0,6946	0,7033	0,6965

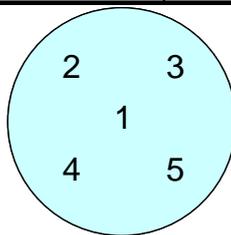
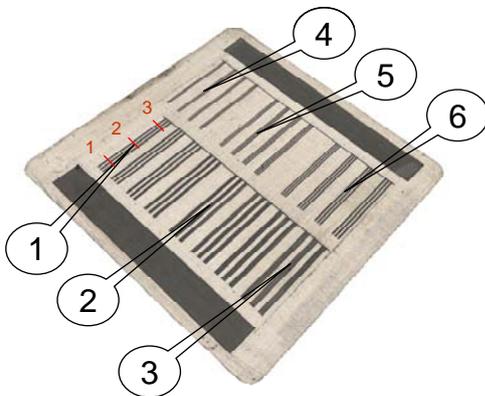


Abbildung 84: unten: Schemazeichnung eines Aluminium-Scheibchens, welches zur Prüfung der Niedrigkontrastauflösung im Prüfkörper nach DIN 6868-13 enthalten ist. Die Ziffern in der Abbildung geben die Position der Messorte wieder, an denen die taktile Untersuchung der Plättchen erfolgte; oben: Resultate der taktilen Dickenmessung der Niedrigkontrastobjekte an den in der Schemazeichnung gekennzeichneten Orten. Sämtliche Messwerte sind in der Einheit Millimeter angegeben

B.2.3. Dicke des Bleistrichrasters



Bleistrichraster 50 µm (DIN 6868-13)			
Profilschnitt Messort	1	2	3
1	55,592	55,781	55,906
2	52,761	49,720	51,645
3	49,396	57,657	57,410
4	58,007	50,171	58,419
5	56,565	53,792	58,281
6	58,769	56,965	55,221

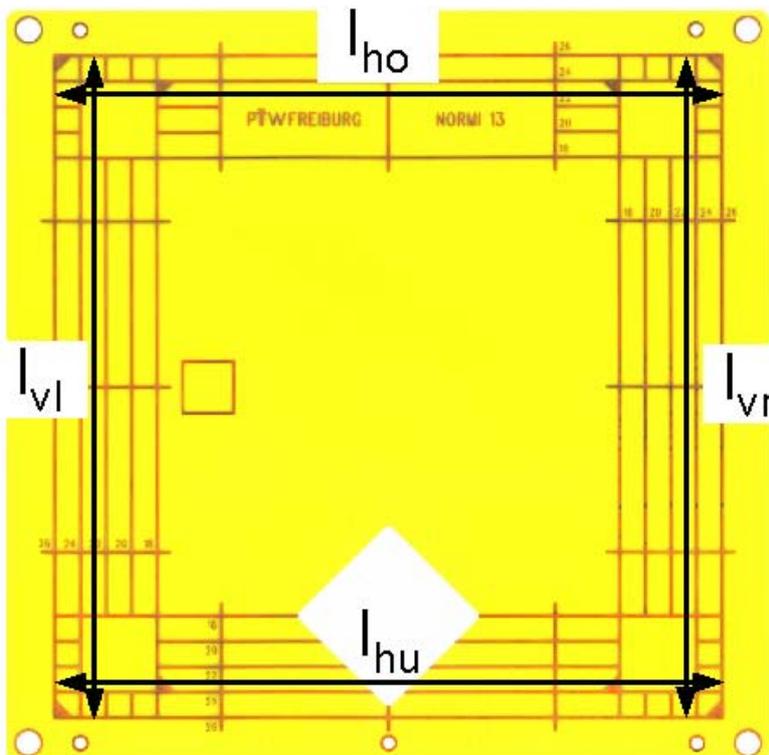
Abbildung 85: links: Abbildung eines Bleistrichrasters mit Angabe der sechs Strichfrequenzen, in denen die Materialdicke untersucht wurde. An jeder Strichfrequenz wurde die Materialdicke an den exemplarisch als 1 bis 3 gekennzeichneten Positionen gemessen. rechts: Resultate der Messung der Bleidicke an den in der Abbildung bezeichneten Messorten

B.2.4. Abstand der Linienpaare im Bleistrichraster

LP/mm	Breite der Lücken $d_{Lü}$ in mm	Breite der Bleilinen d_{L_i} in mm	Abstand der Bleilinen in mm	Sollwert in mm
0,6	0,8288	0,8392	1,6694	1,6667
0,7	0,7112	0,7178	1,4284	1,4286
0,8	0,6198	0,6288	1,2489	1,2500
0,9	0,5500	0,5617	1,1125	1,1111
1,0	0,4929	0,5066	1,0004	1,0000
1,2	0,4084	0,4205	0,8298	0,8333
1,4	0,3451	0,3565	0,6966	0,7143
1,6	0,3041	0,3145	0,6191	0,6250
1,8	0,2746	0,2842	0,5585	0,5556
2,0	0,1808	0,2547	0,4999	0,5000
2,2	0,2249	0,2347	0,4599	0,4545
2,5	0,1926	0,2048	0,3998	0,4000
2,8	0,1755	0,1839	0,3573	0,3571
3,1	0,1568	0,1631	0,3200	0,3226
3,4	0,1432	0,1509	0,2942	0,2941
3,7	0,1309	0,1392	0,2698	0,2703
4,0	0,1215	0,1285	0,2507	0,2500
4,3	0,1119	0,1203	0,2319	0,2326
4,6	0,1050	0,1149	0,2199	0,2174
5,0	0,0947	0,1052	0,1999	0,2000

Abbildung 86: Resultate der Messung der Steg- und Lückenbreiten des Bleistrichrasters im Prüfkörper nach DIN 6868-13

B.2.5. Linienabstand Rasterplatte



	Abstand in mm
l_{ho}	260,104
l_{hu}	260,110
l_{vl}	260,094
l_{vr}	260,101

Abbildung 87: links: Abbildung der Rasterplatte mit überlagerter Angabe der gemessenen Distanzen; rechts: Resultate der Abstandsmessungen

B.2.6. Kupfer des Grundkörpers

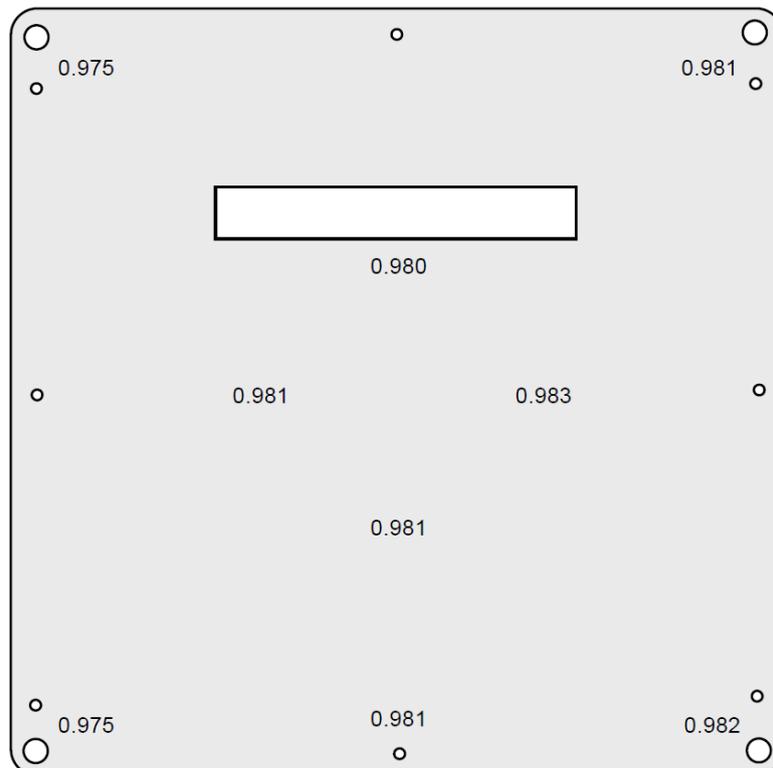


Abbildung 88: Schemazeichnung der Kupfer-Basisplatte des Prüfkörpers nach DIN 6868-13 mit beinhalteten Resultaten der taktilen Dickenmessung. Die Messung wurde an den Orten durchgeführt, an welchen die Resultate angegeben sind. Sämtliche Messwerte sind in der Einheit Millimeter angegeben.

B.2.7. PMMA-Grundkörper

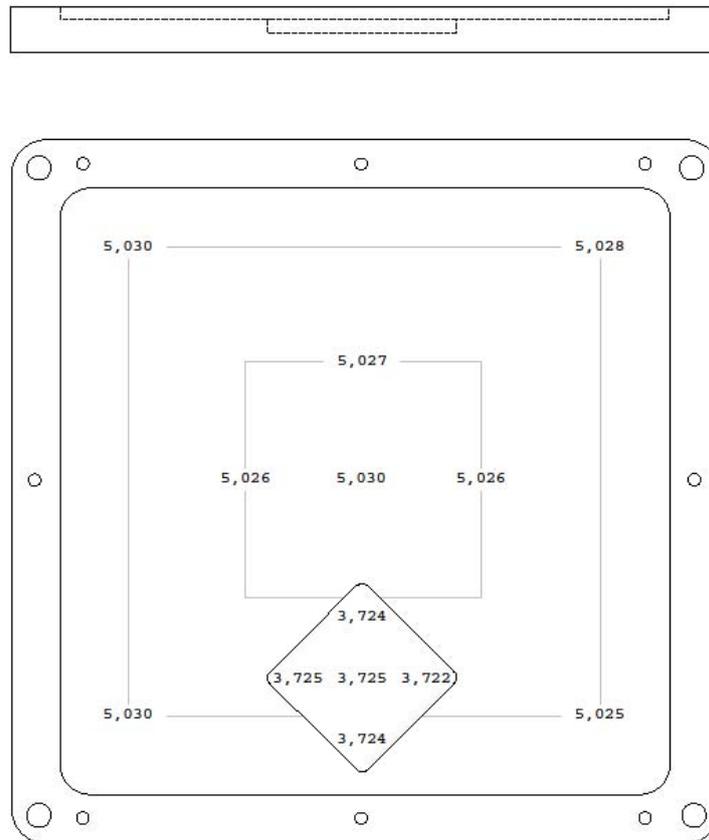


Abbildung 89: Schemazeichnung des PMMA-Grundkörpers des Prüfkörpers nach DIN 6868-13 mit beinhalteten Resultaten der taktilen Dickenmessung. Die Messung wurde an den Orten durchgeführt, an welchen die Resultate angegeben sind. Sämtliche Messwerte sind in der Einheit Millimeter angegeben.

B.3. DSA-Prüfkörper nach DIN 6868-4

B.3.1. Kupfer-Platten



	1	2	3	4	5	6	7	8	9
18,7	1,1955	1,1956	1,1955	0,1958	0,1953	0,1960	0,1959	0,1960	0,1958
37,4	0,1919	0,1923	0,1918	0,1923	0,1918	0,1925	0,1924	0,1921	0,1917
56,1	0,1923	0,1924	0,1924	0,1932	0,1919	0,1923	0,1922	0,1924	0,1923
74,8	0,1934	0,1927	0,1925	0,1927	0,1915	0,1926	0,1927	0,1925	0,1926
93,5	0,1928	0,1929	0,1925	0,1928	0,1920	0,1929	0,1926	0,1925	0,1930
112,2	0,1924	0,1925	0,1924	0,1922	0,1919	0,1922	0,1924	0,1922	0,1925
149,6	0,1927	0,1933	0,1928	0,1931	0,1929	0,1931	0,1930	0,1930	0,1933

Abbildung 90: oben: Schemazeichnung einer Kupfer-Platte aus welcher die Dynamiktreppe im DSA-Prüfkörper zusammengesetzt ist. Die Ziffern in der Abbildung geben die Position der Messorte wieder, an denen die taktilen Untersuchung der Platten erfolgte; unten: Resultate der taktilen Dickenmessung der Kupfer-Platten an den in der Schemazeichnung gekennzeichneten Orten. Sämtliche Messwerte sind in der Einheit Millimeter angegeben.

B.3.2. Aluminium-Niedrigkontraststreifen



Solldicke	0,05	0,10	0,20	0,40
Messort				
1	0,0472	0,091	0,210	0,4084
2	0,0483	0,091	0,210	0,4085
3	0,0471	0,091	0,211	0,4075
4	0,0495	0,091	0,211	0,4075

Abbildung 91: oben: Schemazeichnung eines Aluminium-Niedrigkontraststreifens im DSA-Prüfkörper. Die Punkte in der Abbildung geben die Position der Messorte wieder, an denen die taktile Untersuchung erfolgte; unten: Resultate der taktilen Dickenmessung an den in der Schemazeichnung gekennzeichneten Orten. Sämtliche Messwerte sind in der Einheit Millimeter angegeben.

B.3.3. PMMA-Grundkörper

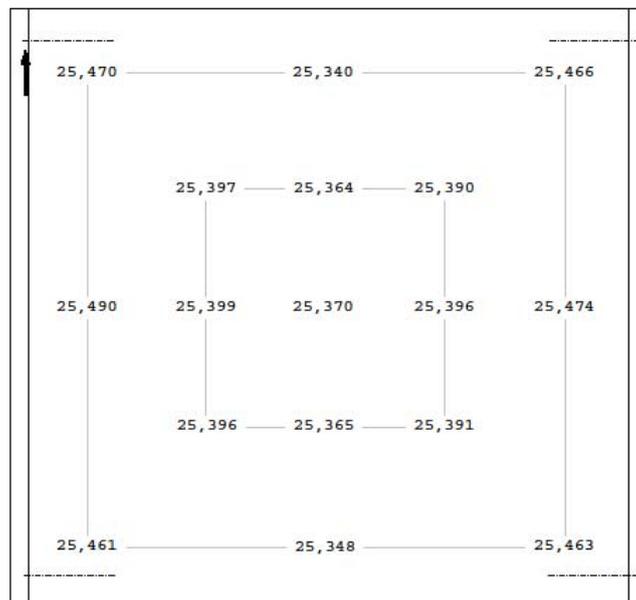


Abbildung 92: Schemazeichnung der Deckplatte des PMMA-Schwächungskörpers des DSA-Prüfkörpers mit beinhalteten Resultaten der taktilen Dickenmessung. Die Messung wurde an den Orten durchgeführt, an welchen die Resultate angegeben sind. Sämtliche Messwerte sind in der Einheit Millimeter angegeben.

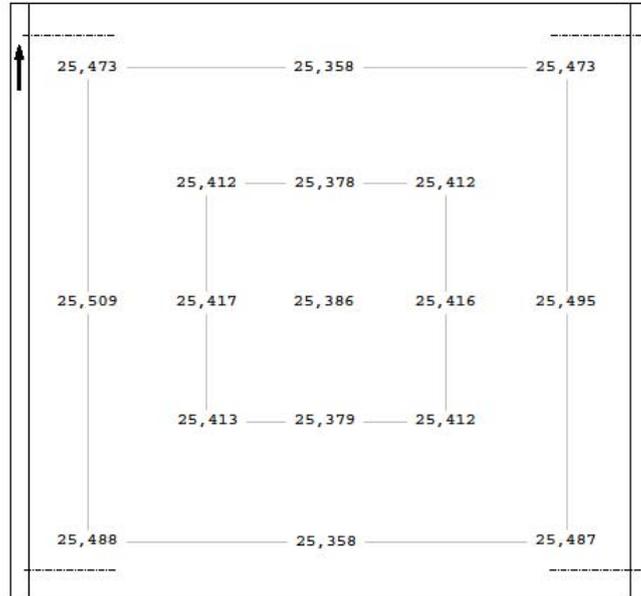
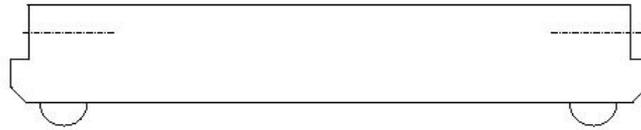


Abbildung 93: Schemazeichnung der Bodenplatte des PMMA-Schwächungskörpers des DSA-Prüfkörpers mit beinhalteten Resultaten der taktilen Dickenmessung. Die Messung wurde an den Orten durchgeführt, an welchen die Resultate angegeben sind. Sämtliche Messwerte sind in der Einheit Millimeter angegeben.

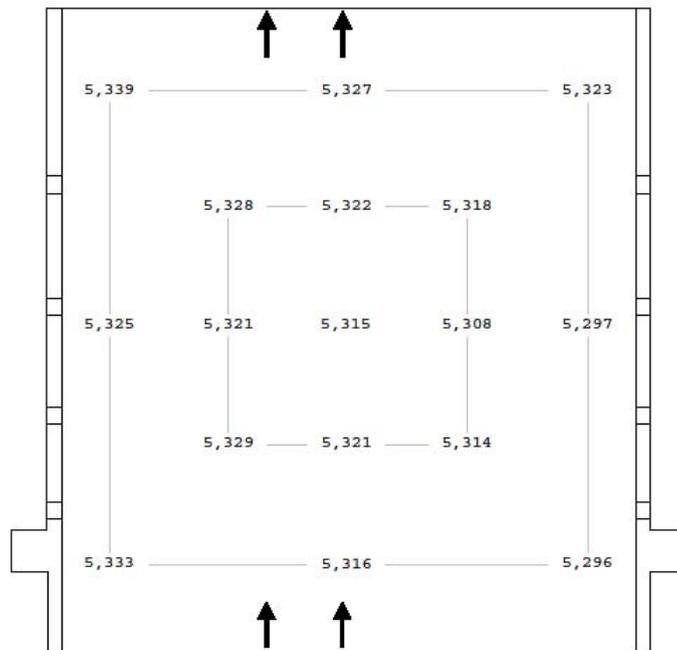
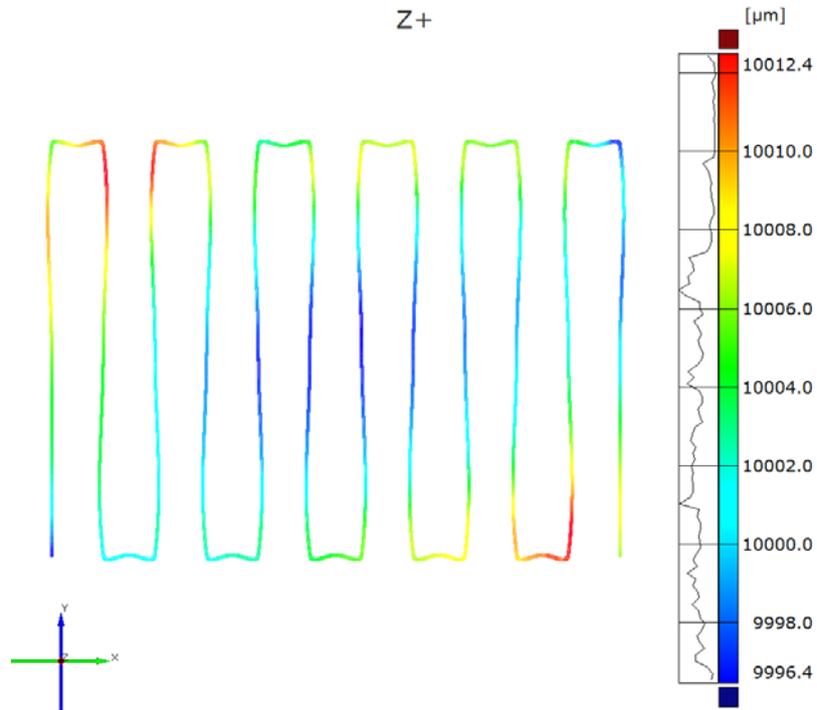


Abbildung 94: Schemazeichnung der beweglichen Platte im Zentralbereich des DSA-Prüfkörpers mit beinhalteten Resultaten der taktilen Dickenmessung. Die Messung wurde an den Orten durchgeführt, an welchen die Resultate angegeben sind. Sämtliche Messwerte sind in der Einheit Millimeter angegeben.

B.4. Schwächungskörper

B.4.1. PMMA-Schwächungskörper



Bezeichnung	d_{\max} / mm	d_{\min} / mm	d_{mean} / mm
5	5,146	5,052	5,099
6	6,100	6,029	6,064
7	7,028	6,934	6,981
8	8,126	8,040	8,083
9	9,027	9,003	9,015
P	10,012	9,996	10,004
PP			10,004
PPP			10,019
PPPP			10,011

Abbildung 95: oben: farbcodierte Darstellung der linienhaften Messung der Topologie eines PMMA-Schwächungskörpers; unten: Resultate der Dickenmessung an den Referenz-PMMA-Schwächungskörpern. Die mit „P“ bis „PPPP“ bezeichneten Objekte haben alle eine Nominaldicke von 10 mm, bei den anderen Objekten entspricht die Bezeichnung der Nominaldicke in Millimetern

B.4.2. Kupfer-Schwächungskörper (Dicke in Millimetern)

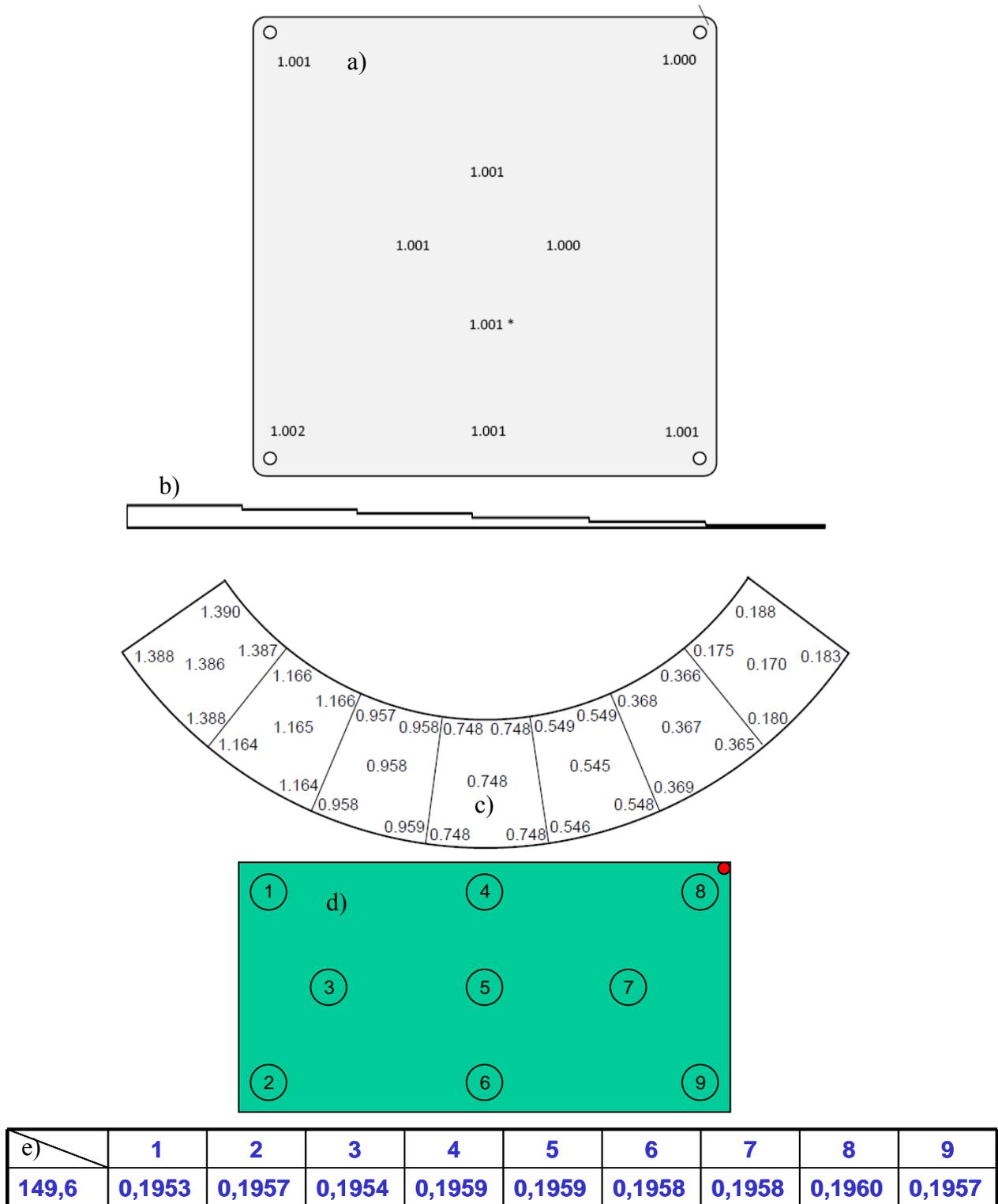


Abbildung 96: a) Schemazeichnung des Kupfer-Schwächungskörpers mit beinhalteten Resultaten der taktilen Dickenmessung; b) Profilansicht und c) Aufsicht der Kupfertreppe sowie d) der Kupferplatte, welche zusammen mit dem Referenz-Schwächungskörper verwendet wurden, um den Zusammenhang zwischen Materialdicke und Signalwert zu ermitteln. In a) und in c) sind die Resultate der taktilen Messung der Materialdicke des Objektes angegeben, in d) sind die Messorte markiert, die zugehörigen Messresultate sind in s) aufgelistet. Sämtliche Messwerte sind in der Einheit Millimeter angegeben.

B.4.3. Aluminium-Schwächungskörper

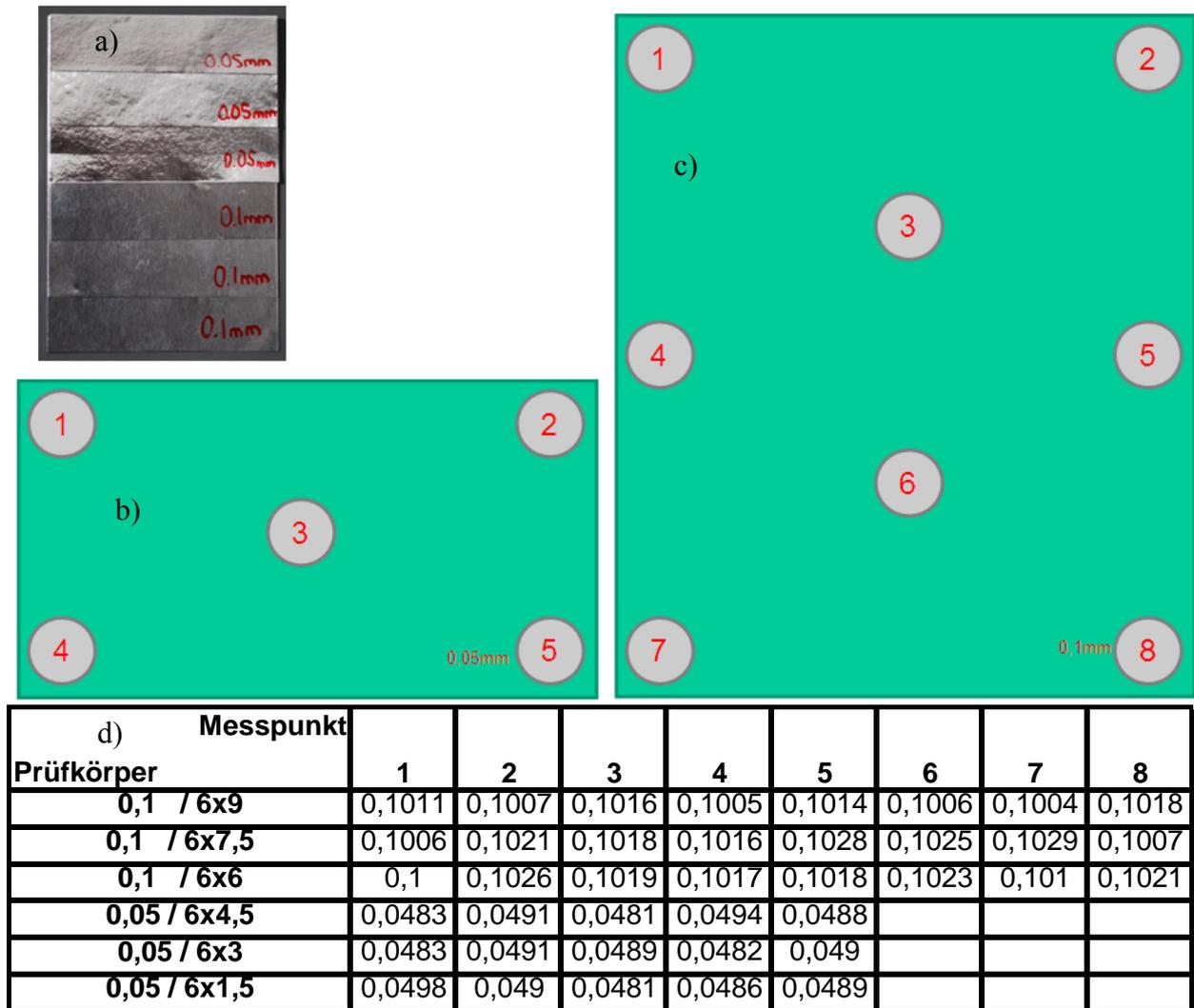


Abbildung 97: a) Photographie der Aluminium-Treppe, die zusammen mit dem Referenz-Schwächungskörper verwendet wurde, um den Zusammenhang zwischen Materialdicke und Signalwert zu ermitteln; b) und d) Schemazeichnung der Aluminium-Platten, aus denen die Aluminium-Treppe nach a) zusammengesetzt wurde. In den Schemazeichnungen sind die Messorte für die taktilen Messungen markiert. Die zugehörigen Messresultate sind in d) aufgelistet. Sämtliche Messwerte sind in der Einheit Millimeter angegeben.

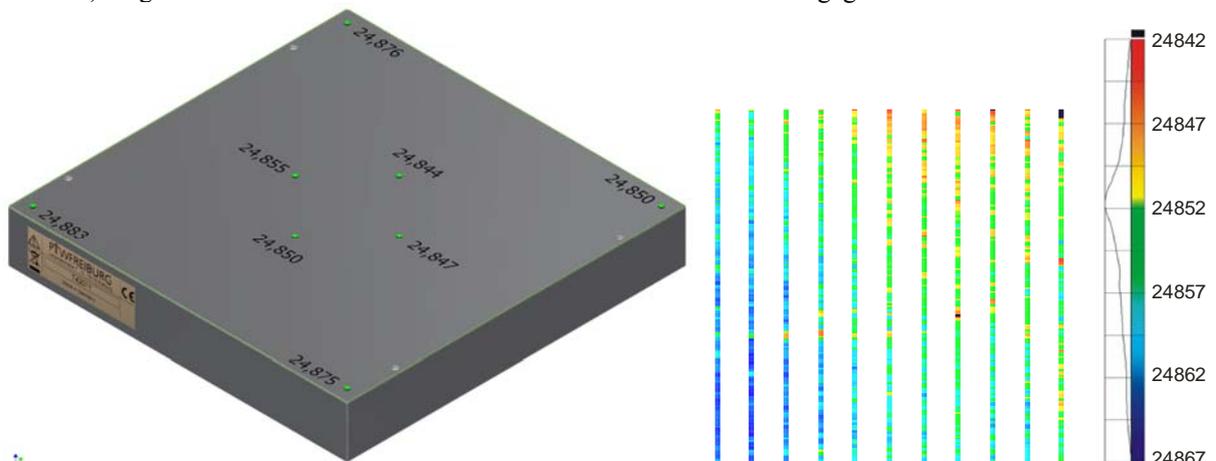


Abbildung 98: links: Abbildung des Aluminium-Schwächungskörpers mit beinhalteten Resultaten der taktilen Messungen in Millimetern; rechts: farbcodierte Darstellung der Oberflächentopologie des Schwächungskörpers. Die Skala hat die Einheit Mikrometer.

Anlage C. Auswerteregionen, ROI, für die Komponenten der Prüfkörper nach DIN 6868-4, DIN 6868-13 sowie dem DSA-Prüfkörper

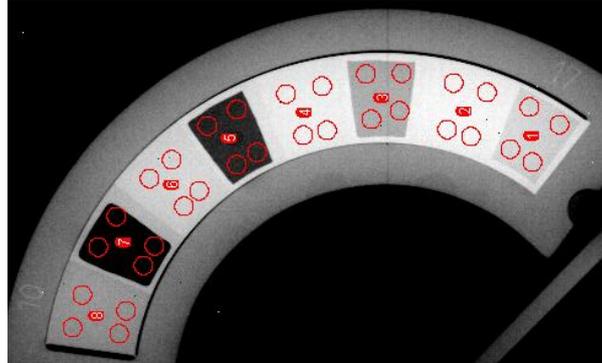


Abbildung 99: Position der ROI innerhalb der Kupfer-Dynamiktreppe des Prüfkörpers nach DIN 6868-4; Aufgrund der Niedrigkontrast-Bohrung in dem Strukturkörper, die sich mittig in allen Stufen befindet, ist es nicht möglich, eine ROI über die gesamten Stufen zu legen; abgebildet ist nur eine Halbtreppe, die ROI in der anderen Halbtreppe sind analog festgelegt

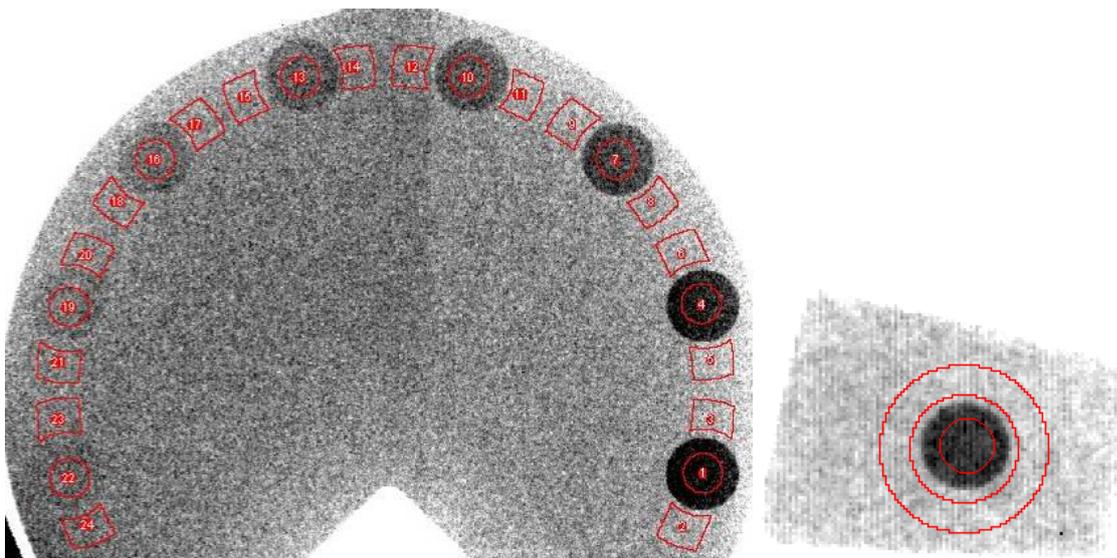


Abbildung 100: Position der ROI bei den Niedrigkontrastobjekten im Zentralbereich des Prüfkörpers nach DIN 6868-4 (links) sowie bei den Niedrigkontrast-Bohrungen an den Stufen der Kupfer-Dynamiktreppe

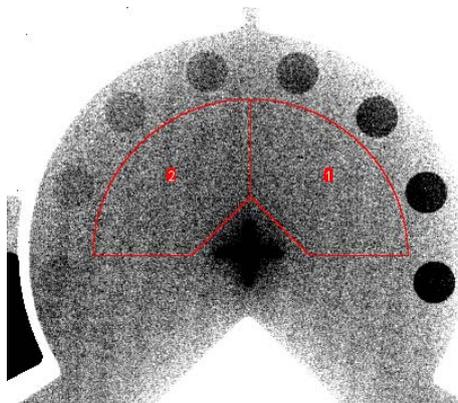


Abbildung 101: Position der ROI zur Bestimmung der Strukturkörperdicke des Prüfkörpers nach DIN 6868-4

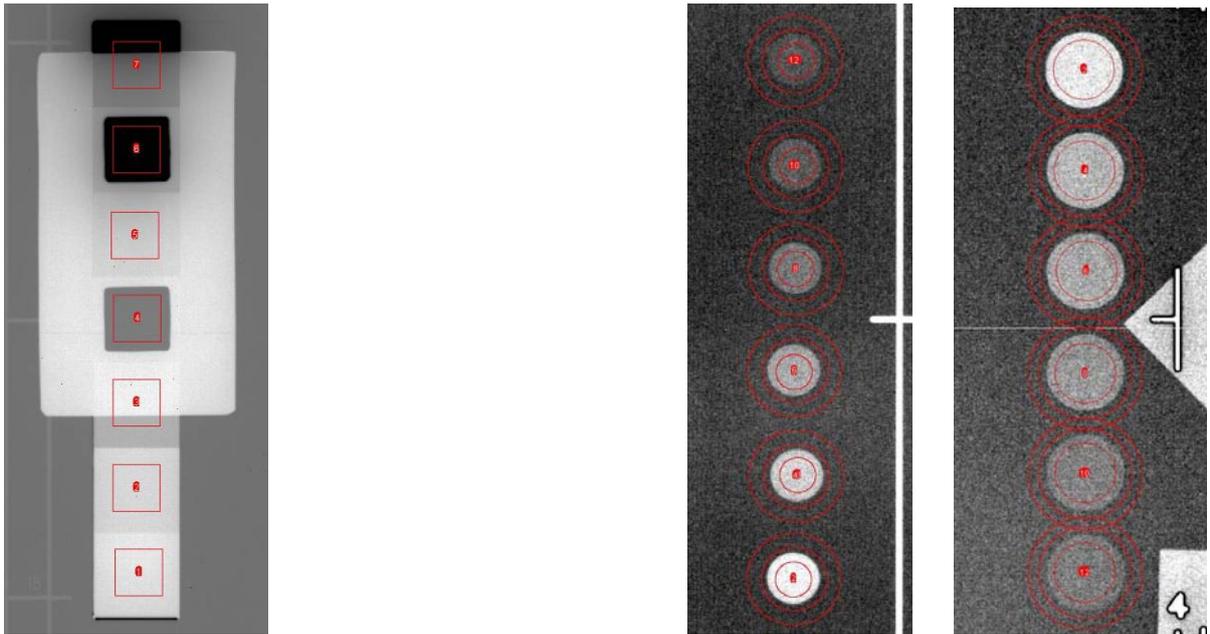


Abbildung 102: Prüfkörper nach DIN 6868-13: links: Position der ROI zur Auswertung der Dicke der Kupfertreppe; rechts: Position der ROI zur Auswertung der Dicke der Aluminium-Niedrigkontrastobjekte. Bei den Niedrigkontrastobjekten werden von den Herstellern iba dosimetry und PTW Objekte mit kleinerem Durchmesser verwendet als von der Firma pehamed. Daraus ergeben sich für diese Objekte zwei unterschiedliche ROI-Sätze.

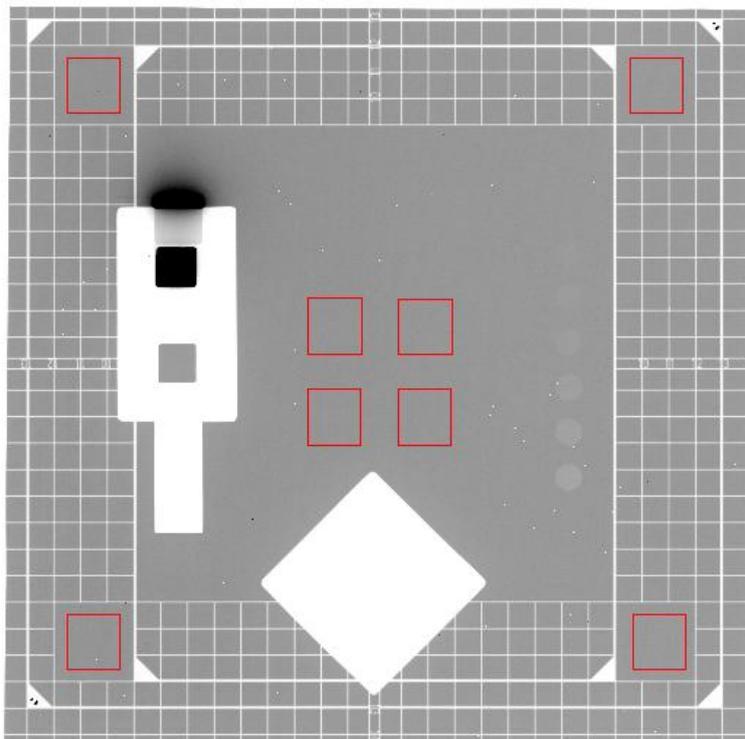


Abbildung 103: Position der ROI, an denen die Dicke des Strukturkörpers nach DIN 6868-13 gemessen wurde.

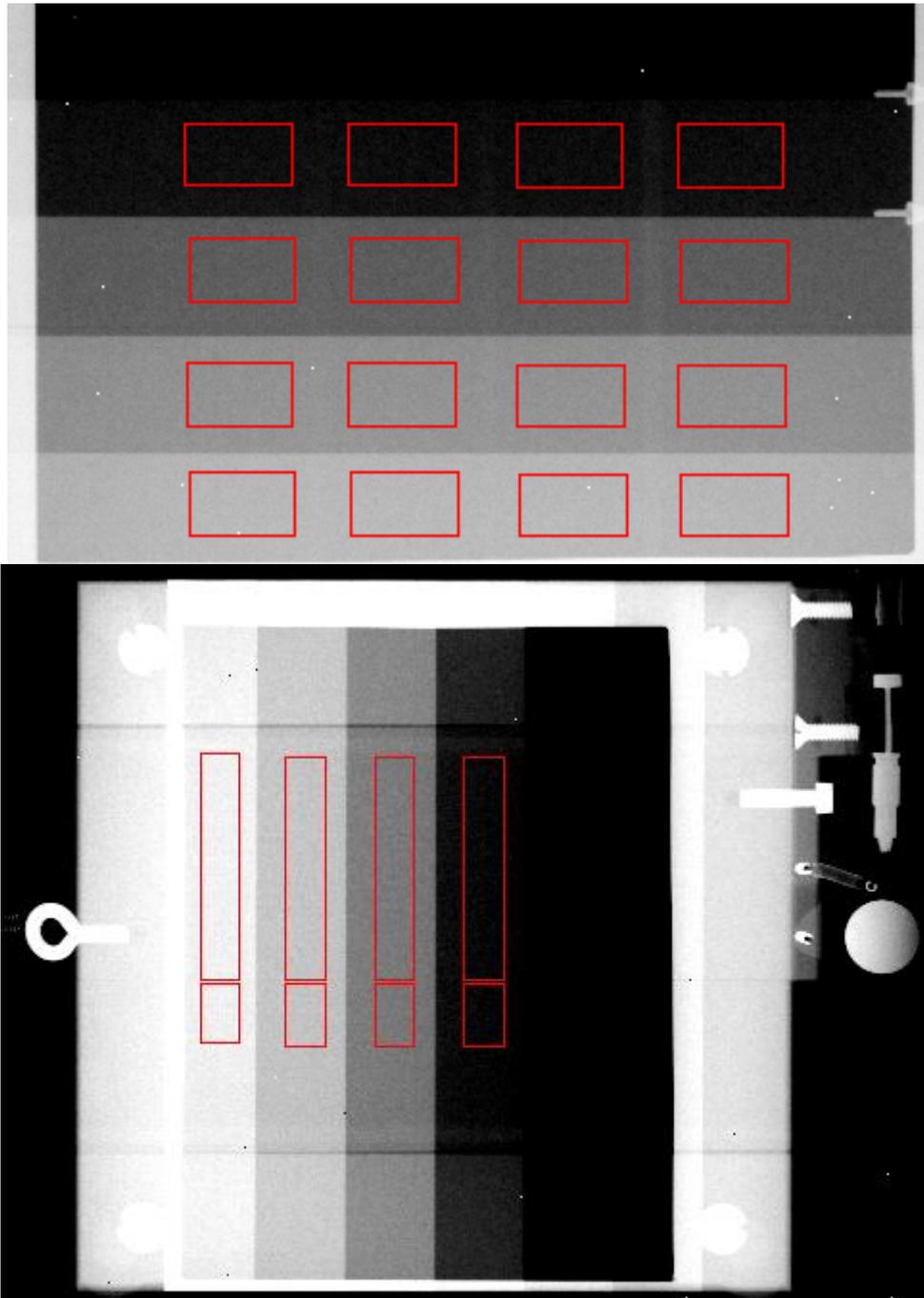


Abbildung 104: Position der ROI zur Bestimmung der Kupferdicke in den ersten vier Stufen der Kupfer-Dynamiktreppe des DSA-Prüfkörpers. Die Position in den anderen Stufen ist analog. Die Position der ROI für die Prüfkörper der Firmen PTW und iba dosimetry ist in der Abbildung oben dargestellt, für die Prüfkörper der Firma quart unten

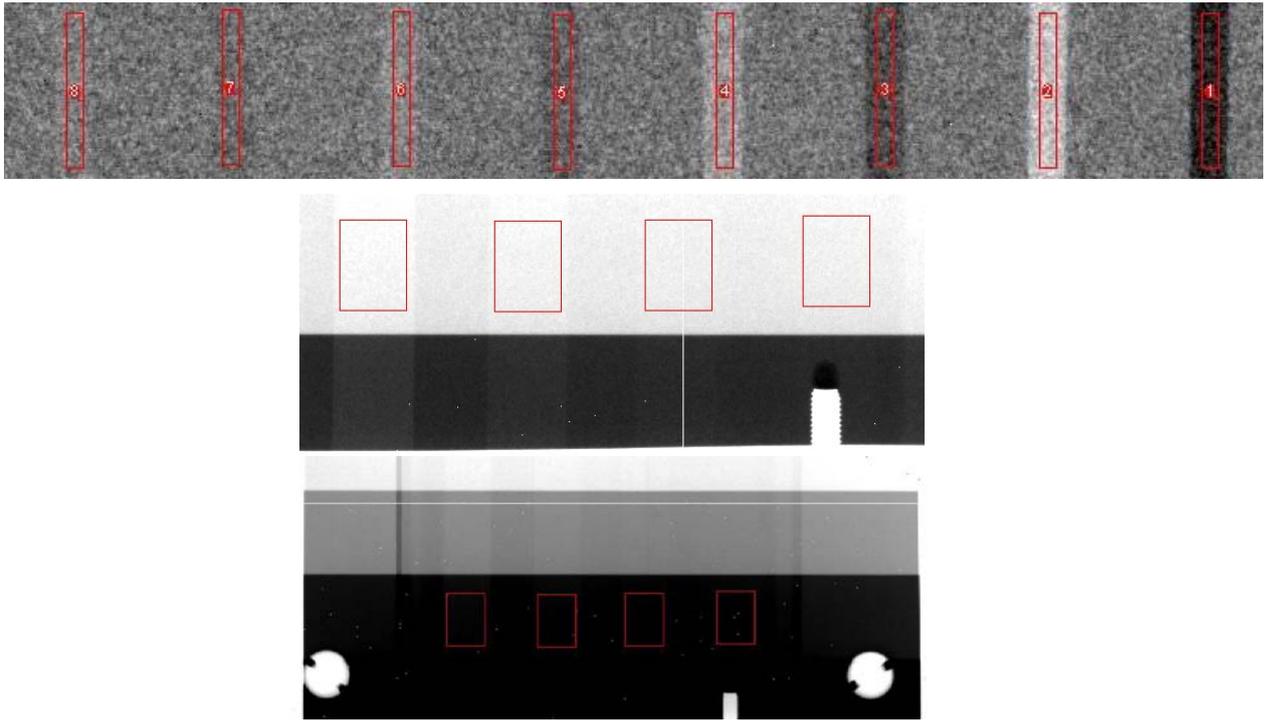


Abbildung 105: Position der ROI für die Aluminium-Niedrigkontrast-Objekte des DSA-Prüfkörpers; Das Prüfkörperdesign des DSA-Prüfkörpers der Firma Quart unterscheidet sich von dem bei den Firmen PTW und iba dosimetry. Die Position der ROI für die Prüfkörper der Firmen PTW und iba dosimetry ist in der Abbildung oben dargestellt, das der Firma quart unten.

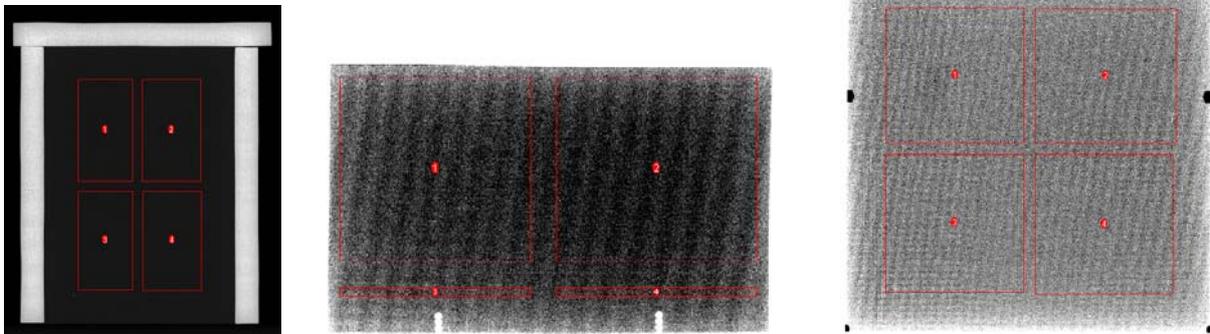


Abbildung 106: Position der ROI für die Bestimmung der Materialdicke der PMMA-Schwächungskörper des CD-MAM (links), beim Testeinzelbild AP (Mitte) sowie bei den Prüfkörpern nach DIN 6868-4 und DIN 6868-13 (rechts)

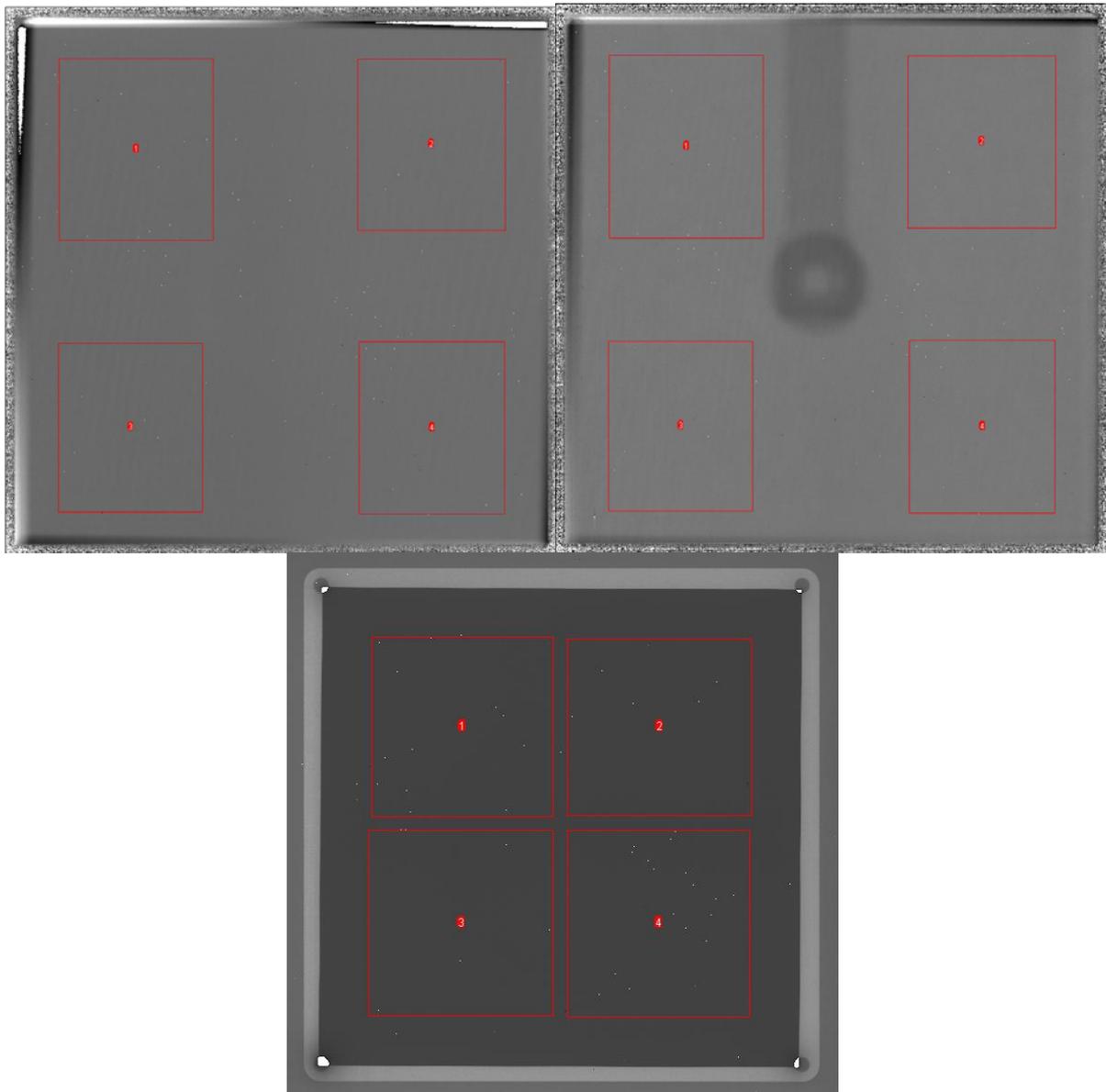
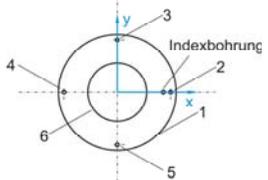


Abbildung 107: Position der ROI für die Bestimmung der Materialdicke in dem Aluminium-Schwächungskörper (oben), dabei oben links: Schwächungskörper ohne Ionisationskammer; oben rechts: Schwächungskörper mit integrierter Ionisationskammer; sowie bei dem Kupfer-Schwächungskörper (unten) für die Prüfkörper nach DIN 6868-4 sowie DIN 6868-13

Anlage D. Resultate der Vergleichsmessungen an den CTDI-Referenzprüfkörpern

D.1. Resultate der Vergleichsmessung an dem CTDI-Prüfkörper der Firma PTW

Kopfphantom							Verkipfungswinkel / °		
Durchmesser / mm							xz-Ebene		yz-Et
Zylinder Nr.	PTB						Feinmess	PTB	Feinmess
1	160,04	160,04				0,004	0,000	0,009	
Durchmesser der Bohrung / mm		rad. Abstand zur Mitte / mm		Winkelposition xy-Ebene / °		axial		transv	
	PTB	Feinmess	PTB	Feinmess	PTB	Feinmess	PTB		
2	9,144	9,143	69,936	69,936		-0,024	-0,009	0,010	
3	9,136	9,135	70,134	70,134	90,024	89,999	0,043	0,054	
4	9,135	9,133	70,189	70,187	179,860	179,835	-0,139	0,138	
5	9,136	9,135	69,967	69,966	269,814	269,789	-0,089	0,073	
							xz-Ebene		
							PTB	Feinmess	
6	9,137	9,136	0,146	0,151	151,327	148,595	-0,061	0,063	
							yz-Et		
							PTB	PTB	

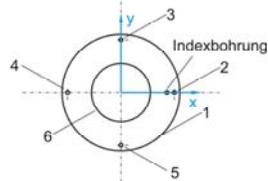
Körperphantom							Verkipfungswinkel / °		
Durchmesser / mm							xz-Ebene		yz-Et
Zylinder Nr.	PTB						Feinmess	PTB	Feinmess
1	319,96	319,96				-0,003	0,000	0,008	
Durchmesser der Bohrung / mm		rad. Abstand zur Mitte / mm		Winkelposition xy-Ebene / °		axial		transv	
	PTB	Feinmess	PTB	Feinmess	PTB	Feinmess	PTB		
2	9,130	9,130	150,187	150,185		-0,006	0,117	-0,113	
3	9,130	9,130	150,061	150,060	89,943	89,938	0,096	-0,037	
4	9,131	9,131	149,955	149,953	180,010	180,003	0,029	0,063	
5	9,131	9,131	150,104	150,101	269,970	270,024	0,093	-0,006	
							xz-Ebene		
							PTB	Feinmess	
6	160,435	160,433	0,033	0,032	287,879	287,625	-0,002	0,002	
							yz-Et		
							PTB	PTB	

Tabelle 52: Resultate der geometrischen Messungen der CTDI-Prüfkörper der Firma PTW an der PTB sowie bei der Firma Feinmess. Neben den Resultaten der Messungen ist jeweils mittig eine Schemazeichnung ergänzt, in welcher die Messpositionen bezeichnet sind.

D.2. Resultate der Vergleichsmessung an dem CTDI-Prüfkörper der Firma iba-dosimetry

Kopfphantom	Durchmesser / mm						Verkipfungswinkel / °		
	PTB	Feinmess					xz-Ebene		yz-Eb
Zylinder Nr.	PTB	Feinmess	PTB	Feinmess	PTB	Feinmess	PTB	Feinmess	PTB
1	159,831	159,83					0,000	0,000	0,010
	Durchmesser der Bohrung / mm		rad. Abstand zur Mitte / mm		Winkelposition xy-Ebene / °		axial		transv
	PTB	Feinmess	PTB	Feinmess	PTB	Feinmess	PTB	Feinmess	PTB
2	12,637	12,635	70,083	70,082			0,025	-0,022	0,026
3	12,649	12,648	69,979	69,979	90,028	90,041	0,022	-0,073	0,078
4	12,635	12,635	70,032	70,032	180,110	180,125	0,081	-0,080	0,027
5	12,646	12,646	70,137	70,133	270,054	270,067	0,074	-0,037	0,039
							xz-Ebene		yz-Eb
6	12,632	12,632	0,066	0,076	289,537	288,723	0,057	-0,056	0,030

Körperphantom	Durchmesser / mm						Verkipfungswinkel / °		
	PTB	Feinmess					xz-Ebene		yz-Eb
Zylinder Nr.	PTB	Feinmess	PTB	Feinmess	PTB	Feinmess	PTB	Feinmess	PTB
1	320,211	320,21					0,002	0,000	0,013
	Durchmesser der Bohrung / mm		rad. Abstand zur Mitte / mm		Winkelposition xy-Ebene / °		axial		transv
	PTB	Feinmess	PTB	Feinmess	PTB	Feinmess	PTB	Feinmess	PTB
2	12,600	12,600	150,132	150,128			0,019	0,017	0,017
3	12,600	12,599	150,171	150,167	89,915	89,913	0,018	0,001	0,004
4	12,600	12,600	150,000	149,996	179,898	179,895	0,009	0,006	0,020
5	12,600	12,600	149,921	149,917	269,970	269,968	0,028	0,023	0,025
							xz-Ebene		yz-Eb
6	160,199	160,193	0,117	0,119	86,576	86,203	0,000	-0,002	0,024

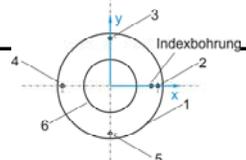


Tabelle 53: Resultate der geometrischen Messungen der CTDI-Prüfkörper der Firma iba dosimetry an der PTB sowie bei der Firma Feinmess. Neben den Resultaten der Messungen ist jeweils mittig eine Schemazeichnung ergänzt, in welcher die Messpositionen bezeichnet sind.

D.3. Statistische Größen zu den Messungen an den CTDI-Referenzprüfkörpern

PTW			
Kopfphantom			
Durchmesser / mm			
Zylinder Nr.	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
1	160,043	0,033	0,006
Durchmesser der Bohrung / mm			
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
2	9,143	0,027	0,010
3	9,135	0,007	0,002
4	9,133	0,008	0,003
5	9,135	0,008	0,002
6	9,136	0,010	0,003
rad. Abstand zur Mitte / mm			
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
2	69,936	0,065	0,020
3	70,134	0,088	0,028
4	70,187	0,284	0,090
5	69,966	0,186	0,059
6	0,151	0,077	0,025
Winkelposition xy-Ebene / °			
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
2	-0,024	0,046	0,015
3	89,999	0,091	0,029
4	179,835	0,034	0,011
5	269,789	0,120	0,038

PTW			
Körperphantom			
Durchmesser / mm			
Zylinder Nr.	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
1	319,958	0,115	0,018
Durchmesser der Bohrung / mm			
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
2	9,130	0,012	0,003
3	9,130	0,013	0,003
4	9,131	0,012	0,003
5	9,131	0,011	0,003
6	160,433	0,071	0,024
rad. Abstand zur Mitte / mm			
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
2	150,185	0,231	0,074
3	150,060	0,179	0,057
4	149,953	0,133	0,042
5	150,101	0,209	0,066
6	0,032	0,018	0,006
Winkelposition xy-Ebene / °			
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
2	-0,006	0,011	0,003
3	89,938	0,028	0,009
4	180,003	0,007	0,005
5	270,024	0,005	0,002

Tabelle 54: Aus den Messwerten in allen Messhöhen des CTDI-Referenzprüfkörpers der Firma PTW berechneter Mittelwert der Messgrößen, die Spanne zwischen den höchsten und niedrigsten Wert sowie die Standardabweichung der Messwerte

iba dosimetry		Kopfphantom		
	Durchmesser / mm			
Zylinder Nr.	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung	
1	159,831	0,021	0,007	
	Durchmesser der Bohrung / mm			
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung	
2	12,635	0,038	0,010	
3	12,648	0,063	0,021	
4	12,635	0,040	0,014	
5	12,646	0,046	0,014	
6	12,632	0,039	0,012	
	rad. Abstand zur Mitte / mm			
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung	
2	70,082	0,073	0,019	
3	69,979	0,086	0,025	
4	70,032	0,168	0,053	
5	70,133	0,142	0,046	
6	0,076	0,038	0,011	
	Winkelposition xy-Ebene / °			
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung	
2	0,014	0,038	0,012	
3	90,041	0,130	0,041	
4	-179,875	0,068	0,017	
5	-89,933	0,070	0,023	

iba dosimetry		Körperphantom		
	Durchmesser / mm			
Zylinder Nr.	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung	
1	320,207	0,099	0,034	
	Durchmesser der Bohrung / mm			
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung	
2	12,600	0,029	0,008	
3	12,599	0,025	0,006	
4	12,600	0,030	0,008	
5	12,600	0,025	0,006	
6	160,193	0,076	0,026	
	rad. Abstand zur Mitte / mm			
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung	
2	150,128	0,038	0,013	
3	150,167	0,022	0,007	
4	149,996	0,030	0,008	
5	149,917	0,042	0,013	
6	0,119	0,020	0,006	
	Winkelposition xy-Ebene / °			
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung	
2	-0,001	0,004	0,001	
3	89,913	0,003	0,001	
4	179,895	0,006	0,002	
5	-90,032	0,017	0,006	

Tabelle 55: Aus den Messwerten in allen Messhöhen des CTDI-Referenzprüfkörpers der Firma iba dosimetry berechneter Mittelwert der Messgrößen, die Spanne zwischen den höchsten und niedrigsten Wert sowie die Standardabweichung der Messwerte

Anlage E. Resultate der Überprüfung der Konformität bei auf dem Markt erhältlichen CTDI-Prüfkörpern

E.1. Resultate der Überprüfung der Konformität von Exemplaren des CTDI-Prüfkörpers der Firma PTW

PTW				Körperphantome			
Durchmesser / mm				Durchmesser / mm			
Zylinder Nr.	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung	Zylinder Nr.	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
1	159,943	0,117	0,031	1	320,062	0,087	0,017
Durchmesser der Bohrung / mm				Durchmesser der Bohrung / mm			
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung		Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
2	9,124	0,041	0,004	2	9,127	0,050	0,005
3	9,126	0,015	0,003	3	9,125	0,020	0,001
4	9,125	0,016	0,004	4	9,125	0,016	0,001
5	9,126	0,016	0,003	5	9,126	0,042	0,004
6	9,125	0,019	0,004	6	160,514	0,069	0,018
rad. Abstand zur Mitte / mm				rad. Abstand zur Mitte / mm			
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung		Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
2	70,045	0,651	0,218	2	150,131	0,593	0,028
3	70,106	0,170	0,031	3	150,222	0,303	0,043
4	70,078	0,810	0,204	4	149,976	0,206	0,026
5	69,996	0,307	0,041	5	149,912	0,339	0,028
6	0,194	0,362	0,098	6	0,082	0,087	0,027
Winkelposition xy-Ebene / °				Winkelposition xy-Ebene / °			
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung		Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
2	-0,024	0,651	0,009	2	-0,009	0,104	0,020
3	89,939	0,434	0,134	3	89,881	0,193	0,028
4	179,885	0,170	0,061	4	179,875	0,161	0,041
5	269,905	0,624	0,202	5	269,945	0,169	0,035
Verkipfung in zx / °				Verkipfung in zx / °			
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung		Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
	0,048	0,030	0,010		0,001	0,006	0,002
Verkipfung in zy / °				Verkipfung in zy / °			
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung		Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
	0,027	0,026	0,010		-0,002	0,008	0,003
Höhe des PK				Höhe des PK			
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung		Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
	150,025	0,138	0,045		150,013	0,043	0,015

Tabelle 56: Resultate der Stichprobenprüfung von CTDI-Prüfkörpern der Firma PTW

E.2. Resultate der Überprüfung der Konformität von Exemplaren des CTDI-Prüfkörpers der Firma iba dosimetry

iba dosimetry	Kopfphantome		
	Durchmesser / mm		
Zylinder Nr.	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
1	159,819	0,114	0,037
	Durchmesser der Bohrung / mm		
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
2	12,690	0,078	0,019
3	12,689	0,088	0,020
4	12,690	0,086	0,018
5	12,690	0,095	0,022
6	12,688	0,095	0,019
	rad. Abstand zur Mitte / mm		
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
2	70,029	0,151	0,027
3	70,065	0,216	0,063
4	70,028	0,253	0,058
5	70,001	0,222	0,049
6	0,062	0,168	0,036
	Winkelposition xy-Ebene / °		
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
2	-0,006	0,151	0,031
3	89,970	0,245	0,072
4	179,935	0,337	0,091
5	269,968	0,214	0,063
	Verkippung in zx / °		
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
	-0,01764	0,044	0,014
	Verkippung in zy / °		
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
	0,005	0,103	0,039
	Höhe des PK		
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
	150,041	0,225	0,082

iba dosimetry	Körperphantome		
	Durchmesser / mm		
Zylinder Nr.	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
1	320,206	0,494	0,185
	Durchmesser der Bohrung / mm		
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
2	12,679	0,062	0,016
3	12,679	0,069	0,016
4	12,679	0,071	0,015
5	12,678	0,075	0,016
6	160,195	0,185	0,049
	rad. Abstand zur Mitte / mm		
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
2	150,053	0,296	0,062
3	150,042	0,240	0,058
4	150,057	0,302	0,060
5	150,058	0,130	0,033
6	0,055	0,106	0,032
	Winkelposition xy-Ebene / °		
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
2	-0,005	0,059	0,012
3	90,001	0,123	0,028
4	180,004	0,123	0,039
5	270,001	0,103	0,023
	Verkippung in zx / °		
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
	-0,003	0,033	0,011
	Verkippung in zy / °		
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
	-0,006	0,033	0,012
	Höhe des PK		
	Mittelwert	Spanne	Standard-abweichung
	150,240	0,275	0,101

Tabelle 57: Resultate der Stichprobenprüfung von CTDI-Prüfkörpern der Firma iba dosimetry

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

Kontakt:

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 30 18333 - 0

Telefax: + 49 30 18333 - 1885

Internet: www.bfs.de

E-Mail: ePost@bfs.de

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz