

Analyse von Einflussgrößen beim dimensionellen Messen mittels Röntgencomputertomographie

Jochen HILLER, Stefan KASPERL, Fraunhofer Institut IIS, Entwicklungszentrum Röntgentechnik, Fürth

Kurzfassung. Für die Abschätzung und Bestimmung von aufgabenspezifischen Messunsicherheiten bei Messsystemen sind umfangreiche Kenntnisse über Einflussgrößen notwendig, da sich diese und die damit verbundenen Effekte unmittelbar auf das Messergebnis auswirken. Mit Hilfe von Computersimulationen und virtuellen Prüfkörpern können diese Größen für die CT identifiziert und ihr Einfluss auf ausgewählte Mess- und Kenngrößen analysiert werden.

1. Einleitung

Die Computertomographie (CT) wird zunehmend für dimensionelle Messaufgaben eingesetzt, wie beispielsweise in der Werkstückprüfung oder allgemein im Bereich der Qualitätssicherung. Neben der Verbesserung der Bildqualität von CT-Daten ist die Bestimmung der Messunsicherheit dieser Systeme für unterschiedliche Messaufgaben Gegenstand aktueller Forschungen, um die CT als Messmittel zu etablieren.

CT-Daten, wie sie nach der Rekonstruktion aus Röntgenprojektionen des Bauteils vorliegen, werden von einer Vielzahl unterschiedlicher Anlagen- und Messparametern beeinflusst. In Untersuchungen konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass je nach Material und Lage des Messobjekts im CT-Messvolumen unterschiedliche Effekte dominieren. Nichtlineare Effekte wie Strahlaufhärtung und Objektstreustrahlung in den gemessenen Röntgenprojektionen führen zu störenden Artefakten, die die Bildqualität im rekonstruierten Volumen verringern. Die Extraktion der Oberflächengeometrie durch geeignete Schwellwertverfahren wird dadurch erschwert. Um die CT endgültig als Messmittel zu etablieren, müssen sämtliche relevanten Größen und Effekte identifiziert und deren Einfluss auf Mess- und Kenngrößen quantitativ bestimmt werden können. Bei komplexen Messverfahren, wie es bei der CT der Fall ist, bieten sich vor allem Simulationsmethoden an, Einflussgrößen zu analysieren und ihren Beitrag zur Messunsicherheit im Vorfeld für reale CT-Messungen abzuschätzen. In diesem Beitrag werden der Einfluss der Vergrößerung, der Einfluss von Spannungsschwankungen und der Einfluss der Lage des Messobjekts im CT-Messvolumen auf die Kenngrößen *Kugelabstandsabweichung* und *Durchmesserabweichung* näher untersucht. Als virtueller Prüfkörper dient eine *Kugelkalottenplatte*, wie sie aus der klassischen Koordinatenmesstechnik bekannt ist.

Im nächsten Abschnitt wird auf zwei grundsätzliche Methoden eingegangen, um Einflussgrößen bei der CT zu untersuchen. Die analytische CT-Simulation als Analysewerkzeug wird in Abschnitt 3 kurz vorgestellt. Der verwendete virtuelle Prüfkörper, die untersuchten Kenngrößen und die erzielten Untersuchungsergebnisse sind

Gegenstand von Abschnitt 4. Mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick schließt der Beitrag.

2. Methoden zur Untersuchung von Einflussgrößen beim dimensionellen Messen

Für Messergebnisse, die aus CT-Daten gewonnen werden, ist es mit Hilfe eines *Messunsicherheits-Budget* nach GUM¹ nur schwer möglich, einen Wertebereich anzugeben, in welchem der wahre Wert der Messung liegt. Dazu ist bisher noch wenig über den tatsächlichen Einfluss von den am CT-Aufnahme- und Auswertungsprozess beteiligten Parametern und Größen bekannt. Allerdings kann man mit Hilfe von taktill kalibrierten Prüfkörpern – von denen also die Messunsicherheit bekannt ist – definierten Kenngrößen und durch Variation von Anlagen- und Messparametern zumindest abschätzen, ob diese und die damit verbundenen Effekte einen signifikanten Einfluss auf diese Kenngrößen ausüben. Abbildung 1 zeigt das prinzipielle Ablaufdiagramm dieser Methode.

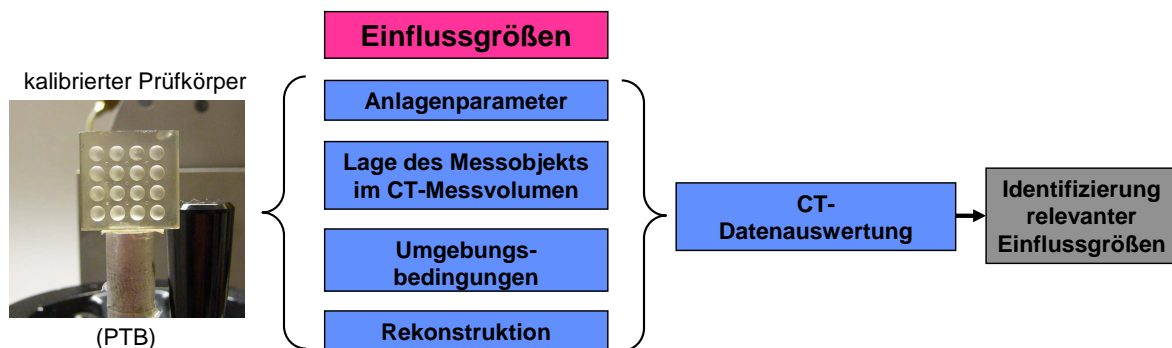


Abbildung 1: Identifizierung relevanter Einflussgrößen mit Hilfe kalibrierter Prüfkörper.

Die Variation einzelner Einflussgrößen gestaltet sich bei diesem Vorgehen u. U. schwierig. Zum Beispiel können Achsendejustierungen an CT-Anlagen nicht ohne weiteres vorgenommen werden, um deren Einfluss auf die Messdaten zu untersuchen. Auch kann nicht sichergestellt werden, dass bei Variation eines Parameters alle anderen Größen konstant bleiben.

Mit der *Simulationsmethode* bestehen diese Nachteile nicht. Am Rechner können alle Manipulator, Röhren- und Detektoreinstellungen beliebig variiert und kombiniert werden. Es bestehen keinerlei Einschränkungen in der Positionierung des Messobjekts im virtuellen CT-Messvolumen. Neben der Identifizierung relevanter Einflussgrößen besteht mit der Simulationsmethode die Möglichkeit, optimale Einstellungen der CT-Anlage für die jeweilige Messaufgabe mit Hilfe von Simulationsdaten zu finden. Durch Variation aller relevanten Einflussgrößen mittels Simulation und Variation der Messparameter bei der Datenauswertung kann eine aufgabenspezifische Messunsicherheit abgeschätzt werden. Abbildung 2 zeigt das prinzipielle Ablaufdiagramm mit drei möglichen Anwendungen der Simulationsmethode.

¹ Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), 1995

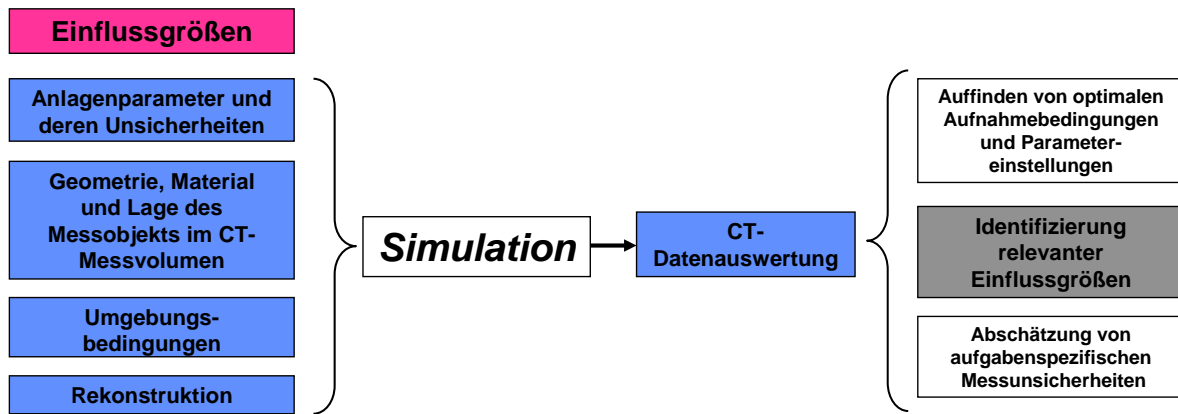


Abbildung 2: Identifizierung relevanter Einflussgrößen mit Hilfe simulierter CT-Daten.

Abbildung 3 zeigt zwei modellierte Prüfkörper für den Einsatz in der Simulation. Für die in Abschnitt 4 beschriebenen Untersuchungen wurde in Anlehnung an die klassische Koordinatenmesstechnik eine Kugelkalottenplatte (Bild rechts) als virtueller Prüfkörper verwendet. Prinzipiell sind in der Simulation Prüfkörper mit beliebigen Geometrien modellier- und einsetzbar.

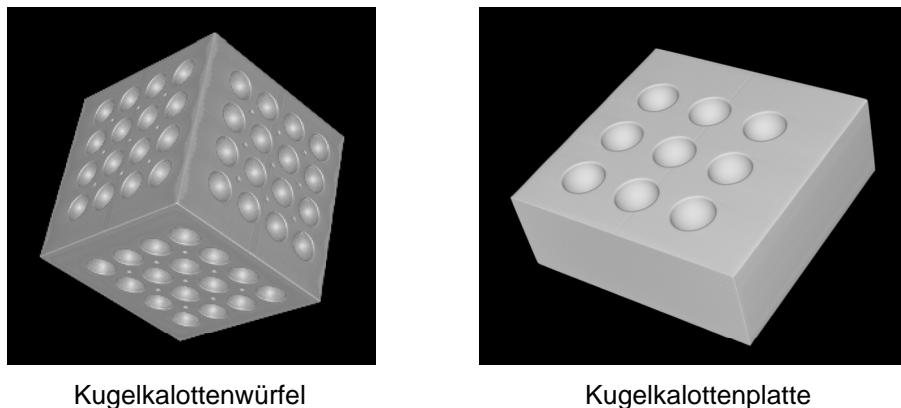


Abbildung 3: Virtuelle Prüfkörper für den Einsatz in der Simulation.

3. Funktionsprinzip der analytischen CT-Simulation

Die am Fraunhofer-EZRT entwickelte CT-Simulationssoftware basiert auf einem Strahlverfolgungsansatz. Die Abschwächung des Röntgenspektrums infolge des Materialdurchtritts wird von der Quelle bis zum Detektor verfolgt und analytisch berechnet, wobei Objektstreustrahlungsanteile und Unschärfe durch interne Detektorstreustrahlung berücksichtigt werden. Zur exakten Modellierung des CT-Systems werden detaillierte Informationen über die Röntgenquelle, die Aufnahmegeometrie, das Material des Messobjekts sowie über den Schichtaufbau des Detektors und die Zusammensetzung des Szintillatormaterials benötigt. Abbildung 4 verdeutlicht das Funktionsprinzip der analytischen CT-Simulation.

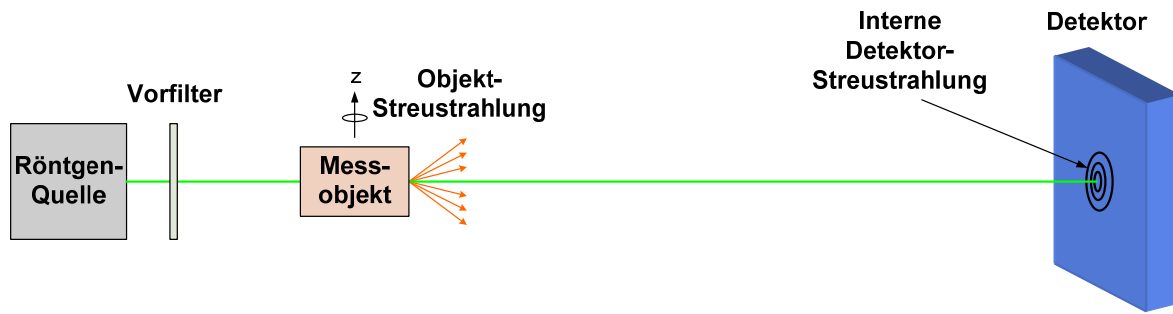


Abbildung 4: Analytischen CT-Simulation mittels Strahlverfolgung.

4. Untersuchung von Einflussgrößen mittels Simulation

Es wurden bereits in früheren Arbeiten der Einfluss von Detektorverkippen, der Einfluss unterschiedlicher Vorfilterungen und der Einfluss des Quantenrauschens auf dimensionelle Messgrößen analysiert.² In diesem Beitrag werden drei weitere Einflussgrößen untersucht: Direktvergrößerung, Spannungsschwankungen der Röntgenröhre und die Lage des Messobjekts im CT-Aufnahmevervolumen. Als Testkörper dient eine Kugelkalottenplatte. Die Untersuchung wurde mit folgenden Aufnahmeparametern durchgeführt:

- Virtueller Prüfkörper
 - Kugelkalottenplatte mit 9 Kalotten
 - Durchmesser der Kalotten: 2 mm
- Lage im CT-Messvolumen
 - vertikal
- CT-Parameter
 - Öffnungswinkel 5° , 400 Projektionen
- Detektor
 - 512 x 512, Pixelgröße: 200 μm , MTF-Filter (512)
- Röhrenspannung -und strom
 - 140 kV, monoenergetisch (keine Strahlaufhärtung)
 - Strom wurde auf maximale Ausleuchtung des Detektor berechnet
 -

Die zu bestimmenden Kenngrößen sind in Anlehnung an VDI/VDE 2617, Blatt 2.3 und 6.2:

- Kugelabstandsabweichung
- Durchmesserabweichung

Durch die Einpassung von Regelgeometrien in den CT-Datensatz kann bei der Verwendung der Kugelkalottenplatte die Kugelabstandsabweichung durch die Bestimmung der Abstände aller Kugel-Mittelpunktkoordinaten zueinander berechnet werden. Es ergeben sich so für n Kalotten $n(n-1)/2$ Abstandsmaße. Für 9 Kalotten werden so insgesamt 36 Abstandsmaße ermittelt. Der zu messende Durchmesser der Kalotten D_{CT} ergibt sich aus dem Durchmesser der eingepassten Kugel-Regelgeometrie. Die Referenzdaten L_{abs} und D_{abs} sind aus den Konstruktionsdaten des virtuellen Prüfkörpers bekannt. Mit $L_{CT} - L_{abs}$ und $D_{CT} - D_{abs}$ können Kugelabstands- und Durchmesserabweichung bestimmt werden.

²Wenig P., Kasperl, S.: Examination of the Measurement Uncertainty on Dimensional Measurements by X-ray Computed Tomography. In Proc: 9th ECNDT, Berlin, 2006.

4.1 Einfluss der Direktvergrößerung

Die Direktvergrößerung des Messobjekts ergibt sich aus dem Strahlensatz mit $m = \text{FDA} / \text{FOA}$, wobei FDA den Fokus-Detektor-Abstand und FOA den Fokus-Objekt-Abstand bezeichnet. Die Direktvergrößerung m wurde in der Simulation mit $m = 2$, $m = 5$ und $m = 7$ variiert und die Abweichungen bezüglich den Referenzdaten in einem Diagramm aufgetragen. Abbildung 5 zeigt die Diagramme für die Kugelabstandsabweichung und der Durchmesserabweichung.

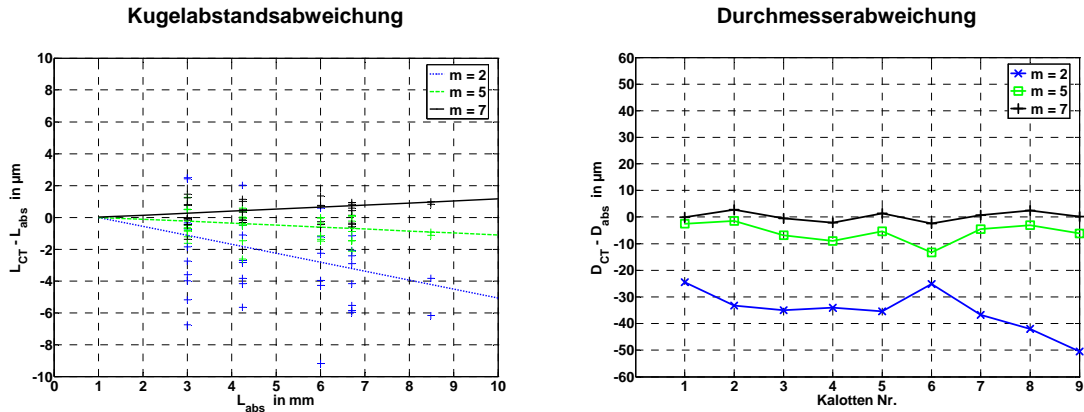


Abbildung 5: Einfluss der Vergrößerung auf die Kugelabstands- und der Durchmesserabweichung.

Aus den Diagrammen wird ersichtlich, dass mit zunehmender Vergrößerung die systematischen Messabweichungen geringer werden. Die Vergrößerung bestimmt maßgeblich die Voxelgröße im CT-Datensatz und damit die Auflösung im rekonstruierten Volumen. Abbildung 6 zeigt Ausschnitte aus den CT-Daten im Bereich der Kugelkalotten. Die jeweilige Voxelgröße bei einer Vergrößerung um den Faktor 2, 5 und 7 beträgt 100, 40 und 28 μm . Mit zunehmender Voxelgröße nimmt die Unschärfe in den Daten zu, was mit größer werdenden Messabweichungen bezüglich der genannten Kenngrößen einhergeht.

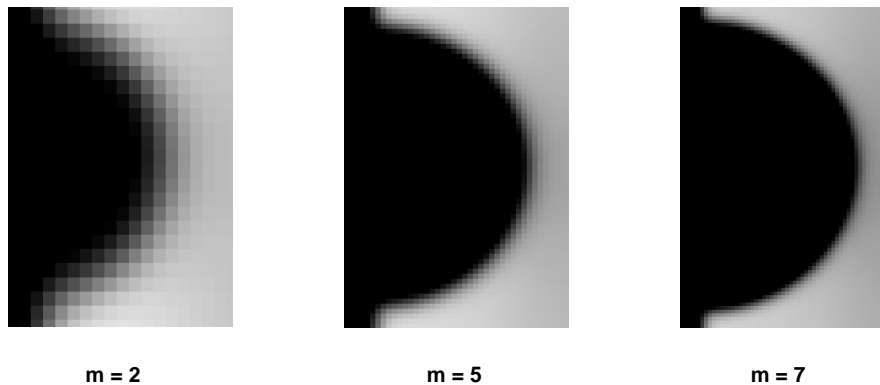


Abbildung 6: Ausschnitte aus dem CT-Datensatz bei unterschiedlichen Vergrößerungsfaktoren.

4.2 Einfluss von Spannungsschwankungen

Für die Simulation von Spannungsschwankungen des Hochspannungsgenerators zur Versorgung der Röntgenröhre wurde eine zufällige Gaußverteilung angenommen. Der Röhrenstrom betrug konstant 1,5 mA bei einer eingestellten Spannung von 140 kV und einer Direktvergrößerung von 7. Für jede Projektion berechnet sich mit $U = U_0 \cdot (1 + U_{Gauß})$ die simulierte Beschleunigungsspannung, wobei $U_{Gauß}$ im Bereich von -0,3...+0,3 V liegt. Abbildung 7 zeigt die Verteilung der Spannungswerte.

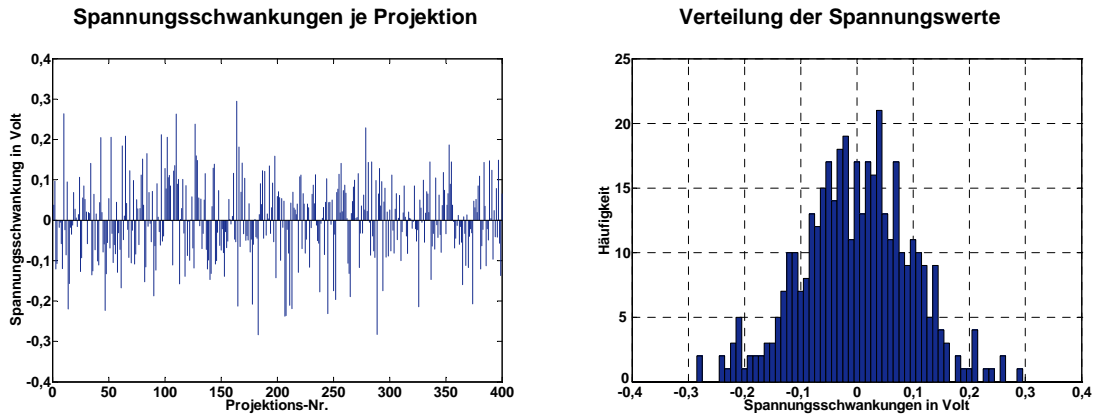


Abbildung 7: Gaußverteilte Spannungsschwankungen in der Simulation.

Für den CT-Datensatz mit Spannungsschwankungen wurde anschließend die Kugelabstands- und die Durchmesserabweichung bestimmt. Im Vergleich zu den CT-Daten, die ohne Spannungsschwankungen generiert wurden, konnten keine signifikanten Unterschiede bezüglich systematischer Messabweichungen festgestellt werden. Abbildung 8 zeigt die Diagramme für die beiden Kenngrößen. Die Spanne der Abweichungen ist in der CT-Messung mit Spannungsschwankungen bei der Kugelabstandsabweichung geringfügig höher. Eine eindeutige Aussage über die Relevanz und den Einfluss auf reale CT-Messungen kann mit diesen Daten nicht getroffen werden. Hier müssen weitere Untersuchungen erfolgen. Denkbar ist die Simulation und die Untersuchung, inwieweit ein zeitlicher Drifts der Versorgungsspannung sich relevant auf die CT-Messdaten auswirkt.

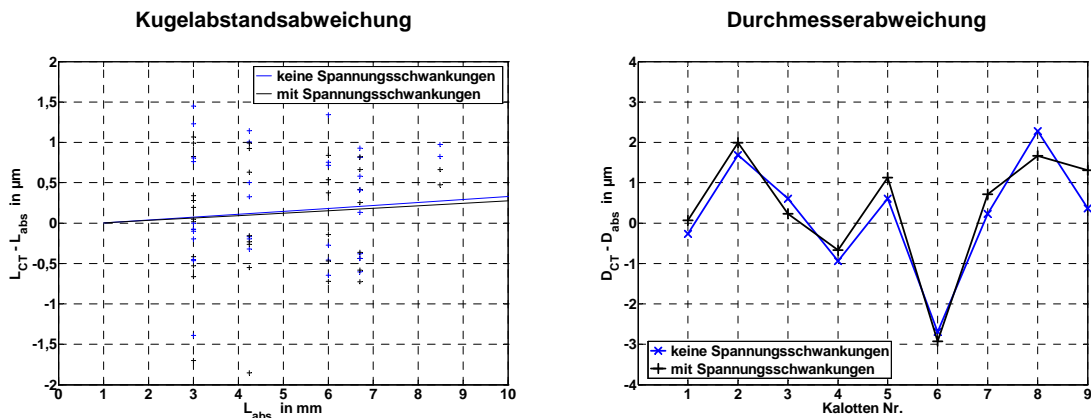


Abbildung 8: Einfluss von Spannungsschwankungen auf die Kugelabstands- und die Durchmesserabweichung.

4.3 Einfluss der Lage des Messobjekts im CT-Aufnahmevolumen

An realen CT-Messungen konnte bereits gezeigt werden, dass die Lage des Messobjekts im CT-Messvolumen einen nicht zu vernachlässigen Einfluss auf das Messergebnis bzw. auf spezifische Kenngrößen ausübt. In der Simulation wurde die Kugelkalottenplatte in eine zur Ausgangslage um 45° gekippte Lage im Messvolumen positioniert und bei einer Direktvergrößerung von 7 virtuell tomographiert. Abbildung 9 zeigt jeweils die erste Projektion der CT-Daten.

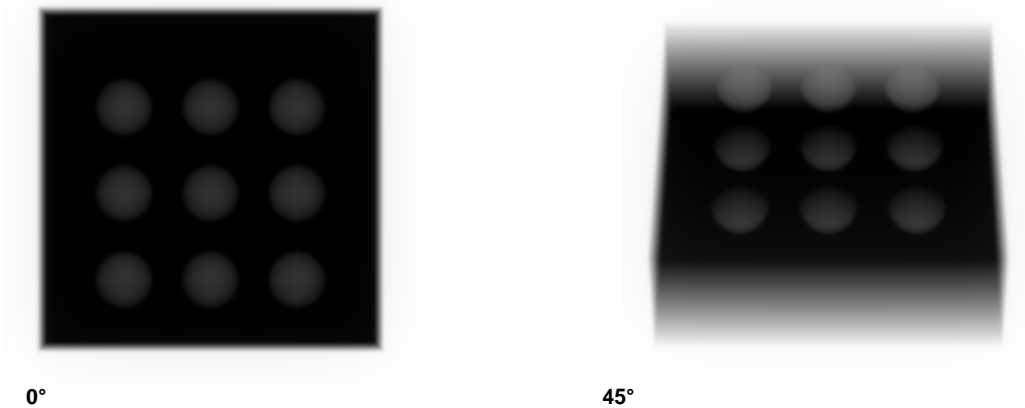


Abbildung 9: Erste Projektion des CT-Datensatzes. Links vertikale Lage, rechts um 45° verkippt.

Anschließend wurden die Kugelabstands- und Durchmesserabweichungen für beide Datensätze bestimmt und miteinander verglichen. Abbildung 10 zeigt die Abweichungsdiagramme. Hier wurde für die verkippte Lage eine geringere systematische Abweichung der Kugelabstände festgestellt. Durch die Verkipfung ergab sich allerdings eine höhere Durchmesserabweichung, die sich aus der leichten Unschärfe an den Randbereichen der Kalotten bedingt durch die Schräglage erklären lässt. Die geringeren systematischen Abweichungen der Kugelabstände in der verkippten Lage lassen sich nicht so einfach deuten. Im Diagramm der Kugelabstandsabweichung zeigt sich, dass einige Abstände im Vergleich zur Ausgangslage (0°) um teilweise über $1,5 \mu\text{m}$ zu gering bestimmt wurden ($L_{CT} - L_{abs} < 0$). In der Ausgangslage wurden die Abstände meist mit ca. $0,6 \mu\text{m}$ zu gering bestimmt. Durch diesen Umstand weist die Ausgleichsgerade (Gauß-Methode) für die verkippte Lage eine geringere Steigung auf. Allerdings ist die Spanne der Abweichungen bzw. der Streubereich der Werte ($-1,7 \mu\text{m} \dots +1,7 \mu\text{m}$) in dieser Lage größer. D.h. nach Ausgleich der systematischen Abweichungen weist Lage 0° eine geringere Kugelabstandsabweichung als Lage 45° auf.

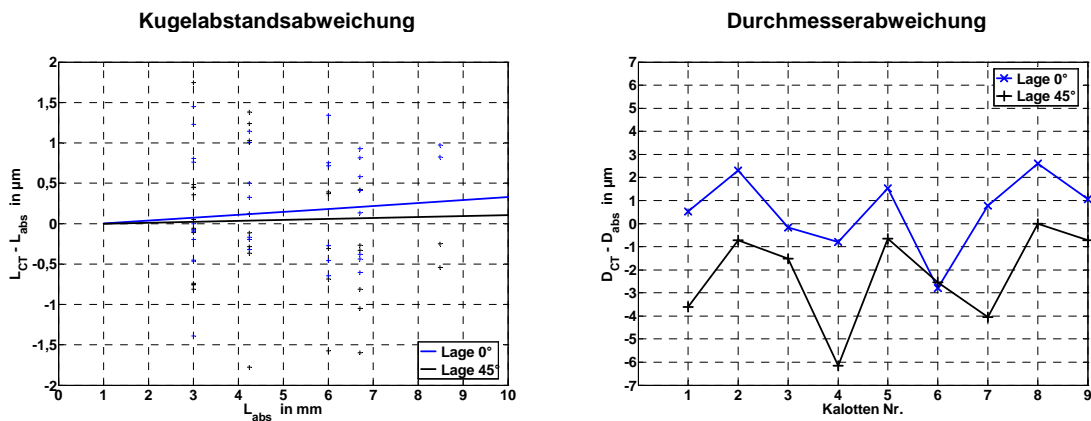


Abbildung 10: Einfluss der Lage des Messobjekts im CT-Messvolumen auf die Kugelabstands- und Durchmesserabweichung.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden zwei Kenngrößen zur Identifizierung und Analyse von Einflussgrößen beim dimensionellen Messen mit CT vorgestellt. Der Einsatz kalibrierter Prüfkörper erweist sich als wichtige Methode, um CT-Messungen im Hinblick auf ihre Genauigkeit zu untersuchen und um die CT mit einer etablierten Messtechnik zu vergleichen. Durch Variation verschiedener Parameter können auch hier relevante Einflüsse identifiziert bzw. abgeschätzt werden. Die Simulationsmethode bietet allerdings den Vorteil der Analyse einzelner Effekte durch unabhängige Parametervariation am Rechner. Alle am CT-Aufnahmeprozess beteiligten Größen können einzeln variiert werden, wobei gleichzeitig konstante Bedingungen für die restlichen Parameter vorliegen. Mit Hilfe der Simulationsmethode wurden der Einfluss der Direktvergrößerung, von Spannungsschwankungen und der Einfluss der Lage des Messobjekts im CT-Messvolumen auf die Kenngrößen Kugelabstands- und Durchmesserabweichung untersucht. Es zeigte sich, dass mit zunehmender Vergrößerung geringere systematische Abweichungen für beide Kenngrößen zu erwarten sind. Die Simulation von Spannungsschwankungen zeigte für beide Kenngrößen keine signifikanten Effekte bezüglich der Kenngrößen. Hier sind weitere Untersuchungen, z.B. die Simulation eines zeitlichen Spannungsdrifts, angedacht. Bei einer zu vertikalen um 45° verkippte Positionierung des Messobjekts im CT-Messvolumen wurden bei der Kugelabstandsabweichung geringere systematische Abweichungen, allerdings ein größerer Streubereich der Messwerte festgestellt. Die verkippte Lage führte eindeutig zu größeren Durchmesserabweichungen.

Die Simulationsmethode erweist sich als nützliches und wichtiges Werkzeug zur Analyse von Einflussgrößen beim dimensionellen Messen. Die nächsten Schritte sind weitere Untersuchungen einzelner Einflussgrößen, Analyse von Korrelationen einzelner Größen und Effekte und die Erweiterung der Simulation mit einer Monte-Carlo-Methode zur statistischen Variation von Einflussgrößen und Parametern zur Abschätzung von aufgabenspezifischen Messunsicherheiten.

Danksagung

Diese Arbeit wird von der Europäischen Union und vom Land Bayern kofinanziert.

Referenzen

- [1] Kasperl S.: Qualitätsverbesserung durch referenzfreie Artefaktreduzierung und Oberflächennormierung in der industriellen 3D-Computertomographie. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2005.
- [2] Steinbeiß, H. P.: Dimensionelles Messen mit Mikro-Computertomographie. Dissertation, Technische Universität München, 2005.
- [3] VDI / VDE 2617 Blatt 2.3: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung. Technische Regel, 12/2001.
- [4] VDI / VDE 2617 Blatt 6.2: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung. Technische Regel, 10/2005.