

Einflüsse bei der messtechnischen Erfassung innenliegender Merkmale mittels Computertomographie

Eckart UHLMANN^{1,2}, Dirk OBERSCHMIDT², Nikolas SAWCZYN¹

¹ Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb IWF,
Technische Universität Berlin

² Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK, Berlin

Kurzfassung. Die industrielle Computertomographie (CT) ermöglicht die zerstörungsfreie und dreidimensionale messtechnische Erfassung von außen- und innenliegenden geometrischen Merkmalen und stellt hierdurch eine Schlüsseltechnologie in der zerstörungsfreien Prüfung dar. Aufgrund der stetigen Optimierung der Anlagenkomponenten (Röntgenquelle, Manipulator und Detektor), der Aufnahmegeometrien (Laminographie, Helix CT und Phasenkontrast CT) sowie der Rekonstruktionsalgorithmen (Algebraische Rekonstruktionsalgorithmen) hinsichtlich der Genauigkeit bzw. Detailerkennbarkeit wird die industrielle CT zunehmend für die messtechnische Erfassung von innenliegenden geometrischen (Mikro-)Merkmalen eingesetzt. Die Entwicklung neuer Werkstoffe zur Erhöhung der Ressourceneffizienz, wie beispielsweise mikroskalige Werkstoffsysteme oder Verbundstrukturen, erfordern für den serienreifen Einsatz die Entwicklung von adäquaten Prüfmethoden. Diese messtechnischen Anforderungen können durch die industrielle CT erfüllt werden, jedoch sind die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit von Messergebnissen noch nicht vollständig erfasst. Des Weiteren sind bislang keine Aussagen zur Messunsicherheit U bei der messtechnischen Erfassung von Multimaterialien mit innenliegenden (Mikro-)Merkmalen möglich.

In diesem Beitrag werden signifikante Einflussgrößen bei der messtechnischen Erfassung innenliegender geometrischer Merkmale mittels Computertomographie dargestellt. Zunächst wird anhand von unterschiedlichen rotationsymmetrischen Prüfkörpern aus Aluminium (AlMgSi1), Messing (CuZn37) und Polyoxymethylen (POM) mit außenliegenden Geometriemerkmalen der Einfluss verschiedener Aufnahmeparameter, wie beispielsweise Beschleunigungsspannung U_B , Röhrenstrom I_R sowie Integrationszeit t_{int} , auf das Messergebnis Y untersucht. Anschließend entsteht durch Zusammensetzen der einzelnen Prüfkörper ein Stufenzylinder mit definierten innenliegenden Merkmalen, welche den zuvor computertomographisch erfassten außenliegenden Merkmalen entsprechen. Hierdurch kann die Materialzusammensetzung des zusammengesetzten Stufenzylinders sowie die räumliche Lage zum Prüfmerkmal variiert und der Einfluss auf das Messergebnis Y bestimmt werden.

1 Einführung

Die stetig steigenden Anforderungen an neue Produkte hinsichtlich der Funktionsfähigkeit, Sicherheit, Nachhaltigkeit sowie Leistungsfähigkeit erfordern zunehmend den Einsatz innovativer Messtechnik als Instrument der Qualitätssicherung. Trends, wie beispielsweise der Einsatz von serienreifen Faserverbundwerkstoffen oder die Zunahme der



Bauteilkomplexität durch Integralbauweise zur Reduzierung des Montageaufwands, verstärken den Bedarf nach adäquaten Prüfmethoden. Eine Prüfmethode, die es ermöglicht sowohl außen- als auch innenliegende Funktions- und Geometriemerkmale dreidimensional und zerstörungsfrei messtechnisch zu erfassen, ist die industrielle Computertomographie (CT) [1].

Die Anwendungsgebiete der CT reichen vom dimensionellen Messen, über die Defekterkennung (Risse, Poren, Einschlüsse oder Lunken) bis hin zum Reverse Engineering [2]. Gegenüber konventionellen Messverfahren sind Aussagen über die Messunsicherheit U zur Bewertung der Qualität eines Messergebnisses bei der industriellen CT noch nicht vollständig möglich, was insbesondere in der hohen Komplexität der gesamten Messprozesskette begründet ist. Dies ist einerseits auf die physikalische Komplexität des Wirkprinzips, beispielsweise hervorgerufen durch die Vielzahl an Nichtlinearitäten bei der Strahlerzeugung sowie dem signifikanten Einfluss des Messobjekts auf den Messprozess, und andererseits auf den großen Einfluss des Messgerätbedieners auf die gesamte Messprozesskette zurückzuführen [3; 4; 5]. Insbesondere Aussagen zur CT-Datenqualität bei innenliegenden Merkmalen mit einer inhomogenen Materialzusammensetzung sind bislang nicht möglich. Im Rahmen dieses Beitrags wurde ein dreiteiliger Prüfkörper mit außenliegenden Geometriemerkmale entwickelt, der durch Zusammenbau definierte innenliegende Geometriemerkmale bildet. Anhand dessen kann der Einfluss wichtiger Einflussgrößen in Abhängigkeit der Materialzusammensetzung untersucht werden.

2 Versuchsdurchführung

Zur Charakterisierung der Einflussgrößen bei der messtechnischen Erfassung von innenliegenden Geometriemerkmale bei der industriellen CT wurden Untersuchungen am FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR PRODUKTIONSANLAGEN UND KONSTRUKTIONSTECHNIK IPK, Berlin, an einem 3D Röntgen-CT des Typs Metrotom 800 des Herstellers CARL ZEISS IMT GMBH, Oberkochen, durchgeführt. Dabei wurden nur die für den Messgerätbediener relevanten CT Aufnahmeparameter untersucht (siehe Abb. 1).

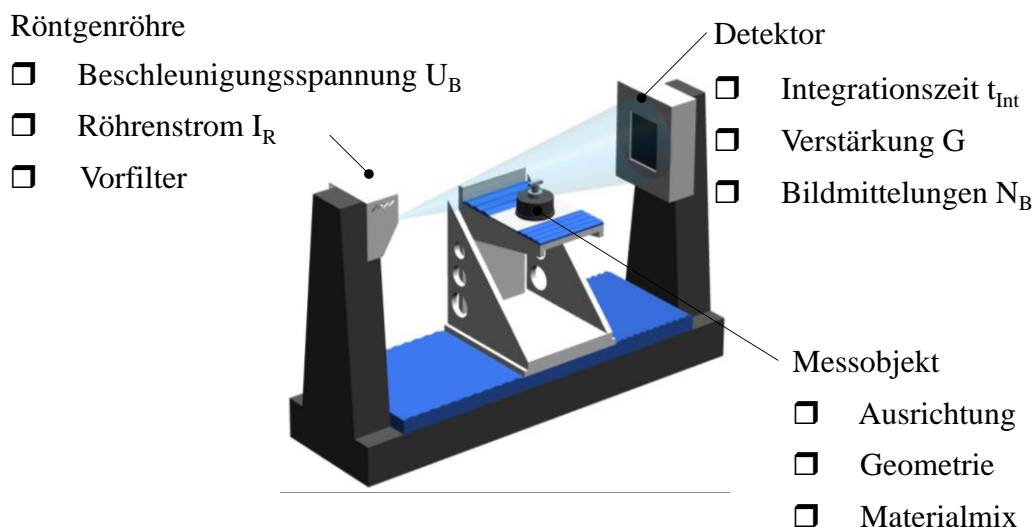


Abb. 1 Einflussgrößen an einem konventionellen 3D Röntgen-CT

Anhand von Voruntersuchungen wurden Wertebereiche für die relevanten CT Aufnahmeparameter festgelegt (vgl. Tabelle 1). Bei allen Untersuchungen beträgt die Voxelgröße $V_x = 20 \mu\text{m}$.

Tabelle 1 CT Aufnahmeparameter mit Wertebereich

Aufnahmeparameter	Wertebereich
Beschleunigungsspannung U_B	90 – 130 kV
Röhrenstrom I_R	65 – 123 μ A
Vorfilter	Aluminium und Kupfer
Integrationszeit t_{int}	133 – 1.000 ms
Verstärkung G	1; 2,5; 8
Bildmittelungen N_B	1; 2; 3; 4; 5
Messobjektausrichtung	0° und 15°
Materialzusammensetzung	variabel
Prüfmerkmal	Durchmesser d und Länge l

Um die Einflussgrößen bei der messtechnischen Erfassung von innenliegenden Geometriemerkmale quantitativ bestimmen zu können, wurde ein dreiteiliger Prüfkörper entwickelt. Der Prüfkörper setzt sich aus zwei Stufenzylindern und einem Zylinder mit taktile erfassbaren Geometriemerkmale (Durchmesser d und Länge l) zusammen (siehe Abb. 2). Der Zusammenbau der (Stufen-)Zylinder ergibt ein Prüfkörper mit innenliegenden Geometriemerkmale. Die einzelnen (Stufen-)Zylinder wurden aus den Werkstoffen Aluminium (AlMgSi1; $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$), Polyoxymethylen (POM; $\rho = 1,4 \text{ g/cm}^3$) sowie Messing (CuZn39Pb3; $\rho = 8,5 \text{ g/cm}^3$) mit einem Langdrehautomaten des Typs Cincom B12E des Herstellers CITIZEN MACHINERY EUROPE GMBH, Esslingen, gefertigt. Durch die Auswahl der Materialien wird mit diesem Prüfkörper ein typischer Materialmix realer Bauteile simuliert.

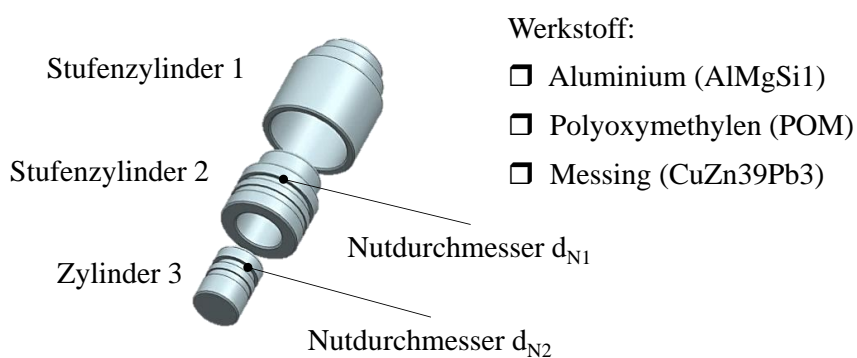


Abb. 2 Aufbau des dreiteiligen Prüfkörpers zur Durchführung der Untersuchungen

3 Untersuchungsergebnisse

Im Folgenden wird ein Ausschnitt der Untersuchungsergebnisse vorgestellt. Dabei wird auf den Einfluss der Messobjektausrichtung, der Beschleunigungsspannung U_B sowie der Integrationszeit t_{Int} in Abhängigkeit der Materialzusammensetzung eingegangen.

3.1 Einfluss der Messobjektausrichtung

Um den Einfluss der Messobjektausrichtung qualitativ und quantitativ zu bewerten, wird zunächst ein homogener Prüfkörper aus dem Material POM mit einem Kippwinkel $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 15^\circ$ untersucht (vgl. Abb. 3). Die qualitative Auswertung in der Software VGStudio MAX 2.1 der Fa. VOLUME GRAPHICS GMBH, Heidelberg, zeigt bei einem Kippwinkel $\alpha = 0^\circ$ an den horizontal verlaufenden Oberflächen starkes Rauschen. Im Gegensatz dazu zeigt der Datensatz mit einem Kippwinkel $\alpha = 15^\circ$ kein Rauschen. Jedoch betrifft das im Datensatz mit einem Kippwinkel $\alpha = 0^\circ$ auftretende Rauschen Bereiche, die für die Auswertung der Prüfmerkmale nicht relevant sind. Dies wird durch die quantitative Auswertung mit der Software Calypso 2014 der Fa. CARL ZEISS IMT GMBH, Oberkochen, bestätigt. Die Messabweichungen zwischen den Datensätzen mit unterschiedlicher Messobjektausrichtung liegen im Bereich von $1 \mu\text{m}$.

Anschließend werden Versuche mit einer inhomogenen Prüfkörperzusammensetzung durchgeführt. Der Prüfkörper 2 besteht aus einem Stufenzylinder 1 und Stufenzylinder 2 aus POM sowie einem Zylinder 3 aus AlMgSi1. Der Prüfkörper 3 unterscheidet sich vom Prüfkörper 2 durch den Zylinder 3, der aus CuZn39Pb3 gefertigt ist. Die qualitative Auswertung von Prüfkörper 3 und 4 zeigt, dass unabhängig von der Messobjektausrichtung ein Rauschen um den Zylinder 3 auftritt. Dabei ist das Rauschen bei einem Kippwinkel $\alpha = 15^\circ$ im Allgemeinen geringer als beim einem Kippwinkel $\alpha = 0^\circ$. Darüber hinaus ist das Rauschen beim Prüfkörper 4 deutlich stärker ausgeprägt. Eine quantitative Auswertung der Prüfmerkmale am Stufenzylinder 1 und 2 zeigt eine konstante negative Messabweichung gegenüber dem Prüfkörper 1. Dabei ist zu beobachten, dass mit zunehmender Absorption des Messobjekts die Messabweichung linear negativ ansteigt.

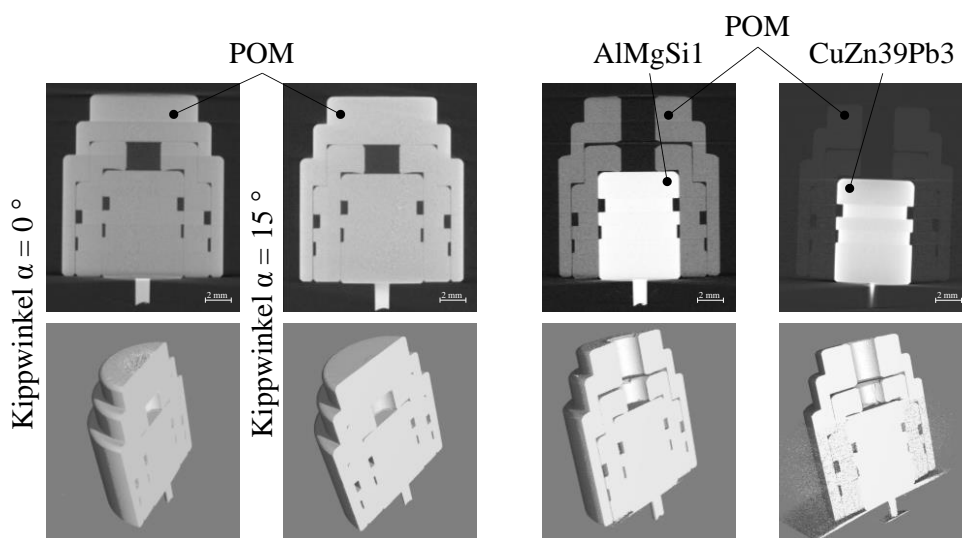


Abb. 3 Einfluss der Messobjektausrichtung in Abhängigkeit der Materialzusammensetzung (VGStudio MAX 2.1, VOLUMEGRAPHICS GMBH, Heidelberg)

3.2 Einfluss der Beschleunigungsspannung U_B

Um den Einfluss der Beschleunigungsspannung U_B in Abhängigkeit der Materialzusammensetzung quantitativ zu untersuchen, werden drei Prüfkörper bei fünf unterschiedlichen Beschleunigungsspannungen U_B mit fünffacher Wiederholungsmessung aufgenommen. Bei allen Aufnahmeparameterkonfigurationen beträgt der Brennfleckdurchmesser $d_B = 20 \mu\text{m}$. Das auszuwertende Prüfmerkmal ist der Nutdurchmesser d_{N2} des Stufenzylinders 2 aus AlMgSi1. Dementsprechend weisen die Prüfkörper unterschiedliche Stufenzylinder 1 sowie Zylinder 3 auf (vgl. Abb. 4). Die für eine CT Aufnahme nötige Projektionsanzahl N_{Proj} kann für eine gefilterte Rückprojektion (FBP - engl. filtered back projection) näherungsweise durch folgende Gleichung abgeschätzt werden:

$$N_{\text{Proj}} \sim \frac{\pi}{2} N_D \quad (1)$$

mit N_D = Objektbreite in Pixel am Detektor. Anhand dieser Näherung werden mit der gewählten geometrischen Vergrößerung V_g $N_{\text{Proj}} = 1.400$ Projektionen aufgenommen. Werden nicht ausreichend viele Projektionen aufgenommen, so wird das Abtasttheorem verletzt. Daraus resultiert eine Signalüberlagerung, die als Aliasing bezeichnet wird. Das Abtasttheorem besagt, dass im Messobjekt nur Ortsfrequenzen vorkommen dürfen, die kleiner als die Nyquist-Frequenz (halbe Abtastfrequenz) sind.

Die Auswertung der Beschleunigungsspannung U_B zeigt bei allen Prüfkörperkonfigurationen eine ähnliche Tendenz. Es ist ersichtlich, dass mit zunehmender Beschleunigungsspannung U_B bei gleichbleibendem Brennfleckdurchmesser d_B das Prüfmaß linear abnimmt. Dabei beträgt die Abnahme in diesem Bereich durchschnittlich $0,02 \mu\text{m}/\text{kV}$. Einzige Ausnahme stellt der Datensatz 6 mit dem homogenen Prüfkörper aus AlMgSi1 bei einer Beschleunigungsspannung $U_B = 90 \text{ kV}$ dar.

Die Betrachtung des Einflusses der Materialzusammensetzung zeigt, dass diese bei allen Aufnahmeparameterkonfigurationen, außer beim Datensatz 6, konstant sind. Die Messabweichung beträgt zwischen der Prüfkörperkonfiguration aus POM und AlMgSi1 durchschnittlich $1,3 \mu\text{m}$ bzw. zwischen POM und AlMgSi1/CuZn39Pb3 durchschnittlich $1,8 \mu\text{m}$. Dies zeigt, dass die Beschleunigungsspannung U_B , bei gegebener Durchstrahlung des Messobjekts bzw. ausreichender Beleuchtung des Detektors, im Vergleich zur Absorption bzw. Materialzusammensetzung des Messobjekts nur einen untergeordneten Einfluss besitzt.

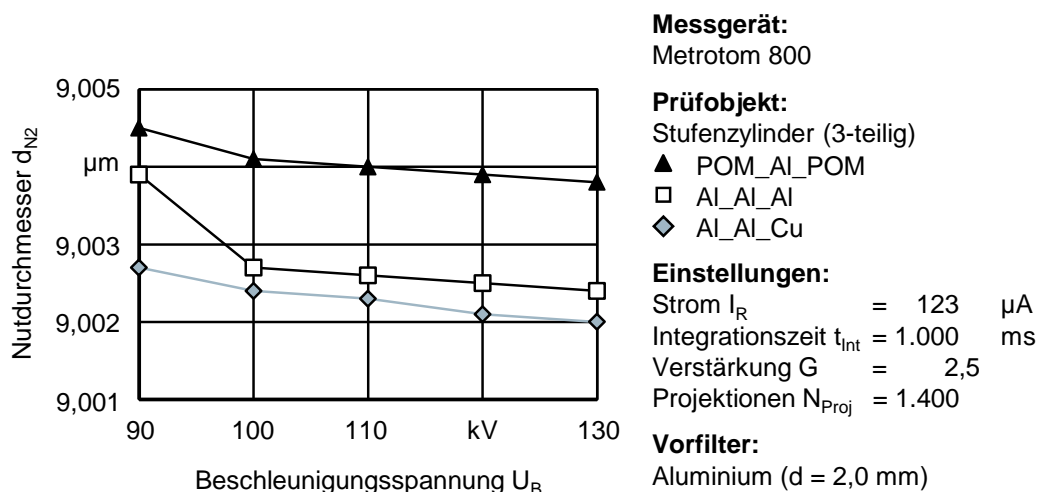


Abb. 4 Einfluss der Beschleunigungsspannung U_B in Abhängigkeit der Materialzusammensetzung auf den Nutdurchmesser d_{N2}

3.3 Einfluss der Integrationszeit t_{Int}

Die Integrationszeit t_{Int} ist, neben der Anzahl an Projektionen N_{Proj} , für die Messzeit t_{M} einer CT Aufnahme verantwortlich. Eine Reduzierung der Projektionsanzahl N_{Proj} führt bei einem FBK Algorithmus zur Verletzung des Nyquist Kriteriums. Ein Ansatz zur Reduzierung der Messzeit t_{M} bildet einerseits die Reduzierung der Projektionsanzahl N_{Proj} unter Anwendung von algebraischen Rekonstruktionsalgorithmen (ART) mit zusätzlicher Nutzung von a priori Informationen und andererseits die Reduzierung der Integrationszeit t_{Int} unter Beibehaltung einer ausreichenden Detektorausleuchtung.

Zur quantitativen Auswertung des Einflusses der Integrationszeit t_{Int} in Abhängigkeit der Materialzusammensetzung werden als Messobjekte drei Prüfkörper mit dem gleichen Zylinder 3 (POM) eingesetzt. Als Prüfmerkmal wird der Nutdurchmesser d_{N1} ausgewertet. Der Stufenzylinder 1 wird zwischen allen drei Materialien variiert (POM, AlMgSi1 und CuZn39Pb3). Bei der Prüfkörperkonfiguration mit dem Stufenzylinder 1 aus POM ist der Stufenzylinder 2 aus AlMgSi1. Bei den anderen beiden Prüfkörperkonfigurationen ist der Stufenzylinder 2 aus POM. Der Brennfleckdurchmesser d_{B} beträgt $20 \mu\text{m}$ bei einer Röntgenleistung $P_{\text{R}} = 15,99 \text{ W}$. Die Integrationszeit t_{Int} wird zwischen 500 und 1.000 ms in vier Stufen variiert (vgl. Abb. 5).

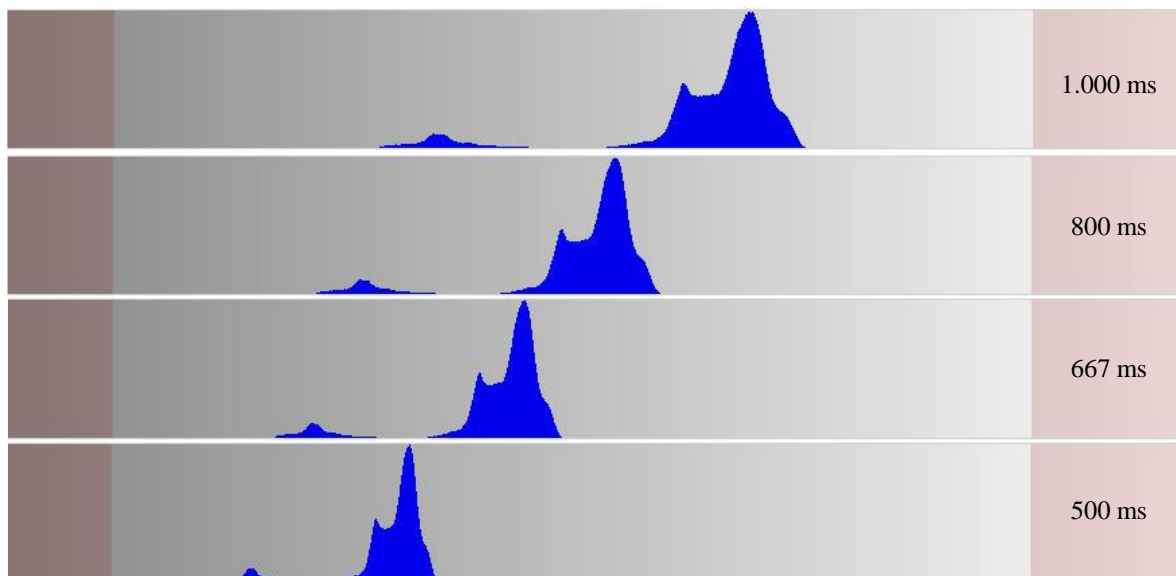


Abb. 5 Histogramm der Grauwerte in Abhängigkeit der Integrationszeit t_{Int} von der Prüfkörperkonfiguration POM_POM_Cu

Die Betrachtung der Integrationszeit t_{Int} zeigt, dass mit dem Erreichen einer ausreichenden Detektorausleuchtung der Einfluss der Integrationszeit t_{Int} deutlich abnimmt (vgl. Abb. 6). Dies wird insbesondere deutlich wenn die Datensätze mit einer Prüfkörperkonfiguration aus POM und AlMgSi1 (Datensatz 31 und Datensatz 32) mit der Prüfkörperkonfiguration aus POM und CuZn39Pb3 (Datensatz 33) verglichen werden. Bei den Datensätzen 31 und 32 ist kein signifikanter Einfluss der Integrationszeit t_{Int} erkennbar. Der Nutdurchmesser d_{N1} ist bei diesen beiden Datensätzen bei einer Integrationszeit t_{Int} im Bereich von 500 und 1.000 ms annähernd konstant. Im Gegensatz dazu wird bei der Betrachtung des Datensatzes 33 deutlich, dass eine ausreichende Detektorausleuchtung für das dimensionelle Messen zwingend erforderlich ist. Die Messabweichung zwischen einer Integrationszeit $t_{\text{Int}} = 500 \text{ ms}$ und $t_{\text{Int}} = 1.000 \text{ ms}$ liegt beim Datensatz 33 bei $40 \mu\text{m}$.

Der Einfluss der Materialzusammensetzung auf die Messabweichung ist, wie schon im Abschnitt 3.2 dargestellt, konstant, wenn die grundlegenden Kriterien einer CT

Aufnahme eingehalten werden. Der Vergleich der unterschiedlichen Prüfkörperkonfigurationen zeigt, dass je höher die Absorption bzw. die Dichte ρ des Messobjekts bezogen auf die Durchstrahlungslänge l_D ist, desto höher die negative Messabweichung des Prüfmerkmals ausfällt. Auffallend ist der zusammen mit der Integrationszeit t_{Int} zunehmende Nutdurchmesser d_{N1} beim Datensatz 33. Dieser auftretende Effekt ist auf die bei einer Integrationszeit $t_{\text{Int}} = 500$ ms auf die zu geringe Ausleuchtung des Detektors zurückzuführen. Mit zunehmender Integrationszeit t_{Int} nimmt die Messabweichung zu den Datensätzen 31 und 32 ab.

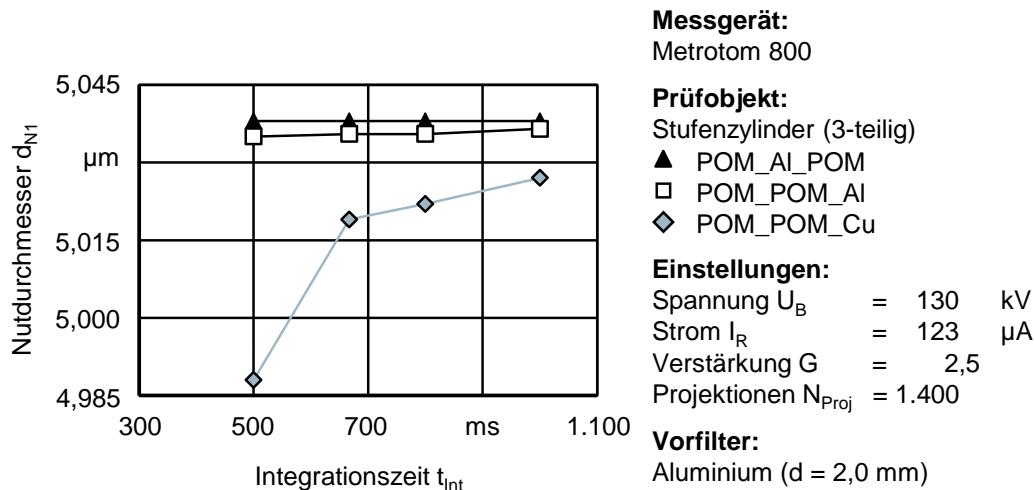


Abb. 6 Einfluss der Integrationszeit t_{Int} in Abhängigkeit der Materialzusammensetzung auf den Nutdurchmesser d_{N1}

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde der Einfluss signifikanter Einflussgrößen in Abhängigkeit der Materialzusammensetzung des Messobjekts auf die Messabweichung bei innenliegenden Geometriemerkmalen bei der industriellen CT untersucht. Hierfür wurde zunächst ein dreiteiliger rotationssymmetrischer Prüfkörper entwickelt, der außenliegende Geometriemerkmalen aufweist. Durch den Zusammenbau der einzelnen (Stufen-)Zylinder entsteht ein Prüfkörper mit definierten innenliegenden Geometriemerkmalen. Als Messobjektmaterialien wurden POM, AlMgSi1 und CuZn39Pb3 eingesetzt.

Die Auswertung der Einflussgrößen zeigt den signifikanten Einfluss der Messobjekteigenschaften bei der computertomographischen Erfassung. Insbesondere der Einfluss der Absorptionsfähigkeit bzw. der Dichte ρ bezogen auf die Durchstrahlungslänge l_D des Messobjekts führt zu einer systematischen Abweichung des Messergebnisses Y . Darüber hinaus zeigt sich, dass signifikante Messabweichungen nur auftreten, wenn grundlegende Kriterien der CT Aufnahme, wie z. B. eine ausreichende Detektorausleuchtung oder vollständige Durchleuchtung des Messobjekts bei allen Winkelpositionen, eingehalten werden.

In weitergehenden Untersuchungen wird insbesondere der Einfluss der Prüfmerkmalsorientierung in Abhängigkeit der Messobjekteigenschaften auf die Messabweichung untersucht. Ferner sollen die erlangten Ergebnisse an realen Mikroteilen validiert werden.

Referenzen

- [1] Imkamp, D.; Schmitt, R.; Berthold, J.: Blick in die Zukunft der Fertigungsmesstechnik. In: tm Technisches Messen, 79 (2012) 10, S. 433 – 439.
- [2] Weckenmann, A.; Krämer, P.: Anwendung der Computer-Tomographie in der Fertigungsmesstechnik. In: tm Technisches Messen, 76 (2008) 7 – 8, S. 340 – 346.
- [3] Kasperl, S.; Reisinger, S.; Franz, M.: Aufnahmeplanung in der industriellen Computertomographie. DGZfP-Jahrestagung 2011, Bremen, 30.05 – 01.06.2011.
- [4] Schmitt, R.; Niggemann, C.: Einfluss der Bauteilorientierung auf die Messunsicherheit bei dimensionellen Computertomografie Messungen. Industrielle Computertomografie Tagung, Wels, Austria, 27. – 29.09.2010.
- [5] Schmitt, R.; Damm, B.; Niggemann, C.: Messunsicherheitsbestimmung für die industrielle Computertomografie anhand kalibrierter Bauteile. In: tm Technisches Messen, 378 (2011) 3, S. 133 – 141.