

# Flexibel und genau Messen

Artefaktkorrektur in der Computertomografie



Werth Messtechnik GmbH  
Siemensstr. 19  
35394 Gießen  
Telefon: +49 641 7938-0  
Telefax: +49 641 7938-719  
E-Mail: [mail@werth.de](mailto:mail@werth.de)  
Internet: [www.werth.de](http://www.werth.de)

Sonderdruck

ARTEFAKTKORREKTUR IN DER COMPUTERTOMOGRAFIE

# Flexibel und genau Messen

Beim Messen mit Computertomografie kommt es Prinzip bedingt zu verschiedenen Artefakten. Zur Korrektur der dadurch verursachten Messabweichungen stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Abhängig von der jeweiligen Messaufgabe lässt sich die am besten geeignete Methode auswählen.

Durch die Integration der Computertomografie (CT) in Koordinatenmessgeräte (KMG) wurde das Einsatzspektrum dieser Technik von Prüf- und Inspektionsaufgaben auf hochgenaue Messaufgaben an verschiedenen Werkstücken aus unterschiedlichen Materialien wie Kunststoff oder Metall erweitert (Bild 1). Computertomografie findet hierdurch seit circa zehn Jahren zunehmend Einsatz zur dimensionellen Messung in Industrie und Forschung.

Das CT-Prinzip beruht auf der Rekonstruktion eines virtuellen Messobjekts ausgehend von Durchstrahlungsbildern des Werkstücks, die in verschiedenen Drehstellungen (Projektionen) aufgenommen wurden. Die Bildpunkte der Durchstrahlungsbilder beinhalten die Information der jeweils durchstrahlten Länge des Werkstücks und der Röntgenabsorptionskoeffizienten des durchstrahlten Materials.

Die Genauigkeit einer CT-Messung hängt bei korrekter Bedienung zunächst grundsätzlich von der eingesetzten Gerätetechnik und den Umweltbedingungen ab. Typische hierfür relevante Geräteeigenschaften sind die Vergrößerung (geometrische Anordnung von Röntgenquelle, Werkstück und Detektor), die Eigenschaften der Röntgenkomponenten (z. B. Detektorauflösung, Kathodenspannung und Brennfleckgröße der Röntgenquelle, Softwarekorrekturen von Sensoreigenschaften), die Rundlaufeigenschaften der Drehachse und die Leistungsfähigkeit der Softwarealgorithmen zur Rekonstruktion des Messobjektvolumens und zur Bestimmung der Lage der Oberflächenpunkte (Punktwolke, z. B.



Bild 1. Koordinatenmessgerät mit Computertomografie zur vollständigen und genauen Messung, auch schwierig zu durchstrahlender Werkstücke

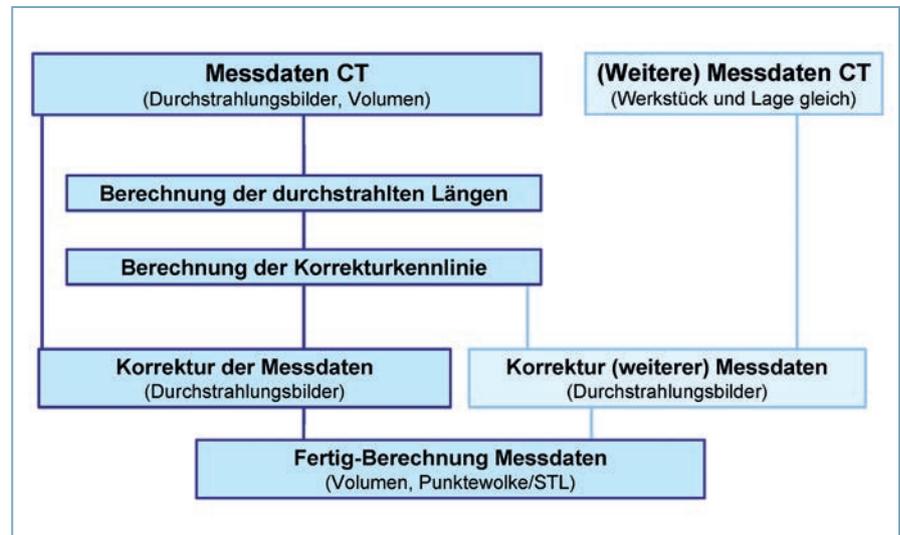


Bild 2. Prinzip der „Empirischen Artefaktkorrektur“ (EAK)

im vernetzten STL-Format) aus den Volumendaten.

Der Einfluss des Werkstücks kann beim Einsatz klassischer taktiler und optischer Sensoren oft vernachlässigt werden. Bei der Tomografie, insbesondere beim Messen großer und schwieriger zu durchstrahlender Werkstücke, ist dies aufgrund der Durchdringung des Werkstücks durch die Röntgenstrahlung und hierdurch bedingter Messabweichungen (Artefakte) nicht möglich.

## Typische Artefakte beim Messen mit Computertomografie

Zu den wichtigsten physikalischen Effekten, die zu Artefakten führen und so das Messergebnis beeinflussen, gehören Strahlaufhärtung, Streustrahlung und der Einfluss der Kegelstrahlgeometrie. Strahlaufhärtungsartefakte entstehen durch die unterschiedliche Absorption der verschiedenen Frequenzbereiche der relativ breitbandigen Röntgenstrahlung.

Dieser Effekt wird bei der Rekonstruktion der Durchstrahlungsbilder nicht zwingend berücksichtigt. Hierdurch entstehen besonders bei großen Durchstrahlungslängen Messabweichungen. Streustrahlung entsteht durch die Schwächung und Ablenkung der Röntgenphotonen von ihrer ursprünglichen Richtung bei der Kollision mit Elektronen des Materials. Bei Mehrfachstreuung macht sich die Streustrahlung als Hintergrundstrahlung bemerkbar und beeinflusst ebenfalls das Messergebnis.

Um schnell messen zu können, werden bei modernen Geräten Flächendetektoren eingesetzt. Die hierdurch bedingte Ausnutzung eines kegelförmigen Röntgenstrahls erlaubt das Messen außerhalb der idealen Mittenebene (Ebene durch Brennfleck der Röntgenröhre, senkrecht zur Drehachse). Hierdurch ist die Rekonstruktion nur näherungsweise möglich und es entstehen Messabweichungen (Kegelstrahlartefakte), die mit steigendem Abstand von der Mittenebene (Kegelwinkel) zunehmen.

**Korrektur der Artefakte**

Seit der Einführung der CT in die Koordinatenmesstechnik sind verschiedene bewährte Methoden zur Artefaktkorrektur gezielt für präzise dimensionelle Messungen modifiziert und neue Verfahren entwickelt worden. Heute kommen abhängig von der Messaufgabe die „Empirische Artefaktkorrektur“ (EAK), die simulationsbasierte „Virtuelle Autokorrektur“ (VAK) oder die „Multisensor Autokorrektur“ zum Einsatz.

Ausgangspunkt der „Empirischen Artefaktkorrektur“ ist die Konsistenz des Zusammenhangs zwischen Durchstrahlungslänge und Schwächung (Grauwert im Durchstrahlungsbild). Eine materialabhängige Korrekturkennlinie wird hierzu anhand einer Referenzmessung (empirisch) erstellt und zur Korrektur der Durchstrahlungsbilder, auch nachfolgender Messungen an gleichartigen Werkstücken verwendet (Bild 2). Der Vorteil dieses Verfahrens ist die schnelle Korrektur der Auswirkungen mehrerer Artefakte mit Hilfe einer einzigen Kennlinie. Im Wesentlichen werden hierbei die Strahlauhfärtung und teilweise die Streustrahlungseffekte korrigiert. Vor allem bei stark ausgeprägten Artefakten wird dadurch überhaupt erst eine Extraktion von Oberflächenpunkten möglich (Bild 3). Auf-



Bild 3. Volumenschnitt durch eine Einspritzdüse vor (links) und nach (rechts) der EAK (überhöhte Darstellung)

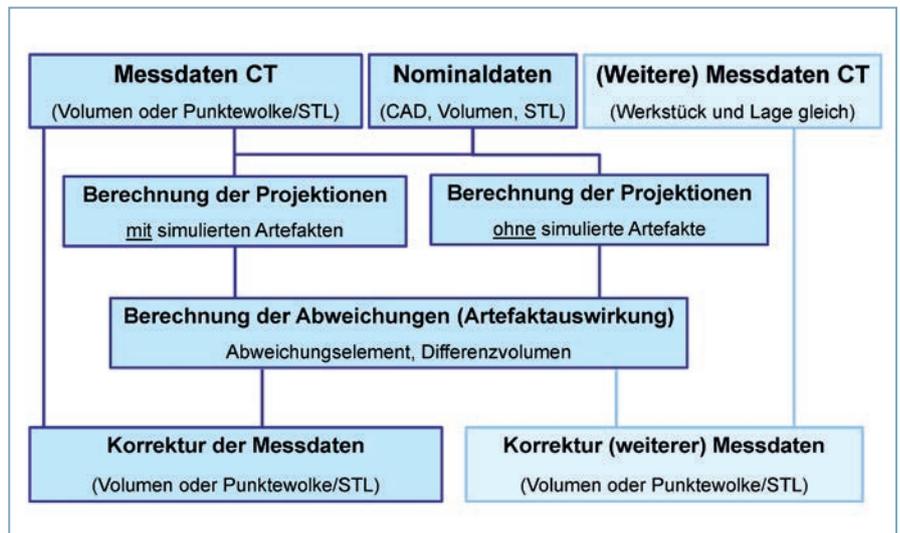


Bild 4. Prinzip der „Virtuellen Autokorrektur“ (VAK)

grund des stark vereinfachten Korrekturansatzes sind die hiermit erzielbaren Genauigkeiten nicht immer ausreichend.

Das als „Virtuelle Autokorrektur“ (VAK) bezeichnete Verfahren basiert auf der (virtuellen) Simulation des CT-Ver-

fahrens ausgehend von Messdaten (z. B. Meisterteil-Messung) oder Nominal-Daten (z. B. CAD-Daten) des Werkstücks selbst (Autokorrektur). Die Simulation erfolgt je Werkstücktyp einmal ohne und einmal mit Einbeziehung der zu korrigie-

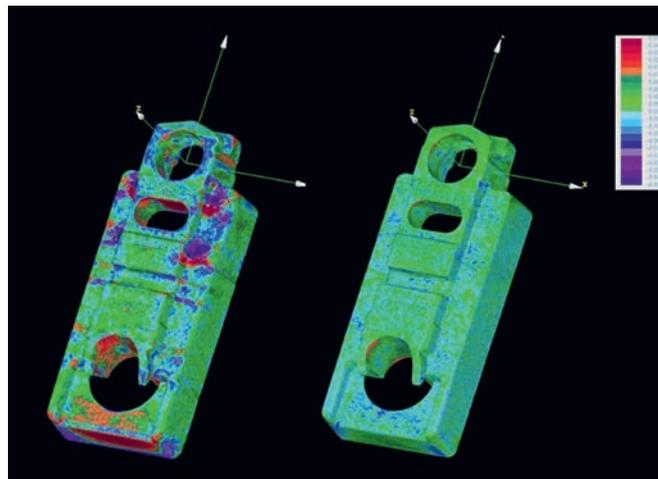


Bild 5. Im Vergleich zur Messung ohne VAK (links) sind die Messabweichungen mit VAK (rechts) deutlich reduziert.

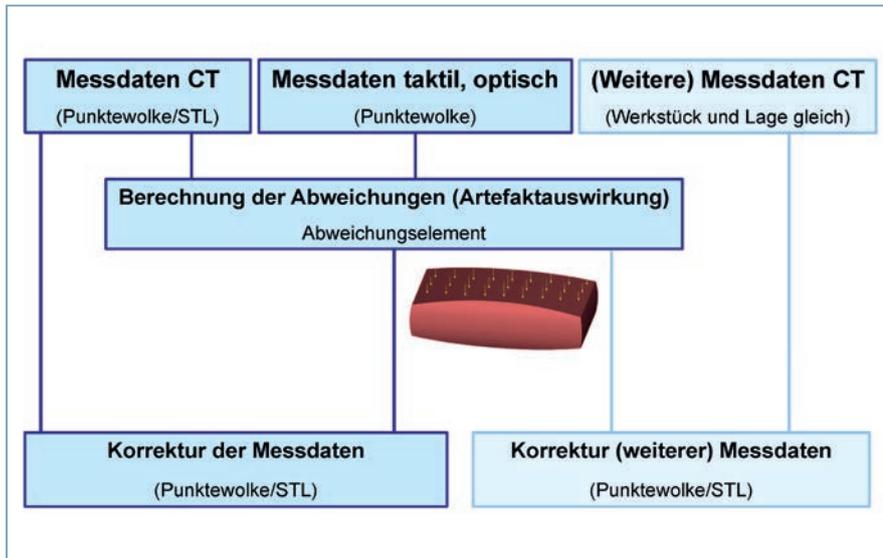


Bild 6. Prinzip der „Multisensor Autokorrektur“

renden Artefakte. Hierbei werden Werkstückgeometrie und -material (Absorptionsverhalten), die Geräteeigenschaften (z. B. Röntgenspektrum und Gerätegeometrie) sowie die physikalischen Modelle für die Artefaktentstehung (Frequenz abhängige Abschwächung, statistische Simulation der Streuung u. a.) berücksichtigt. Der Vergleich („Differenzbildung“) beider Simulationen ergibt die auch auf Serienmessungen anwendbaren Korrekturdaten (Bild 4). Durch die Differenzmethode heben sich Simulationsabweichungen weitgehend auf.

Mit diesem Verfahren kann der Einfluss der verschiedenen Artefakte einzeln berücksichtigt werden. Hierdurch ist die-

ses Verfahren besonders flexibel und kann je nach Aufgabenstellung hinsichtlich Aufwand und Genauigkeit angepasst werden. Die VAK kann auf ein breites Spektrum von Messaufgaben (Kunststoffteile, Einspritzdüsen, Motorblöcke u.v.m.) angewendet werden (Bild 5). Der Zeitaufwand für die Simulation ist abhängig von den berücksichtigten Artefakten und bewegt sich im Minuten- bis Stundenbereich bei der Berücksichtigung von Streustrahlung.

Bei der „Multisensor Autokorrektur“ erfolgt die Korrektur der CT-Messung auf der Basis einer Referenzmessung eines Meisterteils mit hochgenauen taktilen, optischen oder taktil-opti-

schen Sensoren. Diese kann mit demselben Messgerät durchgeführt werden, wenn entsprechende Sensoren vorgesehen sind (Multisensor-Gerät). Die Datensätze der CT-Messung und der Referenzmessung liegen dann bereits im gleichen Koordinatensystem vor, eine nachträgliche Einpassung kann entfallen. Die so einmalig bestimmten Abweichungen für einzelne Maße oder auch ganze Oberflächenbereiche werden für die Korrektur der CT-Serienmessung gleicher Werkstücke verwendet (Bild 6). Bei der „Multisensor Autokorrektur“ handelt es sich um die zurzeit genaueste Korrektur.

Bei Einführung der Röntgentomografie in die Koordinatenmesstechnik war eine rückführbare Messung von Werkstücken ohne „Multisensor Autokorrektur“ praktisch kaum sinnvoll. Heute ist die Messung mit Röntgentomografie allein mit Genauigkeiten in der Größenordnung von wenigen Mikrometern möglich. Für hochgenaue Messaufgaben mit zulässigen Messabweichungen kleiner als ein Mikrometer ist die Anwendung der „Multisensor Autokorrektur“ auch heute oft noch die einzige Lösung. So ist beispielsweise das Messen der Spritzlochdurchmesser an Diesel-Einspritzdüsen mit einer Genauigkeit von etwa 0,5 µm möglich (Bild 7). □

Dr.-Ing. Ingomar Schmidt

► Werth Messtechnik GmbH  
T 0641 7938 0  
mail@werth.de  
www.werth.de

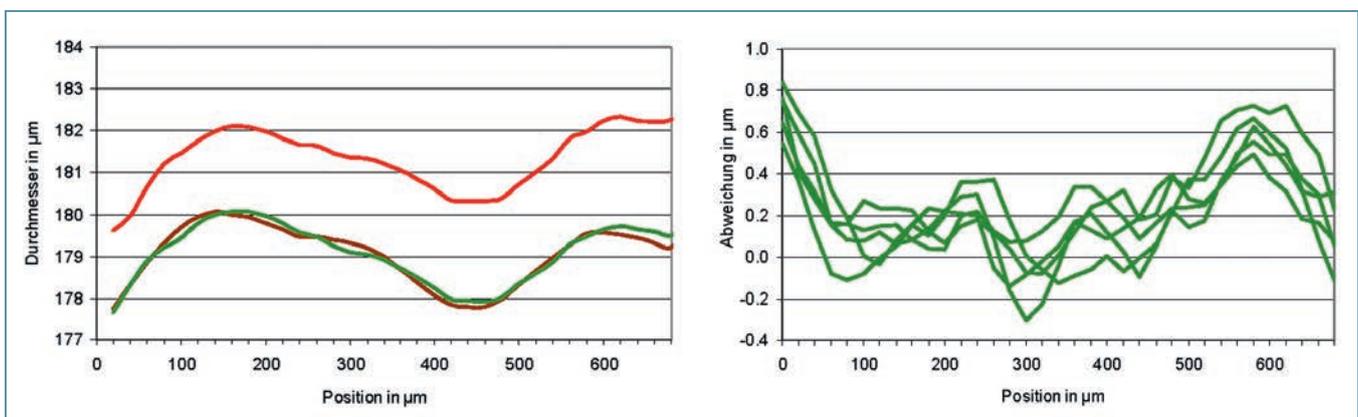


Bild 7. Nach der Korrektur der CT-Messung des Durchmessers (Verlauf entlang des Spritzlochs) an einer Diesel-Einspritzdüse (links, rot) mit Hilfe einer Referenzmessung mit dem Werth Fasertaster (links, braun) bleiben die Messabweichungen mehrerer korrigierter CT-Messungen (rechts) unterhalb eines Mikrometers.