

Softwarebasierte Bestimmung von Qualitätskenngrößen in der dimensionellen Computertomographie

Torsten SCHÖNFELD¹, Markus BARTSCHER¹, Thomas GÜNTHER², Tobias DIERIG²

¹ Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

² Volume Graphics GmbH, Heidelberg

Kurzfassung. Beim Einsatz der Computertomographie (CT) in der dimensionellen Messtechnik steht bislang Information über die Qualität der rechnerisch aus dem Volumendatensatz bestimmten Objektoberflächen wegen fehlender Implementierungen und auch mangels mathematischer Verfahren nicht zur Verfügung. Somit findet diese Information auch keinen Eingang in die dimensionelle Auswertung. In diesem Beitrag wird ein Ansatz zur Berechnung von messtechnisch relevanten lokalen Eigenschaften von CT-Volumendatensätzen vorgestellt, der auf der Auswertung von Grauwertprofilen senkrecht zu einer vorgegebenen Objektoberfläche basiert. Darauf aufbauend wird eine Methode zur Bestimmung von Vorhersagemodellen für Messabweichungen beschrieben, die auf Trainingsdatensätzen fußt, die per CT-Simulation erzeugt werden. Es wird erläutert, wie aus solchen Modellen Qualitätsmaße zur quantitativen Beurteilung von dimensionellen CT-Messungen abgeleitet werden können. Diese Verfahren werden exemplarisch auf reale CT-Messungen angewandt und die Ergebnisse werden zusammenfassend bewertet. Die beschriebenen Untersuchungen münden in die Vorentwicklung neuer Module für die Software VGStudio MAX der Firma Volume Graphics, die hier teilweise bereits genutzt werden.

1. Einleitung

Die Computertomographie (CT) ist heute ein vielfach eingesetztes Messmittel in der dimensionellen Messtechnik. Sie wird im industriellen Rahmen sowohl in reinen CT-Koordinatenmesssystemen als auch im Zusammenwirken mit anderen Sensoren in Multi-sensor-Koordinatenmesssystemen verwendet.

Ein großes Manko beim Einsatz der CT in der dimensionellen Messtechnik ist, dass Qualitätsinformation zu den rechnerisch aus dem Volumendatensatz bestimmten Objektoberflächen bislang wegen fehlender Implementierungen und auch mangels mathematischer Verfahren dem Anwender nicht zur Verfügung steht. Diese Qualitätsinformation kann daher auch keinen Eingang in die dimensionelle Auswertung finden. Es gibt also gegenwärtig keine Möglichkeit, aus dem Messprozess heraus quantitativ zu beurteilen, wie zuverlässig einzelne Oberflächenpunkte sind und ob und wie wahrscheinlich die gemessenen Geometrien auch messtechnisch korrekt erfasst werden. Dies hat zur Folge, dass die Belastbarkeit aller weiterführenden Auswertungen, in die die Oberflächenpunkte eingehen, nicht eingeschätzt werden kann. Eine lokale Qualitätsbewertung von Oberflächen ist derzeit nur mit aufwändigen, jeweils aufgabenspezifisch separat durchzuführenden Simulationsrechnungen oder mit ggf. vorhandenem „Expertenwissen“ des Anwenders möglich. Auch



eine vollständige Bestimmung der Messunsicherheit mittels eines kalibrierten Meisterbauteils (z.B. gemäß VDI/VDE 2630-2.1) stellt nur in Ausnahmefällen eine industriell geeignete Lösung dar, weil die nötigen Messungen sehr aufwändig sind. Zudem existiert vielfach auch kein geeignetes kalibriertes Meisterbauteil.

Prinzipiell ist aber im Volumendatensatz und damit aus dem CT-Messprozess heraus Information über die lokalen Eigenschaften von Oberflächen und damit über deren Qualität vorhanden. Eine Möglichkeit, diese Information zu nutzen, besteht darin, das globale Grauwertistogramm entweder zur Bewertung der gesamten Messung ([1], [2]) oder zur Bewertung lokaler Grauwertvariationen ([3], [4]) heranzuziehen. Eine weitere Möglichkeit ist, eindimensionale Grauwertprofile senkrecht zur ermittelten Oberfläche im dreidimensionalen Volumen zu bestimmen und auszuwerten. Während diese Art der Qualitätsbewertung mittels 1D-Profilauswertung in der 2D-Bildverarbeitung ([5], [6]) und der optischen Messtechnik ([7]–[10]) bereits zum etablierten Stand der Technik gehört, sind für die CT in der Literatur bisher nur erste Ansätze beschrieben ([11]–[14]), die noch keinen systematischen Bezug zur Messabweichung herstellen.

In diesem Beitrag wird ein erweiterter Ansatz zur Ermittlung der messtechnisch relevanten lokalen Eigenschaften von CT-Volumendatensätzen vorgestellt, der auf der Auswertung von 1D-Grauwertprofilen senkrecht zur Objektoberfläche basiert. Darauf aufbauend wird beschrieben, wie in einer Trainingsphase mittels ausreichend genauer CT-Simulationsdaten die lokalen Eigenschaften in Beziehung zu der an jedem Oberflächenpunkt zu erwartenden Messabweichung gesetzt werden können. Diese Methode erlaubt es, Qualitätsmaße zur lokalen quantitativen Beurteilung von dimensionellen CT-Messungen zu definieren, die nur vom jeweiligen Volumendatensatz und einer zugeordneten Oberfläche abhängen und damit direkt aus dem Messprozess heraus bestimmbar sind. Die Ergebnisse einer exemplarischen Anwendung dieser Methode werden skizziert und die vorgestellte Entwicklung wird in Bezug darauf bewertet, welche Messunsicherheitseinflüsse bei CT-Messungen erkannt werden können und welche nicht. Die in diesem Beitrag vorgestellten Untersuchungen sind Bestandteil der Vorentwicklung neuer Module der Software VGStudio MAX der Firma Volume Graphics. Ein Teil der neuen Module kommt bereits in dieser Arbeit zum Einsatz.

Im Folgenden wird zunächst beschrieben, wie per CT-Simulation geeignete Testdaten mit bekannten Messabweichungen erzeugt werden und wie aus Grauwertprofilen Kenngrößen berechenbar sind. Anschließend wird eine Methode vorgestellt, um aus den Kenngrößen mit Hilfe der Simulationsdaten ein Vorhersagemodell für Messabweichungen zu bestimmen und daraus schließlich ein normiertes, einheitenloses Qualitätsmaß abzuleiten, welches z.B. als Gewichtung bei der Einpassung von Regelgeometrien einsetzbar ist.

2. Datenbasis aus CT-Simulationen

Als Basis für die Untersuchungen bieten sich Testdatensätze an, die per CT-Simulation erzeugt werden. Die CT-Simulationstechnik hat mittlerweile einen ausreichenden Entwicklungsgrad erlangt ([15], [16]) und bietet viele Vorteile: es können fast beliebige Objektgeometrien untersucht werden, die Sollgeometrie jedes Datensatzes ist durch das benutzte Objektmodell exakt gegeben und jede unterstützte Einflussgröße des CT-Prozesses kann einzeln zur Simulation hinzugefügt und dadurch separat untersucht werden. Im Gegensatz zur Nutzung von Referenzdaten auf Basis von kalibrierten Maßverkörperungen ist daher insbesondere keine Registrierung von Datensätzen notwendig, da der rekonstruierte Volumendatensatz und der erzeugende Referenzdatensatz im gleichen Koordinatensystem vorliegen. Untersuchungen an einem Prüfkörper zeigten, dass der Unsicherheitseinfluss von verbreitet eingesetzten Strategien zur Definition von Bezugssystemen durch die erforderli-

chen Registrierungen so dominant sein kann, dass eine Auswertung der Messabweichung einzelner Oberflächenpunkte nicht sinnvoll möglich ist.

Zur Durchführung der CT-Simulationen wurde die Software aRTist¹ (Version 2.4.0) der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) verwendet. Sie erlaubt die Nutzung von polygonisierten Oberflächenmodellen (STL-Dateien) als Objektmodell (siehe Abbildung 1 mit zwei Beispielen der untersuchten Geometrien) und kann die folgenden Einflussgrößen berücksichtigen: Geometrie und Materialzusammensetzung des Objekts, Röntgenspektrum, Fokusgröße, Detektorrauschen, Belichtungszeit und Streustrahlung. Bisher nicht in dieser Software abbildbar sind Führungsabweichungen der Rotationsachse, Pixelfehler und Effekte durch die endliche Dicke des Szintillatormaterials.

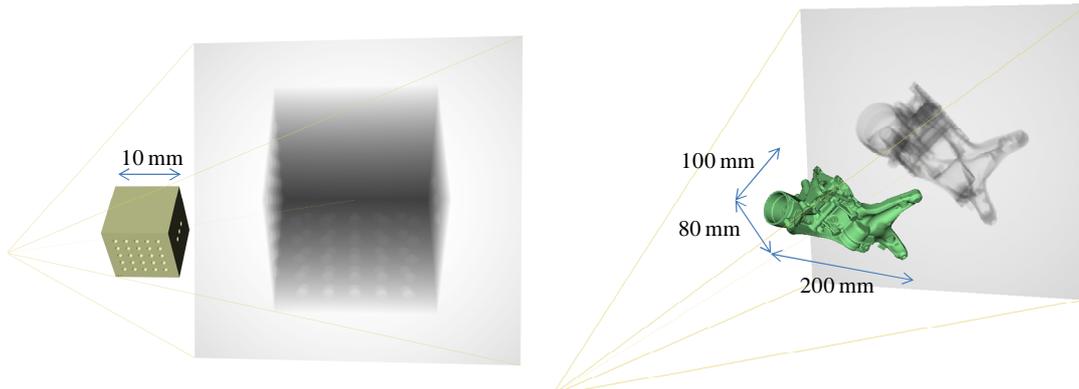


Abbildung 1. Modelle eines massiven Kugelkalottenwürfels (links) und eines dünnwandigen Druckgussbauteils (rechts) zusammen mit den von der Software aRTist der BAM simulierten Röntgenprojektionen.

Während der Rekonstruktion und Auswertung der so erzeugten Röntgenprojektionen können zusätzlich noch die folgenden Einflussgrößen berücksichtigt werden: seitliche Verkipfung und Verschiebung der Drehachse, gewählter Rekonstruktionsalgorithmus und Parameter der Oberflächenfindung. Diese Schritte wurden mit der CT-Rekonstruktion (FDK-Algorithmus) und der adaptiven Oberflächenfindung der Software VGStudio MAX (Vorabversionen 3.0) durchgeführt. Für alle Simulationsdatensätze kann schließlich durch einen Soll/Ist-Vergleich mit dem erzeugenden Objektmodell für jeden Punkt der gefundenen Objektoberfläche die Messabweichung exakt ermittelt werden (siehe Abbildung 2). Damit ist es möglich, die lokalen Eigenschaften des Volumendatensatzes in der Nähe eines Oberflächenpunktes rückgeführt zur Messabweichung in Beziehung zu setzen.

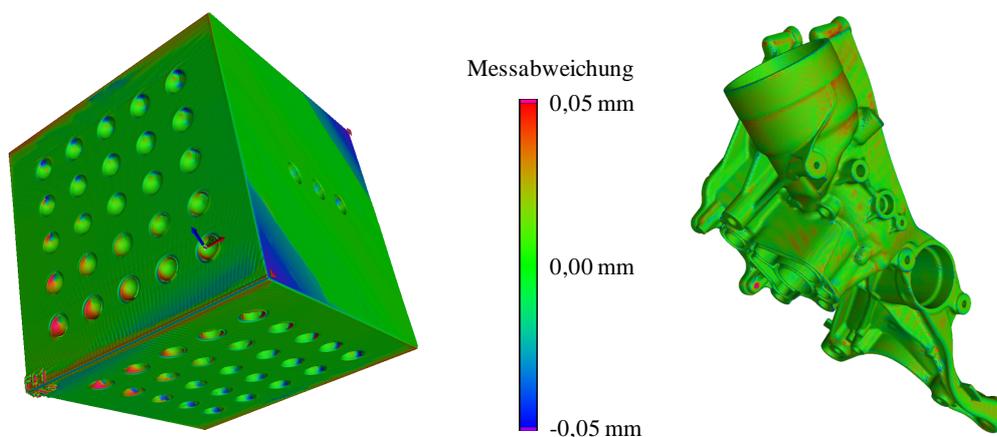


Abbildung 2. Soll/Ist-Vergleich zweier Simulationsdatensätze mit dem jeweils erzeugenden Objektmodell. Links der Kugelkalottenwürfel mit synthetischer seitlicher Schiefstellung der Drehachse um $0,5^\circ$ (die Struktur unten links ist eine Flächenkennzeichnung, die im Objektmodell eingepreßt ist) und rechts das Druckgussbauteil mit Strahlauhfärtungsartefakten durch ein polychromatisches Röntgenspektrum.

¹ <http://artist.bam.de>

3. Auswertung von Grauwertprofilen – Bestimmung von Profilkenngrößen

Zur Ermittlung der lokalen Eigenschaften von CT-Volumendatensätzen werden nach unserem Ansatz 1D-Grauwertprofile in senkrechter Richtung zur bereits anderweitig bestimmten Objektoberfläche ausgewertet. Die Profillänge beträgt dabei z.B. ± 20 Voxel um den vorgegebenen Oberflächenpunkt. Die Abszisse der Profile basiert also auf der Voxelgröße des Datensatzes und ist daher unabhängig von der Größe des Messobjekts. Um sicherzustellen, dass die Profile auch unabhängig von der im Rekonstruktionsprozess gewählten Grauwertskala sind, wird die Ordinate auf den Abstand zwischen den mittleren Grauwerten des Hintergrunds und des Materials der betrachteten Objektoberfläche skaliert.

Für die Auswertung der Grauwertprofile wird dann in jeden Profilverlauf als Modellfunktion die Fehlerfunktion (erf) eingepasst. Die Fehlerfunktion, also die Stammfunktion der Gauß-Funktion, ergibt sich als Modell für die CT-Abbildung eines Kantenverlaufs zwischen zwei Materialien durch Faltung des idealen Kantenverlaufs (Stufenfunktion) mit einer Gauß-Funktion. Das Ergebnis der Einpassung erlaubt es, das Profil in einen Kantenbereich und zwei Plateaubereiche einzuteilen (siehe Abbildung 3). Direkt aus dem Einpassprozess sowie aus der Analyse der drei Profilbereiche (Hintergrundplateau, eigentliche Kante, Materialplateau) können nun Kenngrößen abgeleitet werden, die das jeweilige Profil charakterisieren. Beispiele sind die mittlere Abweichung des Profils von der eingepassten Funktion, die Breite und Höhe der Kante sowie das Rauschen der Plateaus und damit das Signal-Rausch-Verhältnis des Profils.

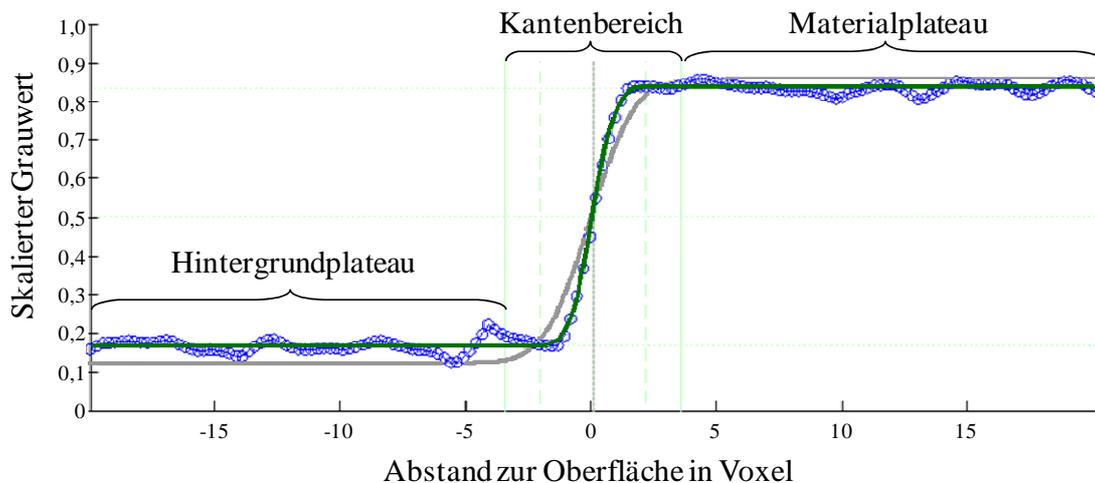


Abbildung 3. Auswertung eines Grauwertprofils. In das Profil (blaue Kreise) wird eine Modellfunktion eingepasst (Startwert in Grau, Ergebnis in Grün). Dies erlaubt es, das Profil in Kanten- und Plateaubereiche einzuteilen und diese durch Kenngrößen zu beschreiben.

Die so ermittelten Profilkenngrößen beschreiben die lokalen Eigenschaften des Volumendatensatzes um den jeweiligen, vorgegebenen Oberflächenpunkt herum. Sie bilden die Grundlage für alle im Folgenden beschriebenen Untersuchungen. Abgesehen von Skalierungsfehlern durch einen global falschen Vergrößerungsmaßstab und durch eine Schiefstellung der Rotationsachse in Richtung Detektor (lokaler Skalierungsfehler sichtbar in den Projektionen und im Volumen) schlagen sich alle Einflussgrößen, die bei dimensionellen CT-Messungen zu relevanten Messabweichungen und Artefakten führen können, in den Grauwertprofilen nieder und können daher zumindest potenziell mit den Kenngrößen erfasst werden. Dies konnte an Testdatensätzen beobachtet werden, die Messabweichungen z.B. aufgrund von Strahlaufhärtung, Unterabtastung, kurzer Belichtungszeit, stark vergrößertem Röntgenfokus oder Feldkampartefakten aufweisen.

4. Vorhersagemodell für Messabweichungen im Ortsraum

Um nun ein Qualitätsmaß für Oberflächenpunkte zu definieren, wird nach unserem Ansatz zunächst ein Vorhersagemodell bestimmt, das basierend auf den Profilkenngrößen die zu erwartende Messabweichung im Ortsraum approximiert. Für die Untersuchung, ob und in welchem Maß aus den Kenngrößen eines Profils an einem Oberflächenpunkt auf dessen zu erwartende Messabweichung geschlossen werden kann, werden die im Abschnitt 2 beschriebenen Simulationsdaten genutzt. Bei deren Auswertung werden an jedem Oberflächenpunkt zusätzlich zu den Profilkenngrößen noch der Wert des Soll/Ist-Vergleichs mit dem erzeugenden Objektmodell und damit die Messabweichung des Oberflächenpunkts bestimmt. Dadurch kann das Verhalten der Profilkenngrößen mit der Messabweichung verglichen werden. Für einen ersten Überblick bietet es sich an, den linearen Korrelationskoeffizienten jeder Profilkenngröße mit der Messabweichung zu betrachten. Relevante Kenngrößen erreichen dabei einen Wert, der sich deutlich von Null unterscheidet.

Der einfachste Ansatz für ein Vorhersagemodell ist, die Messabweichung an jedem Oberflächenpunkt als Linearkombination der zugehörigen Profilkenngrößen darzustellen und die unbekanntenen Koeffizienten mittels linearer Regression zu bestimmen. Terme höherer Ordnung und Interaktionsterme können ebenfalls eingesetzt werden, führen aber – wie bei den vorliegenden Untersuchungen konkret beobachtet – unter Umständen zu einer Überanpassung des Modells an die Trainingsdaten und machen es damit für allgemeine Bauteilmessungen mit anderer Geometrie weniger geeignet. Daher wurde für diesen Beitrag ein linearer Ansatz für das Vorhersagemodell gewählt. Wenn viele der Kenngrößen keinen signifikanten Zusammenhang mit der Messabweichung aufweisen oder wenn es starke Korrelation der Kenngrößen untereinander gibt (beide Fälle treten hier auf), dann können die gängigen numerischen Verfahren zur linearen Regression unzuverlässig werden [17]. Zur Behandlung dieses Problems gibt es viele Regularisierungsmethoden wie z.B. die Ridge Regression (auch Tikhonov-Regularisierung genannt), Least Angle Regression oder Principal Component Regression. Gemein ist diesen Verfahren, dass ihr Verhalten über einen skalaren Regularisierungsparameter gesteuert wird, für den ein geeigneter Wert z.B. per Kreuzvalidierung ermittelt werden kann. Das Ergebnis der Regression ist ein Vorhersagemodell in Form einer Abbildung von den Profilkenngrößen auf die zu erwartende Messabweichung.

5. Exemplarische Durchführung der Methode & Anwendung auf reale Daten

Um die beschriebene Methode zu illustrieren, wurde sie exemplarisch mit den in Abbildung 1 dargestellten Modellen eines massiven Kugelkalottenwürfels aus Titan und eines dünnwandigen Druckgussbauteils aus Aluminium durchgeführt. Diese beiden Objektmodelle sollen repräsentativ für viele der aktuell mit CT durchgeführten Messaufgaben stehen. Unberücksichtigt bleiben damit allerdings noch Multi-Material-Messungen.

Insgesamt wurden mit aRTist aus den beiden Objektmodellen 72 Simulationsdatensätze vollständiger CT-Messungen erzeugt. Dabei wurden folgende Einflussgrößen variiert: Röntgenspektrum (monochromatisch bei 175 kV und mit realistischem Röntgenröhrenspektrum mit Wolfram-Target und Aluminium-Fenster bei 50 kV, 75 kV und 175 kV), Fokusgröße (0 μm – 3000 μm), Detektorrauschen (aRTist-Detektormodelle „1:1“ und „flat panel“), Belichtungszeit (entsprechend 4 % – 80 % Detektorsättigung), mechanische Ausrichtung der Drehachse (seitliche Verkipfung um 0° – 1° und seitliche Verschiebung um 0 mm – 1,5 mm). Somit sind die meisten signifikanten Fehlerquellen berücksichtigt. Wie oben bereits erwähnt, sind allerdings mit aRTist derzeit Effekte durch Führungsabweichungen der Rotationsachse, Pixelfehler oder die endliche Dicke des Szintillatormaterials nicht

abbildbar. Die abgetasteten Parameterbereiche sind teilweise sehr drastisch gewählt (z.B. für die Fokusgröße), um signifikante Messabweichungen zu produzieren. Der Detektor hat in allen Fällen 1000^2 Pixel auf $(400 \text{ mm})^2$ und der Abstand zwischen Quelle und Detektor beträgt 1000 mm.

Die Rekonstruktion (FDK-Algorithmus) der Volumendatensätze und die Oberflächenfindung (lokal adaptiv) erfolgen mit VGStudio MAX. Zur Extraktion der Grauwertprofile senkrecht zur Oberfläche wurde ein neu entwickeltes Modul für VGStudio MAX eingesetzt. Es wurden so rund $1,5 \cdot 10^6$ Profile bestimmt, die ungefähr gleichmäßig über alle 72 Datensätze verteilt sind. Die Auswertung erfolgt in MATLAB. Je Profil wurden 28 Kenngrößen ermittelt. Die einmalig durchzuführende Erzeugung und Auswertung der Simulationsdatensätze für die gewählten Parameterbereiche benötigt derzeit rund fünf Arbeitstage pro Objektmodell.

Für das Vorhersagemodell wurde ein linearer Ansatz gewählt und es wurde nur der Betrag der Messabweichung betrachtet, da viele Profilkenngrößen nicht sensitiv bzgl. der Richtung der Abweichung sind. Zur Berechnung der Linearkoeffizienten wurde die Ridge Regression eingesetzt. Ein geeigneter Wert für den Regularisierungsparameter wurde mittels zehnfacher Kreuzvalidierung bestimmt. Dies dauert nur wenige Minuten.

Für eine erste Beurteilung der Eignung des resultierenden Vorhersagemodells wird die Vorhersage direkt der Messabweichung in einem Streudiagramm gegenüber gestellt. Bei einer so umfangreichen Datenbasis ist die Darstellung der Wertepaare mittels individueller Punkte allerdings nicht mehr geeignet, da es dann unmöglich ist, die Punktedichte zu erkennen. In diesem Fall bietet sich ein Streuhistogramm an, in dem die Häufigkeit der Wertepaare in jedem Bereich grauwertkodiert aufgetragen ist. Wenn sich die Häufigkeit über mehrere Größenordnungen verteilt, ist zudem eine logarithmische Darstellung empfehlenswert (siehe Abbildung 4 links). Zusätzlich wird ein Histogramm der Residuen des Vorhersagemodells betrachtet (also Vorhersage minus Messabweichung, siehe Abbildung 4 rechts). Neben diesen grafischen Auswertungen sind auch numerische Parameter wie der lineare Korrelationskoeffizient r zwischen Vorhersage und Messabweichung (Abbildung 4 links, $r \approx 0,7$) oder die Perzentile der Residuenverteilung zur Beurteilung der Modelleigenschaften nützlich (Abbildung 4 rechts, mittleren 90 % der Residuen zwischen $\pm 0,4$ Voxel).

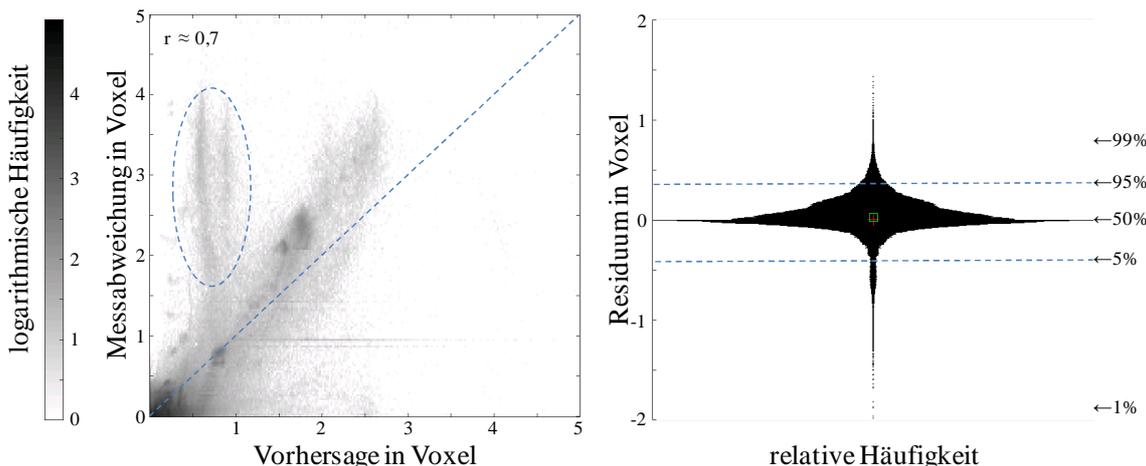


Abbildung 4. Auswertung des Vorhersagemodells. Links ein Streuhistogramm, das die Vorhersage direkt mit der tatsächlichen Messabweichung in den Simulationsdaten vergleicht, indem es die Häufigkeit der Wertepaare in jedem Bereich grauwertkodiert darstellt. Wegen der stark unterschiedlichen Häufigkeiten ist die Grauwertskala logarithmisch (Basis 10). Für ein ideales Vorhersagemodell ergäbe sich eine Gerade mit Steigung Eins und ein linearer Korrelationskoeffizient r ebenfalls gleich Eins. Die Werte im markierten Bereich abseits der Ideallinie stammen aus Datensätzen des Druckgussbauteils mit Messabweichungen durch extreme seitliche Achsverkipung um $1,0^\circ$ bzw. Achsverschiebung um 1,0 mm und 1,5 mm, die durch die Profilkenngrößen nicht detektiert werden. Rechts ein Histogramm der Residuen des Modells (Vorhersage – Messabweichung) mit markierten Perzentilen.

Die Beobachtungen ergeben insgesamt, dass das Modell einen Großteil der Messabweichungen korrekt vorhersagen kann und damit gut für die Verwendung bei realen Daten geeignet erscheint. Die Analyse des Vorhersage-Messabweichungsdiagramms zeigt, dass größere undetektierte Messabweichungen bevorzugt durch Fehlerzustände hervorgerufen werden, die extrem sind und zudem vom Anwender z.B. durch das Auftreten von Doppelstrukturen oder anderer Pathologien erkennbar sind. Da aber Skalierungsfehler mit Profilkenngrößen nicht detektierbar sind, kann ein darauf basierendes Vorhersagemodell noch nicht die volle Messunsicherheit darstellen. Es wird aber eine positive Korrelation zwischen den Aussagen des Vorhersagemodells und den tatsächlich auftretenden Messabweichungen erwartet.

Um einen ersten Eindruck vom Verhalten des Vorhersagemodells bei realen Daten zu erlangen, wird es auf zwei CT-Messungen unterschiedlicher Qualität eines *ausgehöhlten* Kugelkalottenwürfels angewendet. Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen die Ergebnisse. Das Modell kann alle groben Messabweichungen gut vorhersagen und auch die Nuancen und Abweichungscharakteristika entsprechen dem, was aus Expertensicht zu erwarten war. Mit dem aktuellen Prototyp des Analysemoduls für VGStudio MAX lassen sich rund $2 \cdot 10^5$ Profile pro Stunde auswerten.

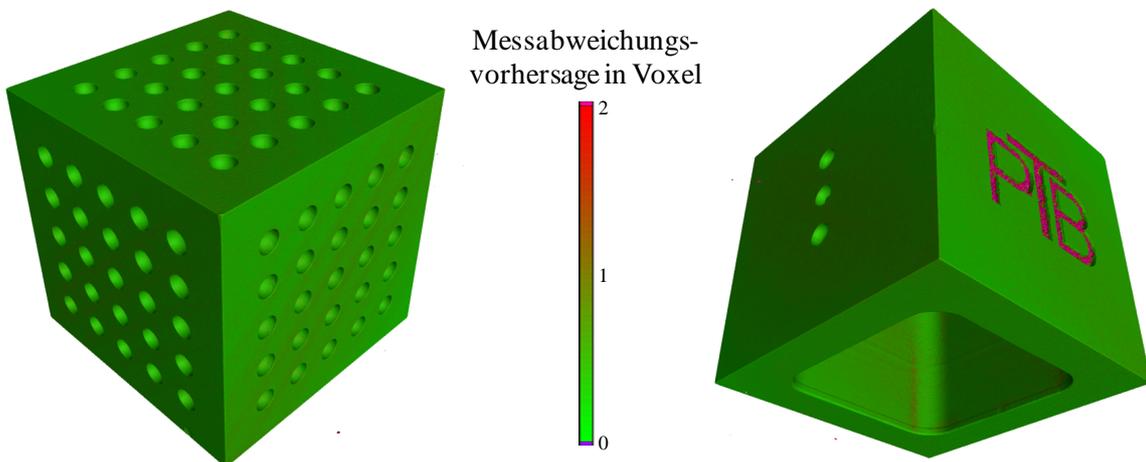


Abbildung 5. Zwei Ansichten einer CT-Messung hoher Qualität eines ausgehöhlten Kugelkalottenwürfels, mit farbkodierter Darstellung der Messabweichungsvorhersage. In den Vertiefungen des lasereingebrannten Schriftzugs „PTB“ weist die Oberfläche eine hohe Rauheit auf, die zu Artefakten bei der CT-Messung führt und hier korrekt klassifiziert wird.

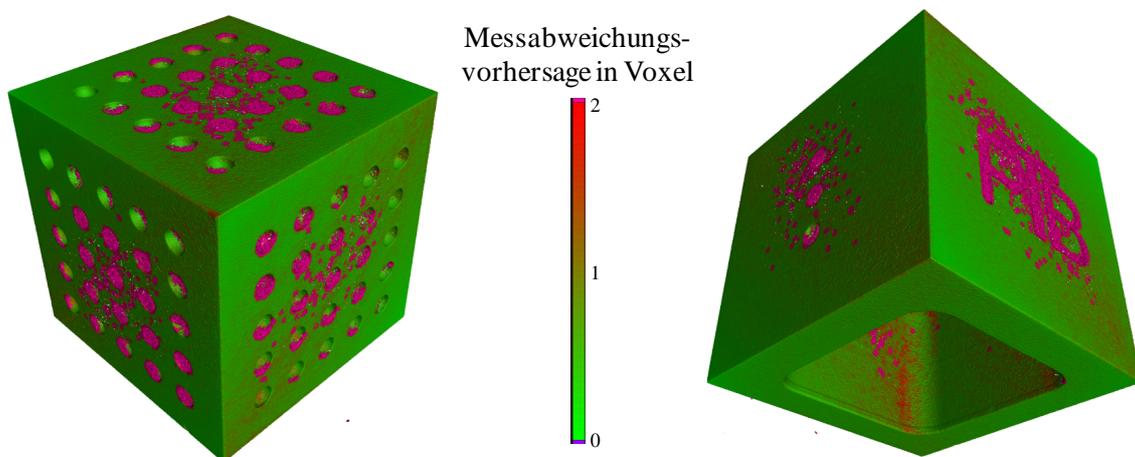


Abbildung 6. Zwei Ansichten einer CT-Messung geringer Qualität eines ausgehöhlten Kugelkalottenwürfels, mit farbkodierter Darstellung der Messabweichungsvorhersage. Die Messung wurde in kurzer Zeit aufgenommen (600 Projektion mit je 2 Sekunden Belichtungszeit) und weist daher viele Rauschartefakte auf. Prüfkörper und Farbskala sind identisch zu Abbildung 5.

Über die Verifikation des Vorhersagemodells auch unter Verwendung der Kalibrierdaten des Kugelkalottenwürfels wird an anderer Stelle berichtet werden [18]. Dabei ist es sicher kritisch zu hinterfragen, ob es genügt, das Vorhersagemodell mit einem Prüfkörper zu verifizieren, dessen Geometrie ähnlich der eines in der Trainingsphase verwendeten Objektmodells ist. Die Geometrien sind aber bzgl. ihrer Durchstrahlung deutlich unterschiedlich, da der reale Kugelkalottenwürfel im Gegensatz zum verwendeten Objektmodell ausgehöhlt ist (vgl. Abbildung 1). Nichtsdestotrotz sind zusätzliche Untersuchungen an kalibrierten Prüfkörpern mit anderer Geometrie geplant.

6. Normiertes, einheitenloses Qualitätsmaß

Zur weiteren Verwendung eines Vorhersagemodells für die Messabweichung von Oberflächenpunkten, z.B. für eine Gewichtung bei Regelgeometrieinpassungen, muss die einheitenbehaftete Vorhersage der Messabweichung d im Ortsraum noch in ein normiertes, einheitenloses Qualitätsmaß umgerechnet werden. Abbildung 7 zeigt dazu vier Varianten.

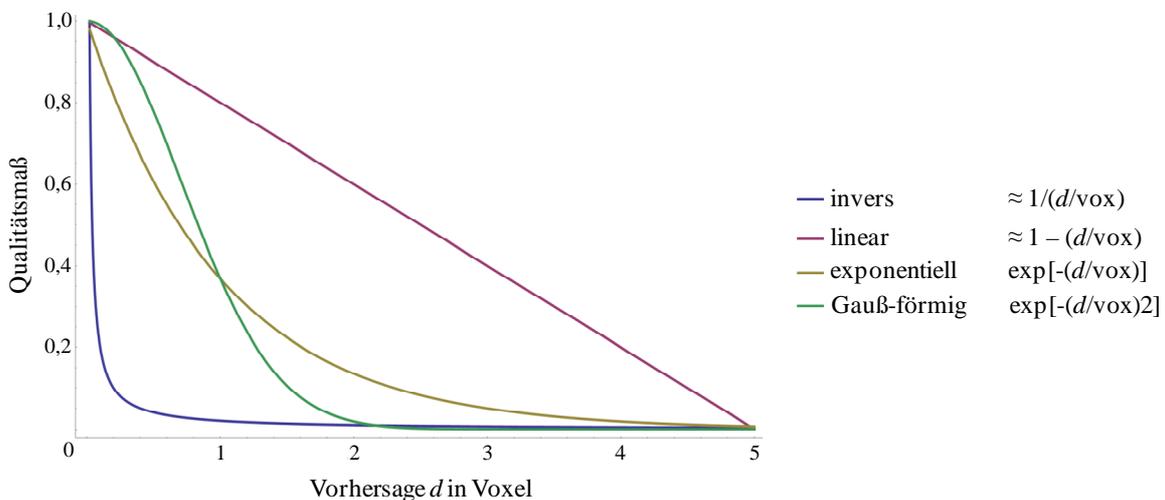


Abbildung 7. Vier Varianten für die Umrechnung einer Messabweichungsvorhersage in ein normiertes, einheitenloses Qualitätsmaß: die Abhängigkeit von der Vorhersage ist dabei entweder invers, linear, exponentiell oder Gauß-förmig.

Wenn die Lage der Oberflächenpunkte normalverteilt wäre und die Vorhersage deren Standardabweichung entspräche, so wäre die kanonische Wahl für die Umrechnung das multiplikative Inverse $d \mapsto 1/d$. Da diese Annahmen nicht gelten, und da insbesondere die Vorhersage aus dem Vorhersagemodell selbst eine Unsicherheit aufweist, ist die starke Gewichtung von Vorhersagen mit geringem numerischem Wert unter Umständen nachteilig. Die nächste naheliegende Variante ist die lineare Umrechnung $d \mapsto 1 - d$, deren Gewichtungsabfall für größere Vorhersagen der Erfahrung nach aber zu langsam ist. Die exponentielle Abbildung $d \mapsto \exp(-d)$ gewichtet nicht so drastisch wie das Inverse, teilt aber dennoch seine Nachteile. Ein potenzieller Kompromiss ist daher die Gauß-Abbildung $d \mapsto \exp(-d^2)$, die Vorhersagen nahe Null ähnlich gewichtet und für große Werte schnell abfällt.

Eine Möglichkeit, unter diesen Varianten die geeignete auszuwählen, besteht darin, sie zum Gewichten von Regelgeometrieinpassungen in CT-Messungen kalibrierter Prüfkörper einzusetzen und die resultierenden Einpassparameter jeweils mit und ohne Gewichtung mit den Kalibrierwerten zu vergleichen. Diese Untersuchungen werden derzeit durchgeführt. Mit dem aktuell besten Qualitätsmaßkandidaten (auf Basis einer Gauß-förmigen Umrechnung) wird bei einem taktal kalibrierten Kugelkalottenwürfel durch die Gewichtung

eine mittlere Verbesserung der Radiusabweichungen um 10 % erreicht. Über diese Ergebnisse wird an anderer Stelle im Detail berichtet werden [18].

7. Zusammenfassung & Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein erweitertes Verfahren zur Beschreibung der messtechnisch relevanten lokalen Eigenschaften von CT-Volumendatensätzen vorgestellt, das auf Kenngrößen basiert, die aus 1D-Grauwertprofilen berechnet werden. Darauf aufbauend wurde eine Methode zur Konstruktion eines Vorhersagemodells der zu erwartenden Messabweichung beschrieben. In einer Trainingsphase kommen dabei Simulationsdaten mit bekannten Messabweichungen zum Einsatz. Für die Umrechnung einer so erlangten einheitenbehafteten Messabweichungsvorhersage in ein normiertes, einheitenloses Qualitätsmaß, das sich z.B. für die Gewichtung von messtechnischen Auswertungen nutzen lässt, wurden vier Varianten benannt. Ziel der gesamten Untersuchungen ist es, eine Qualitätsbewertung von aus CT-Daten bestimmten Objektoberflächen aus dem Messprozess heraus zu erlauben. Alle Entwicklungen sollen letztlich in neue Module der Software VGStudio MAX münden.

Bei einer exemplarischen Durchführung der beschriebenen Methode wurde festgestellt, dass das konstruierte Vorhersagemodell einen Großteil der Messabweichungen in den genutzten Simulationsdatensätzen korrekt wiedergeben kann und dass die Anwendung auf reale Messungen eines ausgehöhlten Kugelkalottenwürfels, dessen Geometrie nicht identisch zu den verwendeten Objektmodellen ist, plausible Ergebnisse liefert. Die eingesetzte Simulationssoftware aRTist implementiert bereits die meisten Einflussgrößen der CT, einige bleiben jedoch noch unberücksichtigt. Da außerdem globale und lokale Skalierungsfehler prinzipiell nicht mit Profilkenngrößen detektierbar sind, kann ein wie beschrieben berechnetes Messabweichungsvorhersagemodell also nicht die komplette Messunsicherheit abbilden. Bei der Anwendung auf reale Daten erwarten die Autoren jedoch eine deutlich positive Korrelation der Vorhersagen mit den tatsächlich auftretenden Messabweichungen und damit einen deutlichen Vorteil für CT-Anwender.

Neben der reinen Visualisierung von Domänen mit hoher Messabweichungsvorhersage ist der Einsatz von Qualitätsmaßen vor allem zur Gewichtung für die entsprechenden Oberflächenpunkte bei Regelgeometrie-einpassungen, bei Wandstärkenanalysen, bei Registrierungen und bei Soll/Ist-Vergleichen geplant. In einem zukünftigen Beitrag [18] wird beschrieben werden, wie gewichtete Regelgeometrie-einpassungen bei CT-Messungen kalibrierter Körper genutzt werden können, um die Eignung eines Qualitätsmaßes und des zugrundeliegenden Vorhersagemodells fundiert zu verifizieren. Ein weiterer Aspekt folgender Arbeiten wird die implizite Verifikation des hier beschriebenen Ansatzes bzgl. der in der eingesetzten Simulationssoftware noch nicht erfassten Einflussgrößen sein. Es besteht aber die Erwartung, dass für industriell relevante Anwendungsfälle und Geometrien die CT-Simulation bereits jetzt zu ausreichend genauen Vorhersagemodellen führt.

Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten erfolgen im Rahmen des Projekts „CT-QM“, das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Programm „KMU-innovativ“ gefördert wird (Kennziffer 01IS12037). Das Projekt endet Mitte 2015.

Referenzen

- [1] M. Reiter, D. Weiß, C. Gusenbauer, M. Erler, C. Kuhn, S. Kasperl, und J. Kastner, „Evaluation of a histogram-based image quality measure for X-ray computed tomography“, in *Proceedings of iCT*, 2014.
- [2] R. Schielein, S. Schröpfer, M. Kiunke, S. Zabler, und S. Kasperl, „Quantitative evaluation of CT Images by means of Shannon Entropy“, in *Proceedings of ECNDT*, 2014.
- [3] M. Allerstorfer, C. Heinzl, J. Kastner, und E. Gröller, „Uncertainty visualization of computed tomography datasets from complex components using statistical analysis“, in *Proceedings of ECNDT*, 2010.
- [4] A. Amirkhanov, C. Heinzl, C. Kuhn, J. Kastner, und E. Gröller, „Fuzzy CT Metrology: Dimensional Measurements on Uncertain Data“, in *Proceedings of the 29th Spring Conference on Computer Graphics*, S. 81, 2013.
- [5] R. N. Strickland und D. K. Chang, „Adaptable edge quality metric“, in *Proceedings of SPIE 1360, Visual Communications and Image Processing '90: Fifth in a Series*, 1990, Bd. 1360, S. 982–995.
- [6] P. V. Khvorostov, M. Braun, und C. S. Poon, „Edge quality metric for arbitrary two-dimensional edges“, *Opt. Eng.*, Bd. 35, Nr. 11, S. 3222–3226, 1996.
- [7] K. Weißensee, „Beitrag zur automatisierbaren Messunsicherheitsentwicklung in der Präzisionskoordinatenmesstechnik mit Bildsensoren“, Dissertation, TU Ilmenau, 2011.
- [8] K. Weißensee, G. Linß, S. Töpfer, O. Kühn, und M. Rosenberger, „Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenpunkten bei der Geometriemessung“, Patentanmeldung WO2009141333 A1, 2009.
- [9] S. Töpfer, K. Weißensee, G. Linß, und U. Nehse, „Verfahren zur Bestimmung der Güte eines Messpunktes, insbesondere bei der Kantenortbestimmung, sowie optisches Präzisionsmessgerät“, Patentanmeldung WO2008087104 A1, 2008.
- [10] S. R. Campbell, „Weighting surface fit points based on focus peak uncertainty“, Patent US8581162 B2, 2013.
- [11] M. Fleßner, A. Müller, E. Helmecke, und T. Hausotte, „Evaluating and visualizing the quality of surface points determined from computed tomography volume data“, *Open access repository for MacroScale 2014, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)*.
- [12] M. Schulze, M. Neugebauer, R. Meeß, J. Brzoska, A. Jung, A. Staude, und K. Ehrig, „Der Einfluss unterschiedlicher Materialzusammensetzungen auf das dimensionelle Messen von Mikroobjekten mittels Mikro-Computertomographie“, in *Berichtsband DGZfP-Jahrestagung*, 2010.
- [13] ASTM, *E 1695 – 95: Standard Test Method for Measurement of Computed Tomography (CT) System Performance*. 2013.
- [14] S. M. Bentzen, „Evaluation of the spatial resolution of a CT scanner by direct analysis of the edge response function“, *Medical Physics*, Bd. 10, Nr. 5, S. 579–581, 1983.
- [15] C. Bellon und G.-R. Jaenisch, „aRTist–analytical RT inspection simulation tool“, *Proceedings of the DIR*, S. 25–27, 2007.
- [16] J. Hiller und L. M. Reindl, „A computer simulation platform for the estimation of measurement uncertainties in dimensional X-ray computed tomography“, *Measurement*, Bd. 45, Nr. 8, S. 2166–2182, 2012.
- [17] T. Hastie, R. Tibshirani, und J. Friedman, *The elements of statistical learning*, 2. Aufl. Springer Series in Statistics New York, 2009.
- [18] T. Schönfeld und M. Bartscher, „Verification and application of quality measures in dimensional computed tomography“, in *Proceedings of the DIR (zur Veröffentlichung akzeptiert)*, 2015.