



Reverse Engineering – Vom Objekt zum Modell

J. Herrmann, M. Möser

Motiviert durch Anwendungen im Maschinen- und Anlagenbau besteht häufig die Notwendigkeit, ein industriell gefertigtes Produkt in ein CAD/CAM-Modell zurückzuführen. Dieser Vorgang wird als Reverse Engineering (umgekehrt entwickeln, rekonstruieren) bezeichnet. Mit diesem Beitrag sollen einige Begriffe und Ansätze des Reverse Engineering erläutert werden. Der Beitrag ist eine Zusammenfassung der Vorträge zum 3. Dresdner Ingenieurgeodäsietag „Industriemesstechnik“ am 1.6.2007 und zum Fortbildungsseminar „Optische Messtechnik für Anwendungen im Maschinenbau“ am 19.10.2007 in Karlsruhe.

1 Reverse Engineering für Freiformflächen

Unter Reverse Engineering im engeren Sinn versteht man im Maschinenbau die 3D-Digitalisierung und Datenaufbereitung der 3D-Punktinformationen für die CAD-Modellierung und das Design. Die weitere Nutzung dieser Daten in der Produktionsplanung, im Fertigungsprozess bis zur Herstellung von Freiformflächen und deren Qualitätskontrolle wird als Reverse Engineering im erweiterten Sinn bezeichnet [1]. Unter Freiformflächen werden nicht einfach zu beschreibende Oberflächen verstanden, die in der Regel nur durch Polynome höheren Grades oder hinreichend dichte Dreiecksflächen beschrieben werden können. Diese Freiformflächen findet man u.a.

- im Energiemaschinenbau bei Turbinen,
- im Fahrzeugbau für Karosserien und den Designentwurf,
- in der Medizintechnik, z.B. Zahnmedizin.

Die numerische Erfassung der Oberfläche von Werkstücken erfolgt durch Abtasten mit einem optischen oder Laser gestützten 3D-Scanner. Als Ergebnis liegt eine Menge diskreter Punkte der gescannten Oberfläche als Basis für die Flächenrückführung vor. Der eigentliche Reverse Prozess ist nach dem Scannen angesiedelt, er bildet die Schnittstelle zwischen der durch den Scannvorgang erzeugten Punktwolke und dem CAD-Modell mit definierten Objekt- und Flächeneigenschaften. Dabei ist die Flächenrückführung und Erzeugung des CAD-Modells auf der Grundlage der gescannten Punktwolke durchaus nicht als trivial zu bezeichnen. Insbesondere vor dem Hintergrund der Instrumentenentwicklung, die eine stetig wachsende Auflösung der Scanner hervorbringt, wächst die Menge der zu verarbeitenden gescannten Punkte.

In der Regel arbeiten die im Reverse Engineering zum Einsatz kommenden Softwarelösungen zunächst mit der

gesamten gescannten Punktwolke. Durch eine Vorverarbeitung der Digitalisierungspunkte werden isolierte Punkte und der Hintergrund entfernt. Ebenso werden Fehlmessungen eliminiert. Beim Ausdünnen der Punktwolke wird bevorzugt an schwach gekrümmten Flächen eine vorgegebene Anzahl von Punkten gelöscht, wodurch die Rechenzeit optimiert wird.

Für die Flächenrückführung in CAD-Modellen stehen verschiedene mathematische Flächenmodelle zur Verfügung. Häufig zur Anwendung kommende Modelle sind die Triangulation und NURBS (NonUniform Rational B-Splines).

Durch die hohen Scannerauflösungen und daraus resultierenden sehr großen zu verarbeitenden Punktwolken ist die Triangulation eher nachteilig, da durch aufwendige Algorithmen die benachbarten Scannpunkte berechnet werden müssen. Darüber hinaus entstehen sehr viele Dreiecke, die schwer zu handhaben sind. Weiterhin nachteilig wirken sich die entstehenden un stetigen Oberflächen aus, die für die meisten Anwendungen nicht geeignet sind. Insbesondere im Designbereich werden glatte bzw. stetige Flächen erwartet. Aus diesem Grund hat sich das mathematische Modell NURBS zur Beschreibung von Flächen in den meisten Softwareapplikationen für Flächenrückführungen etabliert.

2 Darstellungen von Flächen und Körpern

3D-Objektvermessungen bestimmen für jeden Oberflächenpunkt die räumlichen Koordinaten und ggf. auch einen Intensitätswert in Farbe oder als Graustufe. Durch geeignete Viewer kann das vermessene Objekt gedreht und verschoben bzw. in das Bild gezoomt werden. Dadurch erhält der Betrachter einen räumlichen Eindruck. Die Lösung konkreter Aufgaben ist ohne eine Modellierung der Daten in der Regel nur sehr eingeschränkt möglich, da die einzelnen Messpunkte nicht mit den Objektkonturen identisch sind. Handelt es sich bei dem Körper um Regelgeometrien, so lassen sich diese beispielsweise unter Verwendung der Best Fit Methode relativ einfach einpassen. Die Bereinigung der Punktwolke erfolgt nach folgenden Grundsätzen:

- 1) Anwendung von Filtern ohne Informationsverlust mit folgenden Bedingungen
 - Offensichtlich nicht zum Objekt gehörende Punkte werden gelöscht.
 - Offensichtliche Fehlmessungen, signifikante Koordinatenabweichungen zu benachbarten Punkten, werden identifiziert und gelöscht.
 - Beseitigung von Redundanzen durch Löschen von Punkten in Bereichen überlappender Scans.
- 2) Anwendung von Filtern mit Informationsverlust bei sehr großen Punktmengen

- Beim Ausdünnen wird vorzugsweise in schwach gekrümmten Bereichen des Objektes ein bestimmter Anteil von Punkten gelöscht.
- Bei der Glättung wird die Lage der Punkte an die der Nachbarn angepasst. Dadurch erscheinen später rekonstruierte Flächen glatter.

Die Auswertung und Berechnung der Geometrien erfolgt mittels Flächentriangulation oder NURBS-Flächen. Bei der Flächentriangulation und Dreiecksvermaschung (Delaunay Triangulation) werden die drei unmittelbar benachbarten Punkte einer Fläche zu einem Dreieck verbunden. Die Ecken der Dreiecke werden als Knoten und die Verbindungen der Knoten als Kanten bezeichnet. Jede entstehende Dreiecksfläche hat die Flächennormale als Richtung. NURBS-Flächen, Nonuniform Rational B-Splines (Nicht-uniforme rationale B-Splines), sind mathematisch definierte Kurven oder Flächen, die im Computergrafik-Bereich, beispielsweise im CAD, zur Modellierung beliebiger Formen verwendet werden [2]. Dabei bezieht sich Nonuniform auf die Gewichtung einzelner Knoten bzw. deren Gewichtsfunktion. Diese müssen bei NURBS nicht einheitlich für jeden Knoten sein, sondern können von Kurvensegment zu Kurvensegment unterschiedlich sein. Die Darstellung der Geometrieinformation erfolgt über stückweise funktional definierte Geometrielemente. Im Prinzip kann jede beliebige technisch herstellbare oder in der Natur vorkommende Form mit Hilfe von NURBS beschrieben werden. Eine NURBS-Fläche wird durch die beiden Parameter u und v nach folgender Gleichung aufgespannt

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{i,j}(u, v) P_{i,j}$$

und ist definiert durch ein Kontrollgitter $P_{i,j}$ und die rationale Basisfunktion

$$R_{i,j}(u, v) = \frac{N_{i,p}(u)N_{j,p}(v)w_{i,j}}{\sum_{k=0}^n \sum_{l=0}^m N_{k,p}(u)N_{l,q}(v)w_{k,l}}$$

mit einer zweidimensionalen Gewichtsmatrix $w_{i,j}$. Die zweite Dimension der Fläche $S(u, v)$ mit dem Parameter v wird geschaltet durch den Knotenvektor

$$V = \{(c, \dots, c)_{q+1}, v_{q+1}, \dots, v_{s-q-1}, (d, \dots, d)_{q+1}\}$$

mit der Ordnung q und der Längs s .

NURBS-Flächen haben einige interessante Eigenschaften:

- Sie sind invariant für projektive Transformationen.
- Sie bieten eine gemeinsame mathematische Darstellung für sowohl analytische Standardformen (z.B. Kegelschnitte) als auch Freiformflächen.
- Sie reduzieren den Speicheraufwand für geometrische Objekte, da nicht alle Punkte eines Objektes gespeichert werden müssen, sondern nur Kontrollpunkte, Kontrollfunktionen und Knotenvektoren der einzelnen Patches.
- Sie können durch numerisch stabile und präzise Algorithmen verhältnismäßig schnell ausgewertet werden. Diese NURBS-Flächen und Algorithmen sind bei der computergestützten Konstruktion und Fertigung beinahe

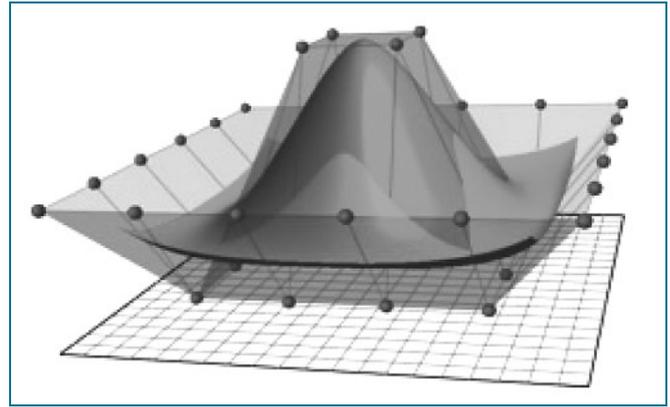


Abb. 1: NURBS-Fläche (innen) vom Grad 4, die durch 36 Kontrollpunkte (äußeres Gitter) über einem zweidimensionalen Parameteregebiet (unteres Gitter) definiert wird

unersetzlich geworden. Im Allgemeinen ist die interaktive Bearbeitung von NURBS-Flächen sehr intuitiv und vorhersagbar. Kontrollpunkte sind stets entweder direkt mit der Fläche verbunden oder wirken, als wären sie mit einem Gummiband verbunden. In den Konstruktionszeichnungen werden alle Maßangaben des Objektes eingetragen. Bestandteil können auch Freiformkurven oder -flächen sein, wie z.B. eine Fräsung oder Nut. Alle Konstruktionselemente lassen sich unter anderem durch NURBS-Kurven oder -Flächen beschreiben. Dabei bestehen zwischen den Konstruktionsmaßen und den NURBS-Kontrollpunkten enge Beziehungen. Die CAD Konstruktionszeichnung stellt als Endprodukt die exakte Beschreibung des Objektes dar.

3 Messverfahren

Bei den 3D-Messverfahren (Abb. 2) zur rechnergestützten geometrischen Werkstück erfassung werden im Maschinenbau die Digitalisierverfahren in objektzerstörend und zerstörungsfrei arbeitende Systeme unterteilt. Bei zerstörender Digitalisierung wird das Teil des Werkstücks in dünne Schichten zerfräst und jede Schicht einzeln digitalisiert. Die einzelnen Schichten werden dann zum 3D-Modell zusammengefügt [1].

Die ursprüngliche Technologie der Objekterfassung ist die diskrete taktile (mit Berührung) Punkterfassung mit Koordinatenmessgeräten (KMG) und Gelenkarmen. Die Messarme besitzen eine integrierte Tasteraufnahme für mechanische und elektronische Taster. Die geodätischen Technologien mit Theodolit, Tachymeter, Laser Tracker und Laser Radar sind optische Verfahren, die meist eine Punktsignalisierung (Vermarkung, Reflektoren) erfordern. Bei den Laser Trackern sind mittlerweile auch Scannfunktionen integriert. Weitere konventionelle optische Messverfahren zur Digitalisierung und Formerfassung von Werkstücken sind die Lasertriangulation, Lichtschnittverfahren und das Streifenprojektionsverfahren. Online-Photogrammetriesysteme bestehen aus mindestens zwei digitalen Kameras, die kalibriert und zueinander orientiert werden. Die Messung des Objektes erfolgt entweder taktill durch direkte Messung aufgebracht photo-

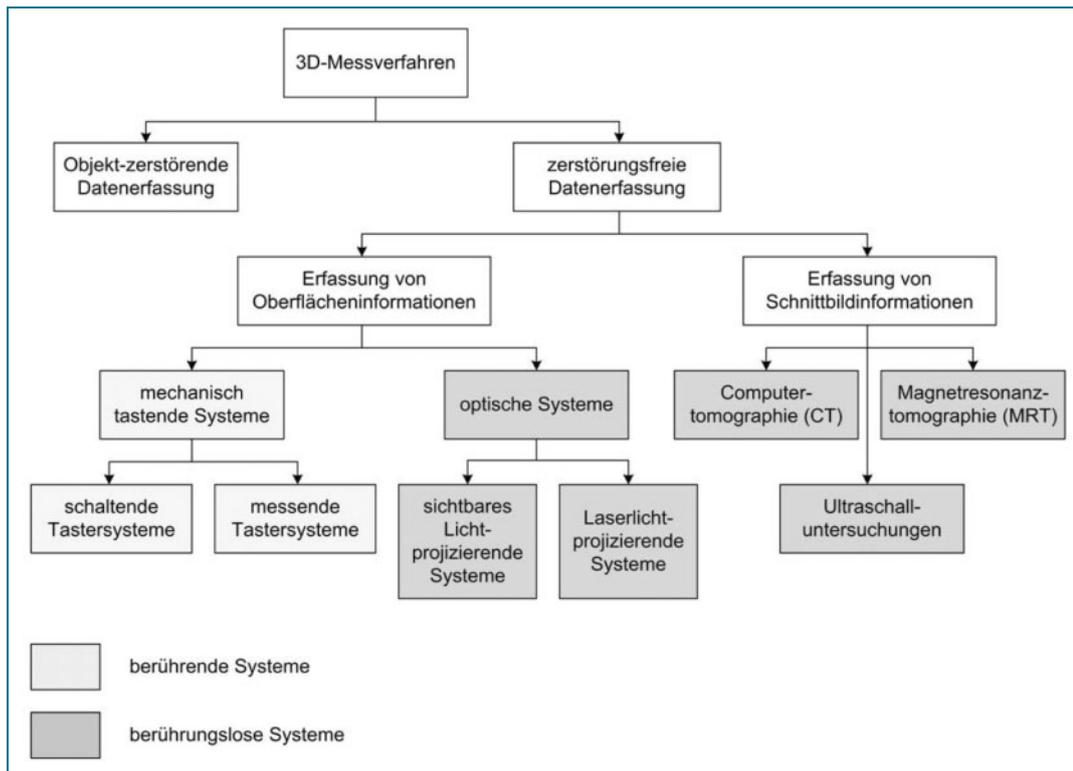


Abb. 2: Klassifizierung von 3D-Messverfahren im Maschinenbau [3]

grammetrischer Marken oder bei speziellen Anwendungen durch Auswertung von Merkmalen im Bild. Optische (Koordinaten-)Messmaschinen basieren auf dem Triangulationsprinzip. Zwei Kameras beobachten projizierte Streifenmuster. Für jedes Kamerapixel werden 3D-Koordinaten hochpräzise berechnet und es wird ein Polygonnetz der Objekt Oberfläche generiert.

4 Auswertesoftware

Für das Aufgabenfeld des Reverse Engineering haben sich eine Vielzahl von Systemen unterschiedlicher Leistungsfähigkeit etabliert. Da im Bereich der Softwareentwicklung eine Trennung zu den Herstellern von Scannersystemen zu beobachten ist, können insbesondere bei online Messungen in der Regel alle gängigen Scanner durch die Software gesteuert werden. Mitunter ist es dennoch ratsam, einzelne Bearbeitungsschritte in verschiedenen Applikationen zu berechnen. Folgende Punkte können bei der Auswahl einer geeigneten Software hilfreich sein. Die mit dem Scanner zum Einsatz kommende Software sollte durch geeignete Filter die Punktwolke von nicht zum Objekt gehörenden Daten befreien bzw. fehlerhafte Daten erkennen und löschen können.

Für die Bearbeitung von Dreiecksnetzen stehen in der Regel automatisierte und manuelle Verfahren zu Verfügung. Gleiches gilt für die Bereinigung von Fehlern. Als Makro in die Software eingebettet, können relativ große Datenmengen schnell und mit wenigen manuellen Eingriffen berechnet werden. Dreiecksmaschenmodelle werden für CAD- und CAM-Anwendungen in NURBS-Flächen rückgeführt. NURBS-Flächen können durch Anpassung an vermaschte Flächen erzeugt oder direkt in die Punktwolke

eingepasst werden, wenn das Objekt vorrangig durch Regelgeometrien gekennzeichnet ist. Besonderes Augenmerk sollte auf Funktionen zur Prüfung der Qualität der Berechnungsergebnisse gelegt werden. NURBS ist ein Verfahren zur Approximation und keine exakte Konstruktion. Als Softwarelösungen seien beispielhaft die Programme Tebis, Polyworks und Geomagic genannt. Ein weiteres Beispiel für die Anwendung von NURBS in der Praxis findet man im sehr leistungsfähigen NURBS-Modellierer Rhinoceros, der die konstruktive Änderung von rückgeführten CAD-Daten ermöglicht. Hierzu gibt es eine Reihe von PlugIn-Modulen für die Erzeugung von NC-Programmen im CAM-Bereich. Als Austauschformate für NURBS-Flächen und NURBS-Kurven eignen sich Standardformate wie IGES oder STEP.

Literatur

- [1] SCHÖNE, CH. (2006): Reverse Engineering für Freiformflächen. Studienbrief TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen
- [2] PIEGL, L.; TILLER, W. (2000): The NURBS Book. Monographs in Visual Communication. Springer Verlag
- [3] BEYER, Ch. (2002): Nutzung der 3D-Digitalisierung bei der Entwicklung von Produkten. Shaker Verlag, Aachen 2002

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Ing. JÖRG HERRMANN, Vermessungsbüro,
Breitenweg 58, 39218 Schönebeck,
E-mail:herrmann@ing-herrmann.de

Prof. Dr.-Ing. habil. M. MÖSER, Technische Universität
Dresden, Geodätisches Institut, Mommsenstr. 13,
01062 Dresden, E-mail: michael.mooser@tu-dresden.de