



Ralph Stelzer (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN 2016

Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung
und Konstruktionstechnik

Ralph Stelzer (Hrsg.) **ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN** 2016
Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik

Ralph Stelzer (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN 2016

Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung
und Konstruktionstechnik

Dresden · 30. Juni – 1. Juli 2016

Programmkomitee Virtuelle Produktentwicklung und Konstruktionstechnik

Prof. Dr. Ralph Stelzer, TU Dresden

Prof. Dr. Michael Abramovici, Ruhr-Universität Bochum

Prof. Dr. Reiner Anderl, TU Darmstadt

Prof. Dr. Martin Eigner, Universität Kaiserslautern

Prof. Dr. Detlef Gerhard, TU Wien

Prof. Dr. Jivka Ovtcharova, KIT Karlsruhe

Prof. Dr. Rainer Stark, TU Berlin

Prof. Dr. Sandor Vajna, Universität Magdeburg

Prof. Dr. Sandro Wartzack, Universität Erlangen

Entwickeln – Entwerfen – Erleben 2016.
Beiträge zur Virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik
Herausgeber: Ralph Stelzer

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the
Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 978-3-95908-062-0

© 2016 w.e.b. Universitätsverlag & Buchhandel
Eckhard Richter & Co. OHG
Bergstr. 70 | D-01069 Dresden
Tel.: 0351/47 96 97 20 | Fax: 0351/47 96 08 19
<http://www.tudpress.de>

TUDpress ist ein Imprint von w.e.b.

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.
Layout und Satz: Technische Universität Dresden.
Umschlaggestaltung: TU Dresden, Illustration © 2016 TU Dresden
Printed in Germany.

Erscheint zugleich auf QUCOSA der SLUB Dresden
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-203878>



© 2016 SAP SE oder ein SAP-Konzernunternehmen. Alle Rechte vorbehalten.



KOMPLEXITÄT DREHT SICH IMMER NUR IM KREIS.



EINFACH TRIFFT ENTSCHEIDUNGEN.

Komplexität bremst Ihr Business aus. Denn je gewaltiger die Informationsflut, desto schwieriger die Entscheidungsfindung. SAP arbeitet daran, Dinge zu vereinfachen. Damit aus Daten Wissen und aus Wissen fundierte Entscheidungen werden, die Ihr Unternehmen weiterbringen. Finden Sie heraus, wie gemeinsam einfach möglich wird auf [sap.de/runsimple](https://www.sap.de/runsimple)

SAP[®] Run Simple

Kosteneffiziente Technologien zur geometrischen Datenaufnahme im digitalen Reverse Engineering

Tim Katzwinkel · Bhavinbhai Patel · Alexander Schmid · Walter Schmidt · Justus Siebrecht · Manuel Löwer · Jörg Feldhusen

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag schlägt eine Auswahlmethode vor, die geeignete Verfahren zur kosteneffizienten Rekonstruktion geometrischer Daten von Baugruppen und Bauteilen aufzeigt. Dabei werden verschiedene objektbezogene Einflussfaktoren wie beispielsweise die Bauteilkomplexität, vorhandene Standardfeatures (z.B. genormte Gewindebohrungen) oder besondere Oberflächengeometrien berücksichtigt. Darüber hinaus werden verschiedene Techniken anhand der Kriterien zeitlicher Aufwand, technologischer Aufwands und erzielbarer Maßgenauigkeit quantitativ verglichen. Dadurch kann der Anwender einen erforderlichen Kompromiss zwischen kostenmäßigem Aufwand und erzielbarer Maßgenauigkeit abschätzen.

1 Einleitung

Im Fall einer Neukonstruktion unter der Anwendung von 3D-CAD-Systemen werden die geometrischen Produktdaten während des Konstruktionsprozesses generiert. Beim Reverse Engineering eines existierenden Produkts ohne vorhandene digitale Geometriedaten müssen die Geometrieinformationen aber zunächst aufgenommen und anschließend digitalisiert werden. Dieser Schritt kann zweigeteilt oder durch eine automatisierte Datenverarbeitung direkt vollzogen werden. In den letzten Jahrzehnten wurden vielfältige Technologien und Strategien zur Erfassung und digitalen Weiterverarbeitung geometrischer Daten von industriellen Erzeugnissen entwickelt. Der vorliegende Beitrag schlägt eine Methode zur Auswahl der für den Anwendungsfall geeignetsten Technologien unter Berücksichtigung der technologischen und wirtschaftlichen Randbedingungen vor.

Ein relevantes Zwischenziel im Reverse Engineering liegt in der Erzeugung eines vollständigen und möglichst genauen CAD-Modells des Objekts. Mit

Hilfe dieses Modells kann der Konstrukteur Optimierungen an funktionsrelevanten Geometrien vornehmen oder fertigungstechnische Anpassungen vornehmen. (Várady et al. 1997)

2 Definition von Kenngrößen zur Evaluierung der Technologien

Um die betrachteten Technologien zur Erfassung der Geometriedaten (vgl. Kapitel 3) hinsichtlich Ihrer Eignung für einen bestimmten Anwendungsfall bewerten zu können, werden drei voneinander unabhängige Kenngrößen definiert. Der nachfolgende Abschnitt beschreibt die einzelnen Kenngrößen sowie ihre Valenz im Rahmen der beschriebenen Untersuchung.

2.1 Kenngröße Genauigkeit

Vor dem Hintergrund einer industriellen Anwendung im Maschinenbau unterscheidet sich der Genauigkeitsanspruch an die Messverfahren von anderen Anwendungsfällen (z. B. Kartographieren geographischer Areale, Vermessen von Räumen und Kanälen, diagnostische Analyse in der Humanmedizin). Das übliche Nennmaß im industriellen Maschinenbau liegt im [mm]-Bereich, die Angabe von Fertigungstoleranzen liegt entsprechend im Bereich von 0,1 bis 0,001 Millimetern. Im Bereich der Oberflächenveredlung oder der Mikrotechnik sind auch weitaus höhere Genauigkeiten erforderlich. Der vorliegende Beitrag betrachtet jedoch ausschließlich das Reverse Engineering von spanend oder ur- bzw. umformend gefertigter Bauteile im konventionellen Sinn.

Für die Bewertung der Genauigkeit der analysierten Verfahren wird ihre durchschnittliche Auflösung herangezogen. Allerdings lässt sich einschränkend festhalten, dass die geometrische Gestaltung eines Bauteils durch den Konstrukteur vorwiegend im Nennmaßbereich erfolgt (ausgenommen funktionsrelevanter Toleranzangaben wie Passungen und Funktionsoberflächen). Obwohl viele Messverfahren beim 3D-Scan sehr viel genauere Maßangaben anzeigen, kann hieraus kein direkter Rückschluss auf die Maßtoleranz oder das zugrundeliegende Nennmaß des Bauteils erfolgen. Maßabweichungen im μm -Bereich können nicht nur auf besondere Funktionsflächen sondern auch auf Fertigungsungenauigkeiten oder Verschleiß zurückgeführt werden. Für eine fundierte Aussage ist die Vermessung einer Serie von Gleichteilen und eine statistische Ergebnisauswertung empfehlenswert, um beispielsweise Toleranzketten oder Fertigungsungenauigkeiten zu identifizieren.

Für die Anwendung des dreidimensionalen Vermessens zwecks Reverse Engineering bei Einzelstücken ohne vorhandene CAD-Modellinformationen sind besonders genaue Messergebnisse im μm -Bereich aus den genannten

Gründen nicht aussagekräftiger für die Erzeugung eines funktionalen Modells als moderate Geometrieinformationen über den Nennmaßbereich. Dies sollte bei der Auswahl des Messverfahrens berücksichtigt werden.

2.2 Kenngröße Zeitaufwand

Je nach Messverfahren kann die Erzeugung eines 3D-CAD-Modells eines physischen Objekts durch unterstützende Software manuell, teilautomatisch oder vollautomatisch erfolgen (Schöne 2012). In jedem Fall beeinflusst der Zeitaufwand für die Messaufnahmen die Gesamtkosten der Herstellung eines digitalen Abbilds des Objekts. Dabei muss im Sinne der Kosteneffizienz berücksichtigt werden dass neben der reinen Durchführung der Messungen gegebenenfalls auch ein hoher Zeitaufwand für Ein- oder Umspannvorgänge und spezielle Kenntnisse für die Überarbeitung der Messdaten benötigt werden können. Stückzahlabhängige Kostensenkungen, wie sie beispielsweise von Ehrlenspiel beschrieben werden, werden im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt da von einer Vermessung eines einzelnen Objekts im Sinne einer „Einzelfertigung“ ausgegangen wird (Ehrlenspiel et al. 2014).

Im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen wird der zeitliche Aufwand für Durchführung und Nachbearbeitung der Messverfahren bezüglich einer einzelnen Messstelle gemittelt und mit den ungewichteten Bewertungsnoten „gering“, „mittel“ und „hoch“ entsprechend nachstehender Tabelle 1 angegeben.

Wert	Bedeutung
gering	wenige Sekunden bis einige Minuten
mittel	mehrere Minuten bis wenige Stunden
hoch	mehrere Stunden

Tabelle 2: Bewertungskriterium Zeitaufwand

2.3 Kenngröße Technologiekosten

Je nach Messverfahren werden unterschiedliche Geräte oder Anlagen zur Durchführung der Messung benötigt. Da für die Verarbeitung im 3D-CAD-Modellierer ohnehin ein leistungsfähiger Computer benötigt wird, werden im Folgenden in Tabelle 2 ausschließlich die Investitionskosten für die Geräteanschaffung sowie eventueller Software o.ä. grob abgeschätzt.

Wert	Technologiekosten
gering	< 1000 €
mittel	1000 € bis 10 000 €
hoch	> 10.000€

Tabelle 2: Bewertungskriterium Technologiekosten

Unter Anwendung der vorgestellten Bewertungskriterien werden im nachfolgenden Abschnitt etablierte Verfahren zur Rekonstruktion dreidimensionaler Geometrieinformationen vorgestellt.

3 Technologien zur geometrische Datenaufnahme

Im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen werden Messverfahren behandelt, die geeignet sind, um geometrische Abmessungen von industriellen Erzeugnissen gemäß dem Normensystem für geometrische Produktspezifikationen und –prüfungen aufzunehmen (DIN EN ISO 14638). Der inhaltliche Schwerpunkt liegt auf dem Reverse Engineering im industriellen Maschinenbau, daher wird insbesondere die messtechnische Aufnahme von linearen Größenmaßen der IST-Geometrie einzelner Objekte sowie die Vermessung von Freiformflächen fokussiert. Nicht betrachtet werden die Identifizierung von Maßabweichungen gegenüber einer SOLL-Geometrie, die messtechnische oder rechnerische Ermittlung von Toleranzbereichen für bekannte Nennmaße und die Aufnahme von Oberflächenrauheiten.

Zur Aufnahme der geometrischen Daten ist es zunächst notwendig, die Abmessungen des Objekts aufzunehmen. Die Einteilung der verfügbaren Messverfahren für die Ermittlung geometrischer Abmessungen lässt sich dabei nach unterschiedlichen Kriterien vornehmen. Czichos und Daum teilen die Verfahren gemäß ihrer zugrundeliegenden physikalischen Funktionsprinzipien in mechanische, optische und elektrische bzw. elektromagnetische Verfahren ein (Feldhusen 2014). Keferstein unterscheidet darüber hinaus berührende und berührungslose Messverfahren (Keferstein 2015).

Weiterhin lässt sich eine Einteilung in manuelle und (teil-)automatisierte Verfahren vornehmen. Die nachfolgende Abbildung zeigt eine kombinierte Einteilungsform verschiedener Verfahren ohne Anspruch auf Vollständigkeit.

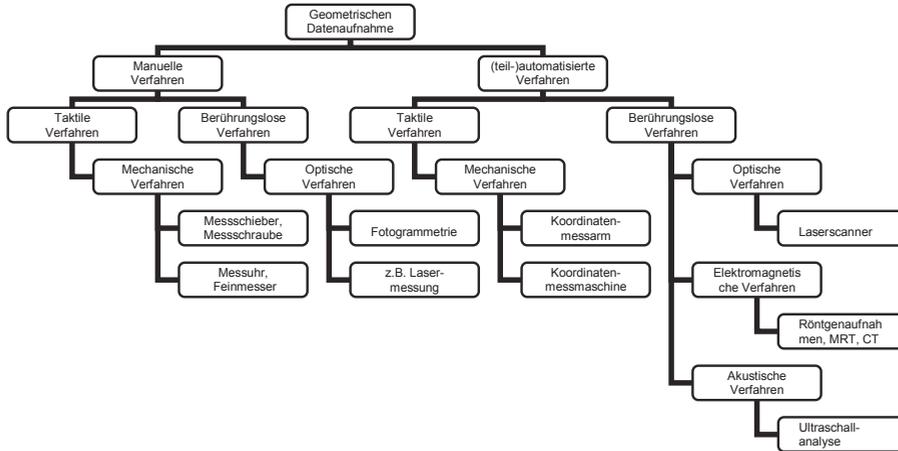


Abbildung 1: Einteilung von Verfahren zur geometrischen Datenaufnahme

Nachfolgend werden die betrachteten Technologien vorgestellt. Dabei geht es bei der Aufzählung nicht um eine vollständige Darstellung aller gängigen Messverfahren sondern vielmehr um eine Aufzählung nach Auffassung des Autors besonders kosteneffizienter und technologisch einfacher Messverfahren. Als Referenz werden einige hochpräzise jedoch aufwändige und teure Messverfahren aufgelistet. Nach der Verfahrensbeschreibung erfolgt jeweils eine Einordnung des Verfahrens bezüglich der vorgestellten Bewertungskriterien in Form einer Eigenschaftstabelle.

3.1 Manuelle taktile Messung

Zu den einfachen und weit verbreiteten Messverfahren zählt das berührende manuelle Messen unter Zuhilfenahme verschiedener Werkzeuge. Dabei wird eine geometrische Distanz physisch abgetastet und mit Hilfe eines Maßstabs in eine normierte Längeneinheit übersetzt. Die Übersetzung erfolgt dabei meist visuell durch Ablesen eines Nonius oder einer digitalen Skala. Typische Vertreter der manuellen taktilen Messverfahren in der industriellen Praxis sind der Messschieber oder die Messschraube. Für hochpräzise Anforderungen können auch Messuhren oder Feinmesser verwendet werden. (Keferstein 2015)

Die manuelle taktile Messung ist ein analoges Messverfahren bei dem die einzelnen Werte händisch aufgenommen und anschließend in eine digitale Datenstruktur überführt werden. Moderne Messmittel verfügen zusätzlich

über digitale Schnittstellen um eine computergestützte Datenaufnahme und Auswertung zu ermöglichen.

Der Anschaffungsaufwand der einzelnen Messmittel wird gemäß der vorgestellten Skala als gering eingestuft (Mitutoyo 2015, Gedema 2016, Hoffmann 2016). Allerdings sind je nach abzumessender Geometrie gegebenenfalls mehrere Messmittel unterschiedlicher Skalierung einzusetzen. Die Genauigkeit der Messmittel hängt zudem aufgrund ihrer Materialeigenschaften von der Einsatztemperatur ab. Kosten für mehrfache Anschaffungen manueller taktiler Messmittel sowie für die Bereitstellung eines temperierten Messraums werden in der Eigenschaftstabelle (vgl. Tabelle 3) nicht berücksichtigt.

Kriterium	Wert
Genauigkeit	0,2 – 0,001 mm
Zeitaufwand	gering
Technologiekosten	gering

Tabelle 3: Eigenschaftstabelle manueller taktiler Messmittel

Die Messaufnahme eines einzelnen Messwerts erfolgt mit einem geringen Zeitaufwand. Die Genauigkeit dieses Messverfahren beträgt unter Berücksichtigung der Messungenauigkeiten je nach Messmittel zwischen 0,2 mm (Messschieber) und 0,001 mm (Feinmesser). (Dubbel 2014).

3.2 Teilautomatisierte taktile Messung

Die manuelle Aufnahme von dreidimensionalen Messpunkten kann mit Hilfe sogenannter 3D-Koordinatenmessarme erfolgen. Dabei wird jeder Messpunkt durch eine Berührung der Werkstückoberfläche durch eine an einem Taststift angebrachte Tastkugel aufgenommen. Bei dieser Berührung wird eine Taststiftbiegung hervorgerufen. Der Ist-Berührungspunkt wird mit Hilfe einer computergestützten Auswertung aus den eingemessenen Parametern (z.B. Tasterradius und Tasterbiegung) ermittelt. (Keferstein 2015)

Bei den manuell geführten taktilen Messarmen handelt es sich um fest installierte oder temporär aufgestellte Messsysteme, die in Bezug auf ihren Aufstellungspunkt kalibriert werden müssen. Der Anwender führt den Messtaster an die aufzunehmende Messstelle. Die Registrierung der Koordinaten und die Verarbeitung der Messpunkt Wolke im dreidimensionalen Raum werden von einem Computer vollautomatisch durchgeführt. Kalibrie-

rung und Softwarebedienung bedeuten im Vergleich zu manuellen taktilen Messverfahren einen erhöhten Zeitaufwand und erfordern darüber hinaus eine Personalschulung.

Die Anschaffungskosten manuell geführter Koordinatenmessarme liegen im mittleren Bereich. Neben dem reinen Messgerät ist unter Umständen die Anschaffung weiterer Peripherie (z.B. Computer) notwendig. Die erzielbare Genauigkeit dieses Messverfahren liegt laut Herstellerangaben bei 0,05 bis zu 0,025 mm (Faro 2016). Tabelle 4 zeigt eine Eigenschaftstabelle teilautomatisierter taktiler Messmittel.

Kriterium	Wert
Genauigkeit	0,05 – 0,01 mm
Zeitaufwand	mittel
Technologiekosten	mittel

Tabelle 4: Eigenschaftstabelle teilautomatisierter taktiler Messmittel

3.3 Automatisierte taktile Messung

Um eine höhere Präzision bei der Messung zu erreichen und viele Messstellen mit einer gleichbleibenden Qualität einmessen zu können wurden vielfältige automatisierte Messverfahren entwickelt. Hierzu zählen die sogenannten Koordinatenmesssysteme verschiedenster Bauarten wie beispielsweise kartesische, zylindrische oder kugelförmige Koordinatensystemformen in Ausleger-, Brücken-, Portal-, oder Ständerbauweise. (DIN EN ISO 10360-1 2003)

Allen Messsystem gemein ist die digitale Messwertaufnahme unter Zuhilfenahme von Steuer- und Anpassautomatik ähnlich dem Verfahren der manuell geführten taktilen Messung. Für die automatisierte Einmessung ist eine aufwändige Einstellungs- und Kalibriertechnik sowie ein erheblicher Programmieraufwand durch geschultes Fachpersonal notwendig. Koordinatenmessmaschinen sind hochpräzise Anlagen mit Genauigkeiten bis zu 0,001 mm. (Keferstein 2015)

Die Zusammenfassung der Eigenschaften automatisierter taktiler Messverfahren kann Tabelle 5 entnommen werden.

Kriterium	Wert
Genauigkeit	0,01 – 0,001 mm
Zeitaufwand	hoch
Technologiekosten	hoch

Tabelle 5: Eigenschaftstabelle automatisierter taktiler Messmittel

3.4 Manuelle optische Messverfahren

Mit Hilfe der sogenannten Fotogrammetrie-Verfahren können die räumliche Lage eines Objektes sowie seine geometrische Formbestimmt werden. Dabei werden meist mehrere Fotografien eines Objektes aus unterschiedlichen Richtungen mit Hilfe von Computeralgorithmen rechnerisch analysiert. Die Auswertung dieser Stereomessungen liefert dreidimensionale Koordinateninformationen, aus denen die Geometrie eines Werkstücks berechnet werden kann. (Keferstein 2014)

Aufgrund der weiten Verbreitung von kostengünstigen 3D-Druck-Systemen gibt es neben kostenintensiver professioneller Software auch frei verfügbare Berechnungsprogramme für die Verarbeitung regulärer Bilder von Digitalkameras oder Smartphones. Dadurch stellt dieses Verfahren eine kostengünstige Alternative zu teuren Scantechnologien dar. (Wu 2015)

Eine Abwandlung der Fotogrammetrie stellt die Videogrammetrie dar, bei deren Anwendung mehrere Bildsensoren Videoaufnahmen aus unterschiedlichen Perspektiven aufzeichnen und so ein Produktmodell in Form einer dreidimensionalen Punktwolke in Echtzeit aufzeichnen können. Neben professionellen aber kostenintensiven Lösungen gibt es auch in diesem Bereich kostengünstige Lösungen. Beispielsweise kann die 3D-Kamera Kinect der Firma Microsoft zu einem 3D-Scanner umfunktioniert werden. Je nach gewünschter Genauigkeit der Kameras sind die Technologiekosten für die Anwendung dieses Verfahrens im niedrigen bis mittleren Bereich anzusiedeln. Demgegenüber ist die Auswertung mit Hilfe aufwändiger Softwarealgorithmen zeitaufwändig. Die entsprechende Software erfordert eine intensive Einarbeitung oder den Einsatz von geschultem Fachpersonal. Die erreichbaren Genauigkeiten schwanken je nach Verfahren zwischen 0,5 mm und 1 mm (Mankoff 2012). Die ermittelten Eigenschaftswerte manueller optischer Messverfahren kann Tabelle 6 entnommen werden.

Kriterium	Wert
Genauigkeit	0,5 – 1 mm
Zeitaufwand	gering bis mittel
Technologiekosten	niedrig bis mittel

Tabelle 6: ermittelte Eigenschaftswerte manueller optischer Messverfahren.

3.5 Teilautomatisierte optische Messverfahren

Mit Hilfe des sogenannten Laserschnittverfahrens kann eine definierte Reflexion an der Objektoberfläche durch die Bestrahlung mit einem oder mehreren Linienlaser erzeugt werden. Mit Hilfe optischer Sensoren werden die Reflexionen des Materials registriert und zu einem digitalen Modell in Form einer Messpunktwolke umgerechnet. Neben der computergestützten Auswertung in Echtzeit erfordert dieses Verfahren die Bewegung des Objekts oder der Aufnahmeeinrichtung. Ein Beispiel für eine sehr kostengünstige teilautomatisierte Lösung mit einer Genauigkeit von ca. 0,2 mm ist der FabLab 3D-Scanner (Engelmann 2011).

Demgegenüber gibt es professionelle Lösungen, die mittlere bis hohe Technologiekosten aufweisen aber mit Genauigkeiten bis zu 0,05 mm wesentlicher präzisere Ergebnisse liefern können. Darüber hinaus sind diese Technologien auch als portable, handgeführte Scaneinrichtungen verfügbar (Amatek 2016). Tabelle 7 zeigt die ermittelten Eigenschaftswerte für teilautomatisierte optische Messverfahren.

Kriterium	Wert
Genauigkeit	0,05 – 1 mm
Zeitaufwand	gering bis mittel
Technologiekosten	niedrig bis mittel

Tabelle 7: Eigenschaftswerte teilautomatisierte optische Messverfahren

3.6 Automatisierte elektromagnetische Verfahren

Je nach Beschaffenheit des zu digitalisierenden Objekts kann der Einsatz von elektromagnetischen bildgebenden Verfahren in Betracht gezogen werden. Die weitläufig aus der bildgebenden Diagnostik der Medizintechnik

bekanntem Verfahren wie Röntgenanalyse, Magnetresonanztomographie (MRT) oder Computertomografie (CT) eignen sich prinzipiell für die Datenaufnahme an nicht-metallischen Verbundwerkstoffen, keramischen Bauteilen und polymerbasierten Elementen wie etwa Polymerfedern, Rohre und Dichtungen. Aufgrund der Anlagentechnik und der benötigten Fachkräfte zur Durchführung dieser Analysen sind hoher Zeitaufwand und Technologiekosten zu berücksichtigen. Indes können Auflösungen bis 0,005 mm erzielt werden. Durch die damit entstehenden großen Datenmengen kann ein hoher Zeitaufwand zur nachgelagerten Datenauswertung ergeben (Keferstein 2015, Schöne 2012). Tabelle 8 zeigt die ermittelten Eigenschaftswerte elektromagnetischer Messverfahren.

Kriterium	Wert
Genauigkeit	0,01 – 0,005 mm
Zeitaufwand	hoch
Technologiekosten	hoch

Tabelle 8: Eigenschaftswerte elektromagnetische Verfahren

3.7 Download von Standardkomponenten

Im industriellen Maschinenbau werden eine Vielzahl von Standardkomponenten genutzt. Aufgrund des flächendeckenden Einsatzes von 3D-CAD Modellersystemen sind Hersteller von Standardkomponenten weltweit dazu übergegangen, ihre geometrischen Produktdaten in digitaler Form als Download bereitzustellen.

Die bereitgestellten Daten sind häufig in einem Übergabeformat (z.B. *.step) vorhanden welches lediglich Nennmaße und keine Baugruppenzusammenhänge abbildet. Im Rahmen der hier untersuchten Anwendung im Reverse Engineering sind diese Einschränkungen für die Erzeugung eines ersten digitalen Modells jedoch vertretbar. Der Technologieaufwand zur Anwendung dieses Verfahrens beschränkt sich auf den Einsatz eines Computers sowie die Nutzung einer Internetverbindung (Dassault 2016, TraceParts 2016). Zusammengefasst ergeben sich für den Download von Standardkomponenten die in Tabelle 9 abgebildeten Eigenschaftswerte.

Kriterium	Wert
Genauigkeit	Nennmaß
Zeitaufwand	gering
Technologiekosten	gering

Tabelle 9: Eigenschaftstabelle Download von Standardkomponenten

3.8 Nutzung von Konstruktionsassistent-Systemen in 3D-CAD-Modellierern

Aktuelle 3D-CAD-Modellierer verfügen über Hilfsprogramme zur Erzeugung von Standard- und Normteilen sowie zur Berechnung und automatischen Modellierung von Verzahnungsstufen, Schraub- und Bolzenverbindungen, Riementreibe und vielen anderen Maschinenelementen. Das Ergebnis dieser sogenannten Konstruktionsassistenten sind dabei vollständig parametrische 3D-CAD-Unterbaugruppen, die einen Teil des zu rekonstruierenden Systems abbilden. (Scheuermann 2015)

Aufgrund der zur Erzeugung eines digitalen Produktmodells ohnehin notwendigen Hard- und Software werden die Technologiekosten für die Anwendung dieser Technik innerhalb der Untersuchungen als gering eingestuft (vgl. Tabelle 10). Die Genauigkeit dieser Technik ist ebenso wie die Download-Technik auf Nennmaße oder funktionsrelevante Toleranzangaben beschränkt. Je nach Anwendungsfall ist eine Einarbeitung in die teilweise komplexe Funktionsweise des Konstruktionsassistenten notwendig, weshalb der Zeitaufwand insgesamt als mittel eingestuft wird. In Tabelle 11 werden abschließend alle Eigenschaftswerte in einer tabellarischen Übersicht aufgelistet.

Kriterium	Wert
Genauigkeit	Nennmaß
Zeitaufwand	mittel
Technologiekosten	Gering

Tabelle 10: Eigenschaftstabelle Konstruktionsassistent-Systeme

Technologie	Genauigkeit							Zeitaufwand			Technologiekosten		
	Nenn- maß	0,5 - 1	0,1 - 0,5	0,05 - 0,1	0,01 - 0,05	0,005 - 0,01	0,001 - 0,005	gering	mittel	hoch	gering	mittel	hoch
manuelle taktile Messung	-	●	●	●	●	●	●	●	-	-	●	-	-
teilautom. Taktile Messung	-	●	●	●	●	-	-	-	●	-	-	●	-
autom. Taktile Messung	-	●	●	●	●	●	●	-	-	●	-	-	●
manuelle optische Messung	-	●	-	-	-	-	-	●	●	-	●	●	-
teilautom. Optische Messung	-	●	●	●	-	-	-	●	●	-	●	●	-
autom. elektromagn. Messung	-	●	●	●	●	●	-	-	-	●	-	-	●
Download Standardkomp.	●	-	-	-	-	-	-	●	-	-	●	-	-
Konstruktionsassistenzsystem	●	-	-	-	-	-	-	●	-	-	●	-	-

Tabelle 11: Zusammenfassung aller ermittelten Technologieeigenschaften

4 Vorstellung einer Methode zur kosteneffizienten Technologieauswahl

Die Auswahl eines für den jeweiligen Anwendungsfall kosteneffizienten Messverfahrens zur geometrischen Datenaufnahme eines Objektes hängt direkt von der aufzunehmenden Geometrie sowie von den vorgegebenen Randbedingungen der Aufgabenstellung ab. Nachfolgen werden die Objekteigenschaften funktionale Geometrielemente, Standardfeatures und Standardelemente sowie einige weitere Aspekte des Reverse Engineering Prozesses betrachtet und zur Entwicklung einer generischen Methode zur Technologieauswahl verwendet.

Funktionale Geometrielemente

Technische Erzeugnisse enthalten aufgrund der verwendeten Fertigungstechnologien (z. B. Drehen, Fräsen, Bohren, Schleifen, usw.) meist bestimmte geometrische Standardformen, die in 3D-CAD-Modellierern beispielsweise in Form boolescher Grundkörper eingearbeitet werden können (z. B. Würfel, Quader, Zylinder, Kegel, Kugel etc.). Andererseits gibt es bestimmte Funktionsflächen oder -körper deren geometrische Formen nicht einer besonders einfachen Fertigungsweise sondern der optimalen Funktionserfüllung und angepasst sind. Hierzu zählen beispielweise topologieoptimierte Bauteilgestaltungen mit angenäherten bionische Formen (z. B. Tragrahmen oder Orthesen) und strömungsoptimierte Freiformflächen (z. B. Tragflächen eines Flugzeugs, Turbinenschaufelgeometrien, etc.).

Die vorgestellten Messtechnologien eignen sich jeweils für verschiedene Anwendungsfälle des Reverse Engineering. So lassen sich boolesche Grundkörper mit vielen Längenmaßen beispielsweise besonders gut durch taktile Messverfahren erfassen. Demgegenüber können Freiformflächen durch flächig abtastende Verfahren wie beispielsweise einer teilautomatischen optischen Messerfassung durch einen 3D-Laserscanner aufgenom-

men werden. Es empfiehlt sich daher eine grundsätzliche Unterteilung der abzubildenden Geometrie in einfache geometrische Formen und komplexe Flächen- und Körperbereiche vorzunehmen. Die funktionsrelevanten geometrischen Eigenschaften sollten soweit möglich im Vorfeld identifiziert werden, um die Anzahl der Messstellen auf ein Minimum zu beschränken.

Standardfeatures und Standardelemente

Heutige parametrische 3D-CAD-Modellierer bieten die Einarbeitung technischer Standardfeatures wie Bohrungen, Fasen, Lagersitze, Passfedernuten usw. an. Die meisten dieser Standardfeatures lassen sich an einem technischen Erzeugnis bereits auf den ersten Blick erkennen und sollten lediglich in Ihrer Ausprägung (z. B. Gewindeart und -größe) und Positionierung vermessen werden, da sie sich mit geringem Aufwand nachträglich in die 3D-Geometrie einfügen lassen.

Neben der Ausnutzung der Standardfeatures moderner 3D-CAD-Systeme sollte für eine kosteneffiziente Erzeugung eines digitalen Produktmodells so häufig wie möglich auf die vorgestellten Techniken des Konstruktionsassistenzsystems und des Produktdownloads zurückgegriffen werden (vgl. Kap. 3.7 und 3.8), da diese einen geringen Zeitaufwand aufweisen und kostengünstig sind.

Taktil vs. Berührungslos

Sind die funktionsrelevanten Geometrien identifiziert worden, muss die Frage nach einer geeigneten Art der Messwertaufnahme beantwortet werden. Eine taktile Messwertaufnahme ist je nach Bauteileigenschaften gegebenenfalls unerwünscht und eignet sich nur bedingt für die Aufnahme von geometrischen Freiformflächen (z. B. Tragflächen, Gusskörper, etc.). Automatisierte optische Messverfahren mit einer hohen Datendichte und einem starken Nachbearbeitungsaufwand erzeugen wiederum hohe Kosten bei der Aufnahme einfacher geometrischer Informationen wie z. B. Längen- und Dickenmaße.

Neben der reinen Messpräzision muss für eine kosteneffiziente Technologieauswahl auch der benötigte Zeitaufwand zur Durchführung der Messungen und der Datenauswertung bzw. der Erzeugung eines 3D-Modells berücksichtigt werden. Besonders die Übertragung der aufgenommenen Messwerte in eine verarbeitbare Form dreidimensionaler geometrischer Informationen in 3D-CAD-Systemen erfordert einen signifikanten Nachbearbeitungsaufwand. Die Ursache hierfür liegt in den unterschiedlichen Datenformen (Punktwolken vs. Flächen- und Volumenmodelle). (Keferstein 2015)

Präzision vs. Funktion

Wie bereits beschrieben ist eine hohe Maßpräzision nur bei besonderen konstruktiven Funktionselementen notwendig (vgl. Kapitel 2.1). Daher ist eine vollständige Geometrieabtastung einer Baugruppe mit höchster Genauigkeit im μm -Bereich (z. B. optische 3D-Laservermessung) nicht pauschal sinnvoll (vgl. Abbildung 2). Neben der bedingten Verwertbarkeit der hochgenauen Maßinformationen für eine Konstruktion im Nennmaßbereich führt die hochgenaue Abtastung häufig zu Fehlerstrukturen in der aufgenommenen Oberflächentopologie. Die hieraus resultierenden fehlerhaften Geometrieabbildungen im 3D-CAD-System erfordern wiederum eine zeitaufwändige Nachbearbeitung durch einen sachkundigen Konstrukteur, wodurch der zeitoptimierte automatisierte Scanvorgang komplexer Bauteile wieder relativiert werden muss. Für die digitale Datenaufnahme sollte daher der Grundsatz gelten: „So präzise wie nötig, so ungenau wie möglich“.

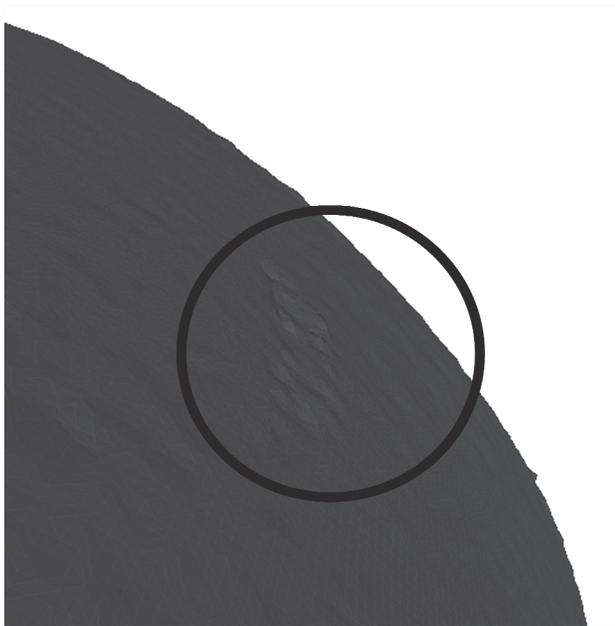


Abbildung 13: Oberflächendefekte im 3D-Scan aufgrund zu hoher Auflösung

Die nachfolgende Abbildung 3 fasst den Vorschlag für eine Methodik zur kosteneffizienten Auswahl von Technologien zur geometrischen Datenaufnahme in Form eines Entscheidungsdiagramms grafisch zusammen.

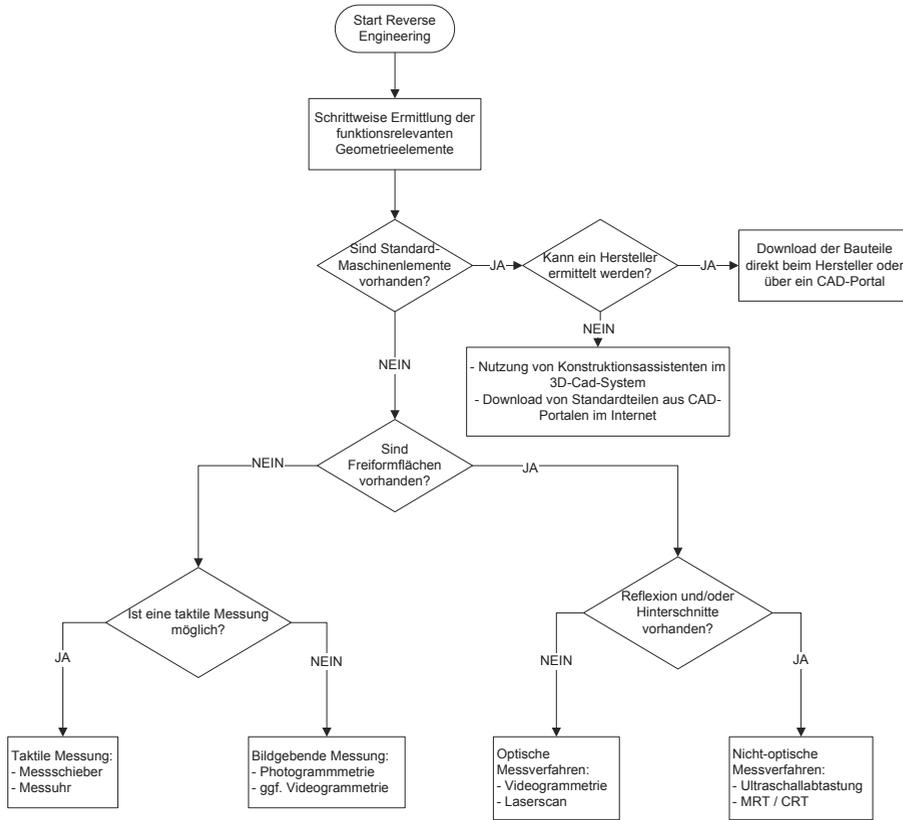


Abbildung 14: Methodik zur Auswahl kosteneffizienter Technologien zur geometrischen Datenaufnahme

5 Evaluierung der Auswahlmethode anhand eines Praxisbeispiels

Die vorgestellte Methodik wurde anhand eines Kegelradgetriebes vom Typ KES der Firma SEW Eurodrive GmbH evaluiert (SEW 2014). Dieses Kegelradgetriebe kann zu Schulungszwecken manuell demontiert werden. Die Gesamtbaugruppe besteht aus 56 unterschiedlichen Bauteilen, darunter ein Gussgehäuse mit abgedichtetem Verschlussdeckel, mehrere Verzahnungsstufen, verschiedene Wälzlager und Standardelemente wie Passfedern, Sicherungsringe, Abstandhalter und Befestigungsschrauben. Die nachstehende Abbildung 4 zeigt eine Explosionsansicht der Baugruppe.

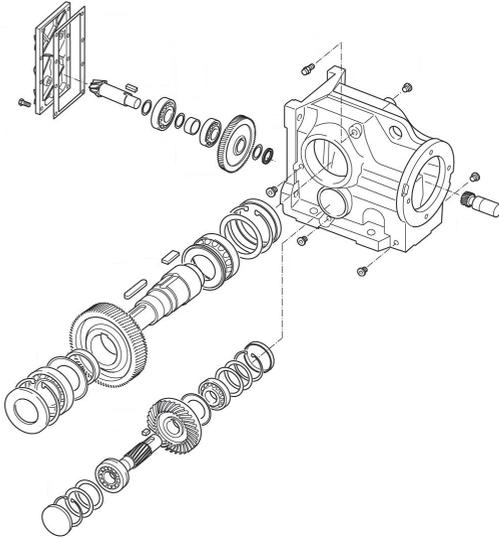


Abbildung 15: Explosionsdarstellung SEW Kegelradgetriebe Typ KES

Bei der Evaluierung werden die folgenden Verfahren zur Digitalisierung der Bauteilgeometrien verwendet:

- Download von Bauteilen beim Hersteller (Gussgehäuse) und aus dem Internet (Standardkomponenten)
- manuelle taktile Messung mittels Messschieber
- Fotogrammetrie
- Verwendung eines Konstruktionsassistenten

Zielsetzung der Modellierung ist die Erzeugung eines vollständigen dreidimensionalen CAD-Modells der Baugruppe mit der Software PTC Creo 2.0 Professional unter Beachtung der funktionsrelevanten Maßgenauigkeit.

Während der Gestaltung wurden Zeitmessungen für die Erzeugung der Einzelteile mit den verschiedenen Methoden durchgeführt. Der Wissensstand des Anwenders entsprach dabei dem eines ausgebildeten Konstrukteurs. Bei der Fotografie-Methode wurde zudem die Maßhaltigkeit im Vergleich zu einer manuellen taktile Messung verglichen. Die nachfolgende Abbildung 5 zeigt das Ergebnis der Evaluierung in Form eines Renderings der Explosionsansicht des digitalen Modells.

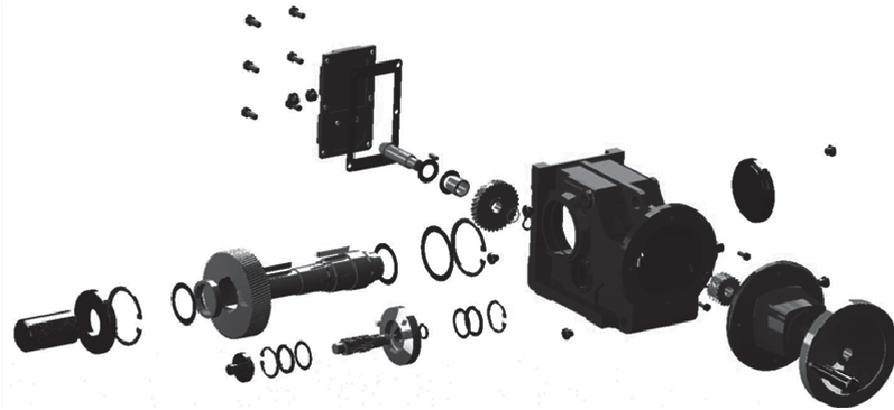


Abbildung 5: Rendering des fertigen Modells in Explosionsdarstellung

5.1 Anteile der angewandten Techniken am Gesamtmodell

Für die Erzeugung des Gesamtmodells werden insgesamt 56 Bauteile benötigt. Es konnten 31 Standard-Bauteile identifiziert werden, deren digitales Modell mit Hilfe der Download-Technik von entsprechenden Herstellern bezogen wurden. Die Erzeugung der Verzahnungsgeometrien wurde mit Hilfe des Konstruktionsassistenten-Systems bei sechs Bauteilen angewandt. Insbesondere rotationsymmetrische Teile ließen sich mit Hilfe einer einfachen Form der Fotogrammetrie rekonstruieren. Diese Technik wurde bei fünf Bauteilen angewandt. Schließlich wurden 14 Bauteile mit Hilfe eines Messschiebers manuell vermessen und händisch nachmodelliert. Die folgende Abbildung zeigt die Anteile der unterschiedlichen Rekonstruktionsverfahren.

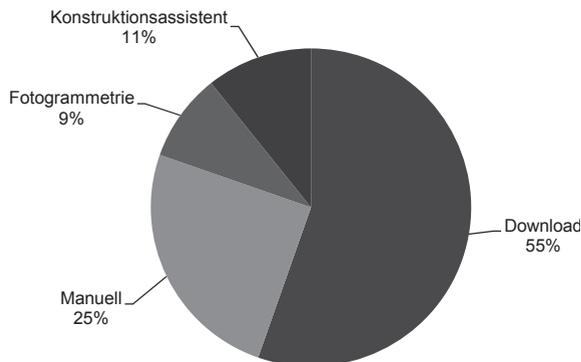


Abbildung 6: Anteile der unterschiedlichen Rekonstruktionsverfahren

5.2 Zeitlicher Aufwand einzelner Rekonstruktionsverfahren im Vergleich

Anhand der Hauptwelle der Getriebebaugruppe wurden die Verfahren manuelle taktile Messung, Fotogrammetrie und Anwendung eines Konstruktionsassistenten-Systems verglichen. Dabei wurde ein geübter CAD-Konstrukteur mit der Bearbeitung der Aufgabe betraut.

Für die manuelle Messwertaufnahme wurden hierfür ca. 100 Sekunden benötigt. Die anschließende Modellierung des Grundkörpers erfolgte in etwa 50 Sekunden.

Die fotografische Aufnahme der Welle erfolgte mit Hilfe eines handelsüblichen Smartphones mit einer Auflösung von 5 Megapixeln. Aufnahme und Import der Fotografie in das CAD-Programm erfolgten in ca. 40 Sekunden. Die Nachzeichnung der Außenkontur und die Erzeugung des dreidimensionalen Modells benötigten aufgrund der notwendigen Sorgfalt ebenfalls ca. 40 Sekunden.

Die Verwendung eines Konstruktionsassistenten-Systems erforderte zunächst die Aufnahme der Nennmaße aller Wellenabsätze analog zur manuellen Modellierung. Durch die tabellarische Eingabe der Werte und die automatisierte Erzeugung der Geometrie ohne vorhergehende Skizzierung konnte die Welle anschließend bereits nach etwa 20 Sekunden erzeugt werden.

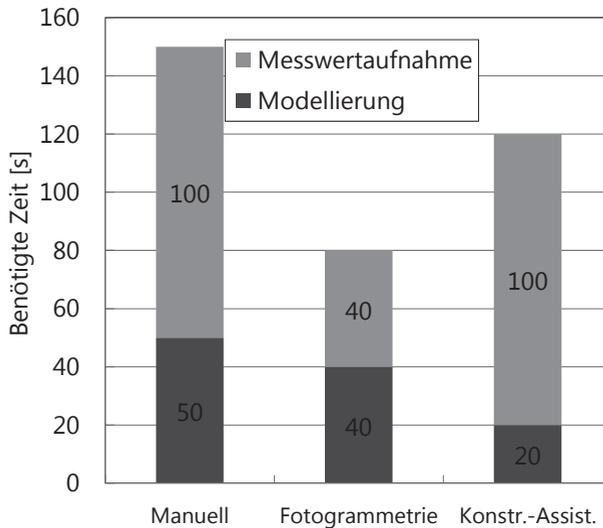


Abbildung 7: Anteile der unterschiedlichen Rekonstruktionsverfahren

Die nachstehende Abbildung 7 zeigt den Vergleich der aufgenommenen Messwerte. Obwohl der Aufwand von Vorbereitung der Messaufnahme und Modellierung der Geometrie im selben Verhältnis steht, konnte mit Hilfe der Fotogrammetrie eine schnelle Rekonstruktion der Geometrie erfolgen. Darüber hinaus ergab eine nachträgliche Messung bei dieser Technik eine verbleibende maximale Genauigkeitsabweichung von 0,2 mm zum manuell gemessenen Nennmaß, was auf optische Verzerrungen und visuelle Fehlinterpretation des Konstrukteurs zurückgeführt wird. Im Rahmen dieses Anwendungsfalls ist diese Toleranz akzeptabel, da eine Virtualisierung des Objekts im Nennmaßbereich angestrebt wurde.

6 Fazit

Mit Hilfe der Übersichtstafel aus Tabelle 11 steht dem Konstrukteur ein Hilfsmittel zur Auswahl der geeignetsten Technologie für die geometrische Datenaufnahme gemäß den vorgestellten Kriterien zur Verfügung. Die erläuterte Methodik ermöglicht darüber hinaus die schrittweise Ausnutzung zeit- und kosteneffizienter Alternativen zur ganzheitlichen dreidimensionalen Abtastung des gesamten Objekts (vgl. Abbildung 3). Anhand des Anwendungsbeispiels konnte gezeigt werden, dass eine kosteneffiziente Abbildung industrieller Erzeugnisse geringer bis mittlerer Komplexität auf niedrigem technologischen Niveau möglich ist.

Die Übertragbarkeit auf komplexe Baugruppen und Anlagen sollte in weiteren Untersuchungen geprüft werden. Um eine statistische Aussage über die Effizienz der vorgestellten Verfahren im direkten Vergleich treffen zu können müssen zukünftig weitere Baugruppen und Produkte vergleichbarer Komplexität analysiert werden.

Ein langfristiges Ziel stellt die softwareunterstützte Automatisierung der vorgeschlagenen Auswahlstrategie und eine Implementierung in 3D-CAD-Modellierer dar. Auf diese Weise könnten der Download von Standardbauteilen und eine Feature-Erkennung anhand einer Datenanalyse der eingespeisten geometrischen Informationen automatisch durchgeführt werden, was eine automatische Rekonstruktion von geometrischen Datenfragmenten ermöglichen könnte.

Literaturverzeichnis

- DIN EN ISO 10360-1 2003: Geometrische Produktspezifikationen (GPS), Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG). Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 14638 2015: Geometrische Produktspezifikationen (GPS), Matrix-Modell. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag.

- Dassault Systèmes 2016: 3DCONTENTCENTRAL. <http://www.3dcontentcentral.com/>, 20.03.2016
- AMETEK GmbH, Division Creaform Deutschland 2016: Handy Scan 3D, Produktbroschüre. Leinenfelden-Echterdingen: Selbstverlag.
- Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., Lindemann, U., Mörtl, M. 2014: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren, Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. 7. Auflage. Berlin: Springer Verlag.
- Engelmann, F. 2011: FabScan, Affordable 3D Laser Scanning of Physical Objects. Bachelor Thesis. Media Computing Group, RWTH Aachen University. Aachen: Selbstverlag.
- Faro Europe GmbH & Co. KG 2016: Faro Edge, Der innovativste MESSarm der Welt. Technisches Datenblatt. Selbstverlag.
- Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (Hrsg.) 2014: Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin: Springer Verlag.
- Gedema GmbH 2016: Messwelt Katalog. Neuss: Selbstverlag.
- Hoffmann Group 2016: Hauptkatalog 2015/2016. Nürnberg: Selbstverlag.
- Keferstein, C. P., Marxer, M. 2015: Fertigungsmesstechnik: Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren. 8. Auflage. Berlin: Springer Verlag.
- Mankoff, K. D., Russo, T. A. 2012: The Kinect a low-cost, high-resolution, short-range 3D camera. In: Earth Surface Processes and Landforms, 38, 926-936
- Mitutoyo Deutschland GmbH 2015: Messgerätekatalog 2015 – 2017. Neuss: Selbstverlag.
- Schöne, C., Stelzer, R. 2012: Reverse Engineering in der Produktentwicklung, Aktuelle Herausforderungen. In: Stelzer, R. (Hrsg.) Entwerfen, Entwickeln, Erleben 2012, Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung, 351-363, Dresden: TUDpress.
- Scheuermann, G. 2015: Inventor 2016, Grundlagen und Methodik in zahlreichen Konstruktionsbeispielen. 5. Auflage. S. 349. München: Carl Hanser Verlag.
- SEW Eurodrive GmbH & Co. KG 2014: Didaktik – Getriebetechnik, Kegelradgetriebe K47 AD2. Ausgabe 07/2014. <http://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/21278989.pdf>, 22.03.2016
- TraceParts GmbH 2016: Kostenfreie CAD Bauteilebibliothek. <http://www.tracepartsonline.net/>, 20.03.2016
- Várady, T., Martin, R., Cox, J. 1997: Reverse engineering of geometric models – an introduction. In: Computer-Aided Design, 29 (4), 255-268, London: Elsevier Verlag.
- Wu, C. 2015: VisualSFM A Visual Structure from Motion System. <http://www.cwu.me/vsfm>, veröffentlicht 2015, abgerufen am 19.3.2016

Kontakt

Dipl.-Ing. Tim Katzwinkel

Bhavinbhai Patel

Alexander Schmid, M.Sc.

Walter Schmidt, M.Sc. RWTH

Justus Siebrecht, M.Sc. RWTH

Dr.-Ing. Manuel Löwer

Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen

RWTH Aachen University

Lehrstuhl und Institut für allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus

Steinbachstr. 54 B

D-52074 Aachen

www.ikt.rwth-aachen.de