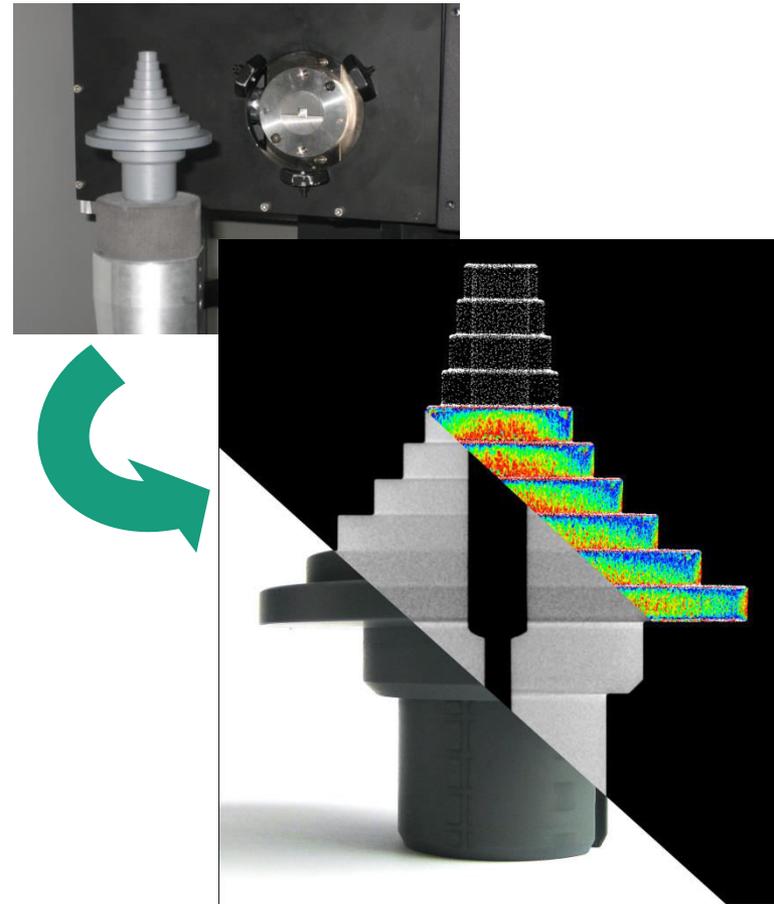

Adaptive 3D-Auswerteverfahren für die CT-Mess- und Prüftechnik

Röntgenseminar 5. und 6. Juli 2017

Dipl.-Math. Andreas Frommknecht
Abteilung Bild- und Signalverarbeitung
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Möglichkeiten der Computertomographie

- Zerstörungsfreie und vollständige Datenaufnahme und Digitalisierung von Bauteilen.
- Teile jeglicher Komplexität können gescannt werden, alle inneren Strukturen werden erfasst
- Automatische Datenaufnahme ohne Vorbehandlung der Teile
- Materialprüfung, messtechnische Auswertung, Flächenrückführung etc. mit einem Datensatz möglich.
- Wiederholungsmessungen an Bauteilen z.B. nach Dauertests



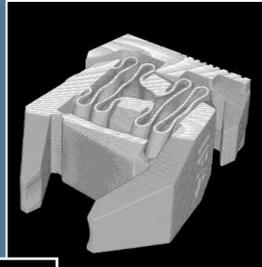
➔ Adaptive Software-Lösungen zur Datenauswertung

Prozesskette 3D-Bauteilmessung

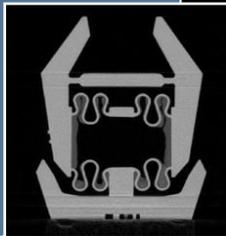
Datenerfassung



3D CT System

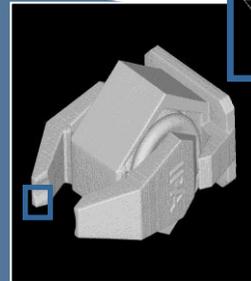


Voxelmodell

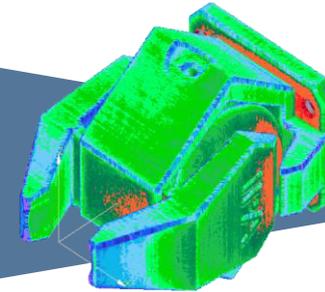
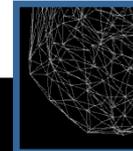


Rekonstruktion/
Artefaktreduzierung

Datenauswertung



STL-Daten



Messtechnische
Auswertung

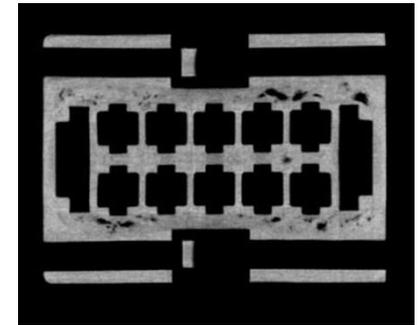
Soll-Ist-Vergleich / Einpassung
regelgeometrischer Elemente

Qualitätssicherung mit Computertomographie

Möglichkeiten:

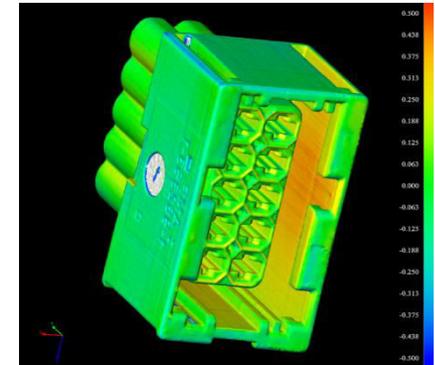
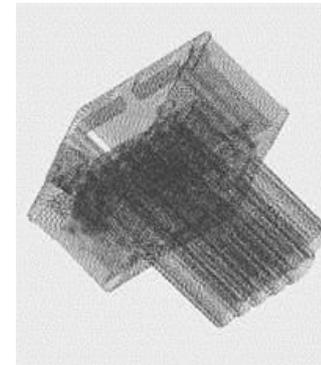
Vollständige Bauteilerfassung, innere Materialstrukturen

→ Materialanalyse (Fehlerbestimmung, Materialeigenschaften, ...)



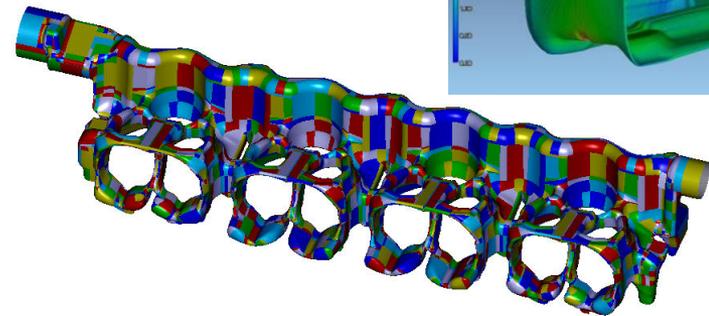
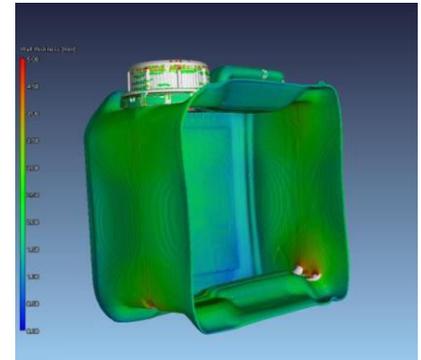
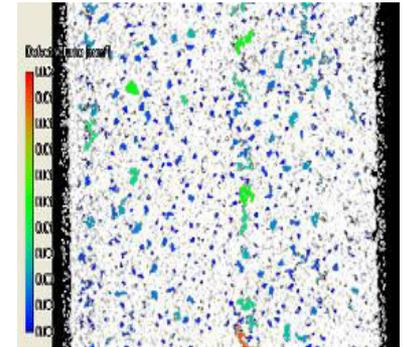
Vollständige Geometrierfassung, d.h. Erfassung aller inneren und äußeren Oberflächenstrukturen

→ Messtechnische Auswertungen (Soll-Ist Vergleiche, Formabweichungen von erwarteten Geometrien, Abstände, ...)



Anwendungsbereiche im Überblick

- Materialprüfung in Volumendaten, z.B. Lunker- und Porositätsanalyse, Erkennung von Fremdmaterialien,
- Montagekontrolle
- Wandstärkenprüfung
- Vollständiger Soll-Ist-Vergleich
- 2D- und 3D-Messung von Bauteilen
- Reverse Engineering
- Eingangsdaten für Simulation
- Rapid Manufacturing

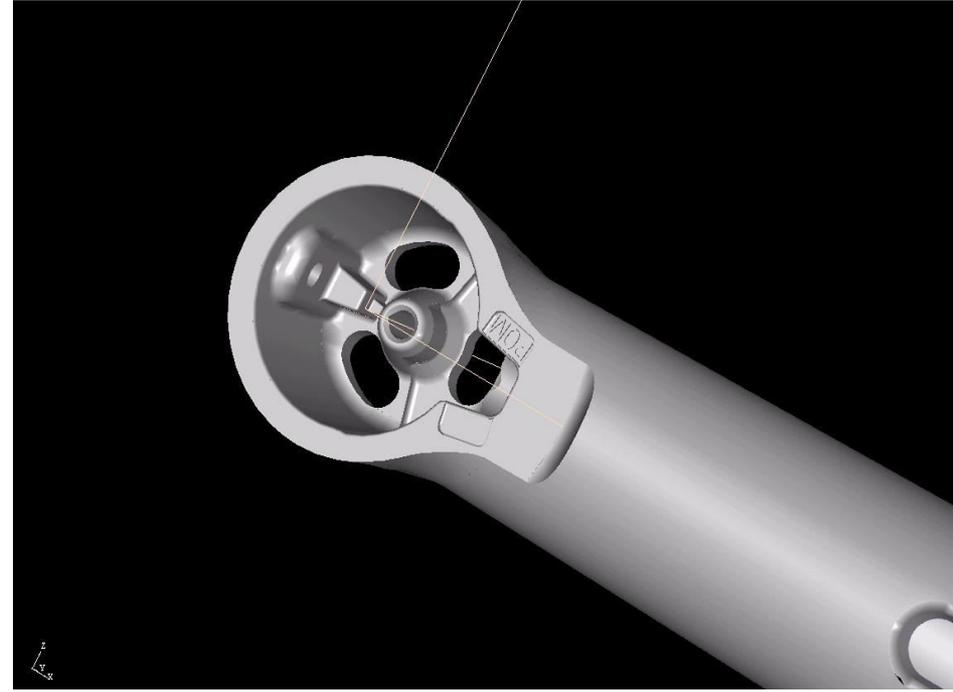


Auswerteverfahren für die CT

Datenauswertung Soll-Ist-Vergleich

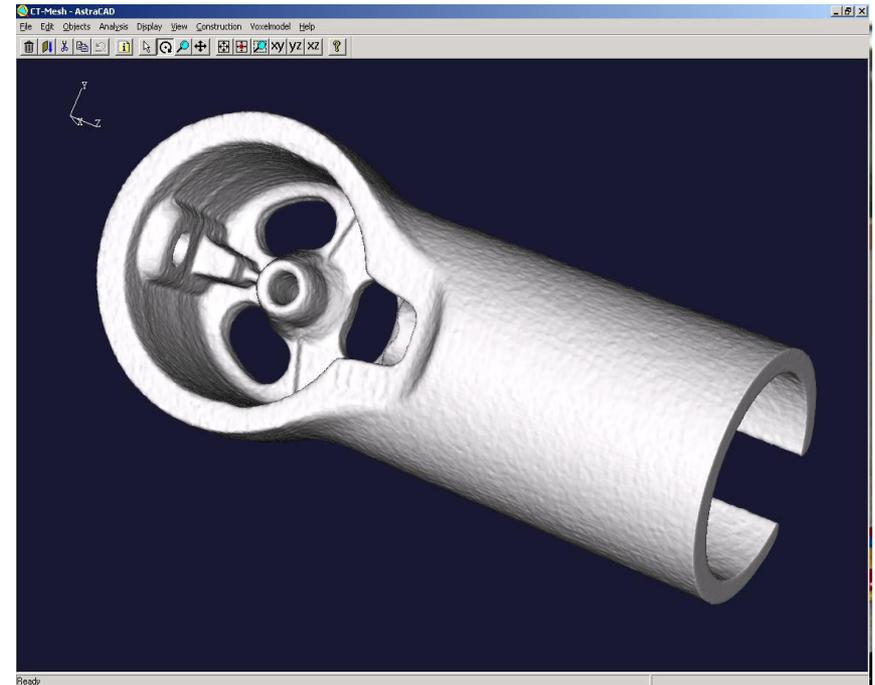
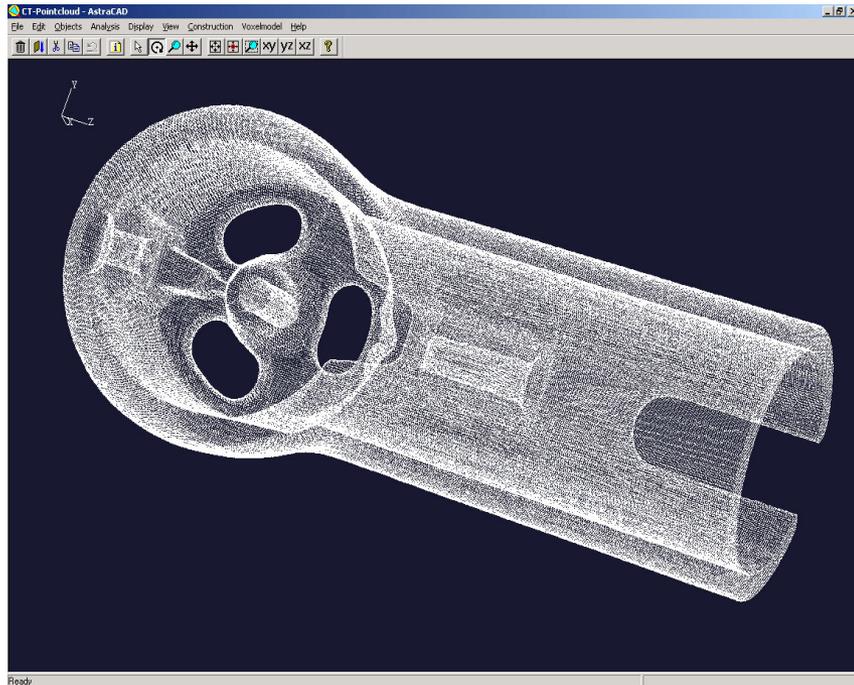


Werkstück



CAD-Modell

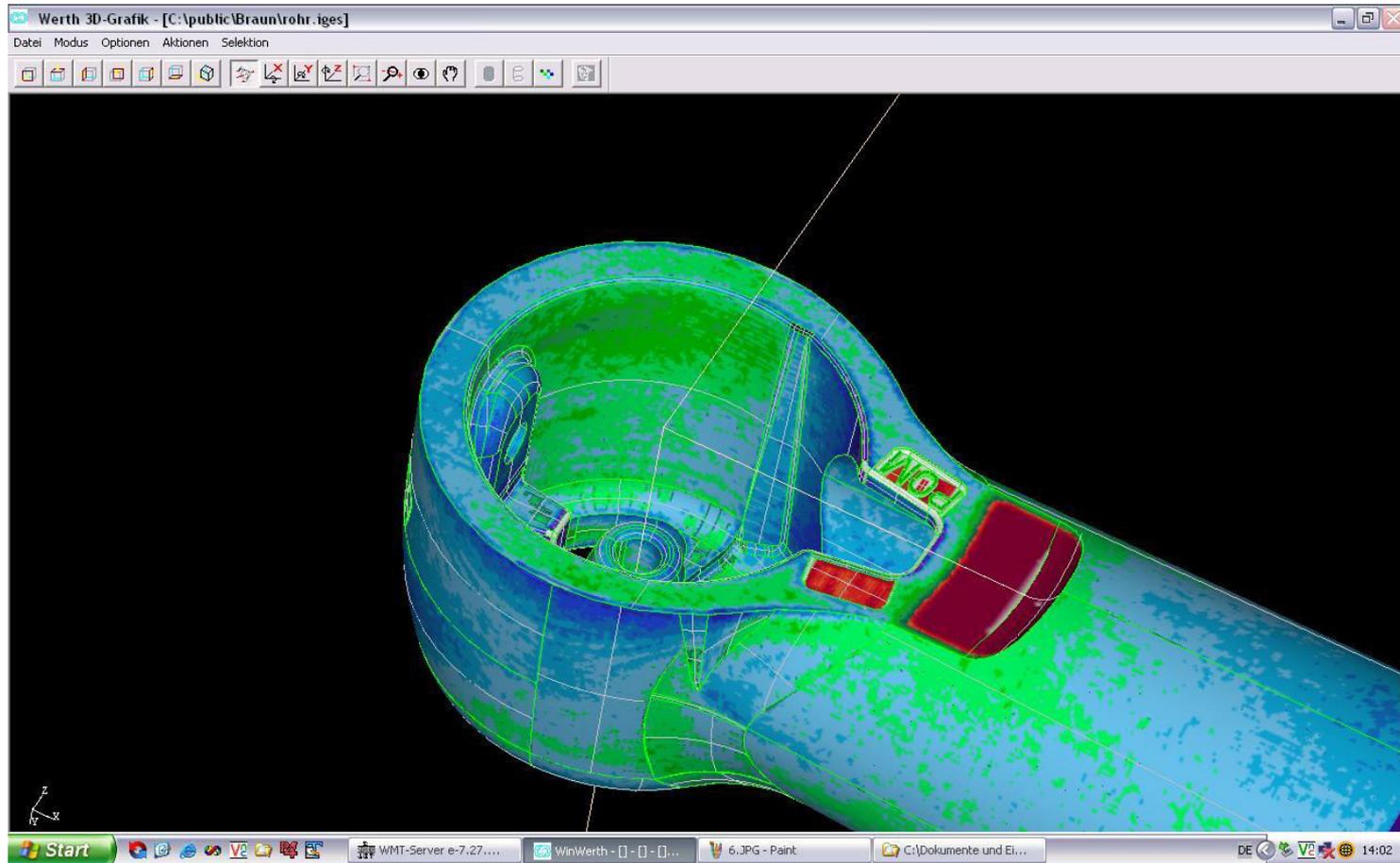
Datenauswertung Soll-Ist-Vergleich



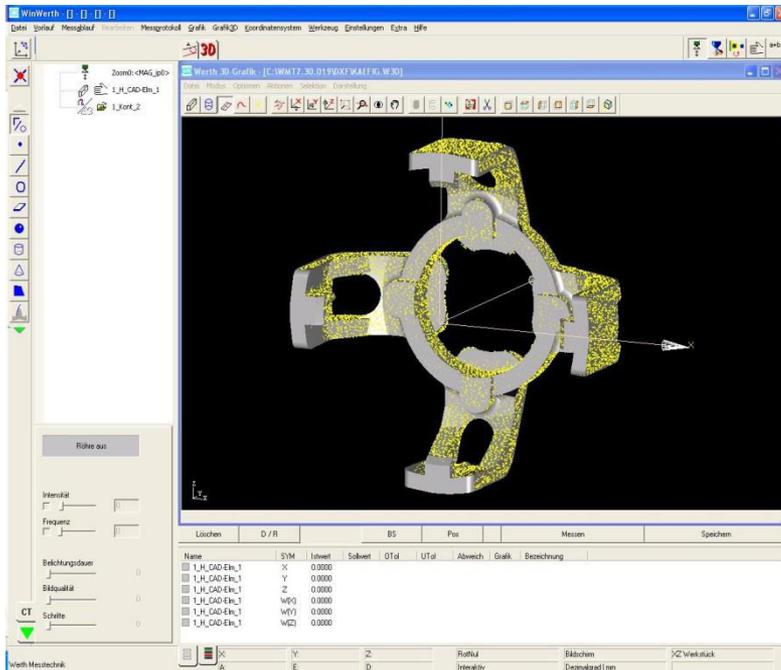
Punktwolke und triangulierte Darstellung

Datenauswertung Soll-Ist-Vergleich

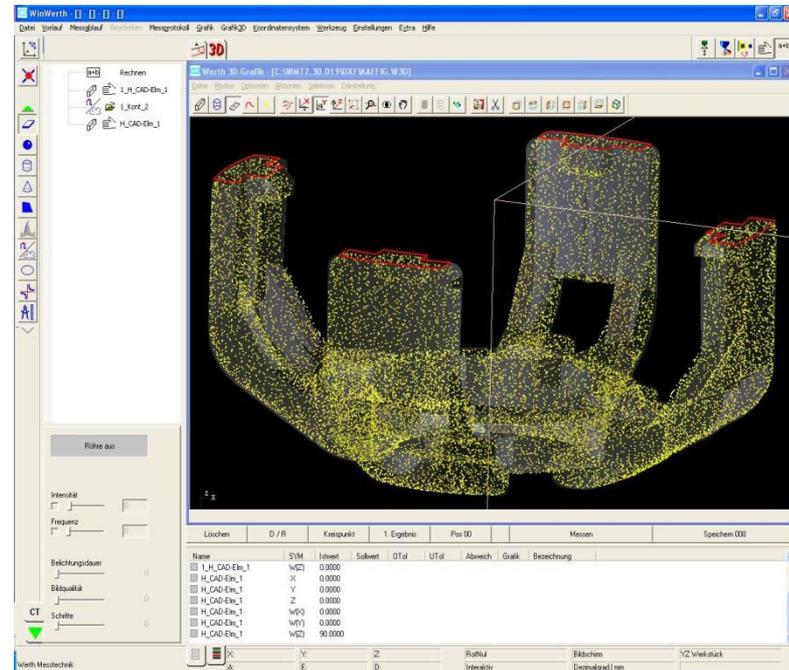
Graphische Ergebnisdarstellung



CAD-basiert Maße ermitteln in CT-Daten

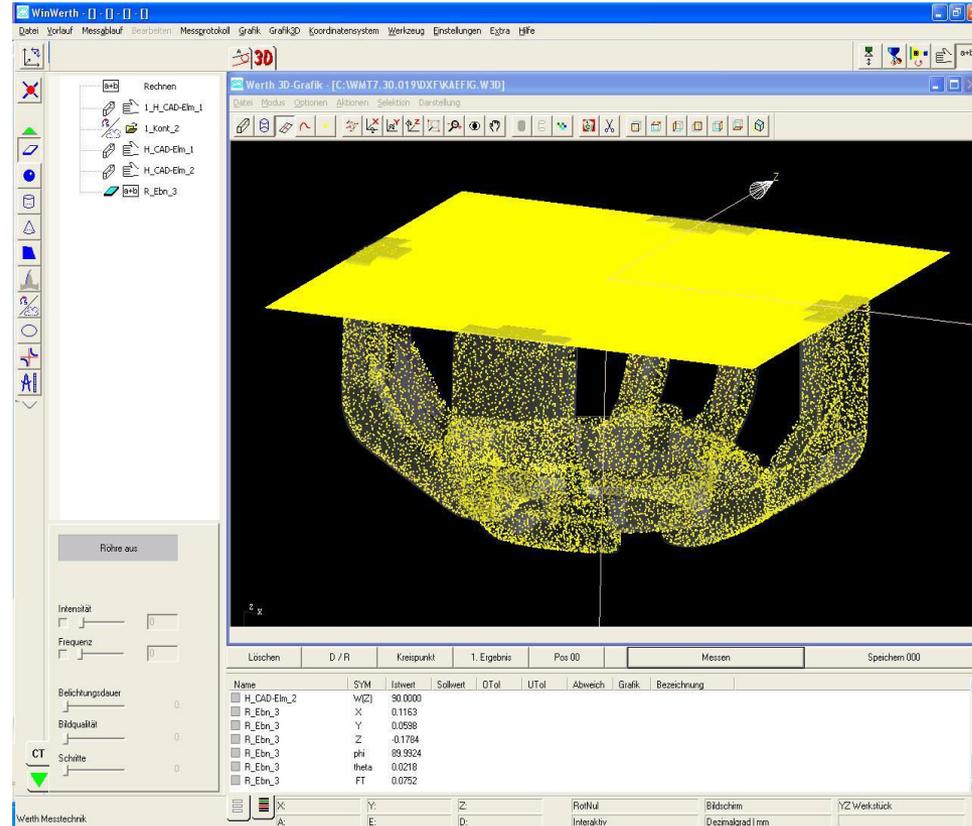
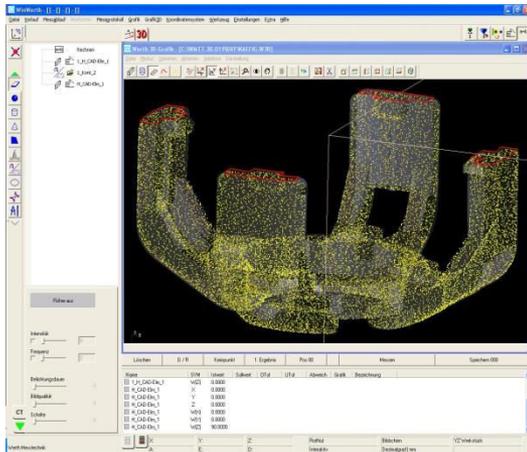


CAD-Modell und Messpunkt wolke



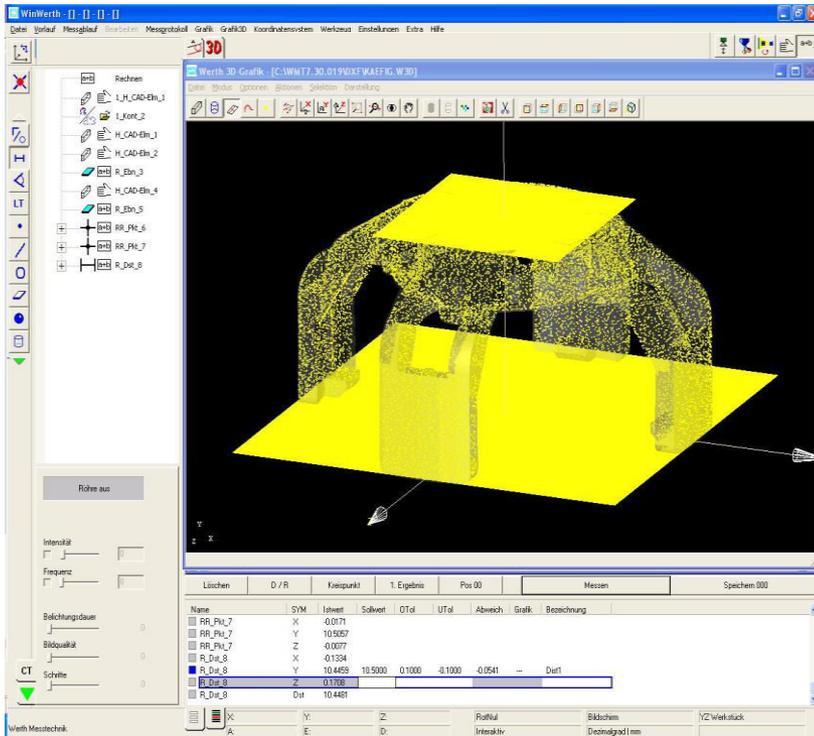
Patch-Selektion: Extraktion aller Messpunkte, die zu markierten Flächen des CAD-Modells gehören

CAD-basiert Maße ermitteln in CT-Daten

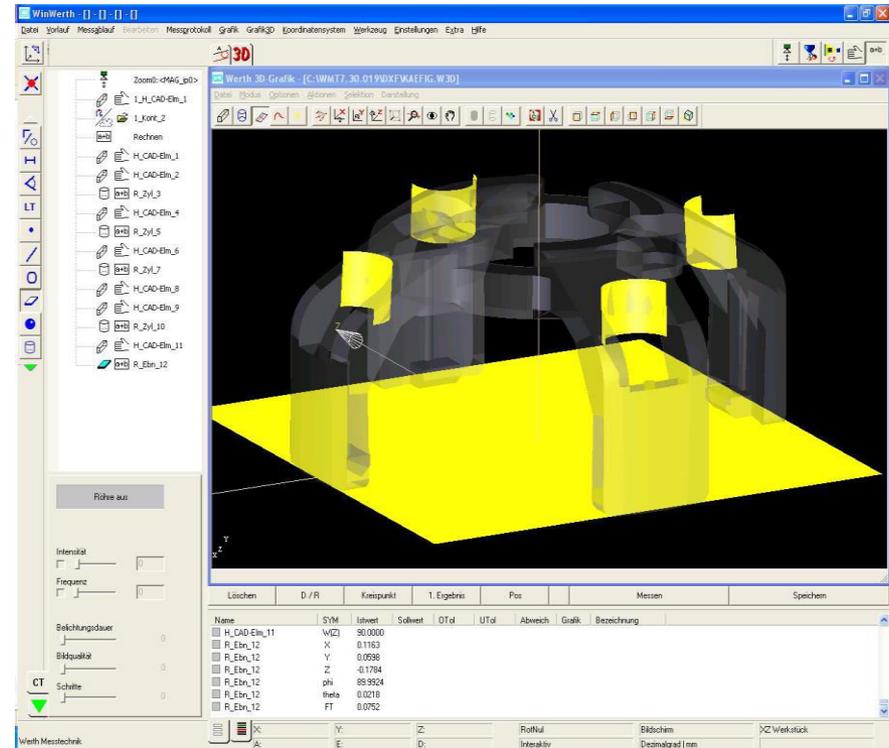


Berechnung der
Ausgleichsebene

CAD-basiert Maße ermitteln in CT-Daten

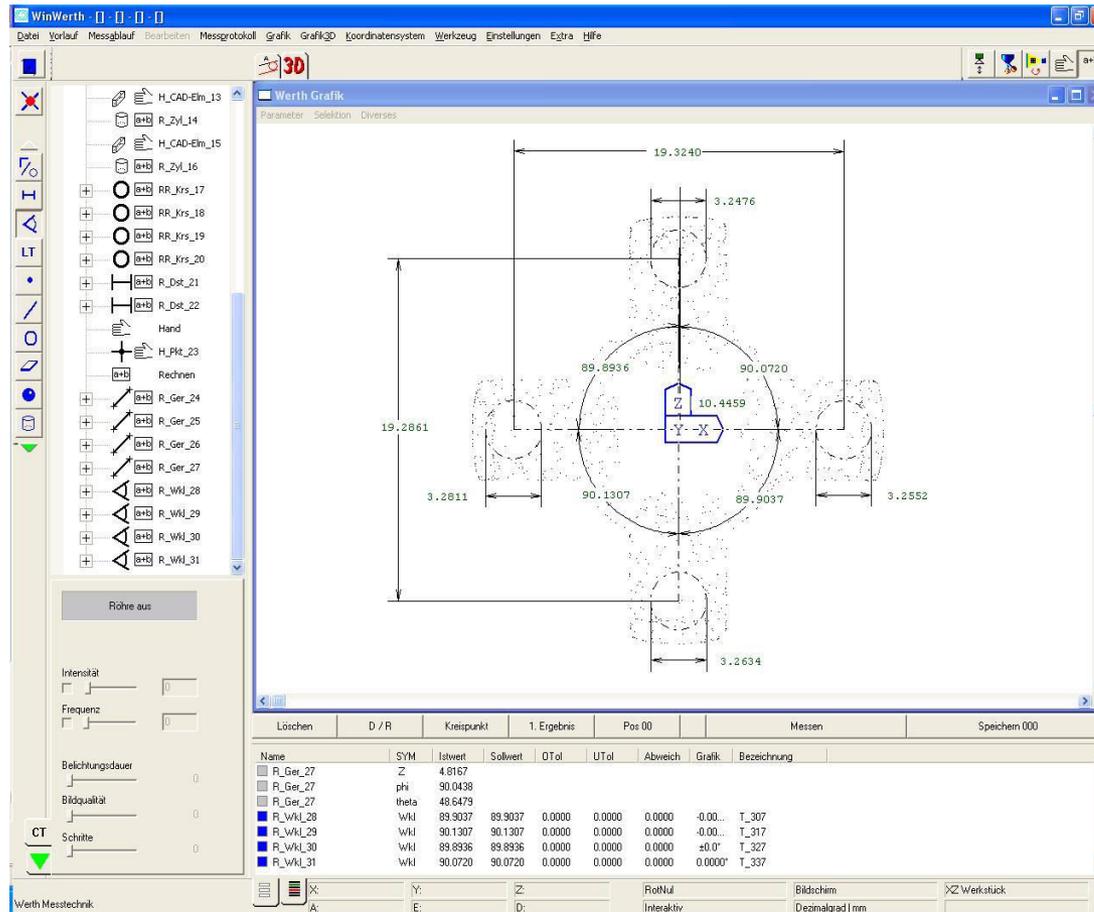


Berechnung der Distanz zweier Ebenen



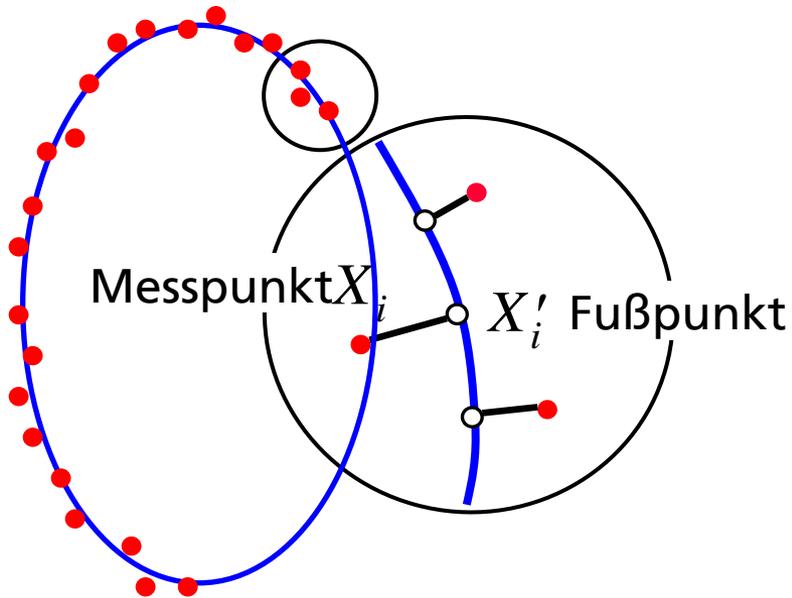
Mit Hilfe von Patch-Selektion berechnete Ausgleichszylinder

CAD-basiert Maße ermitteln in CT-Daten



- Ermittlung weiterer Maße zur vollständigen Bauteilmessung
- Automatisierung durch Messprogrammerstellung möglich

Mathematische Grundlage: Best-Fit-Verfahren



$d_i = \|X_i - X'_i\|$ Senkrechter Abstand

$d^T = (d_1, \dots, d_m)$ Abstandsvektor

Zielfunktionen:

$$\sigma_0^2 = d^T P^T P d$$

$$\sigma_0^2 = (X - X')^T P^T P (X - X')$$

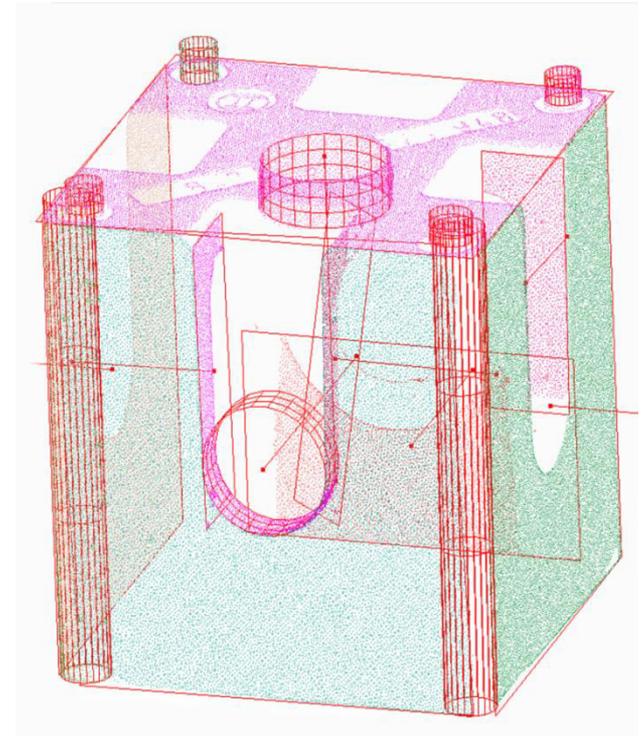
Gewichtungsmatrix $P^T P$

Minimierung der Summe der quadratischen Abstände

Messen von Geometrieelementen ohne CAD-Modell: Best-Fit-Verfahren für regelgeometrische Elemente

Eigenschaften der Algorithmen

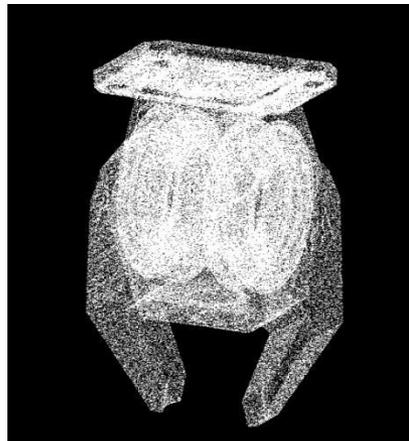
- hohe Effizienz und Flexibilität
- hochgenaue Objekteinpassung
- keine Benutzerinteraktion erforderlich
- automatische Segmentierung der Punktwolke
- Verfügbare Elemente: Ebene, Zylinder, Kugel, Kegel, Torus
- sehr gute Ergebnisse auch für unvollständige und verrauschte Datensätze
- Vielfältige Anwendungsmöglichkeiten: Messtechnik, Reverse Engineering



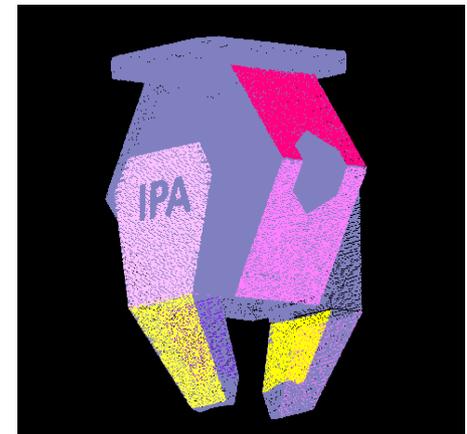
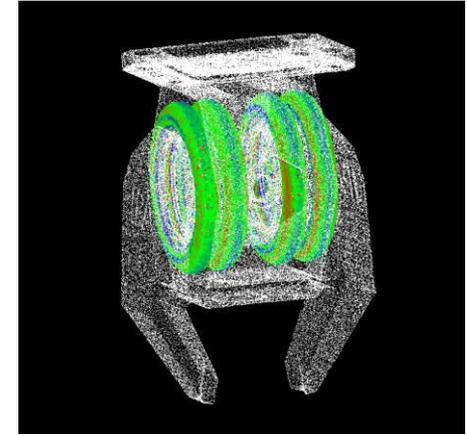
Messen von Geometrieelementen ohne CAD-Modell: Best-Fit-Verfahren für regelgeometrische Elemente



Bauteil Greifer

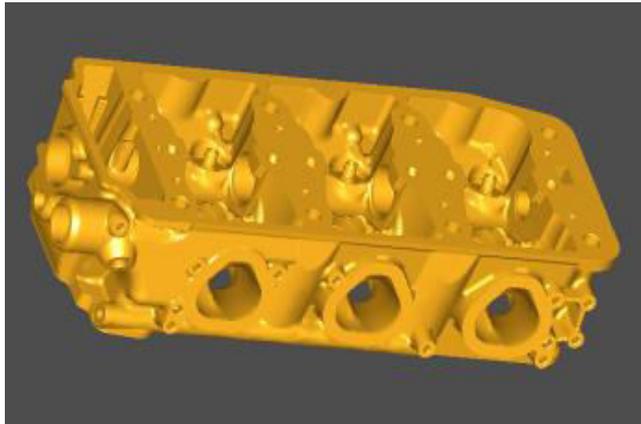


Messpunktwolke

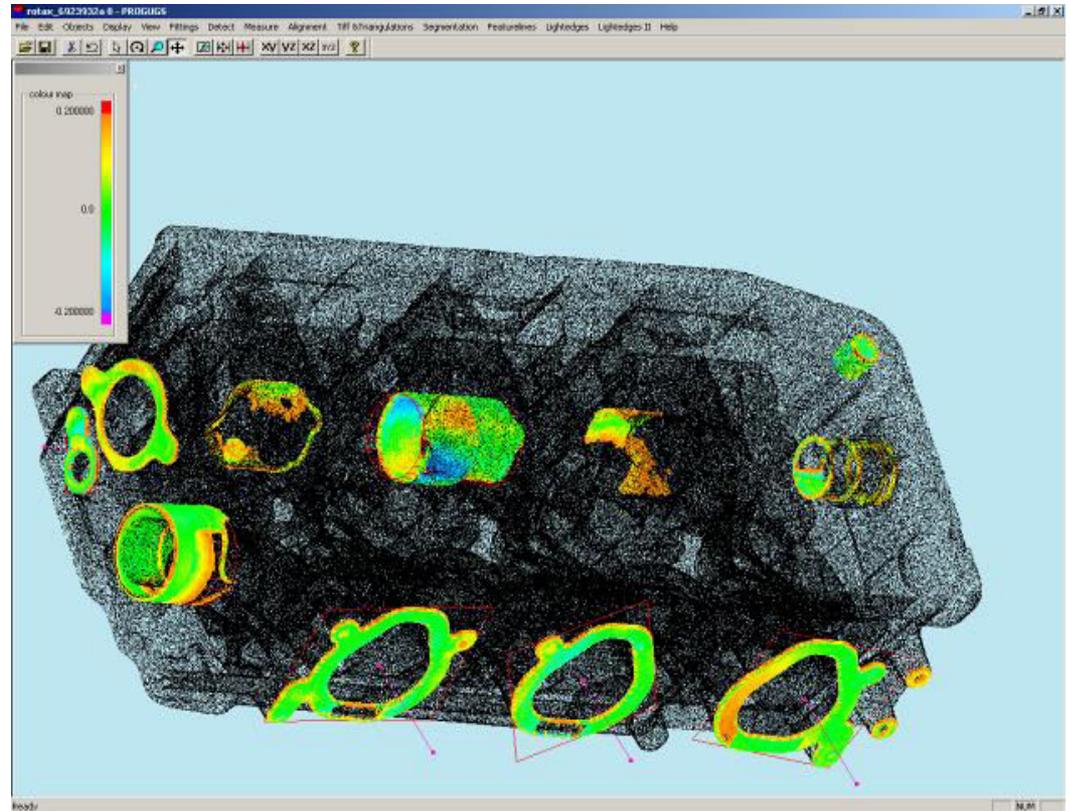


Messen von Geometrieelementen ohne CAD-Modell

Auswertung von CT-Daten



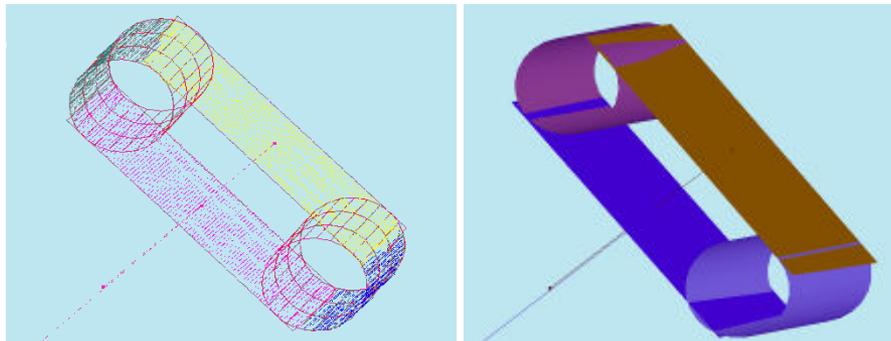
Zylinderkopf



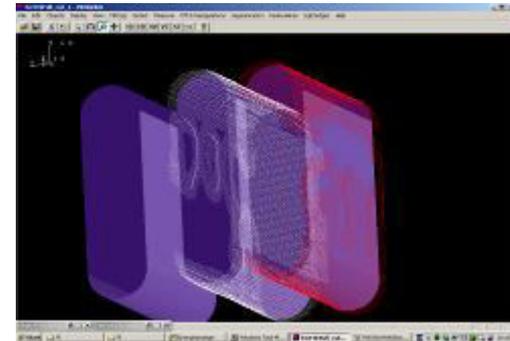
Zylinderkopf mit einigen besteingepassten und ausgewerteten regelgeometrischen Elementen

Messen von Geometrieelementen ohne CAD-Modell: Besteinpassung kombinierter Features

- Nicht nur einzelne regelgeometrische Elemente sondern auch kombinierte erkennen, z.B. Langlöcher, konzentrische Zylinder, Prismen.
- Kombinierte Elemente bedeutet: mehrere regelgeometrische Elemente, die geometrischen Bedingungen genügen (Constraints).
- Verbesserung der Qualität des eingepassten Elements

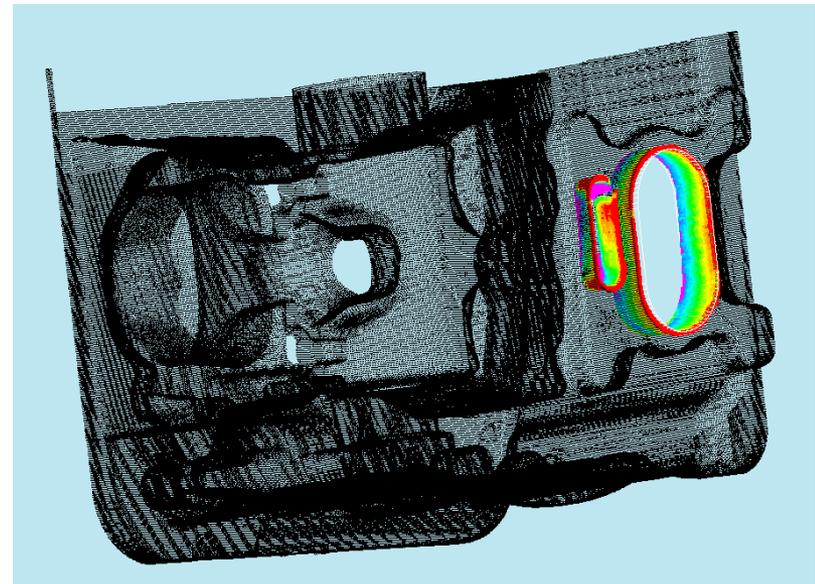
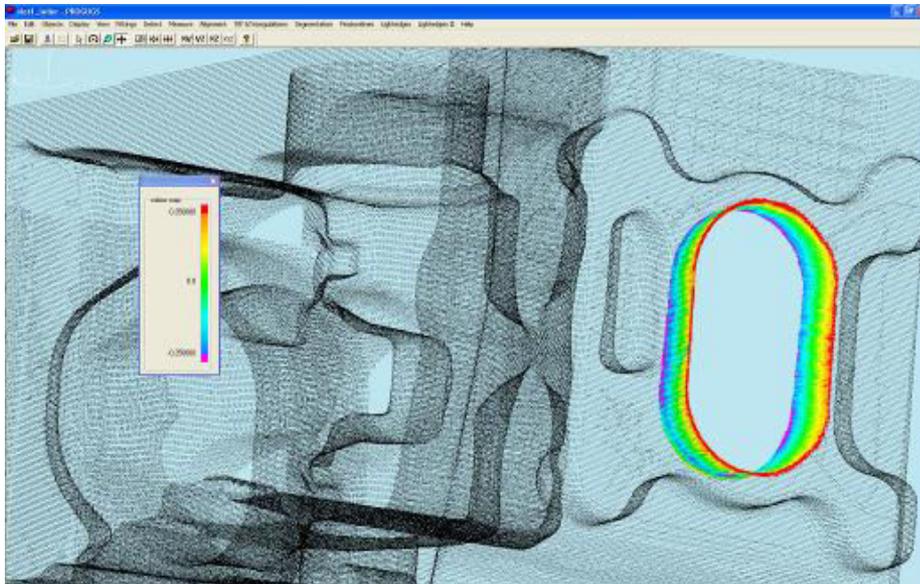


Einzeln eingepasste Zylinder und Ebenen



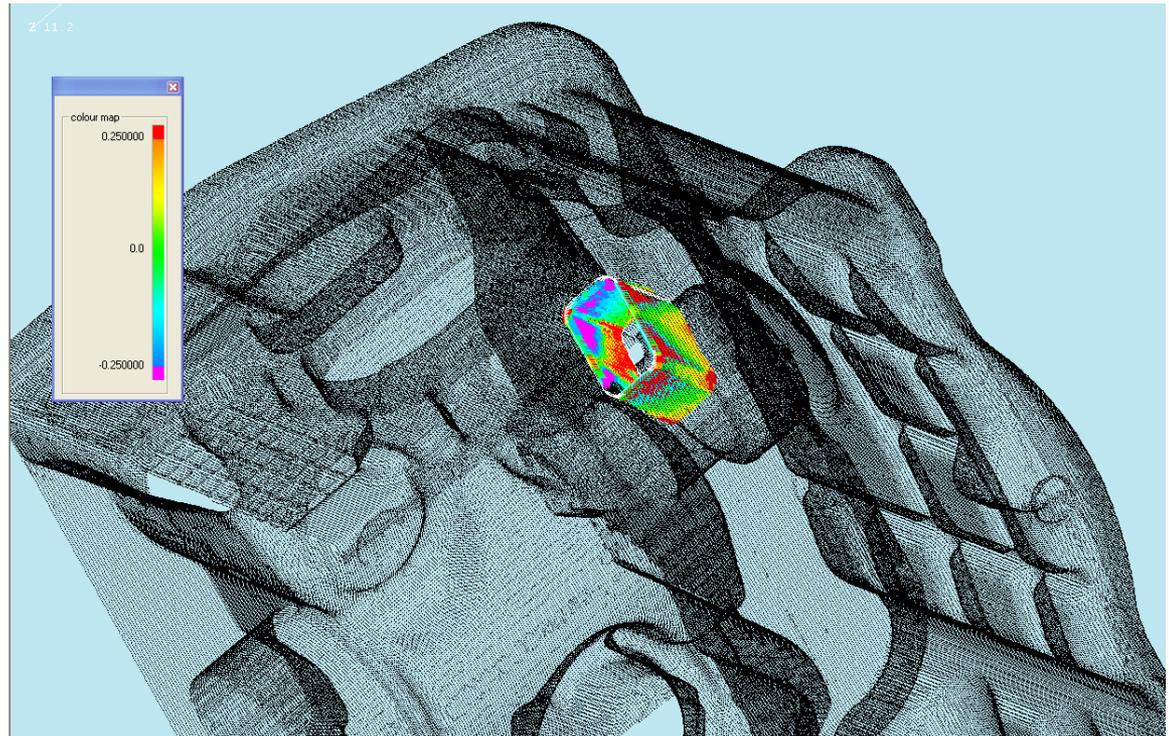
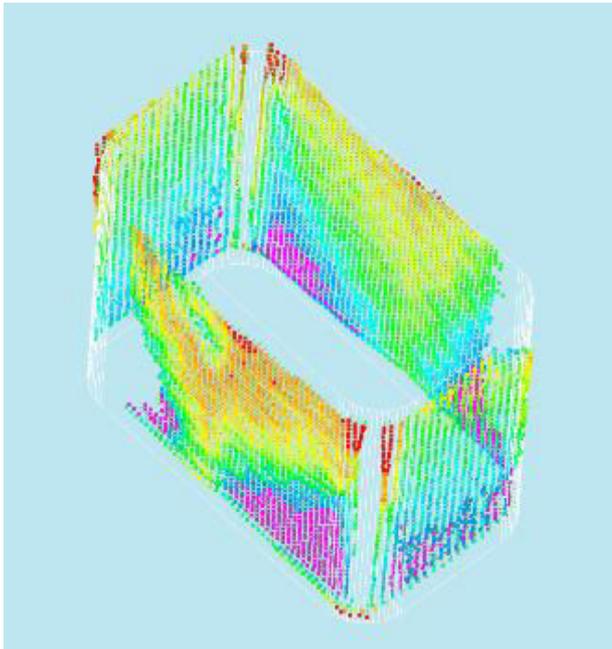
Eingepasste Langlöcher

Messen von Geometrieelementen ohne CAD-Modell: Besteinpassung kombinierter Features



Zylinderkopfdaten mit eingepassten kombinierten Elementen (Langlöchern); Abweichungen sind in farbcodierter Darstellung angezeigt

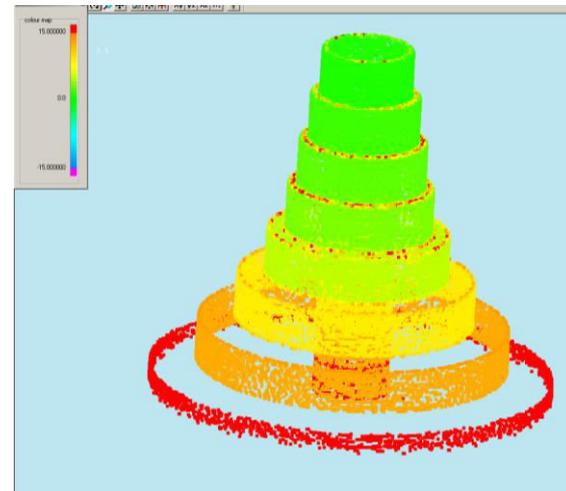
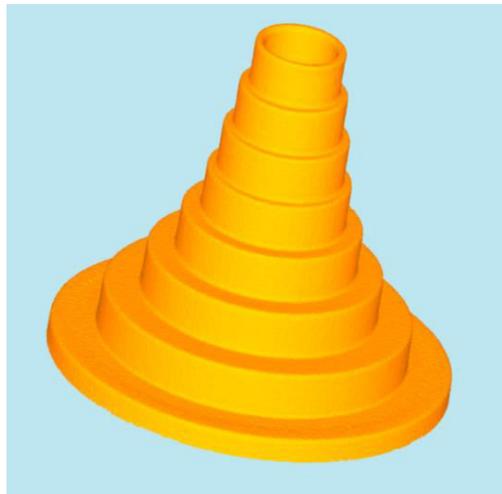
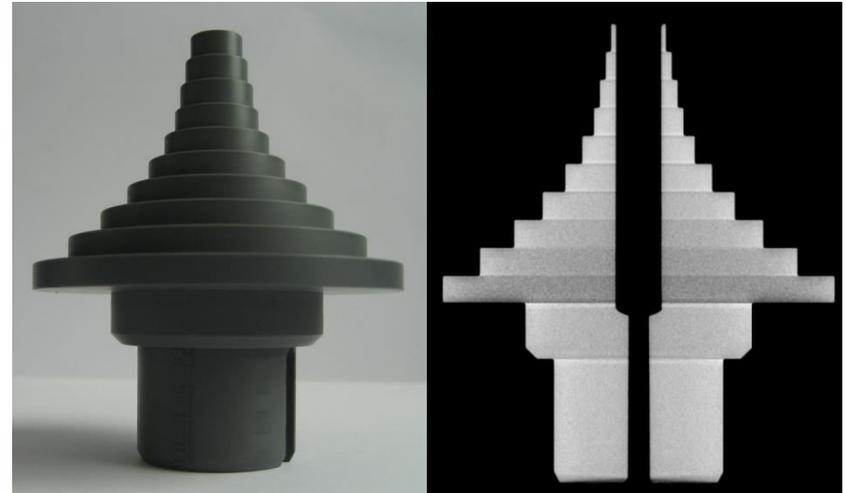
Messen von Geometrieelementen ohne CAD-Modell: Besteinpassung kombinierter Features



Zylinderkopfdaten mit eingepasstem kombinierten Element (abgerundetem Rechteck); Abweichungen sind in farbcodierter Darstellung angezeigt

Wanddickenanalyse

- Berechnung der Wanddicken anhand der STL-Daten aus der CT-Messung
- Farbcodierte Darstellung der Wanddicke

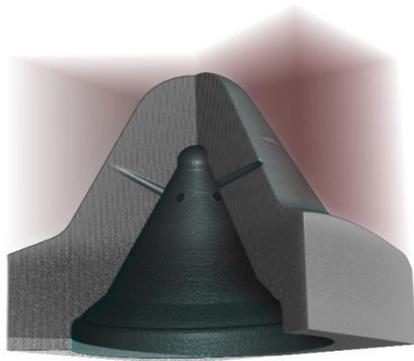


Praxisbeispiel: ***Messung Einspritzdüsen***

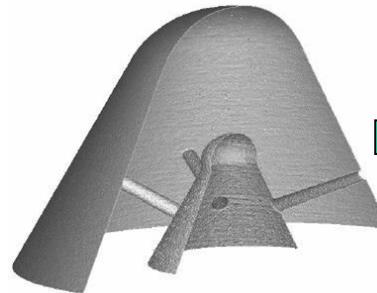
Dieseleinspritzsystem



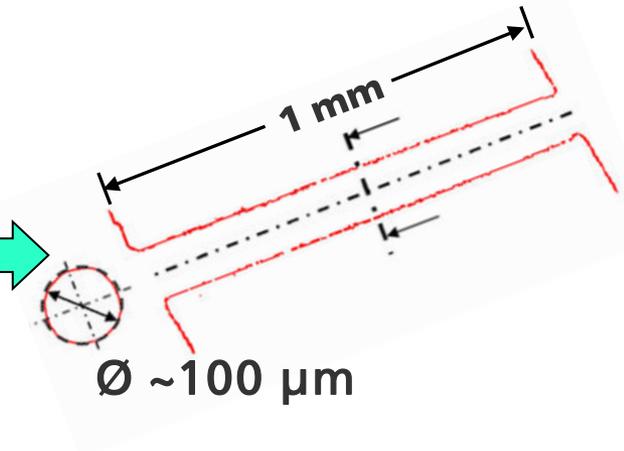
Sub- μm -genaue 3D-Mikromesstechnik auf Basis der Röntgen-CT



Volumendaten aus Röntgen-Computer-Tomographie



Subpixelgenaue Grenzflächenbestimmung



Formmessung mit Messgenauigkeit $< 1 \mu\text{m}$

Ziel:

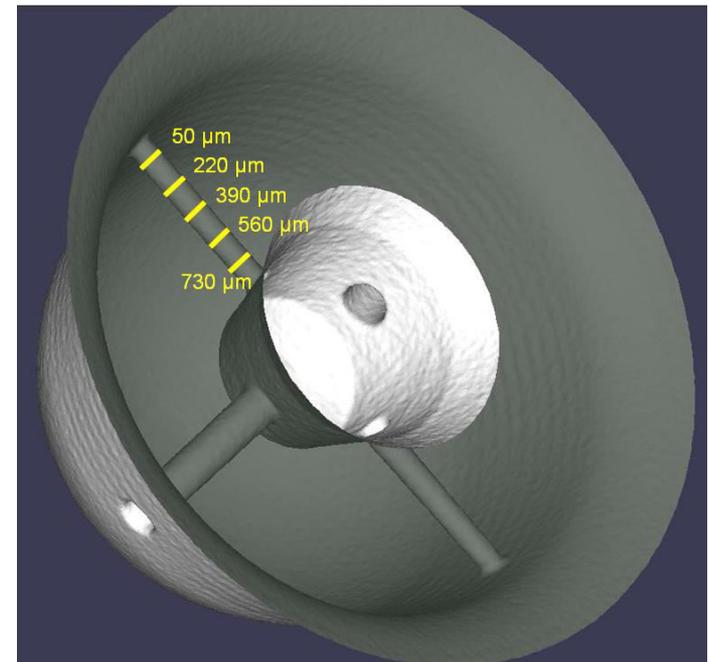
- hohe Auflösung und Messgenauigkeit ($< 1 \mu\text{m}$)
- geringe Mess- und Rekonstruktionszeit
- robuste und automatisierte Verfahren für die Volumendatenanalyse

Düsenkalibrierung auf DKD-Niveau von Werth Messtechnik

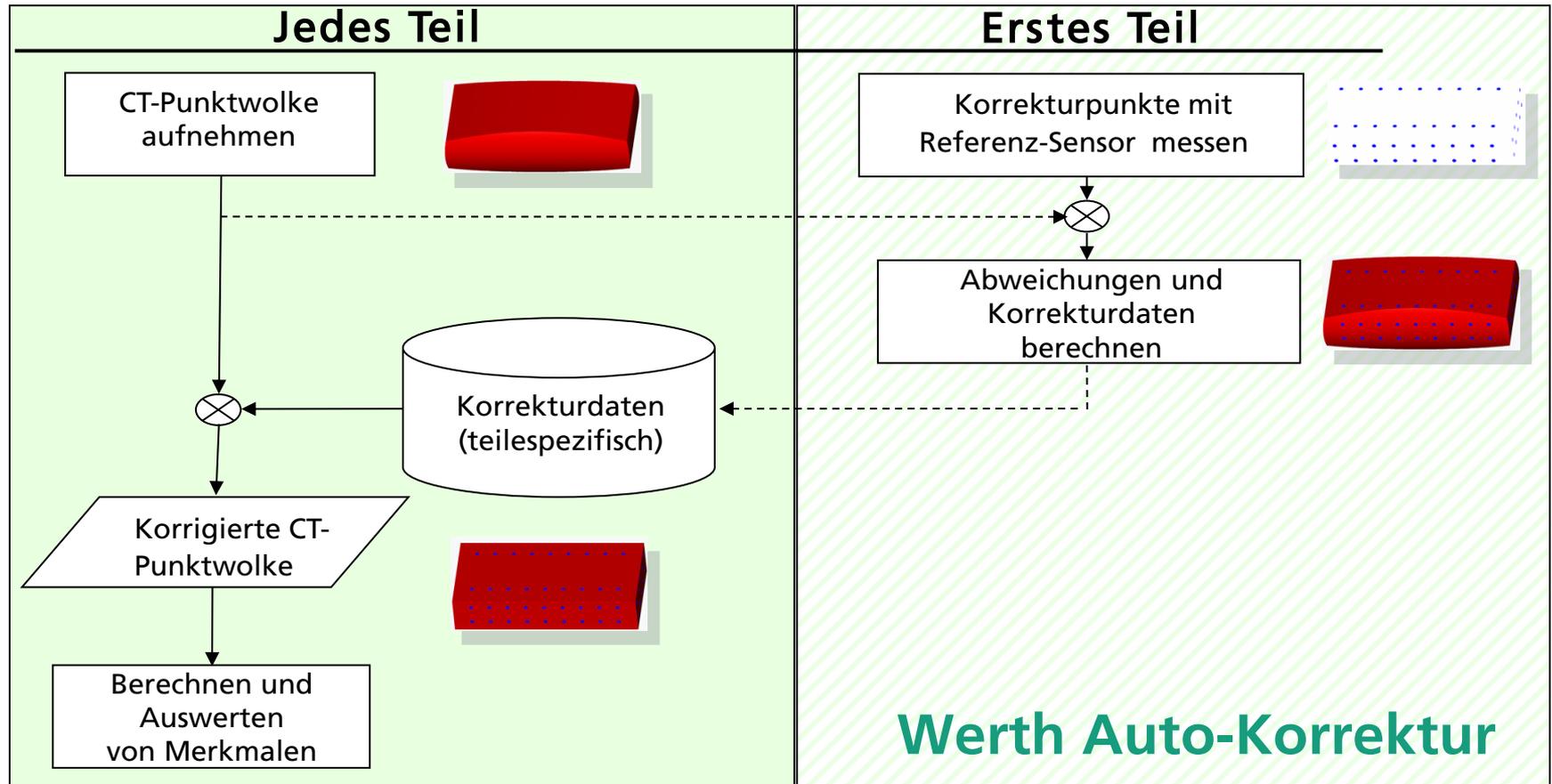
Rückführung der verwendeten Fasertasterkonfiguration mit mehreren kalibrierten Normalen -> exakte Messunsicherheitsangabe auf höchstem Niveau ($< 1 \mu\text{m}$)

Erstellung eines Auswerteprogramms für das Messen von Einspritzdüsen aus Punktwolken → Vergleichbarkeit der Messergebnisse

Testmessungen mit Fasertaster und Auswertung nach bisherigem Auswerteverfahren und Vergleich mit neuem Auswerteverfahren.

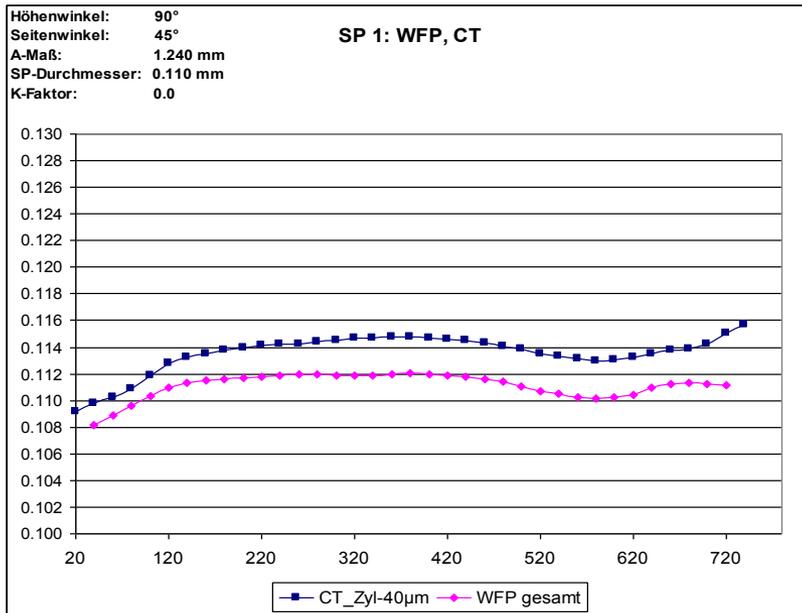


Einsatz von Datenkorrekturverfahren

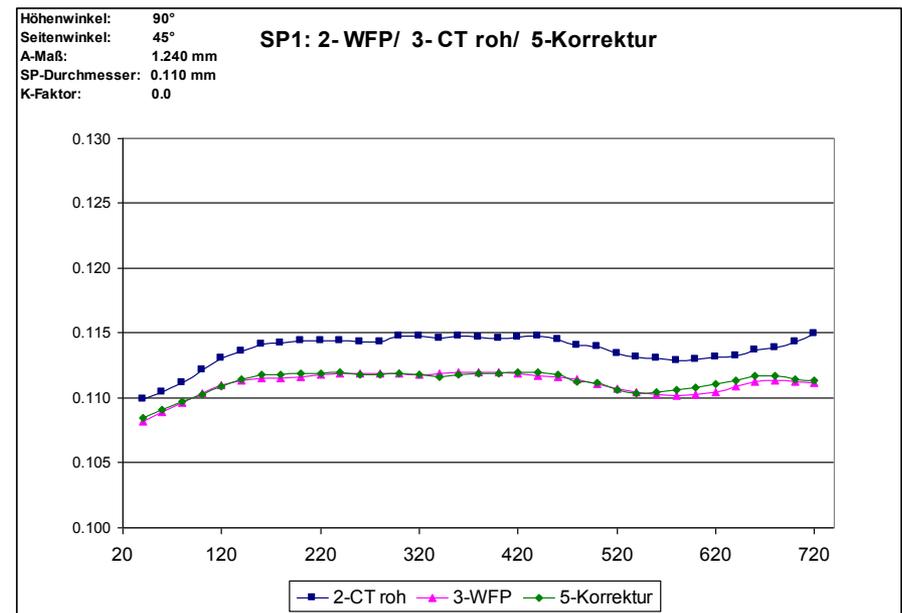


© Werth

Ergebnisse der Messungen: Durchmesserverlauf von Spritzlöchern



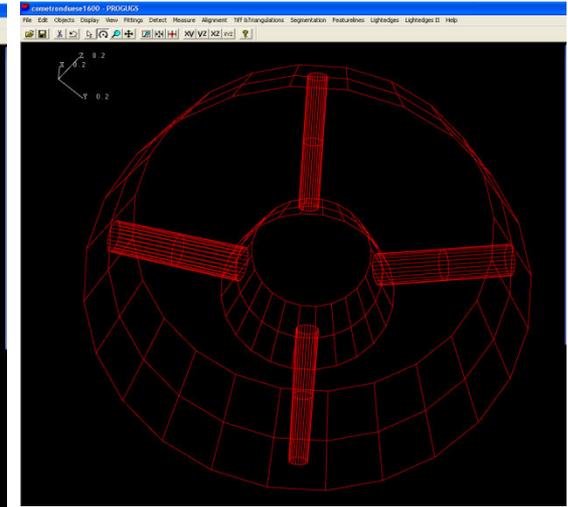
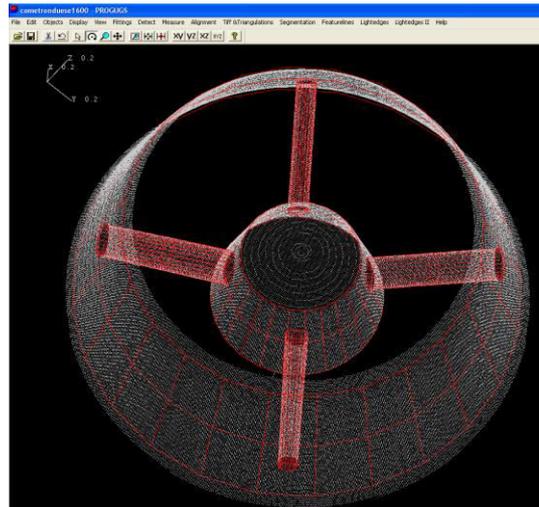
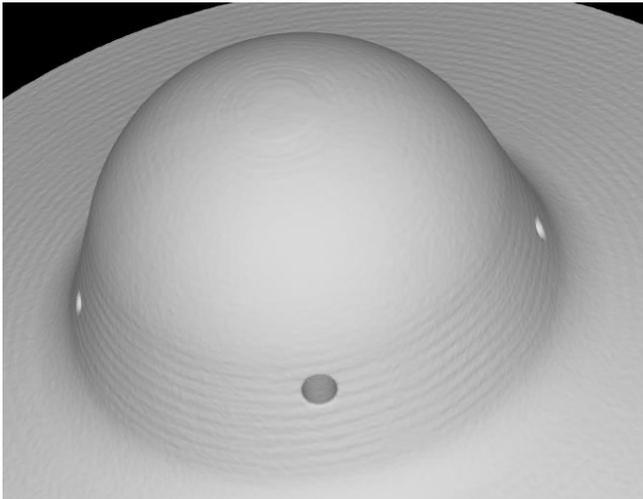
Ohne Korrektur



Mit Korrektur

Einsatz der Verfahren zur Besteinpassung kombinierter Features

- Am Beispiel: Testeinspritzdüse mit 4 Löchern (2 unterschiedliche Durchmesser und Formen)
- Mögliche kombinierte Elemente:
 - Innen- und Außenkegel → Konzentrische Kegel
 - Feste Lagen der Mittelachsen der Düsenlöcher



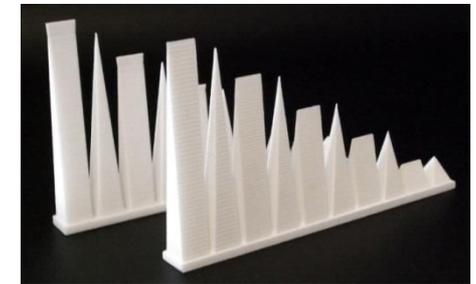
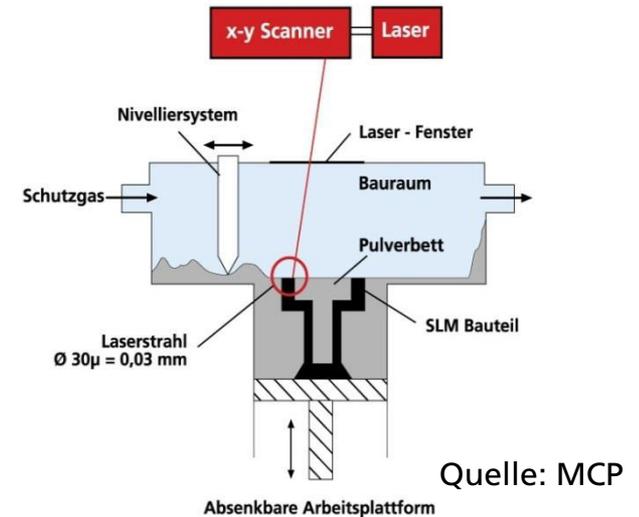
Praxisbeispiel: ***Rapid Manufacturing***

CT im Rapid Manufacturing

Gründe für den CT Einsatz:

- Produktionen mit kleinen Stückzahlen, bis Losgröße 1
 - Zerstörende Prüfung nicht sinnvoll
- Viele verschiedene Einflüsse im Bauprozess u.a. durch Einstellungsparameter des Bauprozesses, Anlagentyp, Materialqualität, Umgebungsbedingungen.
 - Bauteile mit individuellen Qualitätseigenschaften

Angemessenheit von Preis und Geschwindigkeit der CT im Vergleich zum Herstellungsprozess



CT im Rapid Manufacturing

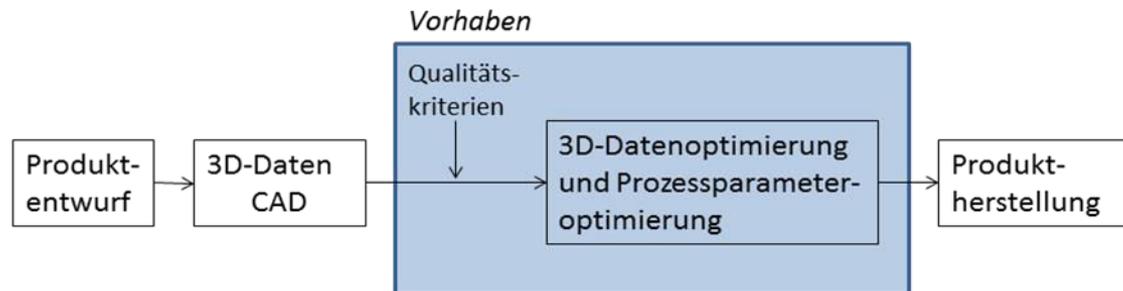
Messbare Merkmale und Einflüsse im Herstellungsprozess mit CT:

Bauteilbezogene Qualitätskontrolle:

- Baufehler in inneren Strukturen
- Geometrische Genauigkeit
- Bauteilverzug und Materialermüdung

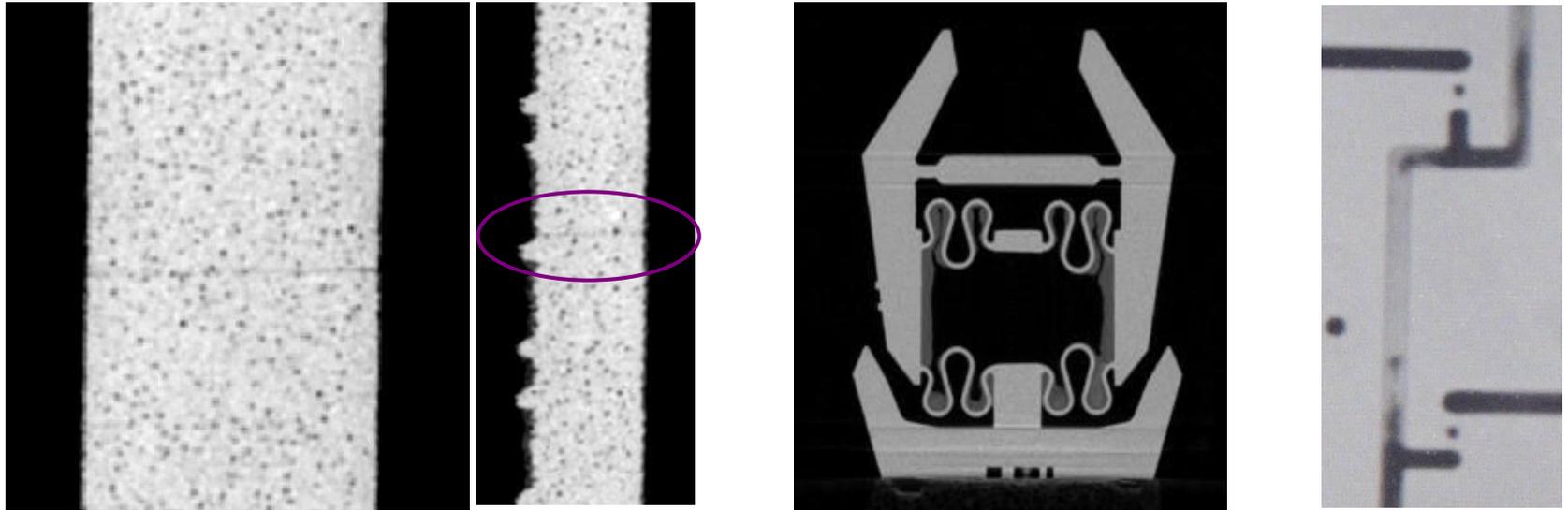
Möglichkeiten des Qualitätsvergleichs und der Prozessoptimierung:

- Vergleich verschiedener Anlagen
- Vergleich verschiedener Materialien
- Abhängigkeit von Prozessparametern und Bauteileigenschaften



Strukturen im Bauteilinneren

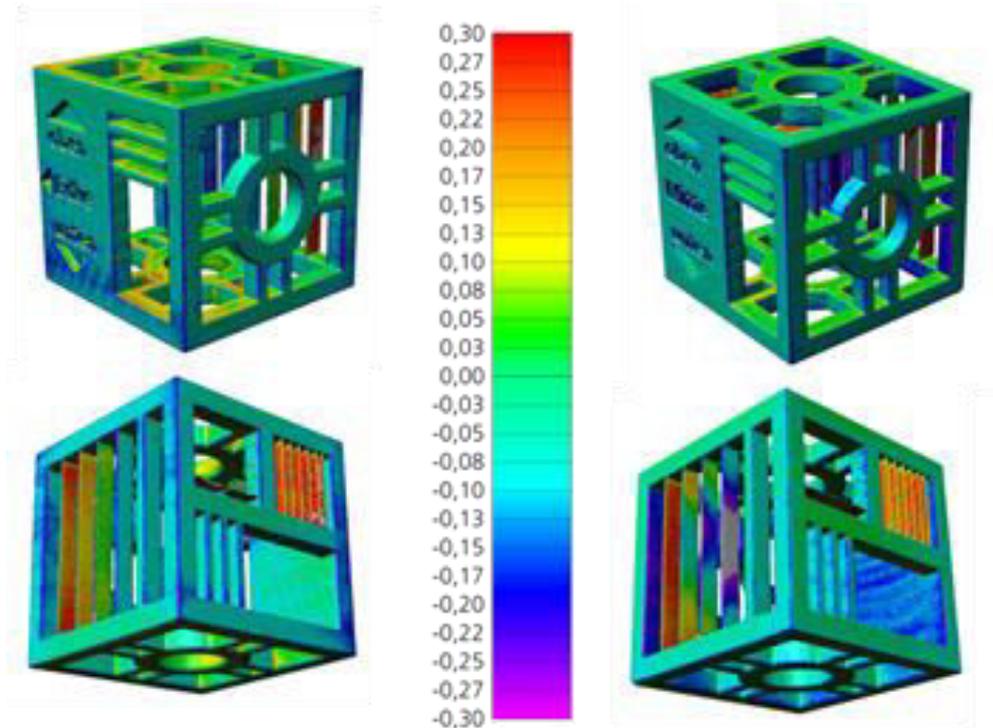
- Beispiele:
- Fehlende Schichten
 - Restmaterial im Inneren (Pulverrückstände)
 - Geschlossene Kanäle



→ Sichtprüfung oder automatisierte Prüfung im CT-Volumenmodell

Geometrische Genauigkeit des RM

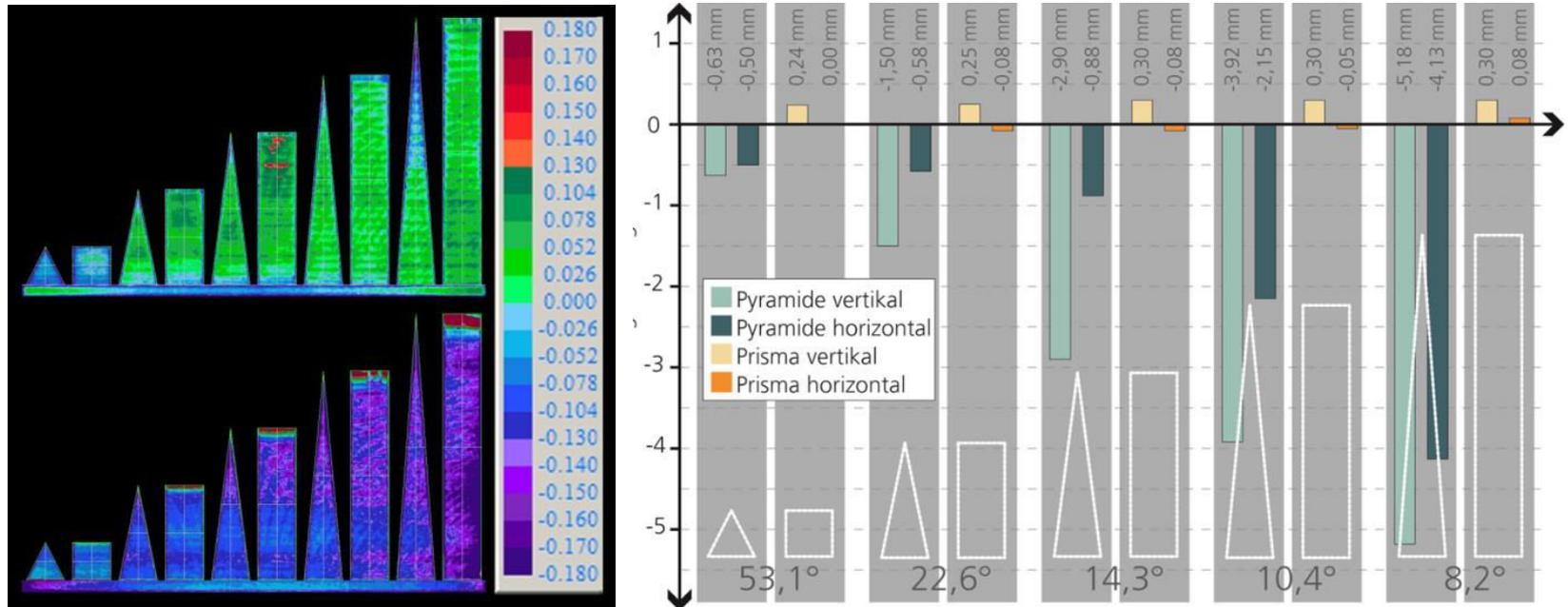
Analyse der Restriktionen an mögliche Wandstärken:



→ Untersuchung mittels Soll-Ist-Vergleich von CT- und CAD-Daten

Geometrische Genauigkeit des RM

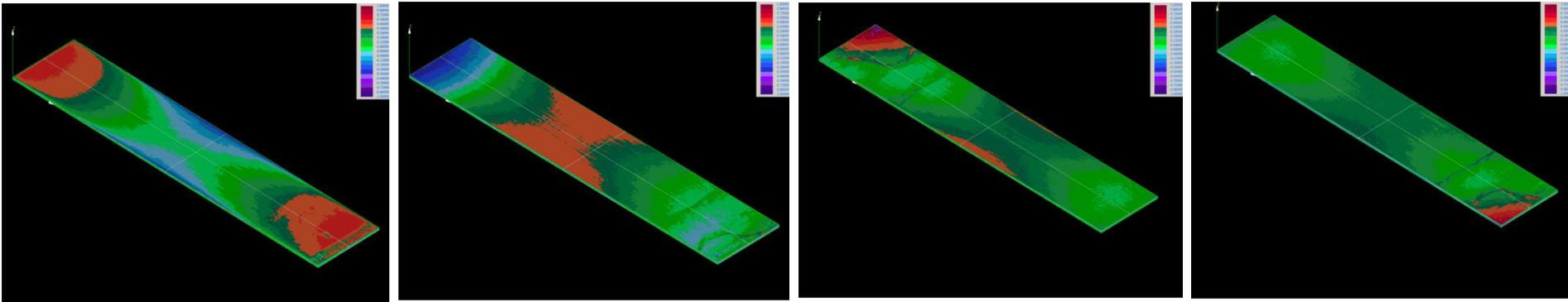
Untersuchung des Stufeneffekts der Schichtbauweise (anhand vertikal and horizontal gebautem Testbauteil):



→ Untersuchung mittels Soll-Ist-Vergleich von CT- und CAD-Daten sowie Ermittlung der Abweichungen zur erwarteten Geometrie

Materialverzug

Materialverzug durch zu schnelles Abkühlen



50 Min. später,
120°C

85 Min. später,
100°C

110 Min. später,
70°C

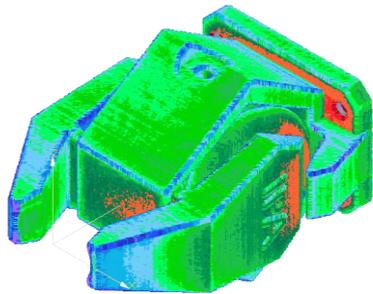
120 Min. später,
60°C

→ Untersuchung mittels Soll-Ist-Vergleich von CT- und CAD-Daten zur Quantifizierung des Verzugs in Abhängigkeit des Abkühlprozesses

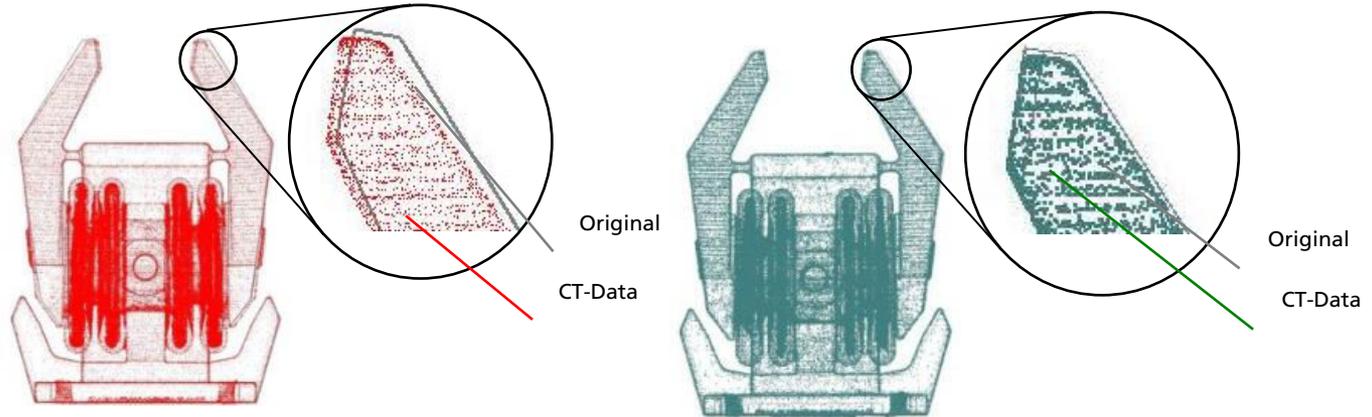
→ Möglichkeit bauteilindividueller Versuchsreihen (Material, Wandstärken, Abmessungen) zur Vorhersage des Verzugs und zeitlichen Optimierung des Bauprozesses.

Materialermüdung

Dauerprüfung von RM-Greifern mit einem Druckaufschlag von 2 Bar:



3D- Soll-Ist
Vergleich nach 24h
Belastung



Projektion der CT-Punkte nach 24h unter Last (links) und nach
weiteren 24h Erholungsphase (rechts)

- Untersuchung mittels Soll-Ist-Vergleich von CT- und CAD-Daten zur Quantifizierung des Verzugs und der Formabweichung
- Möglichkeit bauteilindividueller Versuchsreihen (Material, Wandstärken, Abmessungen) zur Vorhersage des Verzugs und der Lebensdauer eingesetzter Bauteile

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit