

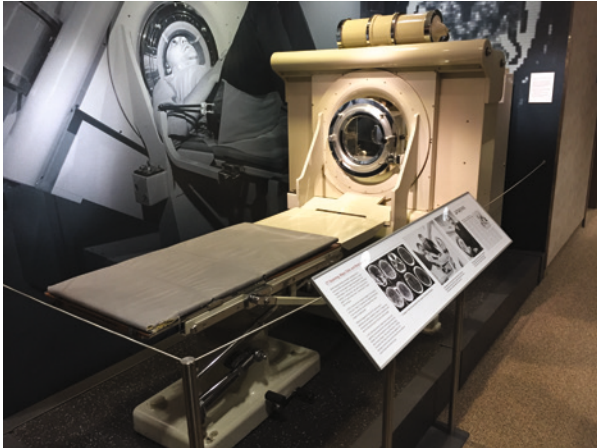
# 9 Computertomografie in der Koordinatenmesstechnik

Raoul Christoph, Marc Kachelrieß

<b>9.1</b>	<b>Funktionsprinzip der Röntgen-Computertomografie</b>	<b>462</b>
9.1.1	Röntgenröhre: Erzeugung der Röntgenstrahlung	462
9.1.2	Vorfilter und Messobjekt: Wechselwirkung der Röntgenstrahlung mit Materie	463
9.1.3	Detektor: Erfassung der Röntgenstrahlung	465
9.1.4	Vom Intensitätsbild zum Projektionsbild	465
9.1.5	Vom Bilderstapel zum Volumen	466
<b>9.2</b>	<b>Auswertung für industrielle Anwendungen</b>	<b>466</b>
9.2.1	Vom Intensitätsbild oder Volumen zur Messpunktwolke	467
9.2.2	Inspektion des Werkstücks	469
9.2.2.1	Werkstückvisualisierung und Inspektion der Materialstruktur	470
9.2.2.2	Automatische Analyse innen- und außenliegender Störungen	471
9.2.3	Messen der Werkstückgeometrie	472
9.2.3.1	Maßliche Auswertung des Werkstücks	472
9.2.3.2	3D-Soll-Ist-Vergleich	474
9.2.4	Gemeinsame Lösung von Inspektions- und Messaufgaben	474
<b>9.3</b>	<b>Abbildungsgeometrie</b>	<b>474</b>
9.3.1	Vergrößerung	475
9.3.2	Messbereich	475
9.3.3	Orts- und Strukturauflösung	475
9.3.4	Optimierung der Abbildungsgeometrie	477
9.3.4.1	Optimierung der Vergrößerung	477
9.3.4.2	Optimierung von Brennfleck- und Pixelgröße	477
9.3.4.3	Optimierung der Drehschrittzahl	478
<b>9.4</b>	<b>Gerätetechnik und Bauformen</b>	<b>478</b>
9.4.1	Röntgenröhre	478
9.4.1.1	Reflexions- und Transmissionstargets	479
9.4.1.2	Elektronenstrahlerzeugung und -fokussierung	480
9.4.1.3	Reduzierung von Betriebskosten	481
9.4.2	Drehachse	482
9.4.3	Röntgendetektor	482
9.4.3.1	Indirekte Detektion nach dem Szintillationsprinzip	482
9.4.3.2	Zeilen- und Flächendetektoren	483

9.4.4	Linearachsen	483
9.4.4.1	Einstellen von Vergrößerung und Kegelstrahlwinkel	484
9.4.4.2	Mehrere CT-Sensoren und Multisensorik	484
9.4.5	Strahlenschutzmaßnahmen	485
<b>9.5</b>	<b>Messabweichungen: Verursachende Effekte und Korrektur</b>	<b>485</b>
9.5.1	Systematische Messabweichungen	485
9.5.1.1	Strahlauhfärtung	485
9.5.1.2	Streustrahlung	486
9.5.1.3	Kegelstrahlartefakte	486
9.5.1.4	Empirische Artefaktkorrektur	486
9.5.1.5	Virtuelle Autokorrektur	487
9.5.2	Zufällige Messabweichungen	487
<b>9.6</b>	<b>Spezielle Tomografieverfahren</b>	<b>488</b>
9.6.1	Messzeit oder Rauschen reduzieren mittels OnTheFly-Tomografie	488
9.6.2	Messbereich oder Strukturauflösung vergrößern	488
9.6.2.1	Abschnittstomografie, longitudinales Rastern und Helix-Tomografie	489
9.6.2.2	Halbseitentomografie und laterales Rastern	490
9.6.2.3	ROI- und exzentrische Multi-ROI-Tomografie	490
9.6.2.4	Swing- und Planar-Laminografie	490
<b>9.7</b>	<b>Messgenauigkeit</b>	<b>492</b>
9.7.1	Spezifikationsüberprüfung	492
9.7.1.1	Antastabweichung	492
9.7.1.2	Längenmessabweichung	492
9.7.2	Messunsicherheitsbestimmung	493
<b>9.8</b>	<b>Ausblick</b>	<b>494</b>
9.8.1	Photonenzählende Detektoren	494
9.8.2	Artefaktkorrektur mittels künstlicher Intelligenz	495

Die röntgenbasierte Computertomografie (CT) wurde in den Sechzigerjahren von Godfrey Hounsfield, Mitarbeiter der Firma Electric and Musical Industries (EMI), entwickelt, um das Körperinnere des Menschen nichtinvasiv darstellen zu können. Seine Entwicklung mündete 1972 in dem „EMI Mark 1“, dem ersten kommerziellen Computertomografen (Bild 9.1). Nur sieben Jahre später erhielt Herr Hounsfield gemeinsam mit Allan McLeod Cormack, der die theoretischen Grundlagen der CT entwickelt hatte, für diese Entwicklung den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin.



**Bild 9.1** Erster kommerzieller Computertomograf „EMI Mark 1“ zur Untersuchung des Gehirns

Die CT wurde schnell zum wichtigsten bildgebenden Verfahren der Medizin und ist dies bis heute mit Abstand geblieben. Die technische Weiterentwicklung führte dazu, dass moderne diagnostische CT-Systeme mit dem „Mark 1“ bis auf die physikalischen Grundprinzipien so gut wie nichts mehr gemeinsam haben. Rotations- und Scanzzeiten im Subsekundenbereich, räumliche Auflösungswerte unter 0,5 mm isotrop, zeitliche Auflösungswerte um die 60 ms, Scangeschwindigkeiten von über 70 cm/s sind heutzutage üblich, und das bei Dosiswerten teils deutlich unterhalb der natürlichen jährlichen Umgebungsstrahlung. Der Ende 2021 vollzogene nächste Schritt war die Einführung der photonenzählenden Detektortechnologie, mit der Möglichkeit energieauflösend und somit spektral zu messen, die Hälfte an Dosis einzusparen und die räumliche Auflösung auf bis zu 150  $\mu\text{m}$  zu verbessern.

Der Einsatz proprietärer hochspezialisierter Technologien machte diese rasanten Entwicklungen erst möglich. Röntgenröhren, Detektorsysteme und Bildrekonstruktionsrechner wurden dediziert für die medizinische CT entwickelt – von den Herstellern selbst. Die Technologien standen und stehen bis heute nur wenigen großen CT-Firmen zur Verfügung. Ungünstige Formfaktoren und

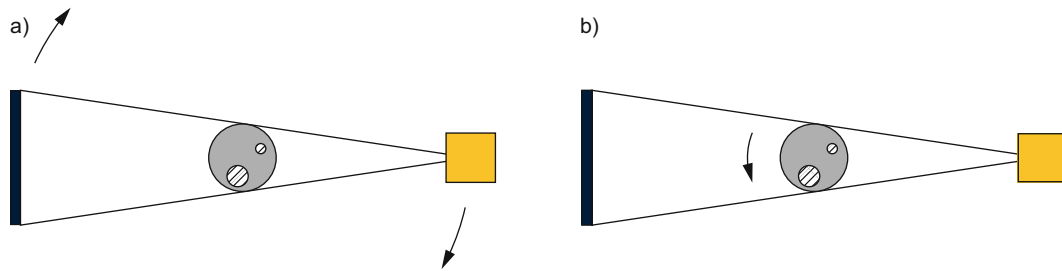
proprietäre Steuer- und Datenprotokolle verhindern die Nutzung der klinischen CT-Technologie in anderen Gebieten.

Eine alternative, nichtproprietäre Detektortechnologie bilden Röntgenbildverstärker, die gegen Ende der vierziger Jahre entwickelt wurden. Diese können mittlerweile auch digital ausgelesen werden und eignen sich somit prinzipiell für computertomografische Verfahren. Diese kostengünstigen und großflächigen Detektoren hatten jedoch zwei entscheidende Nachteile, die eine Verbreitung über medizinische Anwendungen hinaus erschwerten: die schiere Größe und Masse der Bildverstärker sowie die Anfälligkeit für Verzerrungen, die zudem vom Umgebungsmagnetfeld abhängen. Erst das Aufkommen von auch als Flachdetektoren bezeichneten Flächendetektoren, die die Röntgenstrahlung in einem Szintillator in sichtbares Licht wandeln, das von einem hinter der Szintillatorschicht liegenden Array von Photodioden erfasst wird, brachte um die Jahrtausendwende eine Technologie, die sich für die breite Anwendung über die Medizin hinaus leicht nutzen ließ. Der kleine Formfaktor, kombiniert mit der Robustheit der Detektoren und mit gängigen Softwareschnittstellen (auslesbar über Framegrabber oder über Ethernet), und die einfache Verfügbarkeit dieser leider relativ teuren Detektoren sorgte dafür, dass die CT-Technologie auch in zahlreichen industriellen Anwendungen Einzug fand.

Im Bereich der Koordinatenmesstechnik wurde diese Entwicklung zuallererst von der Firma Werth Messtechnik aufgegriffen und mündete gemeinsam mit herkömmlichen Sensoren in einem Multisensorkoordinatenmessgerät mit Computertomografie (Bild 9.2).



**Bild 9.2** Werth TomoScope®: Das erste Koordinatenmessgerät mit Röntgen-Computertomografie und optionaler Multisensorik



**Bild 9.3** Grundprinzip der CT: Meist rotieren entweder a) Röhre und Detektor um das Objekt oder b) Röhre und Detektor sind stationär und das Objekt wird gedreht.

Die Vorteile liegen auf der Hand: Im Gegensatz zur Messung mit optischen und taktilen Sensoren lassen sich computertomografisch alle geometrischen Eigenschaften des Objekts in einem Scan schnell erfassen – auch die innenliegenden, die taktil oder optisch gar nicht erfassbar sind.

während der Aufnahme Röhre und Detektor um das Objekt rotieren oder dass sich das Objekt auf einer Dreheinheit befindet und Röhre und Detektor stationär angeordnet sind (Bild 9.3).

Im medizinischen Bereich ist die Rotation der CT-Komponenten um den Patienten die gängige Kinematik. Bei industrieller CT und in der Koordinatenmesstechnik können beide Versionen zur Anwendung kommen. In der Regel wird jedoch das Messobjekt mittels eines Drehtisches gedreht. Die Scantrajektorie, die durch eine einfache Rotationsbewegung erzeugt wird, nennt sich Kreis-scan oder „Im Bild“-Tomografie. Um einen vollständigen Datensatz aufzunehmen, reicht ein Teilkreis, der einen Winkelbereich von  $180^\circ$  plus Fächerwinkel abdeckt. Aus Bildqualitätsgründen ist es oft jedoch besser, einen Vollkreis zu akquirieren.

## 9.1 Funktionsprinzip der Röntgen-Computer-tomografie

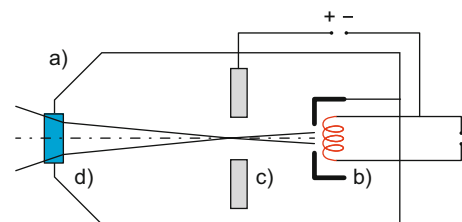
Die CT basiert darauf, dass von einem Objekt Röntgenbilder aus einer Vielzahl unterschiedlicher Blickrichtungen aufgenommen werden und diese aufgenommenen Bilder, auch Rohdaten genannt, mithilfe eines mathematischen Verfahrens, der so genannten Bildrekonstruktion, in Volumendaten, also in einen dreidimensionalen Bildstapel umgerechnet werden. Diese Umrechnung kann aufgrund der hohen Datenmenge und der komplexen durchzuführenden Rechnungen nur mithilfe von Computern realisiert werden, woher letztendlich der Name Computertomografie rührt.

Die wesentlichen Komponenten eines CTs sind somit die Röntgenröhre zur Erzeugung der Röntgenstrahlung, ein der Röntgenröhre aus Sicht des Objekts oder des Patienten gegenüberliegender Detektor zur Erfassung der durch das Objekt geschwächten Röntgenstrahlung sowie die Software, die die Rohdaten vorverarbeitet und die aus den vorverarbeiteten Daten das Volumen rekonstruiert. Außerdem benötigt das CT eine mechanische Vorrichtung mit Bewegungsfreiheitsgraden, um die Röntgenaufnahme aus unterschiedlichen Blickrichtungen automatisiert durchführen zu können. Diese Kinematik wird typischerweise mithilfe von Elektromotoren bewegt.

Die im CT-Bereich am häufigsten anzutreffende Kinematik ist die Rotation. Sie wird meist dadurch realisiert, dass

### 9.1.1 Röntgenröhre: Erzeugung der Röntgenstrahlung

Röntgenstrahlung wird mithilfe von Röntgenröhren erzeugt, deren Grundprinzip seit über 125 Jahren unverändert ist: In einem evakuierten Gefäß (Bild 9.4a) befinden sich Kathode b) und Anode c).



**Bild 9.4** Vereinfachte Darstellung des Funktionsprinzips einer Röntgenröhre

Die Kathode b) emittiert, abhängig vom eingestellten Röhrenstrom, Elektronen, die durch das Anlegen einer positiven Spannung (Röhrenspannung) von bis zu mehreren hundert Kilovolt zur Anode c) hin beschleunigt werden.

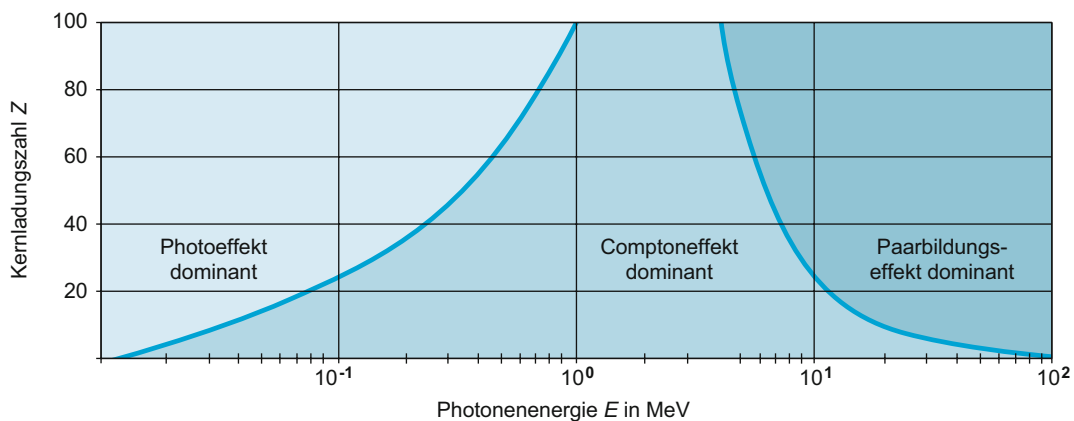
Beim Auftreffen auf das Target d) werden die Elektronen durch Coulomb-Wechselwirkungen oder Stoßprozesse im Anodenmaterial abgebremst und geben dabei, wie jede beschleunigte Ladung, elektromagnetische Strahlung ab. Zusätzlich zu dieser Bremsstrahlung erzeugt das Elektronenbombardement in der Anode noch charakteristische Röntgenstrahlung. Sie entsteht, wenn gebundene Elektronen aus der Atomhülle der Atome der Anode gestoßen werden. In diesem Fall wird das freigewordene Energieniveau unmittelbar durch ein Atom aus einer höherenergetischen Schale aufgefüllt. Die Energiedifferenz beider Schalen wird in Form eines Röntgenphotons abgegeben. Da diese Energiedifferenz charakteristisch für das Atom ist und somit ein Linienspektrum besitzt, spricht man von charakteristischer Röntgenstrahlung. Am häufigsten tritt der Fall ein, dass ein Elektron aus der K-Schale gestoßen wird. Wird das so entstandene Loch durch ein Hüllenelektron aus der L-Schale aufgefüllt, spricht man bei der emittierten Strahlung von  $K_{\alpha}$ -Strahlung. Wird es aus der M-Schale aufgefüllt, so entsteht ein  $K_{\beta}$ -Röntgenphoton. Analog dazu wird die Strahlung, die beim Füllen eines Loches in der L-Schale entsteht, mit  $L_{\alpha}$ ,  $L_{\beta}$  usw. bezeichnet. Bei dem häufig verwendeten Anodenmaterial Wolfram liegt die  $K_{\alpha}$ -Linie ungefähr bei 58 keV und die Bindungsenergie der K-Schalen-Elektronen beträgt ungefähr 70 keV. Das aus dem kontinuierlichen Bremsstrahlungsspektrum und dem diskreten Spektrum der charakteristischen Strahlung zusammengesetzte Röntgenspektrum ist somit polychromatisch. Es treten alle Photonenenergien von 0 bis  $e \cdot U$  auf, wobei  $e$  die Elementarladung und  $U$  die Beschleunigungsspannung ist. Die Röhrenleistung, also das Produkt  $U \cdot I$  aus Röhrenspannung und Röhrenstrom, ist durch den Schmelzpunkt des Targetmaterials limitiert, da ein Großteil der Energie

(etwa 99%) der auf das Target treffenden Elektronen leider nicht in Röntgenstrahlung, sondern in Wärme gewandelt wird. Um ein Schmelzen des Targets zu vermeiden, wird ein Targetmaterial mit hohem Schmelzpunkt eingesetzt. Da die Ausbeute an Röntgenphotonen mit der Ordnungszahl  $Z$  des Targetmaterials steigt, muss ein Material sowohl mit hohem  $Z$  als auch mit hohem Schmelzpunkt und guter Wärmeleitfähigkeit gefunden werden. Es stellte sich somit früh heraus, dass Wolfram (Ordnungszahl 74, Schmelzpunkt 3695 K) ein gut geeignetes Targetmaterial ist.

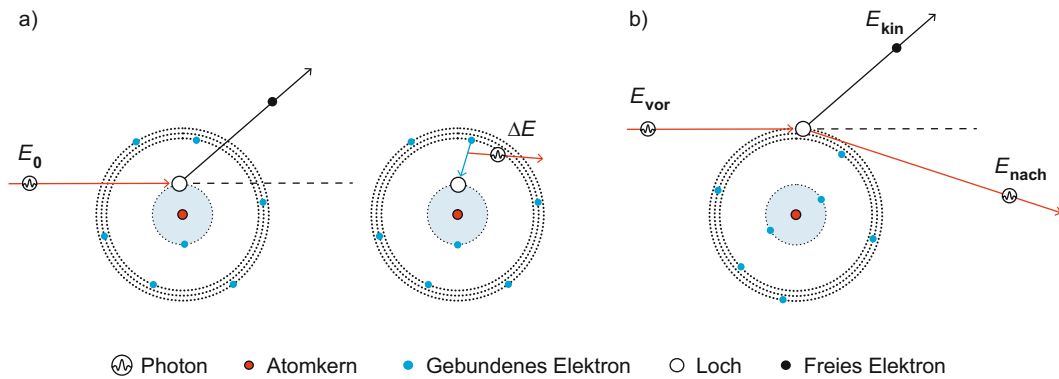
### 9.1.2 Vorfilter und Messobjekt: Wechselwirkung der Röntgenstrahlung mit Materie

Im für messtechnische (und medizinische) Zwecke interessierenden Energiebereich von mehreren keV bis hin zu einem MeV sind die wesentlichen Wechselwirkungen der Röntgenstrahlung mit Materie der Photoeffekt und der Comptoneffekt (Bild 9.5).

Beim Photoeffekt (Bild 9.6a) löst ein Röntgenphoton ein Elektron aus einer Atomhülle. Das Röntgenphoton wird dabei absorbiert und gibt seine Energie an das Elektron ab. Der Wirkungsquerschnitt und somit die Wahrscheinlichkeit, dass ein Röntgenphoton mittels des Photoeffekts wechselwirkt, ist proportional zur Dichte, steigt mit der dritten Potenz der Ordnungszahl der absorbierenden Materie und fällt mit der dritten Potenz der Energie des Röntgenphotons. Bei höher werdender Röhrenspannung und damit höher werdenden Energien der Röntgenphotonen wird der Photoeffekt folglich immer unwahrscheinlicher.



**Bild 9.5** Abhängigkeit der dominierenden Wechselwirkungsprozesse von der Photonenenergie: Während im messtechnischen Energiebereich die Rayleighstreuung kaum einen und die Paarbildung keinen Beitrag hat, sind der Photoeffekt und der Comptoneffekt die bestimmenden Größen für die Absorption (nach Krieger 2009).



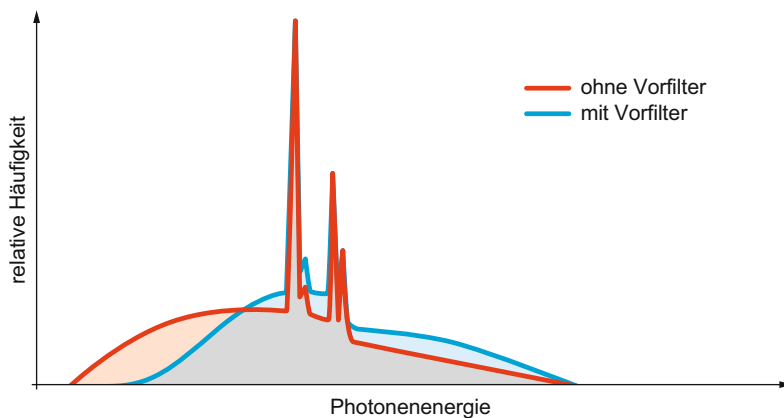
**Bild 9.6** Für die Koordinatenmesstechnik mit Röntgen-Computertomografie wichtige Wechselwirkungsprozesse: a) Photoeffekt und b) Comptoneffekt (nach Krieger 2009)

Der Comptoneffekt hingegen ist ein Streueffekt (Bild 9.6b). Das mit einem Absorber wechselwirkende Röntgenphoton stößt mit einem Hüllenelektron derart, dass das Elektron nur einen Teil der Energie des Röntgenphotons übernimmt und ein neues, niederenergetischeres Röntgenphoton den Wechselwirkungsort in einer zufälligen Richtung verlässt (die Winkelabhängigkeit dieser Richtungsverteilung ist durch die Klein-Nishina-Formel gegeben). Im Gegensatz zum Photoeffekt ist der Comptoneffekt kaum von der Ordnungszahl und schwächer von der Photonenenergie abhängig (bei hohen Energien indirekt proportional zur Energie). Die Comptonstreuung dominiert folglich bei höheren Energien den Photoeffekt. Dies ist ein Nachteil für die Bildqualität, denn während das Röntgenphoton beim Photoeffekt einfach absorbiert wird, entsteht beim Comptoneffekt ein neues Röntgenphoton, das mit nicht zu vernachlässigender Wahrscheinlichkeit Richtung Detektor fliegt und dort registriert wird (Streustrahlung). Da der Detektor nicht zwischen einem Primärstrahlenphoton und einem Streustrahlenphoton unterscheiden kann, wird durch die Streustrahlung die

Messung verfälscht und führt im Volumen zu teils starken Artefakten (siehe Abschnitt 9.5.1.2).

Abgesehen von der Streustrahlung ist ein weiterer nachteiliger Effekt die sogenannte Strahlauhärtung. Sie tritt auf, weil das Röntgenspektrum polychromatisch ist und weil die Schwächungskoeffizienten sowohl des Photo- als auch des Comptoneffekts mit höher werdender Photonenenergie kleiner werden. Beim Durchlaufen von Materie passiert also Folgendes: Niederenergetische Photonen des Röntgenstrahls werden stärker absorbiert bzw. aus dem Primärstrahl entfernt als höherenergetische Photonen. Mit zunehmender Eindringtiefe in das Objekt wird der Anteil der niederenergetischen Photonen relativ zum Anteil der höherenergetischen Photonen immer kleiner, die Strahlung somit immer härter und immer durchdringungsfähiger. Der Schwerpunkt des Spektrums verschiebt sich hin zu höheren Energien. Man spricht von Strahlauhärtung. Bild 9.7 zeigt dies anhand eines Röntgenspektrums.

Die aus der Strahlauhärtung folgende nichtlineare Abhängigkeit von gemessenen Strahlungsintensitäten und



**Bild 9.7**

Aufhärtung des Spektrums mittels Vorfilter: 120-kV-Spektrum eines Röntgenstrahls direkt hinter der Röntgenröhre (rot) und nach Durchlaufen eines Vorfilters (blau). Beide Spektren sind auf die gleiche Fläche normiert. Im Vorfilter werden vorrangig niederenergetische Photonen absorbiert. Daher verschiebt sich das Spektrum hin zu höheren Energien und man spricht von einer Aufhärtung des Spektrums.



Durchstrahlungslängen wird in einer herkömmlichen Volumenrekonstruktion nicht berücksichtigt, was ähnlich wie Streustrahlung zu Artefakten im Volumen führt (siehe Abschnitt 9.5.1.1). Um der Strahlauvhärtung im Messobjekt vorzubeugen werden Vorfilter eingesetzt. Je nach Messaufgabe kommen hierfür 0,1 mm bis 3 mm dicke Metallplättchen beispielsweise aus Aluminium, Kupfer oder Zinn zum Einsatz, mit der die aus der Röntgenröhre austretende Röntgenstrahlung vor Durchstrahlung des Messobjekt aufgehärtet wird (Bild 9.7). Bei einer Messung resultieren aufgrund der dann geringeren Strahlauvhärtung im Messobjekt geringere Strahlauvhärtungsartefakte. Durch die Vorfilterung reduziert sich jedoch auch die Intensität der für die Messung nutzbaren Röntgenstrahlung. Dies führt – analog zu einer Reduzierung der Belichtung bei einer Fotografie – zu einem höheren Bildrauschen oder einer längeren Messzeit. CNC-Filterwechsellern ermöglichen die automatische Anpassung des Vorfilters an die Messaufgabe.

Photo- und Comptoneffekt tragen zum linearen Schwächungskoeffizienten  $\mu(E)$  bei. Dieser beschreibt den Anteil der aus dem Primärstrahl durch Absorption oder Streuung entnommenen Strahlung pro durchstrahlter Länge. Die Schwächung selbst ist aufgrund der Tatsache, dass ein Röntgenphoton kein Gedächtnis und somit keine Information über seine Vergangenheit hat, ein statistischer Prozess. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon einen Absorber der Dicke  $d$  ohne Wechselwirkung durchläuft, ist durch das Lambert-Beersche Gesetz gegeben und beträgt  $\exp(-\mu(E) \cdot d)$ . Wenn  $N_0(E)$  Röntgenphotonen der Energie  $E$  auf den Absorber treffen, so ist zu erwarten, dass  $N(E) = N_0(E) \cdot \exp(-\mu(E) \cdot d)$  Photonen ihn ungestört durchstrahlen. Bei Kenntnis der einfallenden Photonenzahl  $N_0(E)$  und der aus dem Absorber austretenden Photonenzahl  $N(E)$  lässt sich die Schwächung  $\mu(E) \cdot d = -\ln(N(E)/N_0(E))$  berechnen. Dieses Prinzip wird bei der Röntgenbildgebung und somit auch bei der Computertomografie benutzt, um Rückschlüsse auf die räumliche Verteilung  $\mu(x, y, z)$  des Schwächungskoeffizienten zu ziehen.

### 9.1.3 Detektor: Erfassung der Röntgenstrahlung

Der Nachweis der Röntgenstrahlung, also die Messung der aus dem Objekt tretenden Verteilung von Röntgenphotonen, funktioniert mithilfe des Röntgendetektors. In der industriellen Praxis kommen primär aus vielen Bauelementen bestehende Flächendetektoren zum Einsatz (Bild 9.8).

Die von der Röntgenröhre a1) erzeugte Strahlung wird durch das Messobjekt a2) abgeschwächt und trifft auf den Szintillator a3), welcher einen Teil der Strahlungsenergie absorbiert und als sichtbares Licht emittiert. Das Licht wird auf einen Photodetektor a4) abgebildet, detektiert und per Analog-Digital-Wandler in ein digitales Intensitätsbild b) umgewandelt.

### 9.1.4 Vom Intensitätsbild zum Projektionsbild

Die bislang genutzten Detektoren sind nicht energieselektiv, d.h. sie können nicht zwischen Röntgenphotonen unterschiedlicher Energie unterscheiden. Somit lässt sich in einem Detektorpixel nicht die Anzahl  $N(E)$  der dort wechselwirkenden Photonen der Energie  $E$  nachweisen, sondern lediglich ein Intensitätswert  $I$ , der in nahezu linearem Zusammenhang mit der mittleren absorbierten Energie aller eintreffenden Röntgenphotonen steht. Zusammen mit dem Intensitätswert  $I_0$  ohne Objekt lässt sich dann in guter Näherung die Schwächung, auch Projektionswert genannt, berechnen:  $p = \mu \cdot d \approx -\ln(I/I_0)$ . Das gesamte Detektorbild  $I(u, v)$  setzt sich aus den Messwerten aller Detektorpixel zusammen. Hierbei sind  $u$  und  $v$  die Koordinatenachsen des Detektors. Analog dazu ist  $p(u, v)$  die Projektion, also die logarithmierte, auf die nicht durch das Objekt abgeschwächte Intensität normierte Intensität (Bild 9.9).

Im Allgemeinen ist das abgebildete Objekt nicht homogen. In diesem Fall ist die gemessene Schwächung nicht einfach nur das Produkt  $\mu \cdot d$  aus einem Schwächungskoeffizienten  $\mu$  und der durchstrahlten Dicke  $d$ , sondern das

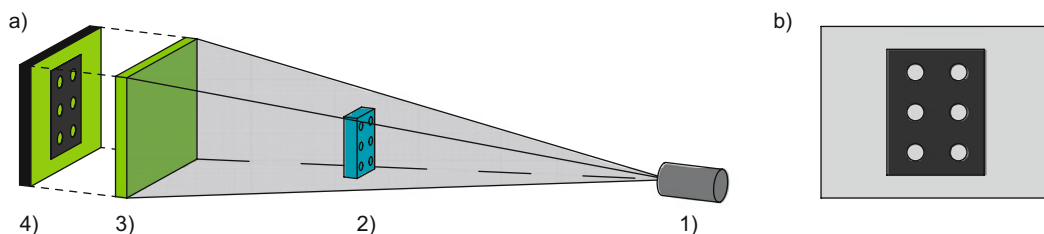
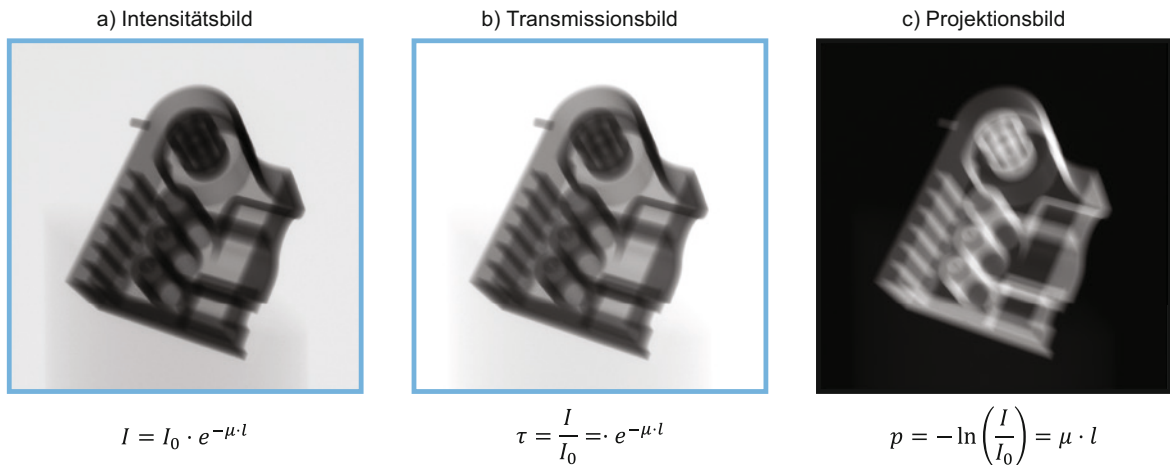


Bild 9.8 Erzeugung eines Intensitätsbilds



**Bild 9.9** Das Transmissionsbild b) resultiert nach Normierung des gemessenen Intensitätsbilds a) auf den Intensitätswert  $I_0$  ohne Objekt. Nach Logarithmieren und Negieren erhält man hieraus das Projektionsbild c).

Integral über die Schwächungskoeffizientenverteilung entlang der Strahlrichtung. Vereinfacht kann man sich dieses Linienintegral vorstellen als Summe über alle Voxelwerte entlang des Strahls multipliziert mit der Schnittlänge des Strahls mit dem jeweiligen Voxel. Das beschriebene Vorgehen entspricht der Umkehrung des Lambert-Beerschen Schwächungsgesetzes.

### 9.1.5 Vom Bilderstapel zum Volumen

Die Projektionsbilder können nun in das Volumen rückgerechnet werden. Dazu ist es zunächst mathematisch nötig, dass jedes Detektorbild zeilenweise mit einem so genannten Faltungs- oder Rekonstruktionskern gefiltert wird. Nach der Faltung werden die gefalteten Projektionsbilder in das Volumen zurückprojiziert.

Zu Beginn sind die Voxel (Volumetric Pixel: Volumenbildpunkt) des Volumens (im Computer) mit Nullen gefüllt. Ausgehend vom ersten Detektorpixel des ersten gefalteten Detektorbilds wird nun ein Strahl in das Volumen zurückgerechnet und der Wert des Detektorpixels wird auf jedes Voxel addiert, den der Strahl trifft (Bild 9.10). Dies wird für jeden Detektorpixel eines jeden Projektionsbilds getan. Der Prozess nennt sich Rückprojektion, denn die gemessenen gefalteten Projektionsdaten werden entlang ihrer ursprünglichen Messrichtung in das Volumen addiert, also zurückprojiziert. Die hier beschriebene Rekonstruktion besteht also aus einer Faltung gefolgt von einer Rückprojektion. Sie nennt sich daher gefilterte Rückprojektion bzw. filtered backprojection (FBP). Im Bereich der Kegelstrahl-CT, wie sie auch in der Messtechnik angewendet wird, spricht man auch vom Feldkampalgorithmus, bzw. Feldkamp-Davis-Kress-Verfahren (FDK-Verfahren),

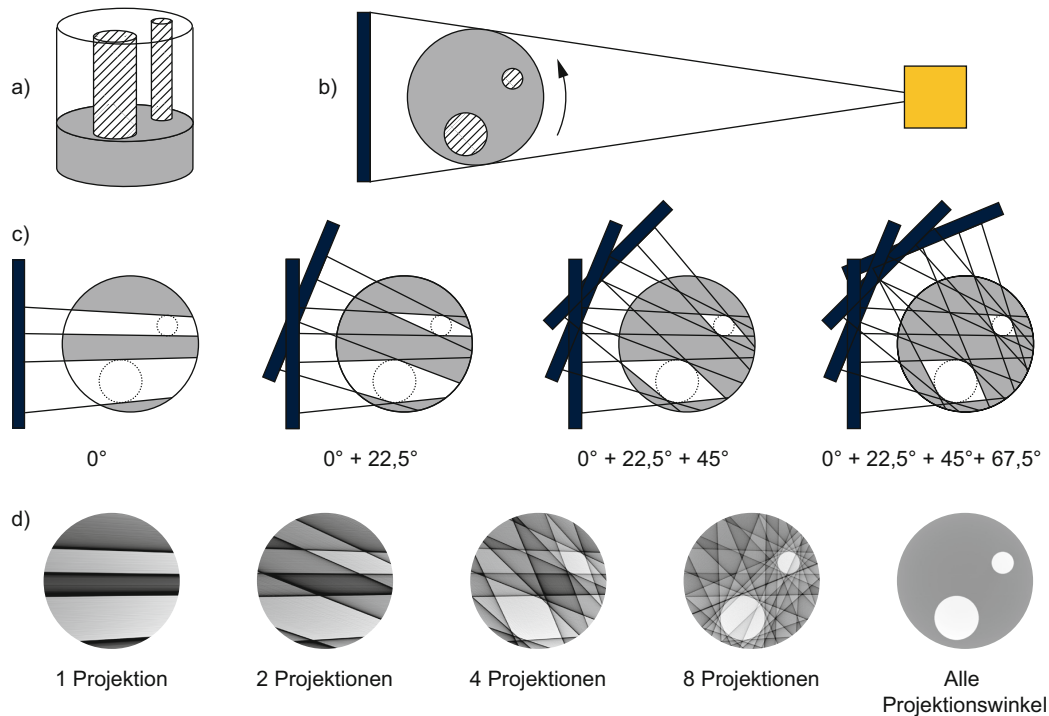
zur Würdigung der drei Autoren, die die FBP erstmals auf Kegelstrahlendaten angewendet haben (Feldkamp et al. 1984).

Die Bildrekonstruktion ist extrem rechenaufwendig (ein  $2000^3$  Volumen aus 2000 Projektionen benötigt  $2000^4 = 16$  Billionen Rechenoperationen und noch mehr Speicherezugriffe) und wird heutzutage daher meist auf Graphikkarten (GPUs) implementiert. Ziel ist es oft, die Rekonstruktionszeit kleiner oder gleich der Bildaufnahmezeit zu halten. FBP-basierte Rekonstruktionsverfahren können schon während der Bildaufnahme starten und die bereits gemessenen Projektionen falten und zurückprojizieren. Somit steht das fertige Volumen bei modernen Geräten in der Regel unmittelbar nach der Aufnahme des letzten Intensitätsbildes zur Verfügung.

## 9.2 Auswertung für industrielle Anwendungen

Mit Röntgen-Computertomografie kann ein vielseitiges Aufgabenspektrum gelöst werden. Dieses reicht von der Visualisierung von Werkstückmaterialien über die automatische Erkennung von Störungen bis hin zum vollautomatischen Messen sämtlicher geometrischer Eigenschaften mehrerer Werkstücke – das Aufgabenspektrum umfasst Prüfaufgaben, die mit CT-Inspektionsgeräten gelöst werden können, sowie die dimensionelle Messung von Werkstückgeometrien mit Methoden der Koordinatenmesstechnik. Die Basis für die Lösung komplexerer





**Bild 9.10** Vereinfachte Darstellung des Funktionsprinzips der gefilterten Rückprojektion: Durch Drehen des Messobjekts a) im Strahlengang b) werden Intensitätsbilder aus verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen. Die aus den Intensitätsbildern berechneten Projektionsbilder werden anschließend mittels gefilterter Rückprojektion in das Volumen projiziert c). Unter d) ist die Rekonstruktion des Volumens mittels gefilterter Rückprojektion dargestellt.

Inspektionsaufgaben, beispielsweise die automatische Prüfung auf Lunker oder Grate, und die Bestimmung geometrischer Eigenschaften sind an den Grenzflächen zwischen zwei Materialien, in der Regel zwischen dem Material des Werkstücks und der umgebenden Luft, berechnete Grenzflächenpunkte.

### 9.2.1 Vom Intensitätsbild oder Volumen zur Messpunktewolke

Die Bestimmung von Grenzflächenpunkten erfolgt entweder anhand von Intensitätsbildern oder Volumen. Für die Berechnung der Grenzflächenpunkte aus Intensitätsbildern werden aus der digitalen Bildverarbeitung bekannte Methoden der Konturbildverarbeitung verwendet (Bild 9.11).

Hierzu muss im Vorfeld der im Röntgenstrahlengang lokal unterschiedliche Abbildungsmaßstab ermittelt und bei der Berechnung berücksichtigt werden. Die Bestimmung von Regelgeometrieelementen und geometrischen Eigenschaften erfolgt anschließend wie bei bildverarbeitenden optischen Sensoren, welche in Teil III, Kapitel 10, „Bildverarbeitung“, detaillierter beschrieben werden.

In der Regel werden die Grenzflächenpunkte jedoch auf Basis des rekonstruierten Volumens bestimmt, das sich aus den Schwächungskoeffizienten der einzelnen Voxel zusammensetzt. In einem ersten Schritt werden hierzu die Grenzflächenorte, beispielsweise mithilfe eines globalen Schwellwerts, grob bestimmt. Diese grobe Bestimmung der Grenzflächenpunkte ist für Inspektionsaufgaben meistens ausreichend. Als Grundlage für die Bestimmung geometrischer Eigenschaften erfolgt anschließend die genaue Bestimmung der Grenzflächenpunkte aus den in der Umgebung um den jeweils grob bestimmten Grenzflächenpunkt befindlichen Schwächungswerten. Durch Einbeziehung der Beträge der Schwächungskoeffizienten wird die erreichbare Auflösung der Positionsbestimmung deutlich erhöht. Dieses Vorgehen wird in Anlehnung an das aus der klassischen Bildverarbeitung bekannte Subpixeling auch als Subvoxeling bezeichnet. Hierfür stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, z. B. die Bestimmung des lokalen Maximums des differenzierten Kantenübergangs oder integrale Verfahren wie das Verfahren der photometrischen Mitte. Das Grundprinzip wird nachfolgend am Beispiel der linearen Interpolation zwischen Schwächungskoeffizienten unter Verwendung eines lokal bestimmten Schwellwerts erläutert (Bild 9.12).



leichtern, wird diese in der Regel als triangulierte Punktwolke im STL-Format gespeichert (Bild 9.13). Je drei benachbarte Punkte werden hierbei zu einer Dreiecksfläche, einem sogenannten Vertex, verbunden.

Die Information über die Nachbarschaftsbeziehung zwischen den Grenzflächenpunkten bleibt erhalten und kann für spätere Auswertungen verwendet werden. Die für eine erneute Berechnung der Nachbarschaftsbeziehung notwendige Rechenzeit entfällt. Wird nur ein Teil der Punkte für die Auswertung benötigt, können auch nur interessierende Teilbereiche gespeichert werden. Hierbei gehen viele Informationen über die Werkstückoberfläche verloren, welche gegebenenfalls für eine genaue Bestimmung der Werkstückgeometrie benötigt werden. Verfahren, welche keine Vorabinformation über das Werkstück benötigen, eignen sich für die meisten Werkstücke aus einem Material.

Besteht das Messobjekt jedoch aus mehreren Materialien oder weisen die rekonstruierten Volumendaten starke Artefakte auf, dann können Verfahren eingesetzt werden, welche Vorabinformationen über die Werkstückoberfläche nutzen. Hierbei kann es sich beispielsweise um Nominaldaten des Werkstücks wie ein CAD-Modell oder eine zuvor berechnete ungenauere Punktwolke handeln. Falls notwendig, wird in einem ersten Schritt die Werkstücklage mit der vorhandenen groben Oberflächenbeschreibung abgeglichen. Eine Methode hierfür ist das in Bild 9.14 dargestellte automatische Einpassen einer Messpunktwolke in ein CAD-Modell.

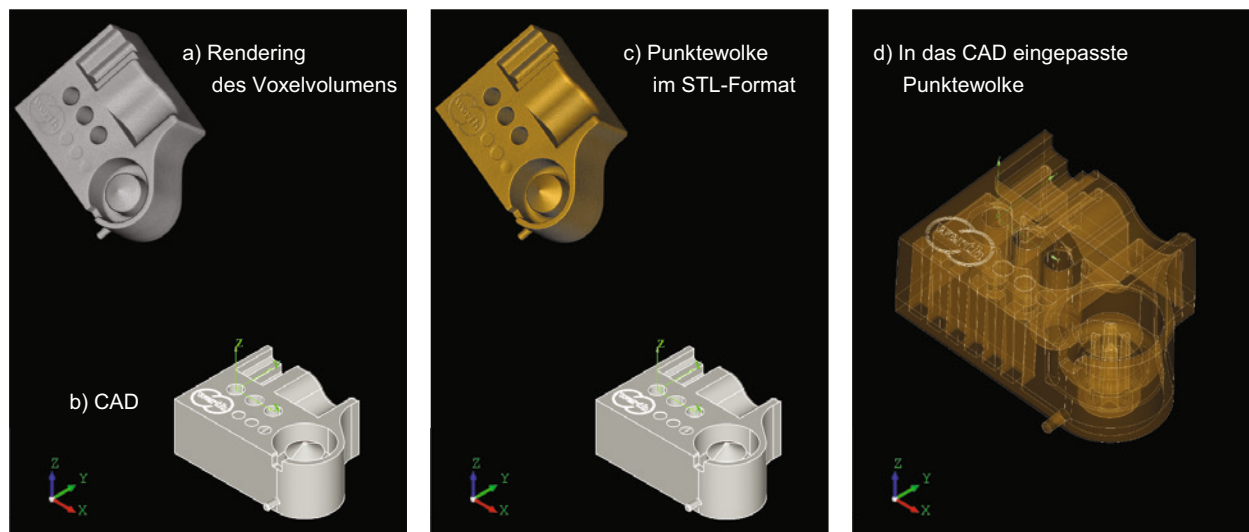
Zunächst wird aus dem Volumen (Bild 9.14a) eine triangulierte Punktwolke (Bild 9.14b) berechnet. Mithilfe von Einpassalgorithmen, wie der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate, wird die Punktwolke in das CAD-

Modell eingepasst. Das Volumen wird automatisch mit-transformiert. Alternativ werden durch Anwählen bzw. durch Messen von Regelgeometrieelementen zwei lokale Koordinatensysteme aufgebaut und aufeinander abgeglichen. Anschließend erfolgt die Auswahl der interessierenden Grenzflächen durch Selektion der zugehörigen CAD-Patches. Im nächsten Schritt werden Linienprofile senkrecht zu den durch die CAD-Patches beschriebenen Grenzflächen berechnet und z.B. mittels linearer Interpolation jeweils ein Grenzflächenpunkt bestimmt.

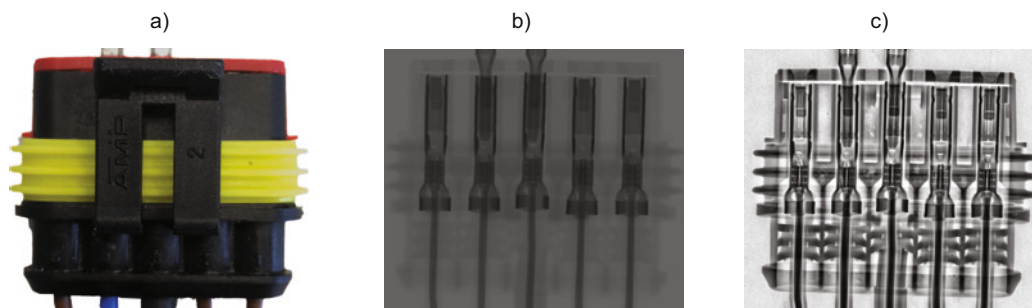
Aufgrund der notwendigen Vorabinformation über die Werkstückgrenzflächen erfolgt die Bestimmung der Punktwolke lediglich in Teilbereichen des Volumens. Neue Algorithmen, wie beispielsweise in (Stopp et al. 2022) beschrieben, ermöglichen die vollautomatische Bestimmung aller Grenzflächen von Werkstücken aus mehreren Materialien oder Baugruppen. Diese haben sich jedoch in der industriellen Praxis aufgrund zu hoher Berechnungszeiten noch nicht durchgesetzt.

### 9.2.2 Inspektion des Werkstücks

Koordinatenmessgeräte mit Röntgen-Computertomografie werden zwar primär für die Bestimmung geometrischer Eigenschaften eingesetzt, ermöglichen jedoch zusätzlich die Lösung konventioneller Inspektionsaufgaben wie der Werkstückvisualisierung, der Inspektion der Materialstruktur oder der Prüfung auf innen- und außenliegende Störungen wie Grate und Lunker. Die Inspektion eines Werkstücks erfolgt hierbei entweder anhand von 2D-Durchstrahlungsbildern, rekonstruierten Volumendaten oder Grenzflächenpunkten.



**Bild 9.14** Automatisches Einpassen der Messdaten in das CAD-Modell



**Bild 9.15** Inspektion eines Kfz-Steckers a): Details im Intensitätsbild b) sind nach Anwendung der 2D-Kontrasterhöhung c) deutlich besser zu erkennen. Dies ermöglicht beispielsweise die Überprüfung der Steckverbindungen.

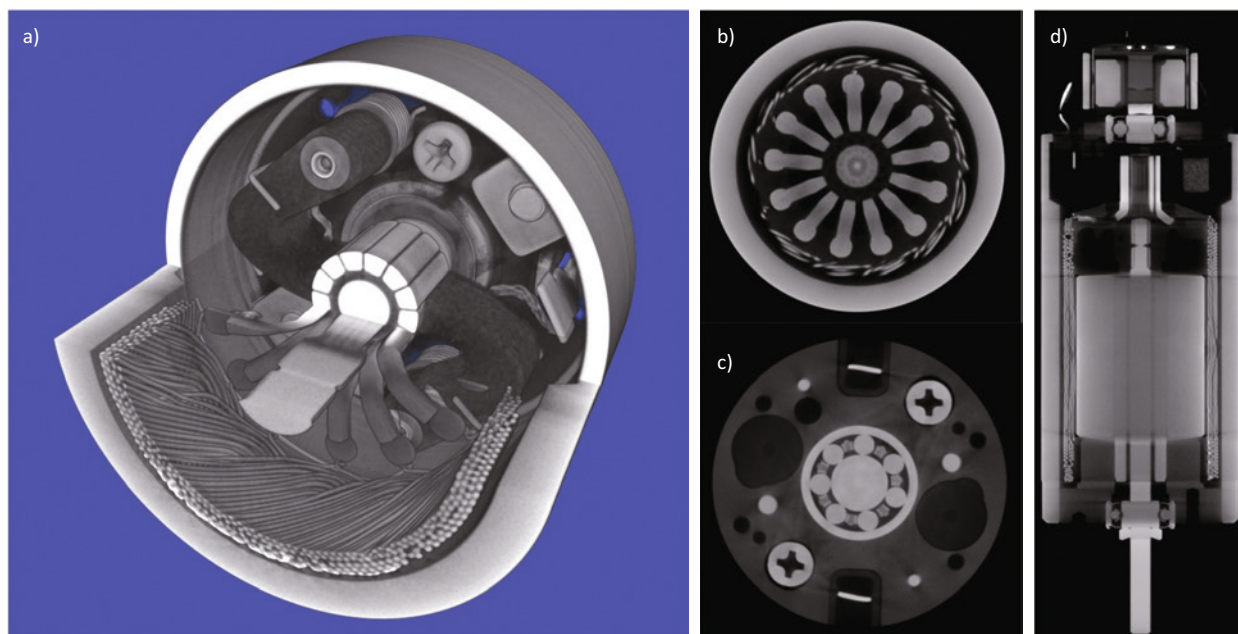
### 9.2.2.1 Werkstückvisualisierung und Inspektion der Materialstruktur

Bei Werkstücken mit hohen Dichteunterschieden (Bild 9.15a) ist das Erkennen von Details in Intensitätsbildern ohne Vorverarbeitung (Bild 9.15b) nur schwierig möglich. Funktionen zur lokalen Kontrasterhöhung erhöhen die Erkennbarkeit von Details deutlich (Bild 9.15c).

Die klassische Inspektion mittels Röntgen-Computertomografie basiert auf der Auswertung von Volumendaten. Die Berechnung von Grenzflächenpunkten ist für diese Form der Materialanalyse zwar nicht zwingend notwendig, ermöglicht jedoch den Abgleich mit Nominaldaten und damit die automatische Erzeugung von 3D-Ansichten gerendeter Volumen (Bild 9.16a) sowie 2D-Volumenschnitten (Bild 9.16b bis Bild 9.16d).

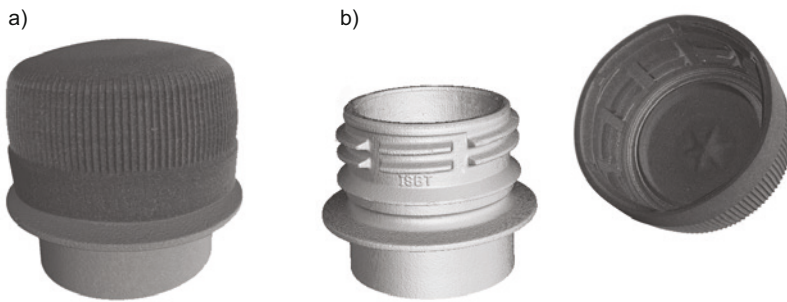
Auch das Speichern von Videos zu Dokumentationszwecken ist möglich (Beispiel unter [www.werth.de/CT-Film](http://www.werth.de/CT-Film)). Die Beträge der Voxel sind proportional zur lokalen Abschwächungsfähigkeit des Materials und werden als Grauwerte dargestellt. Je stärker das Material die Röntgenstrahlung abschwächt, desto höher ist der gemessene Wert und desto heller die Darstellung des Voxels. Unterschiedlich stark absorbierende Materialien oder Dichteunterschiede innerhalb eines Materials lassen sich hiermit darstellen und zerstörungsfrei inspizieren.

Verschiedene Funktionszustände einer Baugruppe können mit derselben Software visualisiert werden. Das virtuelle Demontieren (Bild 9.17) von Baugruppen ermöglicht die Überprüfung der Einzelkomponenten zum Beispiel auf Verschleiß. Das zeit- und kostenintensive reale Demontieren von Baugruppen kann entfallen (Christoph 2017).



**Bild 9.16** Visualisierung der Volumendaten mittels a) 3D-Rendering und b) bis d) verschiedene Schnittansichten (Christoph 2017)



**Bild 9.17**

a) montierte Baugruppe und b) virtuell demontierte Komponenten (Christoph 2017)

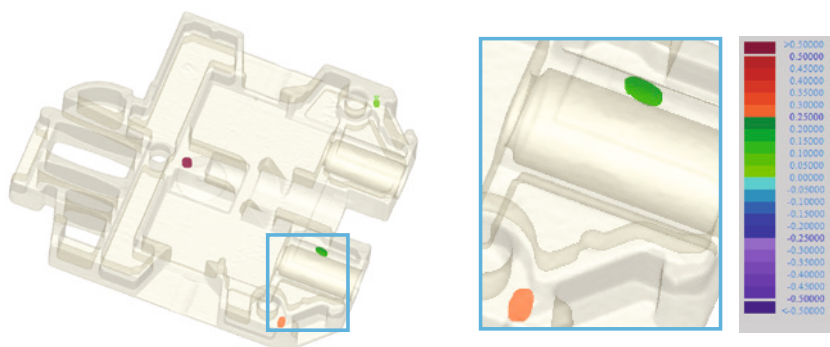
Auch die Überprüfung von Leiterplatten und Halbleiterbaugruppen beispielsweise zur Prüfung der Durchkontaktierung ist prinzipiell möglich. Häufig können diese nicht vollständig im Messbereich gedreht werden, da diese hierbei aufgrund des großen Aspektverhältnisses entweder mit der Röntgenröhre oder mit dem Röntgendetektor kollidieren würden. Aus diesem Grund werden hierfür in der Regel Laminografie-Trajektorien eingesetzt (siehe Abschnitt 9.6.2.4).

### 9.2.2.2 Automatische Analyse innen- und außenliegender Störungen

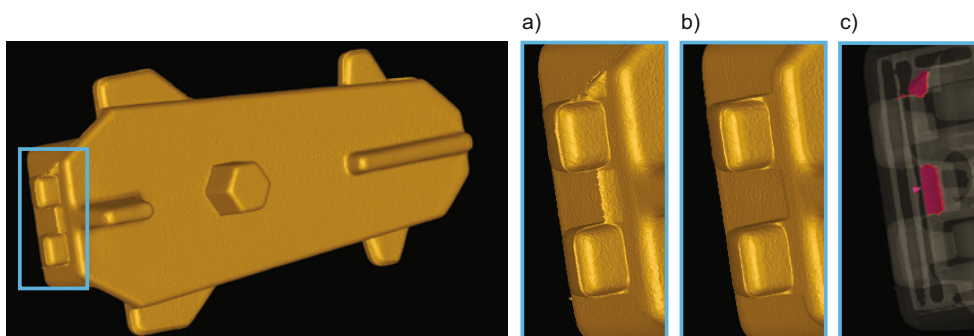
Spezielle Softwarewerkzeuge dienen zur automatischen Identifikation und Klassifizierung innen- und außenliegender Störungen. Ein Beispiel hierfür sind Software-

module zur Analyse von Lunkern und Einschlüssen. Die Störungen werden basierend auf einer das Werkstück und die Störungen umfassenden triangulierten Gesamtpunktwolke erkannt und nach ihrer Größe klassifiziert. Als Ergebnis wird die Anzahl der Lunker je Klasse ausgegeben. Optional können die identifizierten Störungen entsprechend ihrer Größe unter Berücksichtigung einer benutzerdefinierbaren Toleranz farbcodiert dargestellt werden (Bild 9.18).

Auch die Überprüfung des Werkstücks auf Risse und Grate kann auf Basis einer zuvor bestimmten Messpunktwolke (Bild 9.19a) erfolgen. Hierzu wird in einem ersten Schritt eine gratfreie Punktwolke (Bild 9.19b) berechnet. Aus ursprünglicher und gratfreier Punktwolke werden die störenden Grate anschließend unter Berücksichtigung der zulässigen Gratlänge ermittelt. Analog zur

**Bild 9.18**

Lunkerdarstellung: Lufteneinschlüsse werden automatisch gefunden und nach Größe farbcodiert dargestellt.

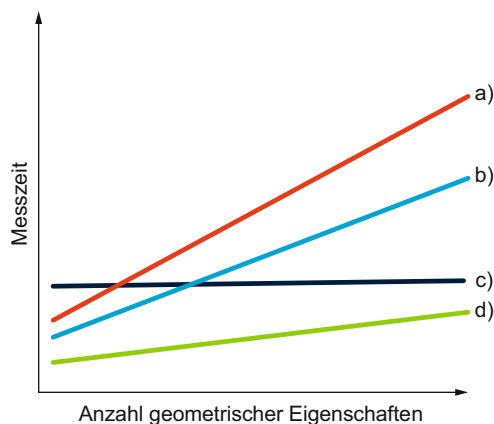


**Bild 9.19** Berechnung der farbcodierten Gratdarstellung: Aus dem gratbehafteten Werkstück a) wird mittels Filterung ein gratfreies Werkstück b) berechnet. Grate außerhalb Toleranz werden anschließend farbcodiert c) dargestellt.

Lunkererkennung ist auch hier eine farbcodierte Darstellung der außer Toleranz liegenden Grate möglich (Bild 9.19c).

### 9.2.3 Messen der Werkstückgeometrie

Die Röntgen-Computertomografie ermöglicht die vollständige, zerstörungsfreie Messung aller innen- und außenliegenden geometrischen Eigenschaften. Die Bedeutung kurzer Messzeiten bei gleichzeitig ausreichend geringer Messunsicherheit nimmt hierbei immer mehr an Bedeutung zu. Beispielsweise erfordert die 100-Prozent-Überwachung eines Fertigungsprozesses im Mehrschichtbetrieb Messzeiten von wenigen Sekunden pro Werkstück. Die Forderung nach Rückführbarkeit der hierbei ermittelten Messergebnisse ist hierbei von zentraler Bedeutung und wird in Abschnitt 9.7 näher behandelt. In Bild 9.20 ist die Messzeit als Funktion der Anzahl zu messender geometrischer Eigenschaften für verschiedene Messprinzipien schematisch dargestellt.



**Bild 9.20** Messzeit in Abhängigkeit von der Anzahl auszuwertender geometrischer Eigenschaften mit a) Taster, b) Multisensorik, c) Röntgentomografie und d) Bildverarbeitung

Sowohl bei konventionellen taktilen als auch bei Multisensorikkoordinatengeräten hängt die Messzeit maßgeblich von der Anzahl zu messender geometrischer Eigenschaften ab. Auch bei schnellen Koordinatenmessgeräten mit Bildverarbeitungssensorik nimmt die Messzeit in erster Näherung linear mit der Anzahl zu messender geometrischer Eigenschaften zu. Im Gegensatz hierzu ist die Messzeit beim Messen mittels Röntgen-Computertomografie hiervon im Wesentlichen unabhängig. In den letzten Jahren konnten die Messzeiten nochmals deutlich reduziert werden. Die Zeit für eine „Im Bild“-Tomografie beträgt bei den meisten Anwendungen nun typischerweise zwischen einigen 10 Sekunden und 10 Minuten pro

Werkstück. Lediglich Messaufgaben mit sehr hohen Anforderungen an Strukturauflösung oder schwer zu durchstrahlenden Materialien erfordern deutlich längere Messzeiten von bis zu 2 Stunden.

Im Vergleich zu mit klassischen Sensoren aufgenommenen Punktwolken ist die Punktzahl bei Messungen mittels Röntgen-Computertomografie sehr groß. Die Form der gemessenen Geometrien wird durch eine CT-Punktwolke aufgrund der hohen Punktzahl deutlich besser beschrieben. Große Formabweichungen wirken sich geringer auf die Messergebnisse aus, da viele Punkte in die Berechnung der Ausgleichselemente einfließen. Die hohe Punktzahl wirkt sich zusätzlich positiv auf die Reproduzierbarkeit der hieraus ermittelten geometrischen Eigenschaften aus.

#### 9.2.3.1 Maßliche Auswertung des Werkstücks

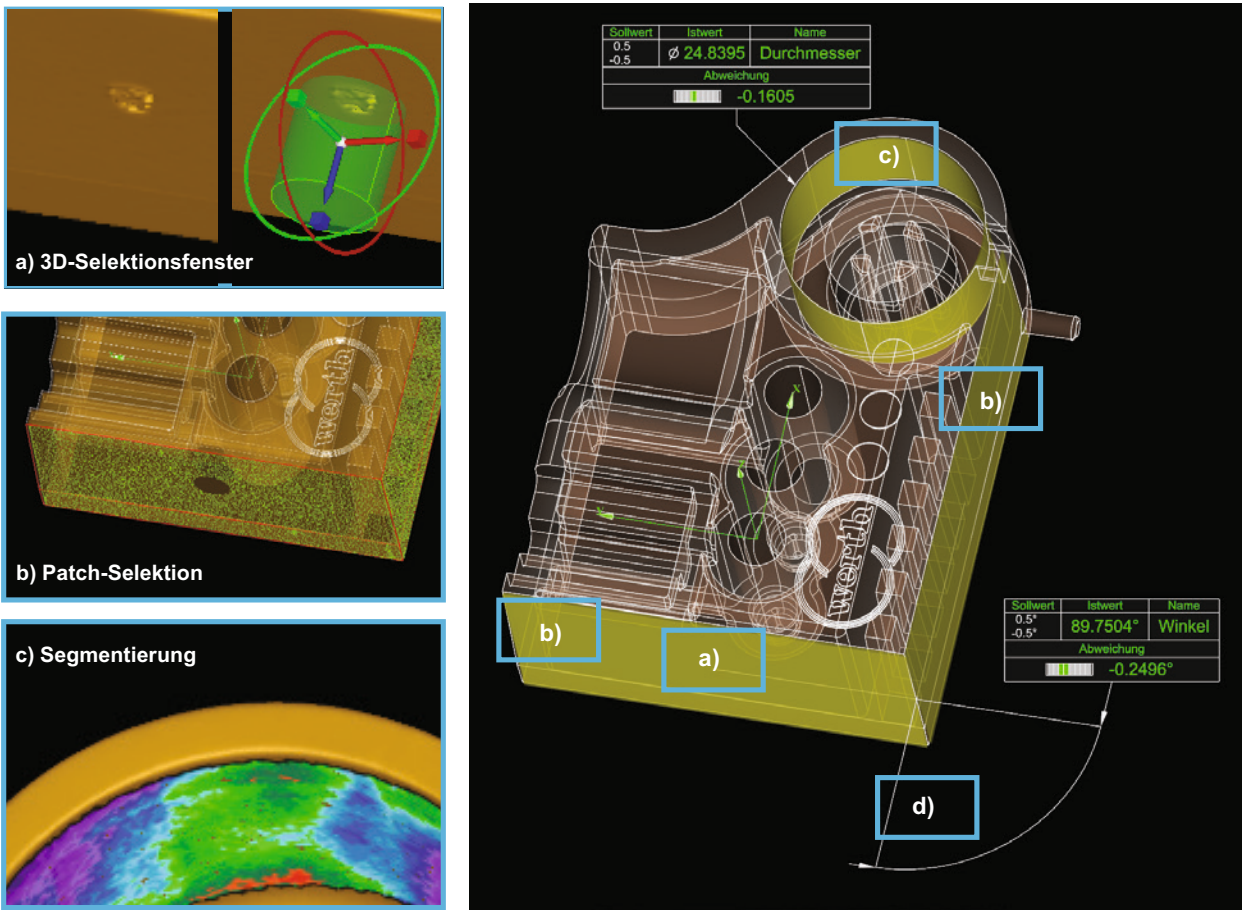
Die Bestimmung geometrischer Eigenschaften erfolgt auf Basis zuvor berechneter Grenzflächenpunkte. In einem ersten Schritt werden hierzu aus den Messpunkten Regelgeometrieelemente wie Geraden, Ebenen oder Zylinder mittels Methoden der Ausgleichsrechnung bestimmt. Störende Objektbereiche wie Anspritzpunkte lassen sich z. B. mittels 3D-Selektionsfenstern aus einer Messpunktwolke ausschneiden (Bild 9.21a).

Für die anschließende Selektion der für die Berechnung der Regelgeometrieelemente relevanten Grenzflächenpunkte kommen, abhängig von den zur Verfügung stehenden Informationen über das Werkstück, verschiedene Verfahren zum Einsatz.

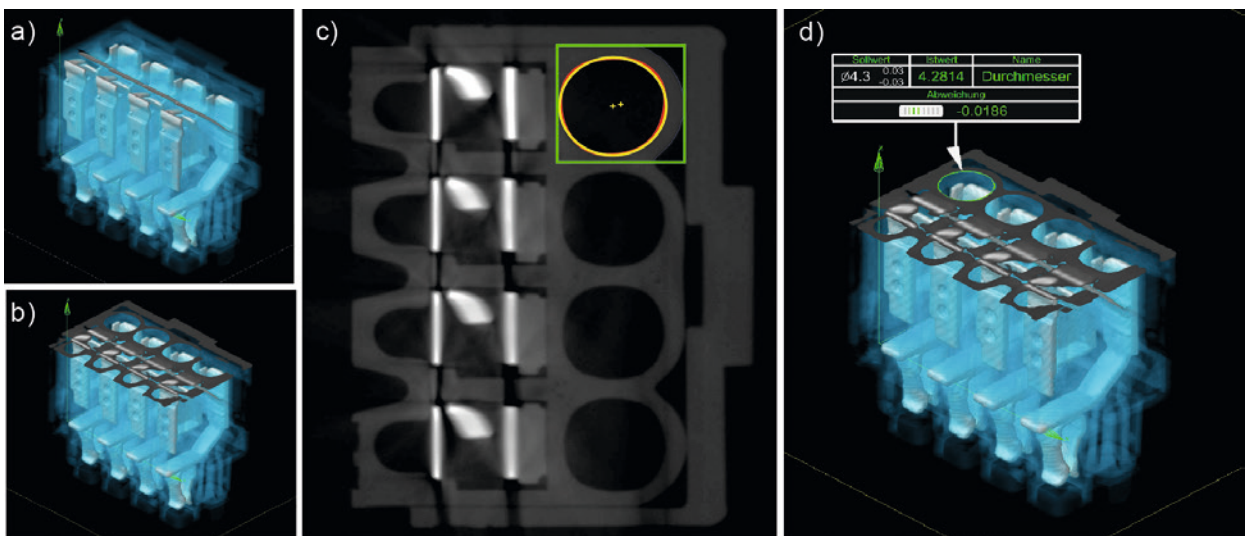
Liegt ein 3D-CAD-Modell des Werkstücks vor, kann die Auswahl der Grenzflächenpunkte besonders einfach durch Anwählen des zugehörigen CAD-Elements erfolgen (Patchselektion, Bild 9.21b). Unter Berücksichtigung von vorgegebenen Randabständen werden alle Messpunkte selektiert, die dem angewählten CAD-Patch geometrisch zugeordnet sind. In Anlehnung an die Vorgehensweise beim taktilen Messen kann die Punktauswahl mithilfe einer vorgegebenen Punkteverteilung auf dem CAD-Patch erfolgen. Da hierbei jedoch die meisten Informationen über die Werkstückoberfläche verworfen werden, sollte diese Methode nur in Ausnahmefällen, beispielsweise zum Vergleich einer CT-Punktwolke mit einer taktilen Referenzmessung, eingesetzt werden.

Liegt kein CAD-Modell vor, erfolgt die Selektion der Punkte alternativ anhand einer triangulierten Punktwolke, z. B. mithilfe einer automatischen Zerlegung in Regelgeometrieelemente (Segmentierung, Bild 9.21c): Unter Vorgabe eines zu messenden Regelgeometrieelements, beispielsweise eines Zylinders, werden ausgehend von einem Startpunkt solange Grenzflächenpunkte in dessen Umgebung hinzugenommen, bis sich die Formabweichung





**Bild 9.21** Links: Verfahren zur Selektion von Grenzflächenpunkten: Ausgrenzen eines Anspritzpunktes mittels a) 3D-Selektionsfenster, b) CAD-Patch-Selektion von Punkten zweier Ebenen und c) Segmentierung eines Zylinders basierend auf einer triangulierten Punktwolke des Werkstücks. Rechts: Aus den Messpunkten berechnete Regelgeometrieelemente und hieraus berechnete geometrische Eigenschaften



**Bild 9.22** Auswertung von geometrischen Eigenschaften anhand von Volumenschnitten



des Geometrieelements deutlich vergrößert. Die Vorgabe eines Randabstands ist sinnvoll, um in Übergangsbereichen zu anderen Geometrieelementen befindliche Punkte aus der Selektion auszuschließen.

Sowohl bei Verwendung der 3D-CAD-Patchselektion als auch bei der Segmentierung erfolgt die Berechnung des Regelgeometrieelements anschließend automatisch mit nahezu maximaler Punktzahl (Bild 9.1d). Die gesuchte geometrische Eigenschaft entspricht entweder einem Parameter eines Regelgeometrieelements, beispielsweise dem Durchmesser eines Zylinders (Bild 9.21), oder wird durch Verknüpfung mehrerer Regelgeometrieelemente bestimmt, beispielsweise durch Berechnung des Winkels zwischen zwei Ebenen (Bild 9.21).

Eine Alternative ist die Auswertung von Volumenschnitten mittels 2D-Bildverarbeitung, welche nachfolgend anhand von Bild 9.22 erläutert wird. Zunächst muss die Ebene, in dem der 2D-Volumenschnitt erzeugt werden soll, definiert werden (Bild 9.22a). Dies erfolgt beispielsweise manuell, anhand eines gerenderten Volumens, oder automatisiert, anhand von Patches eines eingepassten CAD-Modells. Jeder Pixelwert eines 2D-Volumenschnitts (Bild 9.22b) wird mittels mathematischer Verfahren aus den benachbarten Voxelwerten im Voxelvolumen berechnet. Die weiteren Verarbeitungsschritte erfolgen mittels Methoden der 2D-Bildverarbeitung. Nach einer optionalen Filterung des Volumenschnitts werden Grenzflächenpunkte (Bild 9.22c, rot) und Regelgeometrieelemente (Bild 9.22c, gelb) bestimmt und hieraus geometrischen Eigenschaften d) berechnet.

### 9.2.3.2 3D-Soll-Ist-Vergleich

Die Berechnung eines Soll-Ist-Vergleiches von Nominaldaten wie einem CAD-Modell oder einer Meister-teilmessung zu einer Ist-Geometrie beschrieben durch eine CT-Messpunktewolke findet breite Anwendung. Nicht nur für Freiformflächen, sondern auch zur Bestimmung der Formabweichung an Regelgeometrieelementen oder Paarungsgeometrien wie Lochbildern und formschlüssigen Verbindungen können Abweichung berechnet, dargestellt und analysiert werden. Nachdem Soll- und Ist-Daten aufeinander eingepasst oder abgeglichen wurden erfolgt die Berechnung der Abweichung in wenigen Bedienschritten. Die Abweichungen können optional abhängig von Vorzeichen, Betrag und Toleranzeinhaltung farbcodiert dargestellt werden (Bild 9.23).

Die Toleranzen können entweder global oder einzelnen Geometrieelementen, z. B. anhand von CAD-Patches oder zuvor berechneten Regelgeometrieelementen, zugeordnet werden. Toleranz-Fit-Funktionen ermöglichen die Berücksichtigung der lokal definierten Toleranzen bei der Lageoptimierung, sodass die hierdurch definierten Zonen

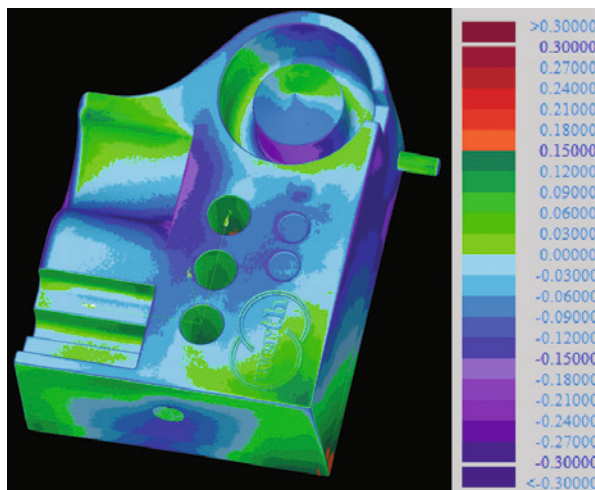
möglichst wenig ausgenutzt bzw. überschritten werden (Christoph 2017).

### 9.2.4 Gemeinsame Lösung von Inspektions- und Messaufgaben

Die Integration der für Inspektions- und Messaufgaben notwendigen Softwaremodule in ein gemeinsames Softwarepaket ermöglicht nicht nur rückführbare Ergebnisse, sondern auch kurze Berechnungszeiten. Beispielsweise entfallen bei Verwendung eines Softwarepakets zeitintensive Speicher- und Ladevorgänge die zudem häufig nicht automatisierbar sind. Alle Inspektions- und Messergebnisse können in einer Grafik dargestellt (Bild 9.24) und Problemstellen schnell identifiziert werden.

## 9.3 Abbildungsgeometrie

Das Ziel der Tomografie ist die volumetrische Abbildung aller zu messenden geometrischen Eigenschaften des Messobjekts in möglichst kurzer Messzeit mit für die Messaufgabe ausreichend geringen Artefakten (Bildfehlern) und einer ausreichenden (nicht immer möglichst hohen) Struktur- und Ortsauflösung. Sowohl der zur Verfügung stehende Messbereich als auch die erreichbare Strukturauflösung hängen hierbei von der eingestellten Vergrößerung ab.



**Bild 9.23** Farbcodierte Darstellung der Abweichungen zwischen CAD und Punktewolke

# Stichwortverzeichnis

## Symbole

1D-Messmaschine 250  
2,4 GHz-Frequenztechnologie 660  
2D-Bildverarbeitung 474  
2D-Messmaschinen 265  
2D-Visualisierung  
– bei Ultraschalluntersuchungen 622  
3D-Distanzoffset-Bestimmung 528  
3D-Farbkartenerstellung 657  
3D-Formfehler 664  
3D-Koordinatenmessgerät 268  
3D-Koordinatenmesssysteme 286  
3D-Messmaschinen  
– Steuerung 270  
3D-Messverfahren 256  
3D-Modelle 98  
3D-Punktwolke 389  
5M 379  
6D-Datenerfassung 529  
6DOF 557  
6D-Sensoren 530  
6D-Visualisierung 530  
8D-Report 97

## A

AAS *siehe* Asset Administration Shell  
Abbildung 501, 504, 510  
Abbildungsfehler 503, 504, 549  
Abbildungsgeometrie  
– Messbereich 475  
– Optimierung 477  
– Ortsauflösung 475  
– Strukturauflösung 475  
– Vergrößerung 475  
Abbildungsmaßstab 502, 503, 545  
Abrissverfahren 604  
Absolutdistanzmesser 522, 527  
Abstandsmessung 189, 255  
Abstandssensoren 189, 301, 302, 303, 314  
Abstand-Verstärkung-Größe-Verfahren 621, 623  
ADM-Schema 523  
Advanced Product Quality Planning 98  
Advanced Quality Data Exchange Format 697

Ähnlichkeitstransformation 557  
AIAG *siehe* Automotive Industry Action Group  
AIAG MSA 105, 109, 209, 221, 230  
aktive Thermografie 631  
Aktualität  
– Datenqualitätsdimensionen 778  
Akzeptanzgrenze 166  
Akzeptanzwinkel 423  
Allgemeintoleranz *siehe* Form und Lage geometrischer Elemente; *siehe* Größenmaß  
Alpha-Fehler 166  
Analyse-Software 81  
Analysetechniken 787  
Anode 462  
ANOVA 83  
ANOVA-Analyse 170  
ANOVA-Methode 125  
Antastabweichung 192, 193, 303, 304, 305, 311, 492, 512, 559  
Antastkraft 308  
Antaststrategien 603  
Antastung 287  
Apertur 502, 503, 504, 510, 511  
APQP *siehe* Advanced Product Quality Planning  
AQDEF *siehe* Advanced Quality Data Exchange Format  
Arbeitsabstand 303, 304, 305, 502, 503, 504, 506, 514  
Arbeitspunkt 227  
Arbeitsvorbereitung 196  
ARL *siehe* Average Run Length  
Asset Administration Shell 683  
Atline-Prüfungen 18  
Attributprüfungen 18  
Auditdaten  
– Datenart 778  
Audits 98  
Auflösung 133, 502, 510, 511, 512, 514, 578  
Auflösungsvermögen 418, 440  
Ausreißer 429  
Auswertung 196  
Autoencoder 28  
Autokollimator 256  
automatisierter Messdatentransfer 9  
Automatisierung 381  
– Greifersysteme 389

- Handhabung 381, 382, 383
- sortieren 382
- Automotive Industry Action Group 81, 93
- Average-Range-Methode (ARM) 125
- Average Run Length 31
- AVG-Diagramm 623
- axiale Auflösung 578
- Azimuth 594

## B

- Batchfingerprinting 751
- Batch-Maturity 751
- Batwings 438
- Bauteilausrichtung 601
- Bauteilpositionierung 598
- Bauweise 310, 311, 318
- Bediener 134
- Bedienereinfluss 125
- Belastungen
  - thermische 390
- Beleuchtung 503, 504, 505, 506, 547
- berührungslos 301, 303, 308, 514
- bestärkendes Lernen
  - maschinelles Lernen 780
- Bestätigung 122
- Best-Fit-Applikation 657
- Beta-Fehler 166
- Betrachtungswinkel 380
- Betriebsmodelle 681
- Bias 174
- Big Data 752, 777
- Bildmessung 551
- Bildverarbeitung 499, 501, 512, 515
  - Abbildungsmaßstab 395
  - Bilderfassung 385
  - Bildmerkmale 386
  - Binärbild 394, 397
  - Entscheidungsfindung 387
  - Kalibrierbild 395
  - Merkmalsextraktion 386
  - Objekterkennung 386
  - Otsu 396
  - Thermografie 637
  - Vorverarbeitung 385
- Bildverarbeitungsfilter 509
- Bildverarbeitungssensoren 301, 302, 303, 304, 305, 308, 309, 311, 312, 313, 314, 315, 317
- Bildzuordnung 545
- Binning 483
- Blackbox-Modelle 756
- Bleiglas 485
- Blickwinkel 382
- Blitzthermografie 641
- Bolzen-Beispielanlage 607
- Bosch Heft 10 211
- Brennfleckgröße 477, 478, 479, 480
- Brinellhärte 352

- Bügelmessschraube 243
- Bündelausgleichung 554
- Bypass-Zelle 611

## C

- CAD-basierte Messsoftware 652
- CAD-Daten 198
- CAD-Modell 469
  - einpassen 469
- CAD-to-Part-Vergleich 657
- Calibration Data Exchange-Format 200, 684
- calibration of reference 174
- Capability of Measurement Processes 118
- CAQ-System 98
- Cäsiumjodid 482
- CCD-Sensor 506, 507, 546
- chromatische Sensoren 304, 305, 312, 313, 314, 315
- Clusteranalyse 28
  - maschinelles Lernen 780
- CMC-Einträge 285
- CMOS-Sensor 507, 546, 547
- Coherence Scanning Interferometry 413
- Color-Maps 657
- Companion Specification 686
- Comptoneffekt *siehe* Wechselwirkungsprozesse
- Computertomografie 190, 288, 289, 290, 301, 302, 306, 307, 310, 311, 316, 317, 461, 462
- Computertomograph 720
- Condition-Monitoring 767
- Confidential Computing 687
- Conformance 790
- Convolutional Neural Network 393
- CT *siehe* Computertomografie
- cyberphysikalische Sensorsysteme 680

## D

- Data Mining 788, 795
- Data Warehouse 791
- Datenanalyse 787
- Datenanalysemethoden 754
- Datenanalyse-Trichter 779
- Datenaufbereitung 794
- Datenaustausch 688, 791
  - unternehmensübergreifender 687
- Datenbanken 745
- Datenbereinigung 749
- Datenerfassung 196
- Datenformate 693
- Datenheterogenität 677
- Datenhoheit
  - Sicherung der 687
- Datenmanagement 388, 678
- Datenmodell 695
- Datenqualität 794
- Datenqualitätsdimensionen 778
- Datenquellen 791

- Datenschnittstelle 744  
Datenstruktur 701  
Datentreuhänder-Plattform 688  
Datentypen 778  
Datenvalidierung 747  
Datenverarbeitung 270  
Datenverfügbarkeit 794  
DCC *siehe* Digital Calibration Certificate  
Deep Learning 495  
Defekterkennung 454  
defektselektiv 642, 643  
Deformationsmessung 562  
Descriptive Analytics 33, 766  
– Data Analytics-Modell 779  
Design der Infrastruktur 682  
Diagnostic Analytics 33, 766  
– Data Analytics-Modell 779  
DIC 552  
Dichtheitsanforderung 327  
Dichtheitsprüfung 319  
Dickenmessung 623  
Digital Calibration Certificate 684  
digitaler Kalibrierschein 684  
digitaler Wandel 774  
Digitale Transformation 774  
– digitaler Wandel 775  
digital image correlation 552  
Digitalisierung 765  
– digitaler Wandel 774  
Digitalkamera 546  
Digital Twinning 9  
Digitisierung  
– digitaler Wandel 774  
DIN 32937 31, 107  
DIN 55350-15 93  
DIN EN ISO 5393 372  
DIN EN ISO 9000:2015 81  
DIN EN ISO 9001 107  
DIN EN ISO 10012 108  
DIN EN ISO 14253-1 106  
DIN ISO 286-1 227  
DIN ISO 22514-2 230  
Direkte Lineare Transformation 554  
Discovery 789  
Disruption  
– digitaler Wandel 775  
Distanz-Amplituden-Korrektion (DAK)-  
Verfahren 623  
Distanzmesser 523  
Distanzmessung 519, 593  
DLT 554  
DMIS-Standard 198  
DOE *siehe* statistische Versuchsplanung  
Dokumentation 20, 27  
Dokumentenmanagement 98  
Doppler-OCT 581  
drahtlose Messsysteme 9  
Drehachse 482  
Drehgeber 248  
Drehmoment 733  
Drehmomentschlüssel 362  
Drehmomentschraubwerkzeuge 371  
Drehschrittzahl 478  
Drehwinkelmessung 365  
Dreibein-Messwerk 654  
Drift 176  
Druckabfallmessung 334  
Druckanstiegsverfahren 338  
Druckmessmethoden 334  
Druckmessung 336  
Dunkelfeld-Auflicht 503, 504, 505, 506  
Durchflussmessung 338  
Durchflusssensoren 340  
Durchlicht 504  
Durchschallungsverfahren 617  
Dynamic Depth Focussing 620
- ## E
- Ebenheit 259, 260, 733  
Ebenheitsmessabweichung 559  
Ebenheitsmessung 407  
Edge-Devices 681  
Effusivität 633  
Eigenfilterung 480  
Eignungserklärung 82  
Eignungsindex nach VDA Band 5 231  
Eignungsindizes  
– Grenzwerte 209  
Eignungskennwerte 89, 224, 716  
Eignungsnachweis 81, 221  
– für Messprozesse 115  
– gemäß VDA 5 129  
– Kennwerte 133  
– Vorgehensweise 168  
Eindringprüfung 390  
– fluoreszierende 393  
– Prüfmittel 391  
Einfachprüfwerkstück 713  
Einflussparameter 380  
Einhüllende 415  
Elevation 594  
Ellipsenmessung 551  
Emissionskoeffizient 631  
EMPB *siehe* Erstmusterprüfbericht  
Endkontrolle von Bauteilen 651  
Enhancement 790  
Entscheidungsbäume 755  
Epipolarometrie 555  
Ereignisprotokolle 789  
Erfolgsfaktoren 775  
Erodierbearbeitung 202  
Erschöpfung 380  
Erstbemusterung 93  
Erstmusterprüfbericht 93  
– digitaler 94



erweiterte Messunsicherheit 133  
 Event Logs 789

## F

Fähigkeitsindex 119  
 Fähigkeitsnachweis 120  
 – gemäß Firmenrichtlinie 120  
 Fähigkeitsuntersuchung gemäß MSA 128  
 Failure Mode and Effects Analysis 97  
 FAIR-Prinzipien 677, 678  
 Feature-based Matching 552  
 Fehlentscheidung 381  
 Fehlerkosten 21  
 Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse 17  
 Feintaster 245  
 fertigungsferne Messung 7  
 Fertigungsintegration 17  
 Fertigungskette 16  
 fertigungsnahe Messung 7  
 Fertigungsprozessstreuung 229, 230  
 Fertigungsregelkreis 202  
 Fertigungssystem 202  
 Fertigungsüberwachung 514, 712  
 Fertigungszelle 201  
 Filament 480  
 Fine Tolerances (FT)-Regelung 214  
 Firmenrichtlinien 110  
 Fisheye-Kamera 546  
 Flächendetektor 461, 465  
 Flächenform 733  
 Flächentexturparameter 433  
 Fluchtfernrohr 259  
 FMEA 17 *siehe* Failure Mode and Effects Analysis  
 Fokussierspule 480  
 Fokusvariationsensoren 303, 305, 314  
 Fokusvariationsverfahren 511, 513, 514  
 Formabweichung 492  
 Formiergasleckprüfung 345  
 Formmessgeräte 185  
 Formmessung 257  
 Formtoleranzen 733  
 Form und Lage geometrischer Elemente 56  
 – Allgmeintoleranz 76  
 – Bezug/Bezüge 61  
 – Situationselemente 62  
 – Zeichnungseintragung 61  
 – Bezugssystem 66, 68  
 – Freiheitsgrad 67  
 – Freiheitsgradbindung 67  
 – Koordinatensystem 68  
 – Formtoleranz 60  
 – Allgmeintoleranz 61  
 – Ebenheit 60  
 – Ebenheitsabweichung 60  
 – Formabweichung 60  
 – Rundheit 61

– Rundheitsabweichung 61  
 – Toleranzgröße festlegen 61  
 – Lauftoleranzen 73  
 – Gesamtrundlauf – radial 75  
 – Rundlauf – axial 74  
 – Rundlauf in spezifizierter Richtung 75  
 – Rundlauf – radial 73  
 – Ortstoleranz 69  
 – Flächenprofil 71  
 – Flächenprofilabweichung 73  
 – Koaxialität 70  
 – Koaxialitätsabweichung 70  
 – Linienprofil 71  
 – Ortsabweichung 69  
 – Position 69  
 – Positionsabweichung 69  
 – Symmetrie 71  
 – Richtungstoleranz 63  
 – Parallelität 64  
 – Parallelitätsabweichung 64  
 – Rechtwinkligkeit 65  
 – Richtungsabweichung 64  
 – Toleranzindikator 58  
 – Bezüge und Bezugssysteme 60  
 – Symbole für geometrische Eigenschaften 58  
 – Toleranzzone und Parameter 58  
 – Toleranzzonen 59  
 – Zeichnungseintragung 58, 60  
 Form- und Lageprüfung 378  
 FPGA 547  
 Freiformfläche 565  
 Frequency Domain OCT 576  
 Frequenzanalyse 580  
 Fühlhebelsmessgerät 245  
 Führungssysteme 269  
 Funktechnologie 659

## G

Gadoliniumoxysulfid 482  
 Gasturbinen 390  
 – Turbinenschaufeln 390  
 Gaußfilter 430  
 gefilterte Rückprojektion 466  
 – Genauigkeit 303, 304, 307, 502, 507, 511, 558, 661  
 Geometrieelement  
 – integrales 60  
 – zusammengesetztes 72  
 – zentrales 60  
 Geometriekorrektur 484  
 geometrische Eigenschaft 472  
 geometrische Produktspezifikation 39, 378  
 – Normensystem 40  
 Geradheit 258, 733  
 Geradheitsmessung 258  
 Glühwendel 480  
 Golden Device 332  
 GPS *siehe* geometrische Produktspezifikation



GPS-Grundsatz  
 – der allgemeinen Spezifikation 55  
 – der bestimmenden Zeichnung 42  
 – der Dualität 45  
 – der Funktionsbeherrschung 44  
 – der Referenzbedingung 44  
 – der Unabhängigkeit 43  
 – der Verantwortung 47  
 – des Aufrufens 42  
 – des Geometrieelementes 43  
 – des Standards (Default) 44  
 – Operatorkonzept 47  
 grafische Benutzeroberfläche 399  
 Grenzflächenpunkte 467  
 – Punktzahl 472  
 – Selektion 473  
 Größenmaß 47  
 – Allgemeintoleranz 54  
 – Grenzmaße festlegen 54  
 – spezifizieren 54  
 – Toleranzen festlegen 54  
 – Toleranzen für Normteile 56  
 – Toleranzsystem 56  
 – Zeichnungseintragung 48  
 Größenmaßelement 47  
 – Kugel 48  
 – Parallelebenenpaar 48  
 – Zylinder 47  
 Größenmaßmerkmal 49  
 – Gauß-Element 51  
 – Größenmaß der kleinsten Abweichungsquadrate 51  
 – Hüllbedingung 52  
 – Maß des größten einschreibbaren Geometrieelementes 51  
 – Maß des Hüllelements 50  
 – Maß des kleinsten umschreibbaren Geometrieelementes 50  
 – Maß des Pferchelementes 51  
 – Paarungsmaß 50, 51  
 – wirksames Größenmaß 50, 51  
 – Zweipunktgrößenmaß 49  
 Großverzahnungen 293  
 GUI *siehe* grafische Benutzeroberfläche  
 GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) 118, 280, 281, 282, 283, 297, 667, 724  
 GUM Typ B 175

## H

Handmessgeräte 242  
 Härtemessverfahren 354  
 Härteprüfung 351  
 Heeoeffekt 480  
 Helium Bombing 345  
 Heliumleckprüfung 342  
 Hellfeld-Auflicht 504, 505  
 Hintergrundkorrektur 580  
 Hochpräzisionsmesstaster 654  
 Höhen-Basis-Verhältnis 558  
 Höhenmessgerät 251

Honstruktur 420  
 Hüllbedingung *siehe* Größenmaßmerkmal

## I

IATF 16949:2016 81, 93, 108  
 ideales Gasgesetz 323  
 image matching 545  
 Impuls-Echo-Verfahren 617  
 Impulsschrauber 363  
 Impulsthermografie 641  
 Induktionsthermografie 642  
 Industrie 4.0 388, 675  
 Industrienickarmroboter *siehe* Roboter  
 industrielle Revolution 381  
 Inertialsensoren 529  
 Informationsressourcen 122  
 Infrarot 546  
 Infrarotkamera 633  
 Inklinometer 254  
 Inline-Messung 7  
 Inline-Prüfungen 18  
 Innenmessschrauben 244  
 In-Prozess-Messung 8  
 Inspektion 469, 470  
 – Baugruppen virtuell demontieren 470  
 – Grate 471  
 – Lunker 471  
 – Materialproben 481  
 – Risse 471  
 – Störungen 471  
 Instrumenten-Transfer-Funktion 444  
 Integrationszeit 633  
 Intelligent Machine Control 105  
 Intel Software Guard Extensions 687  
 Intensitätsbild 465  
 Interessensgruppen 676  
 Interest-Operator 552  
 Interferenz 408  
 Interferenzdetektion 576  
 Interferenzstreifen 412  
 Interferometer 519  
 Interferometrie 408  
 interferometrische Sensoren 301, 306, 312, 314  
 Internationales Wörterbuch der Metrologie 661  
 Internet of Production 33, 766  
 Inventardaten  
 – Datenart 778  
 IoT-Infrastrukturen 681  
 IoT-Stack 682  
 iqs Supply Chain Quality Center 98  
 IR-Kamera 633  
 Ishikawa-Diagramm 169, 379  
 ISO 10360-Reihe 272  
 ISO 16610 433  
 ISO 21920 433  
 ISO 22514-7 81  
 ISO 25178-1 433

ISO/TR 11462-4 84  
IT-Infrastruktur 26

## K

- Kalibrierdaten 199
- Kalibrieren 19
- Kalibrierintervalle 20
- Kalibrierpyramide 278, 279
- Kalibrierstatus 684
- Kalibrierung
  - Leckageprüfung 331
- Kalibrierungsmessungen
  - bei Lasertrackern 525
- Kalibrierunsicherheit 133
- Kamera
  - Consumer- 546
  - Highspeed- 546, 547
  - Industrie- 546
  - Mess- 547
  - Multispektral- 546
  - Spiegelreflex- 546
  - Stereo- 546
  - Thermal- 546
  - Time-of-flight- 546
- Kamerakalibrierung 544, 547, 549, 561
- Kamerasystem 377, 381, 393
  - Bildwiederholungsrate 384
  - CCD 384
  - CMOS 384
- Kappa-Koeffizient
  - Kappa nach Cohen 144
  - Kappa nach Fleiss 150
- Kappa nach Cohen
  - Alternativhypothese 146
  - Annahmekriterien 147
  - beobachtete Anteile 144
  - beobachtete Urteilkombinationen 144
  - Bestimmungsgleichung 145
  - Datenaufbereitung gemäß AIAG-Heuristik 147
  - erwartete Anteile 145
  - Fallbeispiel 147
  - Nullhypothese 146
  - Prüfgröße für den Signifikanztest 146
  - Rechenschema 144
  - Testentscheid 150
  - Varianz-Schätzer 146
  - Wahrscheinlichkeit P 146
- Kappa nach Fleiss
  - Alternativhypothese 152
  - Annahmekriterien 153
  - Anteil übereinstimmender Urteile 151
  - Anteil zufälliger Übereinstimmungen 151
  - Bestimmungsgleichung 151
  - Fallbeispiel 153
  - Nullhypothese 152
  - Prüfgröße für den Signifikanztest 152
  - Rechenschema 150
- Rechenschema für den Signifikanztest 152
- Standardabweichung 152
- Testentscheid 152
- Wahrscheinlichkeit P 152
- Kathode 462
- Kegelstrahlartefakte 483, 484, 486
- Kegelstrahlwinkel 484
- KFU *siehe* Kurzzeitfähigkeitsuntersuchung
- Kleinlängenmesser 251
- k-Linearisierung 580
- Klinometer 254
- KMG *siehe* Koordinatenmessgerät
- KMG-Kalibrierung 271
- Koaxialität 733
- Kohärenz 573
- Kohärenzlänge 415
- Kohärenztomographie 573
- Kollinearitätsgleichungen 554
- Kollisionskontrolle 657
- Kompaktgeräte 307, 311
- Konfidenzintervall 400
- konfokale Sensoren 305
- Konformitätsbewertung 14
- Konformitätsprüfung 106
- Konsistenz
  - Datenqualitätsdimensionen 778
- Konturbildverarbeitung 467, 509
- Konturmessgeräte 185, 719
- Kontursensoren 309
- Konversion
  - digitaler Wandel 774
- Koordinatenmessgerät 184, 478, 501, 502, 506, 511, 512, 514, 515, 719
- Koordinatenmesssysteme 184, 189
- Koordinatenmesstechnik 183
- Koordinatenmessungen 264
- Koordinatensystem 556
- Koplanaritätsbedingung 555
- Körperkanten 77
- Korrektheit
  - Datenqualitätsdimensionen 778
- Korrelationen 562
- Korrelationsanalysen 754
- Korrelogramm 411
- Kosten
  - qualitätsbezogene 21
- Kreisscan 462
- Kreuzkorrelationskoeffizient 552
- Kugelabstandsabweichung 193, 559
- künstliche Intelligenz 495, 765
- Kurzzeitfähigkeitsuntersuchung 707

## L

- Lagetoleranzen 733
- Lambert-Beer-Gesetz 465, 616
- Laminografie 471
- Längenkomparator 250

- Längenmaße 733  
 Längenmessabweichung 192, 310, 311, 312, 492, 512, 559, 560  
 Längenmessung 249, 276  
 Langzeitfähigkeit 716  
 Large-Scale-Metrology-Systeme 683  
 Laser-Anregung 643  
 Laserdurchstrahlschweißen 587  
 Laserinterferometer 249  
 Laserlichtschnittverfahren 553  
 Lasermaterialbearbeitung 585  
 Laserprojektion 548  
 Laserprozesskontrolle 584  
 Laserradar 591  
 Laserscanner 658  
 Laserscanning 657  
 Lasersensoren 302, 303, 304, 308, 309, 312, 313, 314, 315, 317  
 Laserthermografie 643  
 Lasertracker 185, 683  
 Laser-Triangulation 654  
 Lastenheft 112, 715  
 laterale Auflösung 578  
 Lateralsensoren 189  
 least-squares matching 552  
 Lebenszyklus von Messdaten 676  
 Leckagegrenzwerte  
 – massebezogene 328  
 Leckageprüfung 321  
 – mit Durchflussmessung 339  
 Leckagerate 322  
 Leckgeometrie 328  
 Leckprüfmethoden 333  
 Leckprüfung  
 – druckbasierte 338  
 Leckratenbestimmung 328  
 Leckströmung 325  
 LED-Marker 530  
 Leica-6D-Lasertrackersystem 538  
 Leitfaden MSA 81  
 lernende Fabrik  
 – zukunftsfähige Produktionssysteme 775  
 Lichtschnittverfahren 190  
 LIDAR 389  
 Linearachsen 477, 484  
 Linearencoder 248  
 lineare Interpolation 467  
 Linearitätsabweichung 134  
 Linearitätsstudie 128  
 Linienform 733  
 Linienscanner 535  
 Liniensensoren 190  
 Lobing 662  
 Lockin-Thermografie 641  
 lokale Kontrasterhöhung 470  
 LVDT-Sensor 246  
 LWIR 633
- M**
- Machine Learning 33, 766, 768  
 – Convolutional Neural Networks (CNN) 386  
 Machine-Learning-Algorithmen 33  
 Machine Vision 384  
 Makrofokusröhren 480  
 Manufacturing Execution System 745, 792  
 Mapping 622  
 Maschinelles Lernen 9  
 Maschinenabnahme 713  
 Maßabweichung 492  
 Massebilanzen 746  
 maßliche Prüfung 7  
 Maßverkörperung 185  
 Materialressourcen 122  
 Materialverteilung  
 – Prüfung der 453  
 Maximum Permissible Error (MPE) 492  
 Measurement Systems Analysis (MSA) 19, 109, 118  
 Medianfilter 431  
 Mehrfachmessung 217  
 Mehrkugeldistanznormal 493  
 Mehrmedienphotogrammetrie 550  
 Merkmale 378, 716  
 – einseitig begrenzte 221  
 Merkmalsauswertung 604  
 Merkmalsdetektor 552  
 Merkmalsextraktion 638  
 Merkmalspriorisierung 17  
 Merkmalstoleranz 111  
 MES *siehe* Manufacturing Execution System  
 Messabweichung 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 312, 313, 315, 485  
 – systematische 134, 485  
 – zufällige 485, 487  
 – zulässige 192  
 Message Queuing Telemetry Transport 685  
 Messbereich 475, 483, 484, 489  
 Messdatenerfassung 675, 743  
 Messdatenlebenszyklus 676  
 Messdatenspeicherung 743  
 Messdatenvalidierung 746  
 Messen 14, 106  
 Messergebnis 130  
 Messfehler *siehe* Messabweichung  
 Messfenster 475  
 Messgenauigkeit 492  
 Messgerät  
 – optisches 384  
 Messgeschwindigkeit 301, 303, 307, 308, 314  
 Messkamera 547  
 Messkopfprinzipien  
 – taktile 287  
 Messkopfsysteme 286, 288  
 Messmikroskop 265  
 Messmittel 105, 107  
 Messprogramm 316, 317, 318

Messprozesse 81  
 – nicht fähige 209  
 Messprozesseignung 716  
 Messprozessfähigkeitsuntersuchung  
 – für Dichtheitsprüfung 329  
 Messprozessoptimierung 212  
 Messprozessstreuung 215  
 Messpunkt 413  
 Messschieber 242  
 Messschraube 243  
 Messsoftware 301, 315, 316, 317, 474  
 Messstellen 134  
 Messsystemanalyse 118, 233  
 – nach AIAG MSA 209  
 Messsystembeurteilung 109  
 Messsysteme 184  
 – nicht fähige 209  
 Messsystemeignung 716  
 Messsystemoptimierung 212  
 Messtaster 270  
 Messtasterkalibrierung 665  
 Messtastersysteme 269  
 Messtechnik 241  
 Messtechnikintegration 8  
 Messuhren 245  
 Messunsicherheit 120, 130, 172, 177, 217, 278, 279, 280,  
 281, 282, 283, 284, 285, 287, 290, 297, 492, 502, 503,  
 507, 511  
 Messunsicherheitsbestimmung 493  
 Messunsicherheitskomponenten 110  
 Messzeit 301, 303, 307, 308, 314, 422, 472, 478, 483,  
 512, 513  
 Messzelle 201  
 Metadaten 388  
 – Datenart 778  
 Metal-as-a-Service 681  
 metrologische Strukturauflösung 510, 511  
 MFU-Maschinenfähigkeit 372  
 MHz-OCT 582  
 Michelson-Interferometer 409, 574  
 Micro Electro Mechanical System 451  
 Mikrofokusröhren 480  
 Mikrometer 244  
 Mikrooptiken 586  
 Mikrotaster 301, 302, 303, 308, 309, 312, 314  
 Mikroverzahnungen 292  
 minimal unterscheidbarer Effekt 167  
 Mittelwert-Spannweiten-Methode 125  
 Modellbildung 170, 173  
 Modellierung 756  
 Modellierungssprachen 789  
 Monotonie 387  
 Montageendprüfsysteme 719  
 Montageendprüfung 718  
 Monte-Carlo Simulation 177  
 MPE 272 *siehe* Messabweichung  
 MQTT 769 *siehe* Message Queuing Telemetry Transport  
 MSA *siehe* Measurement System Analysis

MTConnect 686, 769  
 multiple lineare Regression 782  
 Multisensorik 301, 310, 311, 312, 313, 314, 485  
 Multisensor-Koordinatenmesstechnik 299, 301, 312, 313,  
 317, 318  
 Mustererkennung 450  
 MWIR 633  
 myYET® 755

## N

Nachfokussierung 480  
 NBS-Stufennormal 421  
 ndc-Faktor 129  
 Neigung 733  
 Neigungsmessung 253  
 Nennmaß 227  
 Nesting-Index 433  
 Neubeschaffung eines Messsystems 213  
 nichtmaßliche Prüfung 6  
 Nivelliergerät 254, 258, 259  
 No-Code Plattform 767  
 Nonius 242  
 Normal 331, 559  
 Normale 133, 279, 283, 284, 285, 288, 290, 291,  
 292, 293, 294  
 Normen 380  
 Nyquist-Shannon-Theorem 30

## O

Oberfläche  
 – Beschaffenheit 379  
 – Fehler 379  
 – Qualität 378  
 – Risse 393  
 – Textur 379  
 Oberflächenbeschaffenheit  
 – flächenhafte 77  
 – im Senkrechtschnitt 77  
 Oberflächenerfassung 191  
 Oberflächenmessgeräte 719  
 Oberflächenmessungen 425  
 Oberflächenunvollkommenheit 77  
 Objekterkennung 379  
 optische Kohärenztomographie (OCT) *siehe* Kohärenz-  
 tomographie  
 Offline-Photogrammetrie 561  
 Offline-Zellen 610  
 One-Shot-Kalibrierung 550  
 Online-Photogrammetrie 565  
 Online-Prüfungen 18  
 OPC Unified Architecture (OPC UA) 685, 703, 744  
 OPC UA-Schnittstelle 769  
 Optik 384  
 Optimierer 760  
 optisch angeregte Lockin-Thermografie 641  
 optischer Fluss 556

- optische Sensoren 288, 290, 292  
 ORB-Operator 552  
 Orientierung 554  
 – äußere 545, 554  
 – innere 544, 549  
 Orthophoto 555  
 Ortsauflösung 475, 502, 510, 511
- P**
- Parallelität 733  
 Parallelkoordinaten 754  
 Parameterraum 169  
 passive Thermografie 631  
 perceived quality 378  
 Phased-Array-Prüfkopf 619  
 Phased-Array-Rollsensoren 627  
 Phasenauswertung 414  
 Phasenvergleichsverfahren 524  
 Phaseshift-Methode 417  
 Photoeffekt *siehe* Wechselwirkungsprozesse  
 Photogrammetrie 185, 190, 389, 543  
 Piezoeffekt 616  
 PIS *siehe* Prozessinformationssysteme  
 Pixelgröße 477  
 Planlauf 733  
 Platform-as-a-Service 681  
 PMI-Daten 316, 317  
 Polarisationsmodulation 522  
 Portalgeräte 311  
 Portalkoordinatenmessgeräte 185  
 Pose 557  
 Positionsdetektor 520  
 Positionstoleranz 733  
 PPAP *siehe* Production Part Approval Process  
 PPE *siehe* Prüfprozesseignung  
 PPS *siehe* Produktionsplanung und -steuerung  
 prädiktives Qualitätsmanagement 6  
 präskriptives Qualitätsmanagement 6  
 Präzision 661  
 Predictive Analytics 33, 766  
 – Data Analytics Modell 779  
 Predictive Maintenance 31, 675, 769  
 Predictive Quality 675, 771, 773  
 Prescriptive Analytics 33, 766  
 – Data Analytics Modell 779  
 Pre-Travel 662  
 Pre-Travel Variation 654  
 Principal Feature Analysis 28  
 Process Mining 787  
 Production Part Approval Process 93  
 Production Process Mining 35  
 Produktentstehungsprozess 96  
 Produkt-FMEA 17  
 Produkthaftung 105  
 Produktions-IT 679  
 Produktionsplanung und -steuerung 200  
 Produktionsprozess- und Produktfreigabe 93  
 Produktprüfung 202  
 Produktspezifikation 183, 196  
 Produktverfolgung 750  
 Profilprojektor 267  
 Projektionsbild 465  
 Projektionszentrum 549  
 Projektor 548  
 Prozesseinrichtung 650  
 Prozessfähigkeit 715  
 Prozessfähigkeitsindex 119  
 Prozess-FMEA 17  
 Prozessinformationssysteme 744  
 Prozesskamera 595  
 Prozessmodell 789, 793  
 Prozessmodellierung 795  
 Prozessoptimierung 675  
 Prozessüberwachung 650  
 Prüfform 34  
 Prüfdatenauswertung 32  
 Prüfdatenerfassung 32  
 Prüfen 13, 106  
 Prüffentscheid 167  
 Prüffrequenz 29  
 Prüfkörper 193, 559  
 Prüflinse 378  
 Prüfmerkmale 27, 198  
 Prüfmerkmalsdefinition 16  
 Prüfmittel 19, 105, 107  
 Prüfmittelbeschaffung 112  
 Prüfmittelleignung 19  
 Prüfmittelüberwachung 31  
 Prüffobjekt 16, 134  
 Prüffort 18  
 Prüffersonal 34  
 – Erfahrung 381  
 Prüfplanung 13, 14, 15, 22, 196  
 – adaptive 25  
 Prüfprozesse 81, 117  
 Prüfprozesseignung 165, 608, 715  
 Prüfstände 165  
 Prüfsystem-Effektivität  
 – Annahmekriterien 157  
 – Anteil der Übereinstimmungen 156  
 – Betrachtungsfälle 156  
 – Fallbeispiel 155  
 – Fehlentscheidungsrisiko 159  
 – Häufigkeit der Fehlerurteile 158  
 – Rechenschema 155  
 – zweiseitig begrenzter Vertrauensbereich 155  
 Prüfumfang 18  
 Prüfung  
 – fertigungsorientierte 14  
 – Prüfdauer 392  
 – Prüffentscheid 383  
 Prüfverfahren  
 – visuelles 377  
 – zerstörungsfreies 615  
 Prüfzeitpunkt 34

PS-OCT 580  
 Pulsthermografie 641  
 Punktbildauswertung 508  
 Punktedichte 301, 303, 305  
 Punktwolke 184, 199, 555  
 – einpassen 469  
 – STL-Format 469

## Q

Q-DAS ASCII Transferformat 199, 694  
 QIF-Standard 198  
 QML *siehe* Quality Markup Language  
 QMP *siehe* Eignungskennwert  
 QMS *siehe* Eignungskennwert  
 Qualitätskontrolle 453  
 Qualitätsmerkmale 16  
 Qualitätsprozesse 98  
 Qualitätsprüfung 675  
 – Dichtheit 330  
 – mit KMT 196  
 Qualitätssicherung 241  
 Quality Intelligence 6  
 Quality Markup Language 702

## R

Rapidminer 756  
 Rasterscanning 505, 512, 513  
 Rauheit 263, 733  
 Rauheitsmessungen 257, 303, 305, 308, 309, 314  
 Rauheitsnormal 437  
 Rauheitsparameter 263, 433  
 Rauschen 426, 488  
 Rayleigheffekt *siehe* Wechselwirkungsprozesse  
 Realtime-Funktionalität 536  
 Rechtwinkligkeit 733  
 Rechtwinkligkeitsmessung 261  
 Referenzdaten  
 – Datenart 778  
 Referenzflächen 596  
 Referenzhandbücher 109  
 Referenzierung 595  
 Referenznetz 601  
 Referenzteil 223  
 Referenztestleck 331  
 Reflektorverfolgung 520  
 Reflexionsröhren 479, 480  
 Reflexionstarget 479  
 Regressionsanalyse  
 – maschinelles Lernen 780  
 Reinforcement Learning 33  
 Rekonstruktion 466  
 RELIEFF-Algorithmus 28  
 Representational State Transfer 684  
 Requalifikationen 94  
 Ressourcenmanagement 122  
 REST *siehe* Representational State Transfer

Reverse Engineering 658  
 Richtigkeit 661  
 Richtungsmessung 520  
 Risikoanalyse 213  
 Roboter 382, 392, 568  
 – Cobot 383  
 Rockwell-Härtetest 351  
 Rockwellskalen 352  
 Röhrenleistung 478, 479  
 Röntgendetektor 484  
 – direkt konvertierender Detektor 482, 494  
 – energieintegrierender Detektor 494  
 – Flächendetektor 483  
 – indirekt konvertierender Detektor 482, 494  
 – photonenzählender Detektor 494  
 – Zeilendetektor 483  
 Röntgenröhre 462, 478, 484  
 – geschlossene Röntgenröhre 481  
 – Monoblock-Design 481  
 – offene Röntgenröhre 481  
 Röntgenspektrum 463, 464  
 Röntgenstrahlung 462  
 – Bremsstrahlung 463  
 – charakteristische Röntgenstrahlung 463  
 Röntgentomografie 301, 302, 306, 307, 310, 311, 316, 317  
 Röntgenverordnung 485  
 Rückführung 278, 283, 290, 292, 293, 298  
 Rundheit 261, 733  
 Rundheitsstester 261  
 Rundlauf 733  
 Rundlaufabweichung 261  
 Rundschalttisch 257

## S

Scanmodus 287  
 Scannen *siehe* Scanmodus  
 Scanning 188  
 Scanstrategien 603  
 Schallfeldgeometrie 616  
 Schallgeschwindigkeiten 616  
 Schallwellen 615  
 Schärfentiefe 503, 511, 512  
 Schnittstellen  
 – in der KMT 197  
 Schnüffellecksuche 344  
 Schraubtechnik 357  
 Schraubverband 361  
 Schraubwerkzeug 360, 363  
 Schutzabstand 166  
 Schwächungskoeffizienten 465  
 schwarzer Strahler 631  
 Selektion von Grenzflächenpunkten 473  
 – 3D-Selektionsfenster 472  
 – Patchselektion 472  
 – Segmentierung 472  
 selektiver Strahler 631



- Semi-Global Matching 555  
semisupervised learning 33  
Sensitivität 578  
Sensor 679  
– kapazitiver 247  
Sensoren  
– bildgebende 190  
– chromatische 189  
– für Koordinatenmessgeräte 187  
– optische 288  
– taktile 188, 286  
SensOr Interfacing Language 683  
Sensorkalibrierung 599  
Sensorpositionierung 597  
Sensor Services 687  
Sensorsysteme 680  
Sensortypen 289  
Separation of Concern 680  
SGX *siehe* Intel Software Guard Extensions  
Sicherheitsniveau 559  
Sichtprüfung  
– direkte 377  
– dynamische 383  
– indirekte 377  
– stationäre 382  
SI-Einheiten 275, 276, 278, 279  
SIFT-Operator 552  
Signalerkennung 159  
– Annahmekriterien 161  
– Darstellung des Entscheidungsgraubereichs 159  
– Ermittlung des Graubereichs 160  
– Kenngröße %GRR 161  
– Rechenschema 160  
Signalisierung 547  
Signal-Rausch-Verhältnis 507, 513  
Signalübertragung  
– optische 659  
Signifikanztest  
– allgemeines Schema für den Testentscheid 146  
Simultaneous Localization and Mapping 556  
Sinuslineal 255  
SIPOC 749  
SLAM 556  
SmartCom Digital System of Units 686  
Smart Data 752  
Smart Factory 388, 693  
SOA 685  
Softsensorik 757  
Software 474  
Software-as-a-Service 681  
Software für Koordinatenmesssysteme 195  
Software Pakete mit Teach-In-Verfahren 652  
Softwaretest 285  
SOIL *siehe* SensOr Interfacing Language  
Soll-Ist-Vergleich 474  
SOM-Filterung 747  
Sondensysteme 270  
SOP *siehe* Start of Production  
Sparrow-Kriterium 418  
Sparse Principal Component Analysis 28  
SPC-Prüfplan 716  
Spectral Domain OCT 576  
speicherprogrammierbare Steuerung 201  
Spezifikation 492  
Spezifikationsüberprüfung 492  
Spikes 429  
Spinnennetz-Diagramm 170  
SPS *siehe* speicherprogrammierbare Steuerung  
Spurengas 333  
Spurengasleckprüfung 341  
Stacking 604  
Standardatmosphäre 528  
Standardmessmittel 239  
Standardmesstaster 654  
Standards 693  
Standardunsicherheit 130  
Standardunsicherheitskomponenten 133, 134  
Ständerbauweise 185  
Standpunktermittlung 602  
Stanzlöcher 605  
Start of Production 98  
statische Versuchsplanung 400  
Statistikpakete 756  
statistische Auswertemethoden 9  
statistische Prozesslenkung 97  
statistische Prozessregelung 81  
Stereokamera 566  
Steuerungsmakros 651  
Stichprobentechnik  
– adaptive 29  
Stoffbilanzen 746  
Störgrößen 170  
Strahlaufhärtung 464, 485  
– Korrektur 486, 487  
Strahlenbelastung 485  
Strahlenschutzkabine 485  
Streckgrenzsteuerung 365  
Streifenlichtverfahren 389  
Streifenmuster 548  
Streifenprojektion 190, 553, 563, 568  
Streubereiche am Fertigungsprozess 230  
Streustrahlung 464, 486  
– Kegelstrahlartefakte 487  
– Korrektur 487, 495  
Structure-from-Motion 555, 563  
Strukturauflösung 475, 478, 483, 484, 489, 510, 511  
Sub-Mikrofokusröhren 480  
Subpixeling 509, 511  
Substitutionsmethode 284, 285  
Subvoxeling 467, 468  
supervised learning 33  
Swept Source OCT 577  
SWIR 633  
Symmetrie 733  
Synthetic Aperture Focusing Technique 622

System-Heterogenität 678  
Szintillator 482

## T

Tachymeter 185  
taktile Sensoren 286, 287, 291  
Taktrate 383  
Target 463  
Targetoberfläche 479  
Taster 301, 302, 308, 312, 313, 314, 315, 317  
Tastermessung 441  
Tasterradius 441  
Tasterradiuskompensation 188  
Tastschnittgerät 263  
Tastsystem 188  
Tastverfahren  
- mechanisches 263  
T-Bild 622  
T-Cam-Sensor 533  
Telezentrie 503  
Temperaturleitfähigkeit 633  
Temperaturmesstaster 655  
Template Matching 552  
Test  
- dynamischer 607  
- statischer 607  
Testfeldkalibrierung 550  
Textur 548  
Texturparameter 433  
Theodolit 255  
thermische Diffusionslänge 635  
thermische Eindringtiefe 635  
Thermografie 629  
Thermografiekamera 633, 642  
Thermografieverfahren  
- Auswahl 644  
Tiefpassfilter 426  
Time Alignment 176  
Time Domain OCT 576  
Toleranz(en) 221  
- minimale 132  
Toleranzgrenze  
- einseitige 228  
Toleranzinformationen 198  
Tomografie  
- Abschnittstomografie 489  
- Ausschnitts-Tomografie 490  
- exzentrische Multi-ROI-Tomografie 490  
- exzentrische Tomografie 490  
- Halbseitentomografie 490  
- Helix-Tomografie 484, 486, 489  
- Im-Bild-Tomografie 462  
- Laminografie 471, 490  
- laterales Rastern 490  
- longitudinales Rastern 489  
- OnTheFly-Tomografie 488  
- Planar-Laminografie 491

- ROI-Tomografie 490  
- Spiraltomografie 486  
- Start-Stopp-Tomografie 488  
- Swing-Laminografie 491  
- Übersichtstomografie 490  
Tooling-Ball 596  
Topografie 301, 303, 305, 314, 315  
Topografiebestimmung 408  
Topografietreue 445  
T-Probe 531  
T-Probe-Sensor 533  
Tracker-Scanner 535  
Transaktionsdaten  
- Datenart 778  
Transaktionsstrukturdaten  
- Datenart 778  
Transition  
- digitaler Wandel 774  
Transmissionsröhren 478, 479, 480  
Transmissionstarget 479  
Trendprozesse 718  
Triangulationsmessung 256  
Triangulationsscanner 535  
Triangulationssensoren 189, 190  
Tribologie 455  
Tropfenkräfte 327  
T-Scan-Controller 531  
t-Test 128

## U

Übertragungsrate 384  
überwachtes Lernen  
- maschinelles Lernen 780  
Ultraschallmesstaster 656  
Ultraschallmessverfahren 617  
Ultraschallmesszelle 625  
Ultraschallprüfkopf 618  
Ultraschallprüfung 615  
Ultraschallthermografie 642  
Universal-Winkelmesser 253  
Unrundheit 261  
Unsicherheitsbeitrag 174  
Unsicherheitsbudget 607  
Unsicherheitskomponenten 85  
unsupervised learning 33  
unternehmensweite Strukturdaten  
- Datenart 778  
unüberwachtes Lernen  
- maschinelles Lernen 780  
Unwrapping 414  
Unwucht 733

## V

Vakuumleckprüfung 324  
Vakuumverfahren 343  
Validieren 81

Validierungsmessung 172  
 Validity  
 – Big Data 777  
 Value  
 – Big Data 777  
 Variablenprüfungen 18  
 Varianzfortpflanzung 176  
 Variety  
 – Big Data 777  
 VDA 4 230  
 VDA Band 5 19, 81, 105, 109, 110, 129, 212, 227  
 – Sonderregelungen 214  
 VDA QMC 118  
 VDI 2230 361  
 VDI 2851 713  
 VDI/VDE 2634 545, 560  
 VDI/VDE 2645 373  
 VDI/VDE/DGQ-Richtlinie 2618 111  
 Velocity  
 – Big Data 777  
 Veracity  
 – Big Data 777  
 Verfahren 2 (MSA) 134  
 Verfügbarkeit  
 – Datenqualitätsdimensionen 778  
 Vergleichsmessungen 278, 285, 292, 294  
 Vergleichspräzision 129  
 Vergrößerung 475, 477, 484, 489, 502, 503, 504, 510, 511,  
 512, 513, 514  
 Verifizierung 81  
 Verschraubung 361  
 Verwaltungsschale 683  
 Verzahnungsmesstechnik 292, 295, 298  
 Verzeichnung 549  
 Vibrothermografie 642  
 Vickershärte 353  
 virtuelle Autokorrektur 487  
 Visual-SLAM 556  
 visuelle Odometrie 556  
 Vollschutzgerät 485  
 Vollständigkeit 378  
 – Datenqualitätsdimensionen 778  
 Volume  
 – Big Data 777  
 Volumen 466  
 Volumendaten 290  
 Volumenfluss 322, 326  
 Volumenrendering 474  
 Volumenschnitt 474  
 Vorspannen von Schrauben 366  
 Voxel 290, 466  
 Voxelmodell 190

## W

Wanddickenmessung 626  
 Wandstärkenmessung 656

Wareneingangsprüfung 707  
 Wärmebildkamera 633  
 Wasserstoffleckprüfung 345  
 Wasserwaage 253  
 Wechselwirkungsprozesse  
 – Comptoneffekt 463, 464  
 – Photoeffekt 463  
 – Rayleighstreuung 463  
 Wegaufnehmer 247  
 Wegmessung 249  
 Wegsensoren 245  
 Weißlichtinterferometrie 407  
 Weißlichtsensoren 189  
 Wellengleichung 615  
 Wellenlänge 546  
 Wellenoptik 573  
 Welligkeitsparameter 433  
 Werkerselbstprüfung 14  
 Werkstoffprüfung 615  
 Werkstück 241  
 Wertschöpfungskette 98  
 Whitebox-Modelle 756  
 Wiederholbarkeit 133  
 Wiederholbarkeits-Tests 607  
 Wiederholgenauigkeit 661  
 Wiederholmessungen 133  
 Wiederholpräzision 125, 661  
 Wiederholprüfungen 19  
 Wiederholungsmessungen 218  
 Winkelmesser 253  
 Wirbelstromthermografie 642

## X

XGBoost 756  
 XML-Schema 702

## Z

Zählung 7  
 Zahnräder 292, 293, 296, 298  
 Zeitpunkte 134  
 Zeitreihen 753  
 zentrale Wellenlänge 578  
 Zentralprojektion 546, 549  
 Zentralstrahl 483  
 Zentrierspule 480  
 zerstörungsfreie Prüfung 191, 377, 586  
 Zertifizierung  
 – Personal 377  
 ZfP *siehe* zerstörungsfreie Prüfung  
 Zielmarke 547, 551  
 – Adapter 547  
 – kreisförmiger 547  
 – retro-reflektierender 547  
 zukunftsfähige Produktionssysteme 775  
 Zylinderform 733