

Einsatz von Computertomografie in der Reverse-Engineering Technologie – Vollständige Prozesskette am Beispiel eines Zylinderkopfes

M. Bartscher, U. Hilpert, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig
J. Goebbels, G. Weidemann, Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin
H. Puder, H.-N. Jidav, ACTech, Freiberg/Sachsen

Kurzfassung

Unter vollständigem Reverse-Engineering (RE) versteht man die physische Rekonstruktion eines Bauteils ohne Kenntnis seiner Konstruktionsdaten. Am Anfang einer vollständigen Reverse-Engineering Prozesskette steht das Originalbauteil, am Ende seine physische Kopie. Sollen auch innere Bauteilgeometrien erfasst werden, ist Computertomographie (CT) mit Röntgenstrahlen ein wesentlicher Bestandteil dieser Prozesskette [1, 2, 3]. In diesem Beitrag wird am Beispiel eines Zylinderkopfes, einer historischen Motorkomponente eines HORCH 853 Automobils von 1935-37, eine vollständige RE-Prozesskette dargestellt und der Einfluss der verschiedenen Prozessschritte auf die Rekonstruktion des Originalteils untersucht. Der originale Zylinderkopf diente als Vorlage für ein virtuelles Modell, von dem mehrere Kopien aus unterschiedlichen Materialien (Grauguss, Aluminium) angefertigt wurden. Durch die notwendige Adaption an moderne Fertigungstechniken beinhaltet die Rekonstruktion eines historischen Bauteils immer auch eine teilweise Umkonstruktion. Hierdurch weichen Originalbauteil und Kopien systematisch voneinander ab und vergleichende Referenzmessungen sind nur an ausgewählten Bauteilbereichen möglich. Die Prozesskette besteht aus der Bestimmung von äußeren und inneren Geometrien durch optische und CT-Messtechnik, der Einpflege der Ausgangsmessdaten in einen einzigen hybriden Messdatensatz und dem Erstellen des virtuellen Modells, d.h. eines geeigneten Konstruktionsdatensatzes als Ausgangsbasis für die Fertigung der Bauteilkopien. Die Fertigung baut hier auf weiteren abgeleiteten Datensätzen auf, die gießtechnische sowie Bearbeitungsmodifikationen enthalten. Der Beitrag stellt die angewandte optimierte Prozesskette dar.

1. Einleitung

Der Fachbereich Koordinatenmesstechnik der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig, die Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), Berlin, und zehn Industriepartner untersuchen in einem gemeinsamen Industrieprojekt (Förderung durch Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, BMWA) die dimensionellen Messeigenschaften von industriellen Computertomographie (CT)-

Anlagen. Ein Arbeitspaket in diesem Projekt ist die Erstellung einer vollständigen Reverse-Engineering (RE) Prozesskette unter Nutzung von CT-Messdaten.

Seitens der Industrie konzentriert sich die Firma ACTech GmbH auf Prototypenfertigung und Reverse-Engineering. Dies umfasst die Konstruktion und Fertigung von Gussformen, das Abgießen der Rohteile und die mechanische Endbearbeitung der Fertigteile. Im Rahmen der Warenausgangskontrolle werden darüber hinaus werkstofftechnische und dimensionelle Prüfungen durchgeführt.

PTB, BAM und ACTech untersuchen das vollständige RE an einem realen Industriebauteil. Vollständiges RE bedeutet hier, dass von einem Urbauteil, von dem keine Konstruktionsdaten existieren, maßlich möglichst identische Kopien gefertigt werden. Die für diesen Prozess notwendigen Schritte werden im Folgenden vor messtechnischem Hintergrund erläutert.

2. Aufgabenstellung Reverse-Engineering Projekt Horch 853

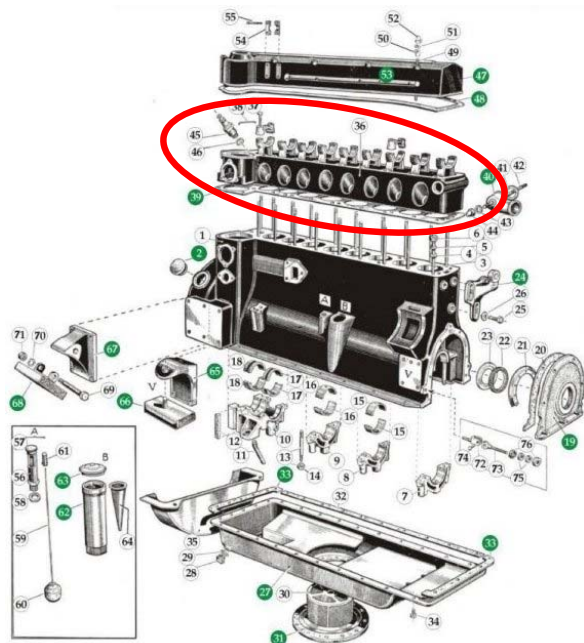


Abb. 1: Horch 853 Automobil Baujahr 1935 (links). Explosionsdarstellung des Komplettmotors mit der markierten Komponente Zylinderkopf (rechts).

Die Aufgabe der vollständigen physischen Rekonstruktion eines Bauteils stellt sich hier an einer historischen Motorkomponente, dem Zylinderkopf eines HORCH 853 Automobils (Abb. 1). Von diesem PKW wurden in der Zeit von 1935 bis 1937 619 Stück produziert. Das Modell besitzt einen Achtzylinder Reihenmotor mit 100 PS (74 kW) bzw. 120 PS (88 kW) Leistung und eine Maximaldrehzahl von 3600 U/min. Das Fahrzeug kostete ca. 15250 Reichsmark.

Ziel des Rekonstruktionsvorhabens ist die Werterhaltung und Sicherstellung der Funktion eines historischen Fahrzeugs, dessen Antriebssystem irreparabel defekt und verschlissen ist. Die gefertigte Motorkomponente soll nicht nur Anschauungscharakter haben, sondern soll zusammen mit ebenfalls nachgefertigten Komponenten (z.B. dem Motorblock) einen lauffähigen Motor ergeben. Die Rekonstruktion soll soweit wie möglich originalgetreu erfolgen.

Die zerstörungsfreie Erfassung komplexer und großer Bauteile stellt eine messtechnische Herausforderung dar. Der untersuchte Zylinderkopf (Abmaße 977 mm x 255 mm x 170 mm) lässt sich mit der zur Verfügung stehenden CT-Messtechnik nicht als Ganzes mit der notwendigen Auflösung erfassen. Die Messdaten von Teilbereichen müssen deshalb aufwändig zusammengesetzt werden. Die Umwandlung der Rohmessdaten der Oberflächengeometrien in handhabbare CAD-Beschreibungen zur Fertigungsvorbereitung, Werkzeugherstellung und Endbearbeitung sind ebenfalls mit hohem Aufwand verbunden. Durch zeitoptimierte Prozesse ist eine Preisreduktion im Prototypenbau möglich, deshalb ist hier der Erfahrungsgewinn für optimierte Fertigungsprozesse wichtig. Im Zuge des Reverse-Engineering des Zylinderkopfes sollen daher Verfahren zur Datenverarbeitung, Soll-Ist Vergleiche von Datensätzen, Verfahren zur Erzeugung und Bearbeitung von NURBS (Non Uniform Rational B-Splines als CAD-Datenformat von Oberflächen) und der Einfluss von Ausrichtestrategien zur Bildung von Werkstückkoordinatensystemen untersucht werden. Hierzu wurden verschiedene Repliken des Originalzylinderkopfes von ACTech angefertigt. Im Rahmen des BMWA-Projekts wurde eine Replik aus Aluminium und eine aus Grauguss gefertigt.

3. Optimierter Reverse-Engineering Prozess

3.1 Erstellung des 3D-Basismodells

Der hier dargestellte Reverse-Engineering (RE) Prozess enthält eine Reihe von Optimierungen, die im Folgenden beschrieben werden. Die Optimierungen betreffen insbesondere die zerstörungsfreie Erfassung der Originalteilgeometrie durch optische und CT-Messungen, das Datenhandling und eingeführte Prozesskontrollen durch Soll-Ist Vergleiche. In Abb. 2 ist der erste Teil eines typischen RE-Prozesses – die Erstellung des 3D-Basismodells – gezeigt, wie er als Ergebnis der Untersuchungen jetzt durchgeführt wird. Der bisher häufig eingeschlagene Weg, das Bauteil von außen taktill mittels eines Koordinatenmessgeräts zu messen, hat mehrere Nachteile. Die Punktdichte ist bei einer taktilen Messung in der Regel relativ niedrig. Die Messzeiten dagegen sind vergleichsweise lang. Diese Nachteile werden mit optisch-flächenhaft messenden Systemen (z.B. Streifenprojektion) umgangen. Einzig die

größere Messunsicherheit eines optischen Systems muss beachtet werden. Ausgehend von einer CT-Messung, die auch Geometrielemente des Bauteilinneren erfasst, und einer optischen Messung des originalen Bauteils wurden verschiedene Datensätze im STL-Dateiformat gewonnen. STL-(Stereolithographie)-Datensätze sind polygonartige Beschreibungen der Oberfläche eines Körpers. Diese Messdatensätze werden in einem aufwändigen – weil wenig automatisierten – Prozess in Konstruktionsflächen transformiert. Durch den CAD-Konstrukteur werden dabei soweit möglich Regelgeometrien am Bauteil in NURBS-Regelgeometrien überführt. Die verbleibenden Flächensegmente werden durch NURBS-Freiformflächen beschrieben. Dieser als Flächenrückführung bezeichnete Prozess ist mit Informationsverlust behaftet. Es muss insbesondere bei der Flächenrückführung das Augenmerk auf Bauteilgeometrien mit kleinen Krümmungsradien (Kanten) gelegt werden.

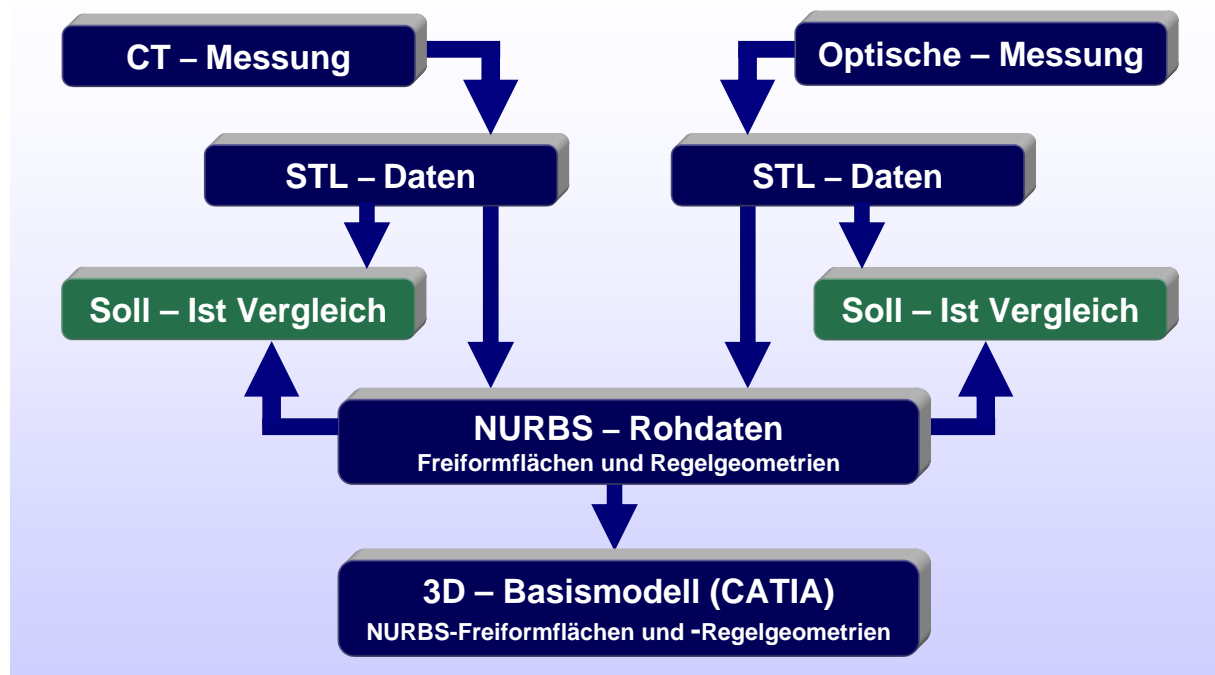


Abb. 2: Schematische Darstellung des ersten Teils des vollständigen RE-Prozesses. Prozesskette von der Erfassung der Messdaten bis zur CAD-Beschreibung des Originalteils.

Die NURBS-Beschreibung bietet im Gegensatz zur polygonbasierten Oberflächenbeschreibung die Möglichkeit der Weiterverarbeitung in CAD-Systemen. Ein Soll-Ist Vergleich mit den gemessenen Polygondaten verschafft einen Überblick, ob der erzeugte NURBS-Datensatz im Rahmen der mit der Aufgabe verträglichen Toleranzen liegt. Bei erfolgreicher Flächenrückführung liegt nun ein geeignetes 3D-Basismodell in einer CAD-Software vor.

3.2 Herstellung des Fertigteils

Zur Adaption moderner Fertigungstechniken beginnt nun eine Umkonstruktion. Es ist wesentlich effizienter und kostengünstiger, auf aktuell verfügbare Teile zurückzugreifen und leichte Änderungen am Modell zuzulassen. Im Zuge der Umkonstruktion wurden z.B. die Lagerschalen ausgetauscht und der Ölkanal angepasst. Wie detailgetreu die Rekonstruktion letztendlich durchgeführt wird, ist Bestandteil der Definition der Qualitätsanforderungen des Auftraggebers. Ein vollständiges und streng detailgetreues RE jeder Einzelstruktur würde die Produktion komplexer Bauteile unmöglich machen oder unakzeptabel verteuern.

Hauptaufgabe der rekonstruktionsbedingten Änderungen ist im vorliegenden Fall jedoch die Korrektur der verschleißbedingten Schadstellen. Es wurden defekte Ventileführungen und -sitze, durch Korrosion beschädigte Durchflüsse des Wassermantels und ein alterungsbedingter Verzug des Originalteils korrigiert.

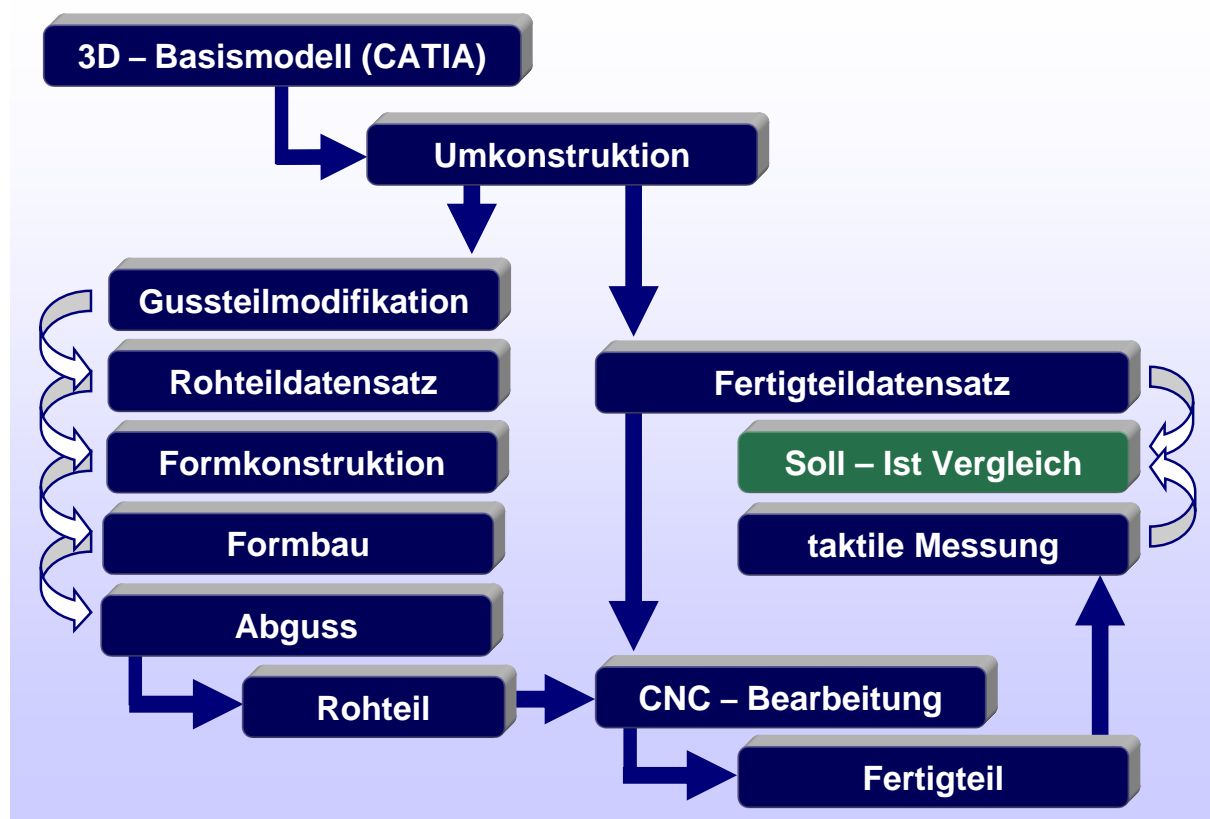


Abb. 3: Schematische Darstellung des zweiten Teils des vollständigen RE-Prozesses. Ausgangsbasis ist die CAD-Beschreibung des Originalteils, am Ende steht das replizierte Fertigteil.

Aus dem 3D-Basismodell entstehen nach der Umkonstruktion und der Korrektur der Schadstellen zwei Datensätze, der Rohteildatensatz als Ausgangsbasis für die Konstruktion der Gussform, und der Fertigteildatensatz für die anschließende CNC-

Endbearbeitung des Gussteils (Abb. 3). Der Rohteildatensatz unterscheidet sich vom Fertigteildatensatz im wesentlichen durch Berücksichtigung von Materialschwund durch den Gussprozess und die Nachbearbeitung durch entsprechende Aufmaße. Nach der CNC-Bearbeitung erfolgen weitere Messungen, diesmal jedoch am Fertigteil, um die Ergebnisse mit den Messungen am originalen Bauteil vergleichen zu können. Das Ergebnis des in Abb. 3 dargestellten Soll-Ist Vergleichs erlaubt eine Aussage über die Qualität des Fertigteils. In Abhängigkeit von den Toleranzen können sowohl taktile (als Standard), optische oder CT-Messungen am Fertigteil durchgeführt werden. Zum Abschluss des RE-Prozesses erfolgt ein Soll-Ist Vergleich von Fertigteil und Originalteil. Hierbei muss kritisch betrachtet werden, in wie weit das Originalbauteil von Störungen wie Verzug, Verschleiß, Schäden und Fertigungsabweichungen des Herstellungsprozesses betroffen ist.

4. Anwendung der Computertomografie für den Reverse-Engineering Prozess

4.1 Prinzip der Computertomographie

Computertomographie (CT) ist ein Messverfahren, mit dem innere und äußere Defekte von Bauteilen zerstörungsfrei bestimmt werden können. In jüngster Zeit werden CT-Anlagen ebenfalls verstärkt für dimensionelle Messungen eingesetzt. Für die Anwendung der zerstörungsfreien und vollständigen Erfassung innerer Geometrien ist CT derzeit das einzige industriell verfügbare Messverfahren.

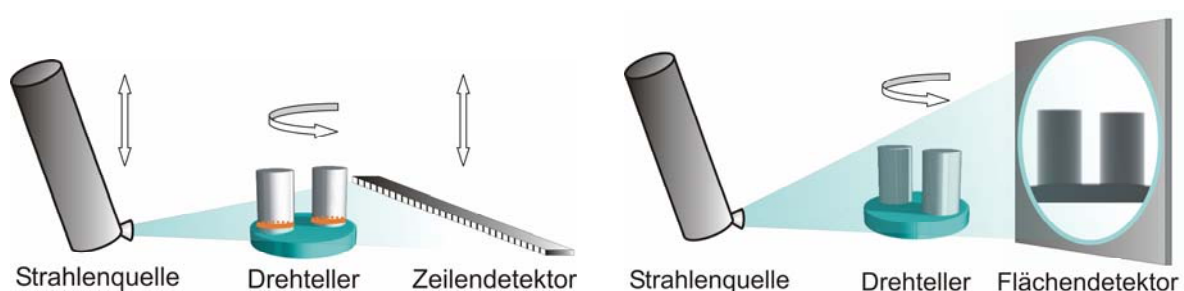


Abb. 4: 2D-CT mit Zeilendetektor (links) und 3D-CT mit Flächendetektor (rechts).

Inzwischen gibt es mehrere industriell gebräuchliche CT-Bauformen, wie die 2D- und die 3D-CT. Bei der 2D-CT [4] wird das Bauteil mit einem Fächerstrahl durchstrahlt und die abgeschwächte Strahlung mit einem Zeilendetektor gemessen (Abb. 4, links). Die vollständige Erfassung des Bauteils erfolgt hier durch eine vertikale Verschiebung von Quelle und Detektor. Bei der 3D-CT [5] (Abb. 4 rechts) wird das gesamte Bauteil von einem Kegelstrahl durchstrahlt. Die Röntgenprojektion wird mit einem Flächendetektor gemessen.

Für besondere Messaufgaben mit stark absorbierenden Materialien oder großen durchstrahlten Dicken wie z.B. 35 cm Stahl oder Gusseisen ist eine Hochenergie CT-Strahlenquelle erforderlich. An der BAM wird hierzu ein 10,5 MeV Linearbeschleuniger („linear accelerator“ LINAC) eingesetzt. Dieser besitzt mit $(1,5 \text{ mm})^2$ einen etwas größeren Fokus als konventionelle röntgenröhrenbasierte CT-Anlagen (bis 450 kV) zur Messung von Großteilen. Mit der LINAC CT-Messeinrichtung lassen sich räumliche CT-Auflösungen von 0,5 mm – 1,5 mm realisieren.

4.2 Durchgeführte Messungen

Der Originalzylinderkopf aus Grauguss wurde bei ACTech zunächst optisch mit Streifenprojektion erfasst. Die CT-Messungen am Originalbauteil wurden an der BAM mittels 3D-CT am LINAC durchgeführt.

Die Projektionen der durchgeführten 3D CT-Messungen wurden mit einem Flächen-detektor mit 256×256 Pixel und einer Pixelgröße von $(0,8 \text{ mm})^2$ aufgezeichnet. Aus der Geometrie der Messungen und diesen Parametern ergibt sich eine Volumenbeschreibung des Körpers mit einer Voxelgröße von $(0,635 \text{ mm})^3$. Durch die Bauteilgröße bedingt musste dabei der Körper in 17 Einzelmessungen erfasst werden (Abb. 5). Nach der Rekonstruktion der CT-Rohdaten wurden die Einzelmessungen auf Voxelbasis zusammengesetzt (Abb. 6). An den rekonstruierten CT-Messdaten wurde in den Überlappungsbereichen der Messungen eine maximale Abweichung im Bereich der Voxelgröße ermittelt. Dieser Wert lässt das Verfahren für RE-Anwendungen geeignet erscheinen.

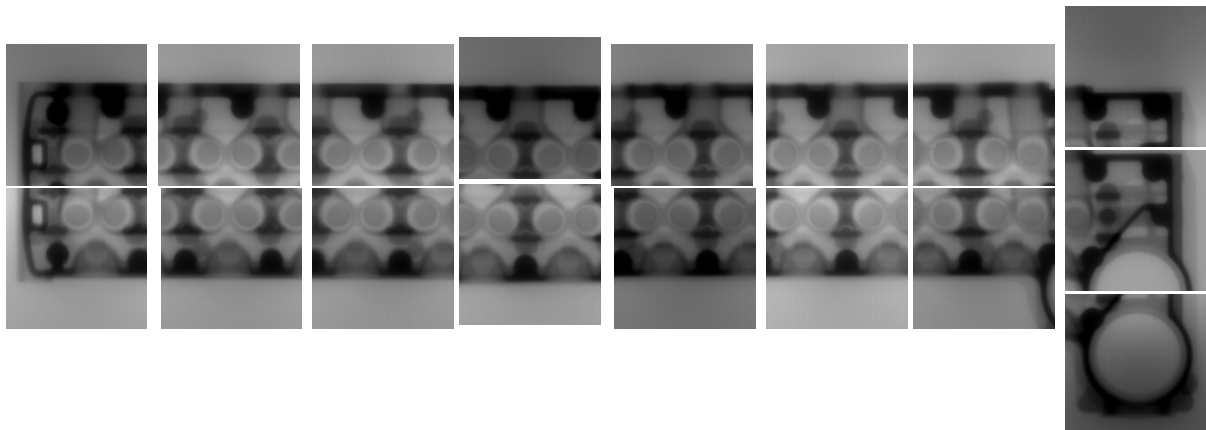


Abb. 5: Einzelmessungen des Zylinderkopfs (jeweils eine Projektion je Teilmessung)

Um eine geeignete Datenstruktur für eine Weiterverarbeitung in CAD-Software zu erhalten, ist es notwendig aus den Volumendaten eine Polygonoberfläche zu extrahieren [3]. Aus dem Verlauf der Kantenfunktion in den Grauwertdaten der rekonstruierten CT-Messung (Abb. 6) wird für die extrahierte Oberfläche eine erweiterte Messunsicherheit von 1-2 Voxeln ($\leq 1,3 \text{ mm}$) angenommen.

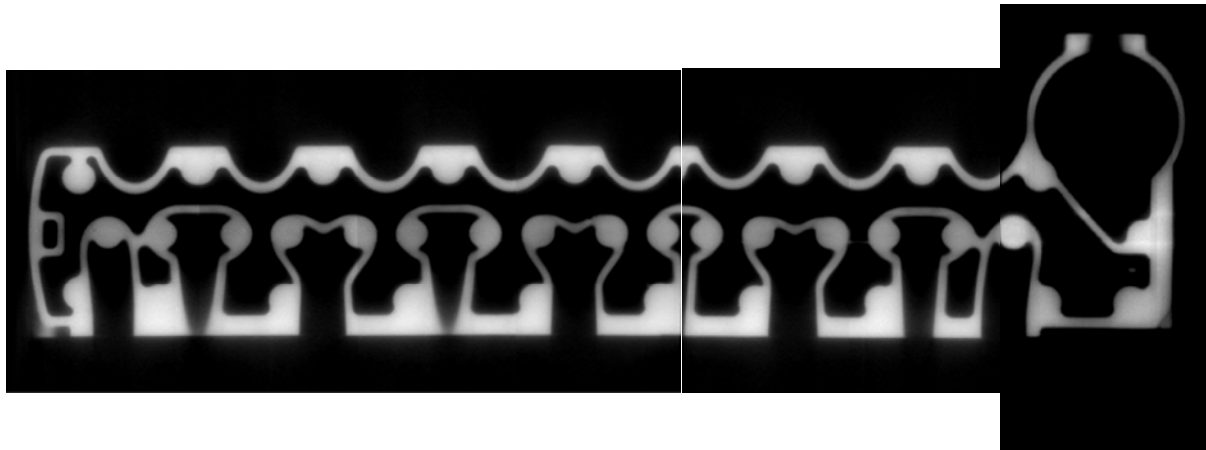


Abb. 6: Rekonstruierte CT-Messdaten des Zylinderkopfvolumens (Schnittbild)

Ausgehend von der CT- und der optischen Messung des originalen Bauteils erhält man zwei polygonbasierte Datensätze. Der Datensatz der optischen Messung beschreibt ausschließlich die Außenkonturen des Bauteils. Vom Hersteller des optischen Messgerätes wird für die aufgenommenen Messpunkte eine Messunsicherheit von ca. 100 µm angegeben. Obwohl das Bauteil unter zwei Winkelstellungen mit ca. 30° Versatz zueinander gemessen wurde, ist die Beschreibung der Außenkontur nicht vollständig. Wie in Abb. 7a beispielhaft für ein Zylinderkopfsegment dargestellt, sind an verschiedenen Stellen des Datensatzes Löcher zu erkennen. Der CT-Datensatz hingegen beschreibt sowohl die vollständige Außen- als auch die Innenkonturen.

4.3 Erzeugung eines Konstruktionsdatensatzes

Zur Erzeugung eines CAD-Modells ist es notwendig, einen einzigen, vollständigen, Datensatz zu verwenden. Der vorliegende CT-Datensatz besitzt aufgrund der relativ großen Voxelgröße des LINAC im Bereich der Außenkontur zu große Messabweichungen. Insbesondere die Bereiche im Brennraum sind zu eng toleriert, um ausschließlich den CT-Datensatz verwenden zu können. Der optische Datensatz ist hierfür besser geeignet, enthält jedoch keine Information über den Innenraum. Aus diesem Grund muss aus beiden Datensätzen ein einziger Datensatz generiert werden. Hierzu werden mit einer geeigneten CAD-Software zuerst die innen liegenden Teile der Messdaten der CT-Messung segmentiert. Anschließend werden diese in den Überlappungsbereichen mit den optischen Daten besteingepasst und in einem gemeinsamen hybriden Messdatensatz abgespeichert. Fehlstellen in den optischen Daten können nun mit vorhandenen CT-Daten ergänzt werden. Dieses Vorgehen, das manuell unter Nutzung von CAD-Software erfolgt, ist in den folgenden Abb. 7a und 7b illustriert.

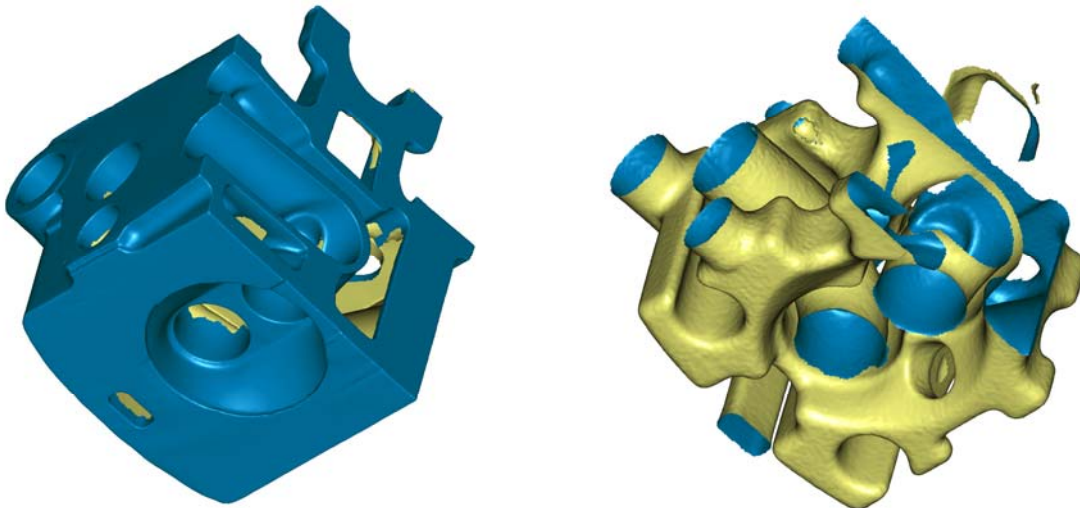


Abb. 7a: Polygonoberfläche erzeugt durch optische Messung (Streifenprojektion). Prinzip bedingt kann nur die äußere Oberfläche erfasst werden.

Abb. 7b: Segmentierte Polygonoberfläche für den Innenraum des Bauteils, erzeugt durch eine LINAC CT-Messung.

Die in dem kombinierten hybriden Messdatensatz induzierte Unsicherheit der Oberfläche hängt maßgeblich von der Eliminierung unterschiedlicher Skalenfaktoren der Messdatensätze ab. Durch die Verwendung geeigneter Prüfkörper zur Aufnahme von Korrekturparametern während einer CT-Messung können die systematischen Abweichungen in den CT-Datensätzen jedoch korrigiert werden [3, 6]. Der Verfahrensfehler für das Zusammenfügen der Datensätze für die vorliegende LINAC CT-Messung mit der optischen Messung wird insgesamt im Bereich der Voxelgröße abgeschätzt. Anschließend kann der Flächenrückführungsprozess durchgeführt werden. In der folgenden Abb. 8 ist ein Soll-Ist Vergleich der Messdaten und eines daraus automatisiert erzeugten CAD-Modells im NURBS-Format dargestellt.

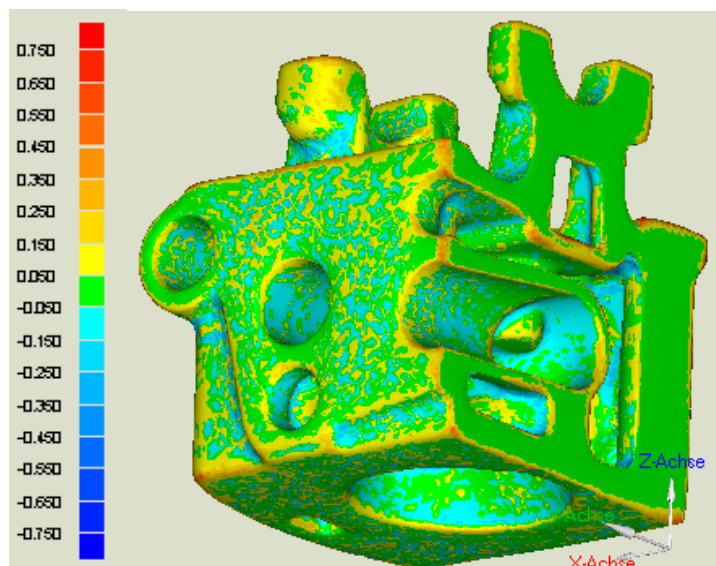


Abb. 8: Soll-Ist Vergleich des hybriden STL-Messdatensatz mit der aus ihm erzeugten CAD-Beschreibung (im ACIS SAT Format).

Eine automatisierte Umwandlung der Polygonoberfläche in NURBS wirkt hier in vielen Bereichen wie ein Tiefpassfilter. In ebenen Bereichen wird das Rauschen unterdrückt, in Bereichen mit kleinen Krümmungsradien werden die Kanten verrundet. Man kann feststellen, dass für komplexe Bauteile die automatische Flächenrückführung, die aktuelle Softwareprodukte anbieten, den CAD-Konstrukteur nicht im wünschenswerten Maß unterstützt. Teilbereiche, insbesondere stark gekrümmte Flächen, lassen sich aber separat selektieren und manuell zurückführen und werden dann im weiteren Prozess mit anderen, automatisch generierten Teilbereichen verschmolzen. Weiterer konstruktiver Aufwand, der nicht durch eine automatische Lösung abbildbar ist, entsteht durch die Notwendigkeit, aus einem vorhandenen Fertigteil (Altteil) ein Rohteil zu erzeugen. Im CAD-Gussrohteil, der Basis für die Formkonstruktion und Grundlage für das Fertigteil, sind alle Bearbeitungsflächen mit einem zusätzlichen Aufmass zu versehen und die Bohrungen zu verschließen. Verzug und Abweichungen, entstanden durch den Fertigungsprozess des Originalteils und dem Verschleiß über die Nutzungsdauer, sind auszugleichen.

4.4 Herstellung und Beurteilung der Replik

Die Formsegmente für den Zylinderkopfabguss entstehen unter Verwendung des Direkten Formstoff-Fräsen (DMM) direkt aus den CAD-Daten. Die Gusskerne werden im Laser-Sinter-Verfahren (Direct Croning[®]) ebenfalls direkt aus den CAD-Daten gefertigt. Beide Verfahren eignen sich besonders für Einzelstücke und Kleinserienfertigung. Ein Soll-Ist Vergleich von Messdatensätzen des Originalzylinderkopfes und des Fertigteils ist in Abb. 9 dargestellt. Die Größe und Verteilung der Abweichungen ist abhängig von der Ausrichtung der beiden Datensätze. Die mittels optischer Streifenprojektion gewonnenen Datensätze wurden vor dem Vergleich auf die Brennraumflächen ausgerichtet.

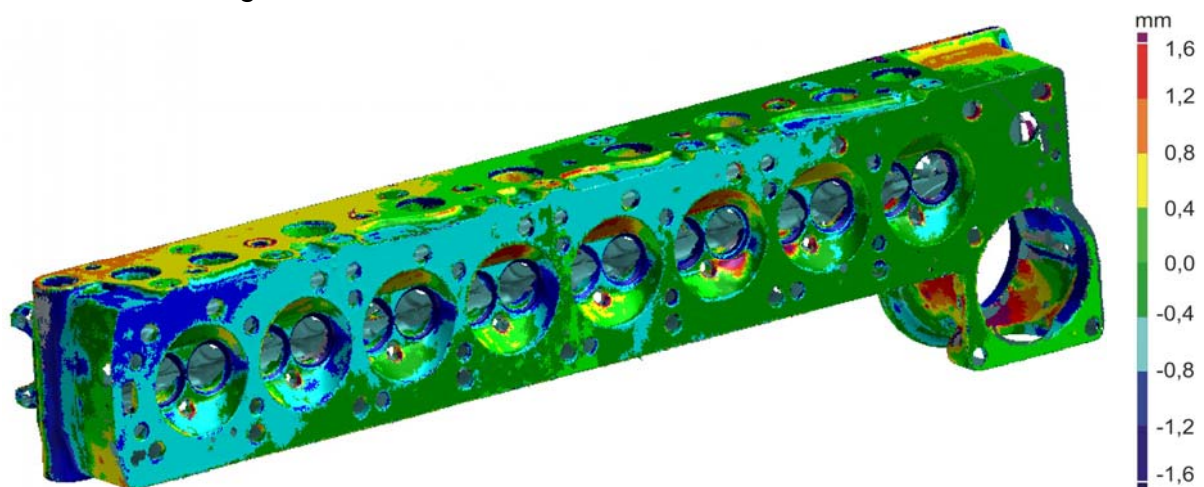


Abb. 9: Soll-Ist Vergleich der optischen Messungen des originalen Bauteils mit der RE-Replik.

Ein Montagetest des RE-Zylinderkopfes und eines ebenfalls gefertigten RE-Motorblockes ergab, dass die Abweichungen von 1,6 mm zwischen dem Originalzylinderkopf und der Replik teilweise auf einen Verzug und auf Gussfehler des Altteils zurückgeführt werden kann. Nach DIN ISO 8062 ist für ein Rohgussstücknenmaß zwischen 1000 mm - 1600 mm eine Gesamt-Toleranz von 4,6 mm zulässig. Dies entspricht der CT-Klasse 9 (CT = Casting Tolerance). Die Ebenheit der endbearbeiteten Flächen der Bauteilkopie liegt fertigungsbedingt im Bereich von 10 µm.

Hieraus wird deutlich, dass eine Qualitätsaussage des vollständigen RE-Prozesses nur über Soll-Ist Vergleiche der einzelnen Teilschritte erfolgen kann. Den größten manuellen Aufwand in der RE-Prozesskette stellt der Aufbau eines einheitlichen Bezugssystems für die Ein- und Anbauteile dar. Die Anforderungen an die Genauigkeit der Bauteilschnittstellen liegen oberhalb der Formtreue des Altteils. Das Bezugssystem muss von den beteiligten Ingenieuren und dem Motorenrestaurator aufgestellt werden. Notwendige Zuarbeiten sind Recherchen über das Originalaggregat, dessen Produktionsweise, Untersuchung von vorhandenen Anbauteilen und ihren standardisierten Größen (z. B. Zahnradmodul) sowie das Nachempfinden der ehemaligen Konstruktion (z. B. sinnvolle Teilungen in mm oder Zoll). Die Tolerierung der Bearbeitungszeichnung erfordert ebenfalls manuelles Engineering und ist nicht automatisierbar.

5. Zusammenfassung

Vollständiges Reverse-Engineering (RE) bedeutet in dem hier beschriebenen Sinn die Herstellung einer geometrisch weitgehend identischen Kopie eines realen Bauteils ohne vollständige Kenntnis seiner Konstruktionsdaten. Eine vollständige Prozesskette wurde am Beispiel der Rekonstruktion einer historischen Automobilkomponente, eines Zylinderkopfs eines HORCH 853 Automobils von 1935-1937, beschrieben. Die wichtigsten Prozessschritte sind die zerstörungsfreie Messung des Bauteils mit optischer Streifenprojektion und CT, die Extraktion von Oberflächendaten, die Erstellung eines Basisdatensatzes mit Konstruktionsflächen, die Erstellung von Roh- und Fertigteildatensätzen, die Fertigung der Gusswerkzeuge, der Abguss und die Endbearbeitung des Bauteils. Des Weiteren sind zur Qualitätssicherung jeweils Soll-Ist Vergleiche der Datensätze bzw. der gefertigten Strukturen notwendig.

Das beschriebene RE-Vorhaben ist bzgl. der Komponente Zylinderkopf erfolgreich abgeschlossen worden. Weitere Komponenten sind noch in der Fertigung. Die absoluten Abweichungen zwischen dem Originalbauteil und den hergestellten Kopien betragen bis zu 1,6 mm in den Bereichen, die von keiner Umkonstruktion durch die Adaption neuer Fertigungstechniken betroffen sind. In der festgestellten Abweichung zwischen Originalbauteil und hergestellten Kopien sind noch der Verzug und die

Gussfehler des Originalbauteils enthalten, die im Zuge des RE-Prozesses korrigiert wurden. Die festgestellten Abweichungen sind unter Berücksichtigung dieses Aspektes und der geforderten Gussteiltoleranzen (DIN ISO 8062) als sehr zufriedenstellend zu bewerten.

Für weitere Optimierungen des RE-Prozesses muss neben Verbesserungen in der CT-Hardware insbesondere für die Auswertung von CT-Daten weiterer Aufwand zur Qualitätssicherung erfolgen (z.B. Softwaretests, Verfahrensdokumentationen und –validierungen). Im Bereich der CAD-Konstruktion ist eine weitere Automatisierung zur Erzeugung von qualitativ hochwertigen NURBS-Beschreibungen aus CT- und optischen Messdaten wünschenswert.

6. Danksagung

Die durchgeführten Arbeiten werden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) unter der Projektnummer VI A 2-08/03 gefördert.

7. Literatur

- [1] Flisch, A.: Industrial Computed Tomography in Reverse Engineering Applications, Int. Symp. on Computerized Tomography, March 15-17, 1999, Berlin, Proc. BB67-CD , DGZfP
- [2] Mnich, F.: Einsatz der Computertomographie in der modernen Gießereitechnik. Automotive Engineering Partner 2/2000, S. 62-65
- [3] Saewert, H.-C., Fiedler, D., Bartscher, M., Wäldele, F.: Obtaining dimensional information by industrial CT-scanning – present and prospective process chain, Int. Symposium on Computed Tomography and Image Processing, Berlin, June 2003, DGZfP-Proc. BB 84-CD, p.163 ff.
- [4] Berger, U., Goebels, J.: Rapid Tooling and Computertomography for Aluminium Casting of Automotive Components, Proceedings of the International User Conference on Rapid Prototyping, Rapid Tooling and Rapid Manufacturing (FhG, uRapid 2001), May 28-30, 2001, Amsterdam
- [5] Simon, M., Sauerwein, C.: Quality control of Light Metal Castings by 3D Computed Tomography, Proc. of 15th WCNDT, Rome, 2000
[<http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn730/idn730.htm>]
- [6] Fiedler, D., Bartscher, M., Hilpert, U.: Dimensionelle Messabweichungen eines industriellen 2D-Computertomographen: Einfluss der Werkstückrauheit. DGZfP-Proc. BB 89-CD, 2004