

Der Einfluss unterschiedlicher Material- zusammensetzungen auf das dimensionelle Messen von Mikroobjekten mittels Mikro-Computertomographie

Matthias SCHULZE, Michael NEUGEBAUER, Rudolf MEEß,
Jörg BRZOSKA, Antje JUNG
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig und Berlin

Andreas STAUDE, Karsten EHRIG
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin

Kurzfassung. Computertomographische Aufnahmen von Objekten mit stark voneinander abweichenden Absorptionseigenschaften stellen sowohl für den Anwendungsbereich der zerstörungsfreien Prüfung als auch für den der dimensionellen Messtechnik eine besondere Herausforderung dar. Die Aufnahmekonfiguration kann bei Objekten dieser Art häufig nicht so gewählt werden, dass die unterschiedlichen Materialeigenschaften mit ausreichender Qualität abgebildet werden können. Aus diesem Grund ist eine objektive Bewertung der Oberflächenmessung mit Hilfe eines in dieser Untersuchung eingeführten Qualitätsmaßes erforderlich. Anhand der in dieser Arbeit vorgestellten Prüfkörperserie soll der Einfluss der Materialzusammensetzung auf das dimensionelle Messen mit CT erfasst und charakterisiert werden. Unter Berücksichtigung der Qualitätsbewertung der Oberflächenpunkte erfolgt die Berechnung der Form- und Abstandsabweichungen. Ziel ist es, die Genauigkeit der Oberflächenmessung hinsichtlich unterschiedlicher Aufnahmeparameter und Materialzusammensetzungen darzustellen. Anhand dieser Ergebnisse ist es möglich, den computertomographischen Aufnahme- und Auswertungsprozess quantitativ zu bewerten und Ursachen der Abweichungen zu diskutieren.

1. Einleitung

Innerhalb der letzten Jahre vollzog sich eine Weiterentwicklung der Mikro-Computertomographie (μ CT) vom rein qualitativen Prüfinstrument hin zum dimensionellen Messwerkzeug. In Anbetracht der steigenden Akzeptanz und Verbreitung des Verfahrens in Industrie und Forschung erschließen sich zunehmend neue Fragestellungen und Anwendungsgebiete. Insbesondere dimensionelle Messaufgaben an mehrkomponentigen Messobjekten mit gegensätzlichen oder fast identischen Absorptionseigenschaften stellen hierbei immer noch eine besondere Herausforderung dar. Vorteil der CT gegenüber anderen Koordinatenmesstechniken (taktile und optische Verfahren) ist es, innere Strukturen mit hoher Auflösung zu erfassen. Voraussetzung für die dimensionelle Messtechnik ist das genaue Messen von Grenz- und Oberflächen.

Die CT misst im Gegensatz zu taktilem Verfahren Oberflächen nicht direkt, sondern stellt diese in Abhängigkeit von der Auflösung nur diskret dar. Schwellwertverfahren zur Oberflächenbestimmung können hierbei nur einen ersten Ansatz darstellen, da diese keine

Aussagen über die Genauigkeiten der einzelnen Oberflächenmessungen liefern. Prüfobjekte mit Maßverkörperungen auf Basis von Kugelmittelpunkten sind hingegen weitgehend unempfindlich gegenüber Fehlern der Oberflächenmessung und eignen sich daher besonders gut zur Bestimmung von Abbildungs- und Rekonstruktionsfehlern.

2. Prüfkörper

Die Prüfkörper der vorliegenden Untersuchung bilden eine Serie von Mikro-Tetraedern bestehend aus vier Kugeln mit jeweils 0,5 mm Durchmesser (Abbildung 1). Das Referenzmaterial zur Untersuchung der Materialeigenschaften und zur Bestimmung des Bildmaßstabes ist Rubin (hauptsächlich Al_2O_3 mit Beimengungen von Cr). Drei Kugeln des Tetraeders, die obere Kugel (A) und zwei Kugeln (C, D) der unteren Gruppe bestehen aus Rubin. Als vierte Kugel (B) ist der unteren Kugelgruppe eine Kugel mit abweichenden Materialeigenschaften zugeordnet.

Für die Untersuchung wurde jeweils ein Tetraeder mit einer Stahlkugel, einer Siliziumnitridkugel (Si_3N_4) bzw. einer Zirkoniumdioxidkugel (ZrO_2) gefertigt. Die Anordnung der Kugeln im Tetraeder erlaubt die Untersuchung des Materialeinflusses direkt in Absorptionsrichtung wie auch außerhalb dieser Richtung. Zusätzlich wurde ein Referenztetraeder aus vier Rubinkugeln hergestellt. Die verwendeten Kugeln zeichnen sich hinsichtlich Form und Durchmesser (Grade 3-5) durch sehr geringe Abweichungen von deutlich kleiner als $1 \mu\text{m}$ aus.

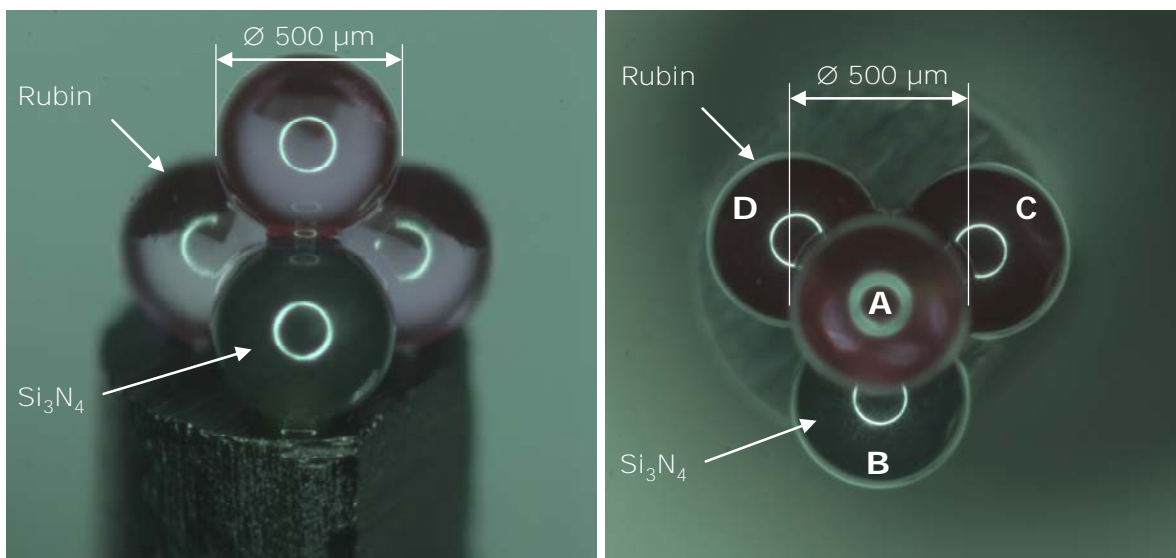


Abbildung 1. Aufbau der Prüfkörper

(Bsp: Tetraeder aus drei Rubinkugeln und einer Siliziumnitrid-Kugel in Seitenansicht bzw. Aufsicht).

Anhand des Tetraeders können verschiedene Referenzmerkmale gebildet werden. Die vier Kugeln definieren sechs unabhängige Strecken zu sechs verschiedenen Raumrichtungen. Abstände zwischen den einzelnen Kugeln im Bereich weniger Mikrometer bilden weitere Merkmale. Die Kugelform kann hinsichtlich der zu erreichenden Messunsicherheiten als nahezu ideal angenommen werden.

2.1 Fertigung

Sämtliche Tetraeder der vorliegenden Untersuchung wurden in der PTB gefertigt. Die präzise Führung der Kugeln während der Fertigung und die hochgenaue Positionierung und Dosierung der Klebepunkte konnte mit Hilfe eines im wissenschaftlichen Gerätebau der

PTB entwickelten Mikromanipulators [1] realisiert werden (Abbildung 2, links). Für die Klebung wurde ein Zweikomponentenkleber verwendet. Im Rahmen weiterer Untersuchungen konnten mit Hilfe des Mikromanipulators bereits Tetraeder aus Kugeln mit einem Durchmesser von 0,2 mm hergestellt werden.

In den Trägerstab aus CFK wurde eine symmetriebrechende Abflachung eingearbeitet, mit der sich die Kugeln während der taktilen Referenzmessung und der CT-Messung eindeutig zuordnen lassen. Die Auflagefläche des Trägerstabes wurde mit höchster Präzision senkrecht zur Stabachse gefertigt und erleichtert eine genaue Ausrichtung des Tetraeders. Die Stabilität der Mikro-Tetraeder wurde mit verschiedenen Belastungstests und Reinigungsverfahren getestet.

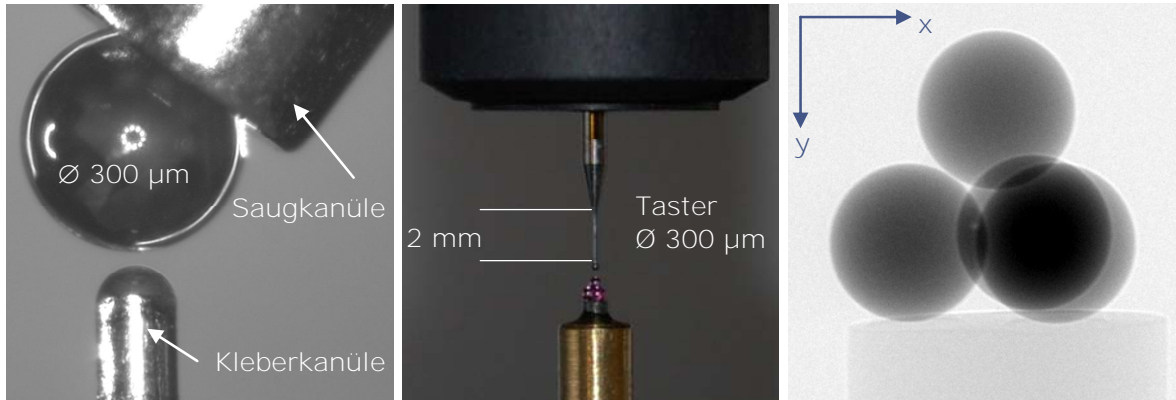


Abbildung 2. links: Positionierung einer Klebestelle am Beispiel einer 300 µm Kugel, Mitte: taktiler Referenzmessung mit einem Mikro-Koordinatenmessgerät F25 (Carl Zeiss), rechts: Projektionsbild des Rubin-Tetraeders während der CT-Messung.

2.2 Referenzmessung

Die taktiler Referenzmessung zur Bestimmung der Kugelparameter wurde mit Hilfe eines Mikro-Koordinatenmessgerätes F25 (Carl Zeiss) ausgeführt. Für die Messung wurde eine Tastkugel aus Siliziumnitrid mit 300 µm Durchmesser verwendet. Auf der oberen Kugel wurden 750 Messpunkte aufgenommen und auf den drei unteren Kugeln je 420 Messpunkte. Zur Ermittlung des Einflusses der Antastkraft wurde innerhalb einer Messreihe die Antastkraft in dem möglichen Bereich von 0,6 mN bis 1 mN variiert und die erhaltenen Ergebnisse auf eine Antastkraft von nahezu Null extrapoliert.

Die gemessenen Formabweichungen der Kugeln betragen zwischen 0,2 µm und 0,4 µm und enthalten neben den Abweichungen des Mikro-Koordinatenmessgerätes auch die Formabweichungen der Antastkugel. Durch zusätzliche Messungen der oberen Tetraederkugel in jeweils 90° versetzten Positionen des Kugeltetraeders konnten einzelne Abweichungen auf der Antastkugel, z.B. durch Partikel, identifiziert und bei der Auswertung entsprechend berücksichtigt werden. Für die Abstände der Kugelmittelpunkte bzw. die Kugeldurchmesser wurde eine erweiterte Messunsicherheit U ($k=2$) von 0,30 µm bzw. von 0,25 µm ermittelt.

2.3 CT-Messung

Die computertomographische Aufnahme der Prüfkörper wurde an einer µCT-Anlage (225 kV) an der BAM durchgeführt. Die Prüfkörper wurden unter folgenden Aufnahme-konfigurationen gemessen:

- 1. Konfiguration: Spannung/Strom: 40 kV/200 µA, ohne Filter
- 2. Konfiguration: Spannung/Strom: 60 kV/133 µA, mit 0,25 mm Cu-Filter

Auf Basis von 900 Projektionen mit einer radiometrischen Auflösung von 16 bit wurden die Volumendatensätze mit einer Voxelgröße von ca. $(2,4 \mu\text{m})^3$ rekonstruiert. Der Bildmaßstab wurde für beide Aufnahmeconfigurationen auf Grundlage des Referenztetraeders aus vier Rubinkugeln ($\varnothing 0,5 \text{ mm}$) bestimmt und korrigiert.

3. Auswertung

Das computertomographische Volumenbild stellt die Abschwächung der gemessenen Objektstruktur hinsichtlich der es durchdringenden Röntgenstrahlung dar. Jedes Bildvoxel repräsentiert dabei die lokale Abschwächung in Form eines Grauwertes. Geometrisch ist jedes Voxel durch das Bildkoordinatensystem fest definiert. Eine topologische Zuordnung, also die Aussagen, ob ein Voxel Bestandteil eines Objektes ist, und welchem Objekt es angehört, liegt im gemessenen Volumenbild noch nicht vor.

Die bildanalytische Auswertung der Messdaten erfolgt in der vorliegenden Arbeit nach dem in Abbildung 3 dargestellten Auswertungsschema.

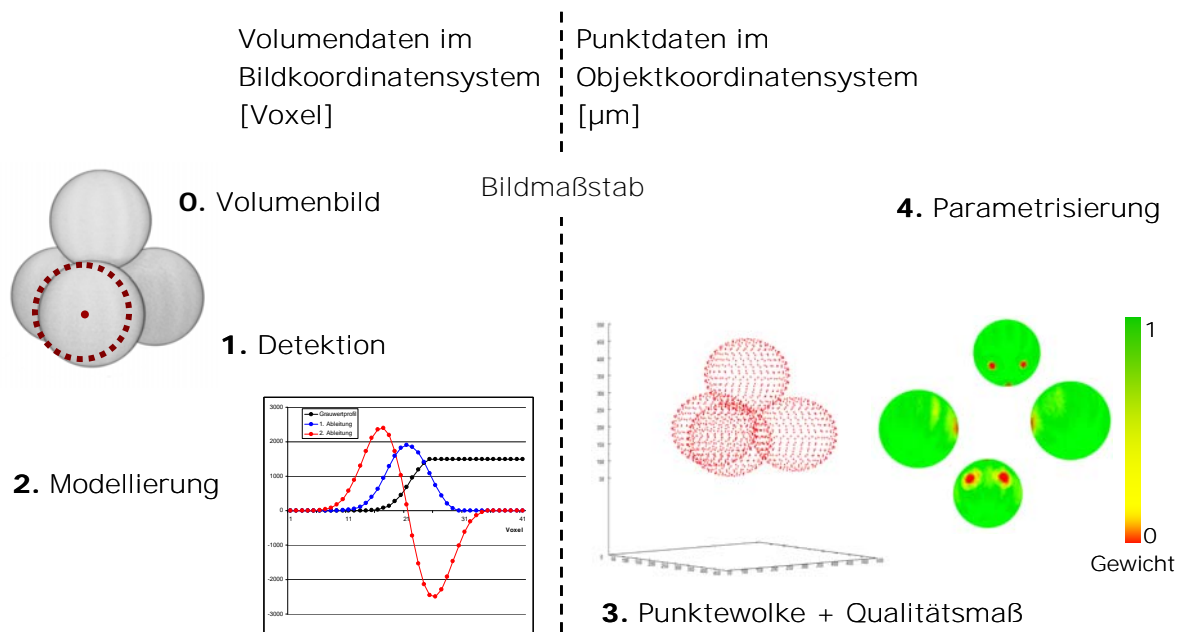


Abbildung 3. Auswertungsschema

Die erste Aufgabe der Bildanalyse besteht in der Trennung zwischen der gesuchten Objektstruktur und dem restlichen Bildinhalt. Bei der Unterscheidung mehrerer Objekte ist darüber hinaus auch die Zuordnung zu einem bestimmten Objekt zu treffen. Diese Trennung und Zuordnung wird während der Detektion durchgeführt. Das Ziel der Detektion liegt nicht in der genauen Bestimmung der gesuchten Struktur oder Eigenschaft des Objektes, sondern in der zuverlässigen und eindeutigen Zuordnung und Trennung der Bildinformation. Hierzu sind Algorithmen wie wissensbasierte Segmentierungsverfahren, Hough-Transformation und Kreuzkorrelation vorhanden. Für die vorliegende Aufgabe wurde ein einfacher Kugelfindungsalgorithmus verwendet [2].

Aufbauend auf den Näherungsdaten der Detektion erfolgt dann die subvoxelgenaue Modellierung der Objektgeometrie. Dazu werden Grauwertprofile auf Grundlage der näherungsweise bekannten Kugelparameter im Bilddatensatz interpoliert. Durch Einpassung einer angenommenen Modellkante an das gemessene Grauwertprofil kann der Kantenpunkt bestimmt werden. Neben dem Oberflächenpunkt liefert die Profilauswertung

ein Qualitätsmaß zur Charakterisierung der lokalen Objektoberfläche, das in Form eines Gewichtes in die Ausgleichung der Oberflächenpunkte eingeht. Die dimensionelle Verknüpfung zwischen Bild und Objektraum erfolgt mit Hilfe des Bildmaßstabes. Dieser wird aus einem korrespondierenden Streckenvergleich bestimmt.

3.1 Modellierung der Objektoberfläche

Die Modellierung der Objektoberfläche basiert auf der Analyse von Oberflächenprofilen. Diese Profile werden senkrecht zur Oberfläche entlang der Profillinie aus den Grauwerten des Volumenbildes heraus interpoliert. Die Interpolation erfolgt auf Grundlage eines Interpolationskernes nach folgendem Schema:

$$i(x) = \sum_{k=-n}^{+n} b(x+k) * f(x+k)$$

x	<i>Interpolationsstelle</i>
i	<i>Interpolationswert</i>
b	<i>Bildwert</i>
f	<i>Interpolationskern</i>
$-n...+n$	<i>Länge des Interpolationskernes</i>

Als Interpolationskerne sind in der Literatur [3, 4] die bikubische, Lanczos- und Blackmann-Interpolation bekannt. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der Größe des Interpolationfensters und ihrer Näherung an die Sinc-Funktion. Im Gegensatz zur Literatur wurde ein symmetrischer Interpolationskern gewählt, da sonst insbesondere bei der dreidimensionalen Interpolation größere Modellfehler zu erwarten sind.

Für die Bestimmung des Oberflächenpunktes wird der Verlauf der Kante als monoton und symmetrisch angenommen. Dann entspricht der Oberflächenpunkt dem Punkt des stärksten Anstieges, also dem Maximum der 1. Ableitung bzw. dem Nullpunkt der 2. Ableitung der Profillinie. Die Ableitung bestimmt sich nach:

$$p'(x) = \sum_{k=-n}^{+n} k * p(x+k)$$

x	<i>Ableitungsstelle</i>
p'	<i>1. Ableitung</i>
p	<i>Profil</i>
$-n...+n$	<i>Länge des Ableitungskernes</i>

Als Wert von n wird die halbe Kantenbreite gewählt. Zur Bestimmung der Kantenposition wird die 1. Ableitung mit einer Gauß-Funktion modelliert. Dieses Verfahren ist in [5] beschrieben. Eine weitere mögliche Methode ist das Modellieren der 2. Ableitung mit einer Geraden.

$$p = x \cdot \cos(\alpha) + y \cdot \sin(\alpha)$$

p	<i>Abstand zum Ursprung</i>
α	<i>Winkel um den Ursprung</i>

Der Nullpunkt der Geraden entspricht hierbei der Position der Kante. Das Verfahren nach Gauß lässt im Allgemeinen eine höhere Genauigkeit erwarten. Zur Steigerung der Zuverlässigkeit wurden beide Verfahren verwendet. Der Kantenpunkt ergab sich aus dem Verfahren mittels Gauß-Modellierung.

3.2 Bewertung der Oberfläche

Das computertomographische Aufnahme- und Rekonstruktionsprinzip setzt eine Reihe von theoretischen Bedingungen voraus, die unter realen Bedingungen nicht erreicht werden können. Aus diesem Grund stellen die Voxelwerte des rekonstruierten Volumens immer

nur eine Näherung des wahren lokalen Abschwächungswertes dar und unterliegen wesentlich stärker dem Einfluss von Artefakten. Artefakte sind systematische Abweichungen und bezeichnen bei der Bildaufnahme künstlich hervorgerufene Strukturen und Erscheinungen, die nicht von der aufgenommenen Objektstruktur ausgehen, sondern ihren Ursprung in der Unvollkommenheit der Aufnahmetechnik und -methode haben. Für das dimensionelle Messen auf Grundlage von CT-Messungen ergibt sich hieraus die Notwendigkeit, Artefakte im Volumenbild zu erkennen und zu qualifizieren. Da der Prozess der Oberflächenextraktion direkt auf die Voxelwerte zugreift, findet der Bewertungsprozess innerhalb dieses Vorgangs statt.

Bei der Modellierung der Oberfläche werden die interpolierten Profilpunkte auf das Modell einer idealen Grauwertkante (Abbildung 4 links) bezogen und daraus der Oberflächenpunkt bestimmt. Für die Bestimmung des Oberflächenpunktes werden folgende Modellannahmen angenommen: Der Verlauf der Kante ist monoton. Der Punkt des stärksten Anstieges entspricht dem Oberflächenpunkt (Maximum der 1. Ableitung bzw. Nullpunkt der 2. Ableitung). Beginn und Ende des Kantenhubes sind in ihrer Ausprägung symmetrisch (Symmetrie der Wendestellen, Maximum und Minimum der 2. Ableitung identische Ausprägung). Zur Charakterisierung der lokalen Oberflächenqualität hinsichtlich der Messung von Oberflächenpunkten wird in dieser Arbeit das Maximum der 1. Ableitung verwendet. Je größer und schärfer der lokale Grauhub ausfällt, desto größer ist das Maximum. Auch Störungen der Grauwertkante wirken sich negativ auf das Maximum aus und können so detektiert werden (Abbildung 4 rechts).

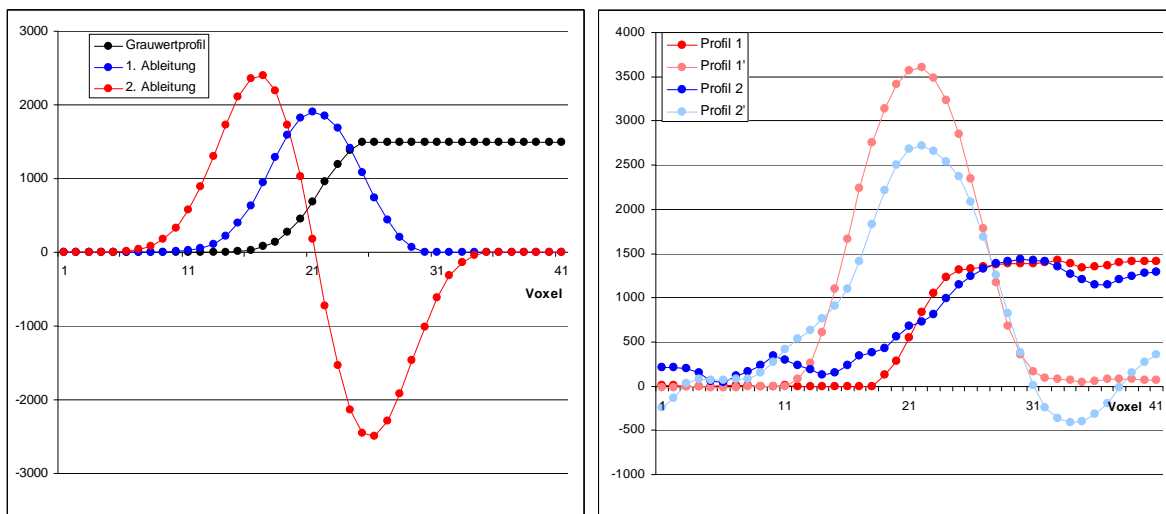


Abbildung 4. links: Modell einer idealen Grauwertkante, rechts: zwei reale Grauwertprofile mit deren jeweiligen 1. Ableitung.

3.3 Parametrisierung der Oberflächenpunkte – gewichtete Kugelausgleichung

Jeder bestimmte Oberflächenpunkt muss die folgende Gleichung einer Kugel erfüllen:

$$0 = (x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_m)^2 - r^2$$

x, y, z Koordinaten des Oberflächenpunktes
 x_m, y_m, z_m Koordinaten des Kugelmittelpunktes
 r Kugelradius

Über eine vermittelnde Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate:

$$[p_{vv}] = \text{Min}$$

p	Gewicht des Oberflächenpunkte
v	Verbesserung

werden die wahrscheinlichsten Werte der Kugelparameter (Mittelpunktskoordinaten x_m , y_m , z_m und Radius r) bestimmt. Der Qualitätswert jedes Oberflächenpunktes geht hierbei als Gewicht p mit in die Ausgleichung ein. Eine detaillierte Beschreibung zur Ausgleichungsrechnung ist z.B. in [6] ausgeführt.

4. Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der Oberflächenbewertung

Die Ergebnisse der Oberflächenbewertung zu unterschiedlichen Materialzusammensetzungen und Aufnahmeparametern sind in Abbildung 5 anhand von Messungen am Referenztetraeder aus vier Rubinkugeln (links) und dem Tetraeder mit einer Zirkoniumdioxidkugel (Mitte, rechts) dargestellt. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden die Kugeln künstlich getrennt abgebildet sowie im mittleren und rechten Bild jeweils die Ergebnisse für die Zirkoniumdioxidkugel entfernt.

Bei diesen Objekten (Referenztetraeder und Tetraeder mit Zirkoniumdioxidkugel) werden nur die Oberflächenbereiche an den Kontaktflächen der Kugeln ausgeschlossen bzw. erhalten ein Gewicht nahe null. Daneben werden Oberflächen, die im Bereich der Klebepunkte liegen, und Bereiche, die auf Grund einer nicht ausreichend stabilen Drehachse verwischt werden, jeweils schlechter bewertet. Der restliche Bereich geht mit einem Gewicht nahe eins vollständig in die Kugelausgleichung ein. Ein messbarer Unterschied zwischen der oberen Kugel und den unteren Kugeln konnte dabei nicht erkannt werden (Tabelle 1, Spalte Oberfläche).

Die Abbildung 5, links zeigt ein Objekt ohne Störkörper beispielhaft am Referenztetraeder aus vier Rubinkugeln. Die mittlere und rechte Abbildung 5 zeigt ein Objekt mit Störkörper beispielhaft am Tetraeder mit einer Zirkoniumdioxid-Kugel jeweils mit 40 kV und 60 kV gemessen. Bei den Tetraedern mit je einer Stahl- bzw. Zirkoniumdioxidkugel zeigen sich die Bereiche um die Störkugel insbesondere für die 40 kV-Messung als nicht auswertbare Oberfläche. Die Störkugel selbst ist dagegen zu fast 100 % messbar (Tabelle 1, Spalte Oberfläche).

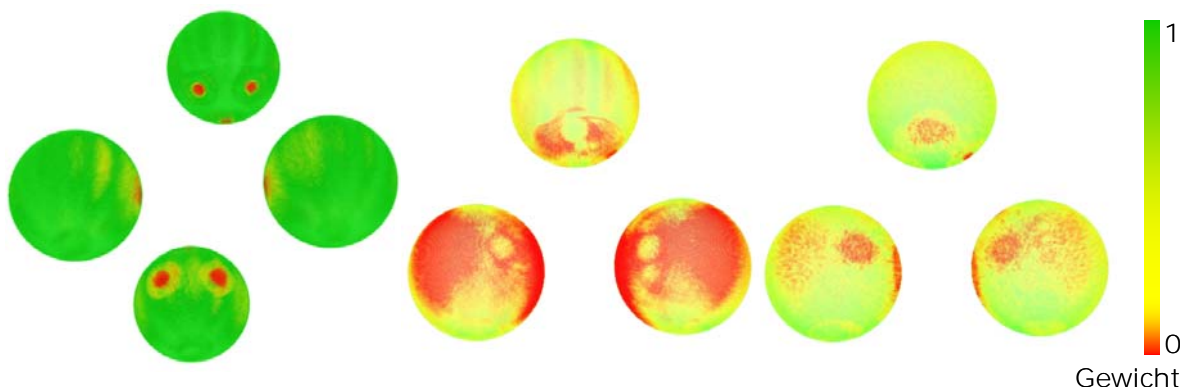


Abbildung 5. Oberflächenbewertung mit farbkodierter Darstellung der Gewichte: links: Referenztetraeder aus Rubin bei 40 kV, Mitte: die drei Rubinkugeln des Tetraeders mit einer Zirkoniumdioxid-Kugel bei 40 kV, rechts: die drei Rubinkugeln des Tetraeders mit einer Zirkoniumdioxid-Kugel bei 60 kV.

4.2 Ergebnisse des Soll-Ist Vergleichs

Die Ergebnisse aus dem Vergleich zwischen der taktilen Referenz- und der CT-Messung sind in Tabelle 1 aufgeführt. Der Vergleich der Kugelabstände und der Durchmesser zeigt keine systematischen Differenzen, daher sind die Abweichungen nur als Mittel über alle Abstände und Durchmesser des jeweiligen Tetraeders dargestellt. Der Maßstab wurde mit Hilfe des Referenztetraeders (Rubin) bestimmt; die Abweichungen der Abstände an diesem Tetraeder sind daher auch relativ gering.

Die Abweichungen der Ergebnisse der drei Tetraeder mit einer Stahl-, Siliziumnitrid- bzw. Zirkoniumdioxidkugel von den taktilen Referenzergebnissen betragen etwa 0,10 bis 0,15 Voxel für die Abstände und ca. 0,05 Voxel für die Radien. Da dies in etwa der angegebenen Messunsicherheit der Referenzmessung entspricht, kann eine Diskussion der Einzelwerte nicht vorgenommen werden (Voxelgröße ca. $(2,4 \mu\text{m})^3$).

In der Tabelle 1 sind die Abweichungen bei ungefilterten Oberflächenpunkten (100 %) den Abweichungen gegenübergestellt, die bei einer Ausreißerfilterung von 1 % der maximal abweichenden Oberflächenpunkte bzw. bei 5 % ermittelt wurden. Bereits die Ausreißerfilterung von einem Prozent der maximal abweichenden Oberflächenpunkte führt zu einer deutlichen Verringerung der Abweichungen auf unter $1 \mu\text{m}$. Der Einsatz eines solchen Ausreißerfilters muss allerdings unter Berücksichtigung der Ursachen dieser maximalen Abweichungen erfolgen, da anderenfalls die Datenmanipulation zu einer Verfälschung der Messergebnisse führen kann.

Tabelle 1. Ergebnisse.

Messung	40 kV ohne Filter					60 kV 0,25 mm Cu-Filter						
	Rubin	Si ₃ N ₄	ZrO ₂			Rubin	Stahl			ZrO ₂		
Material von Kugel B	alle	alle	A	C,D	B	alle	A	C,D	B	A	C,D	B
Kugel(n)	alle	alle	88	60	100	98	98	96	100	98	96	100
messbare Oberfläche in %	98	98	88	60	100	98	98	96	100	98	96	100
Abweichung in Voxel bei:												
100 % (ungefiltert)	2,0	2,1	5,0		0,8	3,0	6,0		0,5	7,0		0,4
99 % (1 % Ausreißerfilter)	0,8	0,8	0,8		0,7	0,7	0,6		0,2	0,7		0,2
95 % (5 % Ausreißerfilter)	0,5	0,5	0,5			0,5	0,5		0,2	0,5		
Soll-Ist Vergleich												
mittlere Abweichung der Abstände in Voxel	0,02	0,07	0,13			0,05	0,15			0,10		
mittlere Abweichung der Durchmesser in Voxel	0,08	0,08	0,10			0,08	0,10			0,10		

In Abbildung 6 sind die Abweichungen der Oberflächenpunkte von den idealen Kugeln für den Referenztetraeder und den Tetraeder mit Zirkoniumdioxidkugel dargestellt. Ähnlich zu Abbildung 5 wurde im mittleren und rechten Bild jeweils das Ergebnis der Zirkoniumdioxidkugel künstlich entfernt. Die größten Abweichungen ergeben sich für die durch die Zirkoniumdioxidkugel gestörten Rubinkugeln. Diese Abweichungen finden sich hauptsächlich in Bereichen um die nicht messbaren Oberflächen. Ihr Einfluss auf die Kugelparameter ist aber gering, da sie nur mit einem geringen Gewicht in die Ausgleichung eingehen.

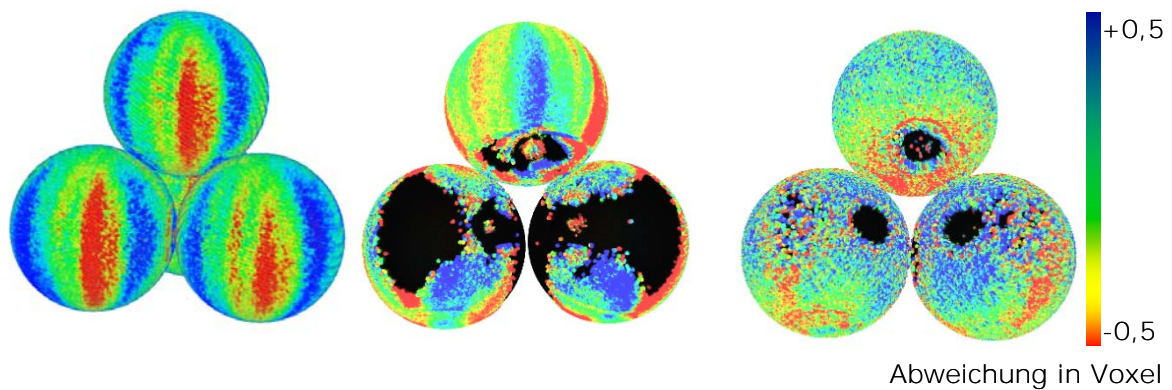


Abbildung 6. Abweichungen der Oberflächenpunkte zur ausgleichenden Kugel, links: Referenztetraeder bei 40 kV, Mitte: die drei Rubinkugeln des Tetraeders mit einer Zirkoniumdioxid-Kugel bei 40 kV, rechts: die drei Rubinkugeln des Tetraeders mit einer Zirkoniumdioxidkugel bei 60 kV.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchung hat gezeigt, dass es möglich ist, trotz stark störender Materialzusammensetzung mit der μ CT eine hohe Genauigkeit beim dimensionellen Messen zu erreichen. Voraussetzung dafür ist eine objektive Analyse und Bewertung der Objektoberfläche mit dem Ziel, nicht messbare oder gestörte Oberflächenbereiche zu detektieren und entsprechend ihrer Qualität für die weitere Auswertung zu bewerten. Das hier vorgestellte Kriterium zur Oberflächenbewertung eignet sich für die untersuchten Prüfkörper gut, stellt aber nur einen ersten Schritt in der Entwicklung von Bewertungskriterien in der CT dar. Aussagen über geometrische und radiometrische Artefakte fehlen hierbei noch. Perspektivisch sollte während der Rekonstruktion die Messunsicherheit jedes Voxels abgeschätzt werden – etwa über das Signal-zu-Rausch-Verhältnis der beitragenden Pixel in den Projektionen, durch Markieren von Artefakten oder Berechnung der lokalen Streuung der Grauwerte im rekonstruierten Volumen.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die Förderung der zugrunde liegenden Arbeiten im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 1159 „Neue Strategien der Mess- und Prüftechnik für die Produktion von Mikrosystemen und Nanostrukturen“. Weiterhin danken wir Herrn Harald Siems (PTB) für die Unterstützung bei der Fertigung der Prüfkörperserie.

Referenzen

- [1] Meeß R, Löffler F: Design of a Precision Micro-Assembly Device with 6 Degree of Freedom. *Proceedings of the 6th international conference, European Society for Precision Engineering and Nanotechnology: May 28th - June 1st, 2006, Baden bei Wien, Vienna. Vol. 2 (2006), 64-67*
- [2] Nöthe M, Schulze M, Grupp R, Kieback B, Haibel A: Analysis of particle rearrangement during sintering by micro focus computerized tomography. *Materials Science Forum 534-536, pp. 493-496 (2007), Thermec 2006, Vancouver, Canada*
- [3] Burger W, Burge M J: Digitale Bildverarbeitung – Eine Einführung mit Java und ImageJ. *Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1. Auflage, 2006*
- [4] Thevenaz P, Blu T, Unser M: Interpolation revisited. *IEEE Trans. Medical Imaging, vol. 19, pp. 739758, July 2000*
- [5] Meijering E: A chronology of interpolation: from ancient astronomy to modern signal and image processing. *Proc. IEEE, vol. 90, March 2002*
- [6] Reißmann G: Die Ausgleichsrechnung – Grundlagen und Anwendungen in der Geodäsie. *VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 5. Auflage, 1980*