

Fig. 8 Film frames captured during the simulation of the robot performing the gluing operation

REFERENCES:

[1] Koch T., Dybala B., Kowalczewski P., "Robot Workcell Simulation System for Personal Computers", International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIM'92, Zakopane, Poland, March 1992.

[2] Koch T., Kowalczewski P., Koceluch A., Dybala B., Szypczyński A., "System symulacji gniazda robotyzowanego" IV Krajowa Konferencja Robotyki, Wrocław, Poland, September 1993.

[3] Pritschow G., Bauder M., Angebauer R., "RDL - ein Werkzeug zur Robotermodellierung", Robotersysteme 7, 1991.

[4] Dilmann R., Schneider S., "Ein CAD-unterstützter Trajektorien Entwurfseditor", Robotersysteme 4, 1988.

Revised by: Gabriel Kost

Detlef KOCHAN,
Jens HOFFMANN

TU Dresden, Institut für Produktionstechnik

Solid Freeform Manufacturing - Aktuelle CIM-Erweiterungen

Zusammenfassung. Die Fertigung von Modellen mit komplizierter geometrischer Gestalt mit Hilfe der 3D-Modellierung und moderner Verfahren des Solid Freeform Manufacturing eröffnet neue Möglichkeiten in der Erzeugnisentwicklung bezüglich Kosten und Zeitbedarf

1. Einleitung

Die direkte Generierung geometrisch komplizierter Objekte aus 3D-CAD-Daten ohne die Verwendung traditioneller Werkzeuge ist zweifellos eine der bedeutendsten Entwicklungslinien für die angestrebten "Technologien des 21. Jahrhunderts". Bereits jetzt befinden sich mehr als 680 Anlagen mit unterschiedlichen Prinzipien im industriellen Einsatz. Als Oberbegriff für die neue Verfahrensgruppe werden unterschiedliche Bezeichnungen Schichten-technologie, Generative Fertigungsverfahren, Rapid Prototyping, Solid Freeform Manufacturing, Layer Manufacturing, Solid Freeform Fabrication u.a. verwendet. In Übereinstimmung mit anderen Auffassungen hat sich der Autor für den letztgenannten Begriff entschieden, weil damit der qualitativ neue Inhalt am treffendsten charakterisiert werden kann.

Die mit den neuen Entwicklungsetappen verbundenen Phasen der Euphorie und der anschließenden Ernüchterung sind inzwischen überwunden. In industriell führenden Ländern und Unternehmen wird nunmehr sehr zielstrebig am Erschließen der möglichen Nutzeffekte in Verbindung mit vielfältigen Anwendungen gearbeitet.

Ausgehend von den erheblichen Anlagenkosten ist dabei eine Quantifizierung der Kosten-Nutzen-Relation nicht unproblematisch.

2. Erweiterte CIM-Prozessketten - SFM und Reverse Engineering

2.1. Vorbemerkungen

In den letzten Jahren wurden weltweit neue Verfahren zur schnellen Fertigung von Modellen entwickelt und eingeführt. Das derzeit am weitesten verbreitete Verfahren ist die Stereolithographie. Die

Technische Universität Dresden verfügt mit dem System STEREOS 400 seit Januar 1993 über eine entsprechende Anlage.

Die Integration der SFM-Verfahren in den fertigungstechnischen Alltag erfordert eine Revolution des gesamten Modellbauprozesses. Hierzu zählt die Einführung der 3D-CAD-Modellierung ebenso wie die Nutzung moderner Verfahren zur Vervielfältigung der Urmodelle. Zur Aufbereitung der international vorhandenen fortgeschrittenen Erkenntnisse auf diesem Gebiet in Verbindung mit den technischen Voraussetzungen der TU Dresden haben sich drei Einrichtungen zu einem Forschungsverbund unter dem Thema

"Gestalten der Prozesskette - Schnelle Fertigung von Modellen - Vacuum-Gießtechnik"

zusammengeschlossen. Dieses Projekt wird durch das Sächsische Wirtschaftsministerium im Rahmen der Technologieentwicklung gefördert. Die gesamte neue Prozesskette soll als beschleunigten Weges vom ersten Entwurf bis zur serienreifen Produktion zur industriellen Wirkung gebracht werden. Dabei sollen spezifische Anforderungen aus verschiedenen Branchen, wie z.B. Industriedesigner, Zulieferer u.a. für die Automobilindustrie, Konsumgüter- und Kunststoffindustrie sowie Feinmechanik und Optik berücksichtigt und repräsentative Beispiellösungen geschaffen werden (Bild 1). Ein Einsatz im Bereich der Medizintechnik und Chirurgie sowie der Architektur ist ebenfalls möglich.

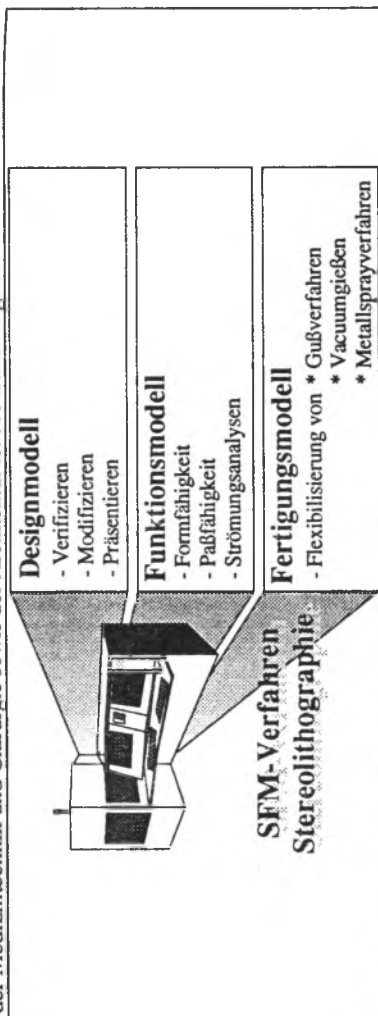


Bild 1. Einsatzmöglichkeiten für SFM-Erzeugnisse

2.2. Internationaler Stand

Die modernen Verfahren des Solid Freeform Manufacturing (SFM) befinden sich zur Zeit in der Phase der breiten Markteinführung. Neue Systeme werden zunehmend von Großunternehmen und Dienstleistern zum Einsatz gebracht. Deren Möglichkeiten finden immer stärkere Verbreitung im Rahmen des Prototypenbaues und der Produktentwicklung. Auf den internationalen Märkten sind zur Zeit etwa ein Dutzend von Anbietern mit ihren System aktiv (Bild 2). Dabei hat die Firma 3D Systems bezüglich der bisher installierten Systeme eine Überlegenheit erlangt. Diese basiert wesentlich auf ihrer Vorreiterrolle auf diesem Gebiet. Eine besondere Bedeutung unter den Anwendern dieser Verfahren haben führende Automobilkonzerne wie General Motors, Mercedes-Benz und BMW, die bereits jeweils mehrere solcher Anlagen im Einsatz haben.

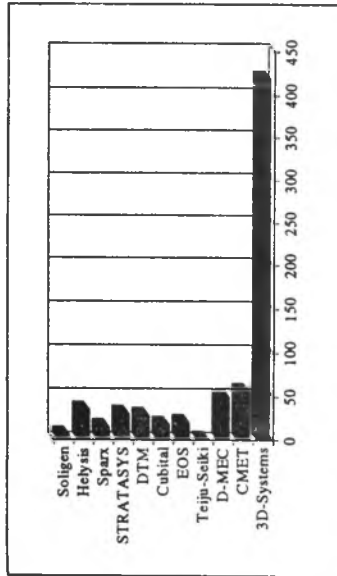


Bild 2. Verbreitung der SFM-Verfahren nach installierten Systemen einzelner Hersteller

2.3. 3D-CAD-Modellierung

Die Basis einer modernen Produktionsvorbereitung bildet eine CAD-gestützte Konstruktion. Dabei wird unterschieden zwischen Flächen- und Volumenmodellierung. Moderne CAD-Systeme bieten eine enge Verknüpfung dieser beiden Modellierungsvarianten an.

Das Kennzeichnen eines Volumenmodells ist eine rechnerinterne Darstellung des Werkstückmodells, bei der die das Objekt umgebenden Flächen zu einem Volumen zusammengefaßt werden. Es integriert folglich das Flächenmodell durch die Definition der Beziehungen zwischen den einzelnen Flächen. Diese Systeme ermöglichen die Beschreibung der Werkstücke durch geometrische Regelkörper (Zylinder, Quader, ...), geometrische Regelflächen (Ebenen, einfach gekrümmte Flächen, ...) sowie, in einem systemspezifischen Umfang, durch doppelt gekrümmte bzw. Freiformflächen.

In Folge dieser Möglichkeiten der modernen CAD-Systeme können Werkstücke mit äußerst komplizierten Oberflächenformen konstruiert werden. Auf Grund dieser Fähigkeiten der Systeme kommt es dazu, daß die Darstellungen auf dem Bildschirm nicht mehr zum Verständnis des Werkstückes ausreichen. Die Daten müssen folglich relativ kurzfristig "materialisiert" werden. Mit dem daraus resultierenden "faßbaren" Modell können entsprechend Untersuchungen sowie eventuell erforderliche Veränderungen besser realisiert werden.

Aus diesem Grunde ergibt sich dann die Frage nach dem Verfahren zur Umsetzung des Daten- in ein physisches Modell, wobei die herkömmlichen Fertigungsverfahren wie Drehen, Bohren und Fräsen zum Teil an ihre verfahrensbedingten Grenzen stoßen. Gleichzeitig sind beim Einsatz dieser spannenden Verfahren große Zeiträume für die Vorbereitung der Fertigung (NC-Programmierung, Rüstzeiten, Testung...) erforderlich. Gleichzeitig sind die erforderlichen Fertigungszeiten von beträchtlichem Umfang. Dieser Zeitbedarf hat erhebliche Rückwirkungen auf die Entwicklungszeiten sowie auf die dabei anfallenden Kosten.

Diese Probleme treten zum Beispiel besonders bei solchen Einsatzfällen wie dem Automobilbau mit seiner Karosseriefertigung, der Strömungstechnik sowie der Gestaltung von Verpackungen auf. Die Ursache dafür ist besonders in der häufigen Verwendung von komplizierten Freiformflächen zu suchen.

2.4. Die schnelle Fertigung von Modellen

Die Zielstellung für alle SFM-Verfahren ist die Verringerung des materiellen sowie des zeitlichen Aufwandes zur Erstellung von Modellen sowie die Steigerung deren Qualität. Die Basis dieser modernen Technologien bilden im wesentlichen die neuen Erkenntnisse der Laser- und Polymertechnik. Unterschieden werden dabei vor allem folgende Verfahren:

- Stereolithographie (STL);
- Solid Ground Curing (Cubital-Verfahren)
- Selective Laser Sintering (SLS, Selektives Laser Sintern);
- Fused Deposition Material (FDM, Materialauftrag mittels Verschmelzen);
- Laminated Object Manufacturing (LOM, Objekt-Fertigung mittels Laminaten);
- 3D-Printing (DSPC).

An dieser Stelle soll besonders auf das Verfahren "Stereolithographie" eingegangen werden. Dieses Verfahren ist gekennzeichnet durch den Einsatz eines flüssigen UV-empfindlichen Photopolymers, das mit Hilfe eines UV-Lasers schichtenweise aushärtet (Bild 3).

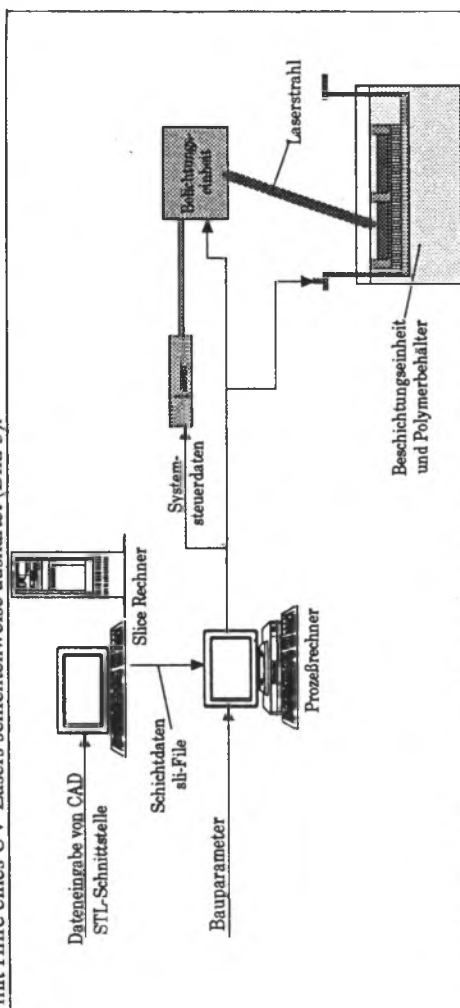
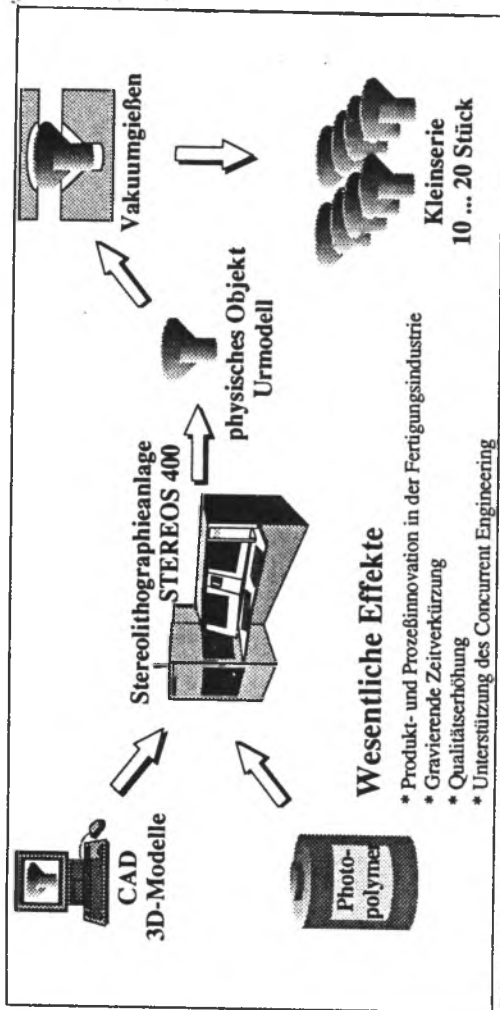


Bild 3. Von den 3D-Daten zum physischen Modell - Stereolithografie

2.5. Vacuumgießen als derzeit verbreitetes Folgeverfahren

Da sich derzeit nur komplizierte Bauteile als einzelne SFM-Erzeugnisse "rechnen", sind weitere neue Modellbauverfahren zur Duplizierung der Urmodelle erforderlich. Eines davon ist das Vacuumgießen (Bild 4).

Dabei kann eine Stückzahl bis maximal 25 Stück erzeugt werden. Die genutzten Werkstoffe für diese Modelle sind relativ variabel und können bereits dem Plast entsprechen, das für die Serienproduktion verwendet wird.



Wesentliche Effekte

- Produkt- und Prozessinnovation in der Fertigungsindustrie
- Gravierende Zeitverkürzung
- Qualitätserhöhung
- Unterstützung des Concurrent Engineering

Bild 4. Neue Prozesskette unter Nutzung der Stereolithographie und des Vacuumgießens. Neben dem Vacuumgießen sind auch andere Verfahren zur Vervielfältigung der Urmodelle geeignet. Dazu gehören u.a. Metallsprayverfahren aber auch das traditionelle Sandformgießen.

3. Stereolithographie-System STEREOS 400 (Möglichkeiten und Erfahrungen)

3.1. Stereolithographieanlage

Das Institut für Produktionstechnik an der Technische Universität besitzt seit Anfang 1993 im Rahmen des SFM-Zentrums eine Stereolithographieanlage der Münchener Firma EOS Electro Optical Systems GmbH. Diese Anlage vom Typ EOS 400 erlaubt die Fertigung von Modellen in einem Arbeitsraum von ca. 400 x 400 x 250 mm. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit größere Modelle durch die Zerlegung in Teilmodelle und anschließend gemeinsame Aushärtung zu fertigen. Die entsprechenden technischen Parameter der Anlage sind dem folgendem Bild zu entnehmen.

In Folge der bisher auf dieser Anlage gefertigten Modelle sowie basierend auf Erfahrungen aus Vergleichsuntersuchungen mit anderen Systemen der SFM-Verfahren lassen sich bereits jetzt einige Aussagen über derzeit verfügbare CAD-Systemen sowie zum Stereolithographieverfahren, seinen Möglichkeiten und Grenzen treffen.

Seit der Inbetriebnahme der Anlage wird mit dem Photopolymer SOMOS 3100 der Firma Du Pont gearbeitet. Dieses Polymer basiert auf Acrylaten.

Deren Eigenschaften bestimmen wesentlich die Möglichkeiten der Stereolithographie zur Erstellung von Modellen. Auf Grund der derzeitigen Maschinenkonfiguration gelten bestimmte technische Restriktionen (Bild 5). Bestimmend für die Fertigungszeit ist besonders die zu belichtende Oberfläche, die dazu erforderlichen Energiedichte sowie die verfahrensbedingten Nebenzeiten.

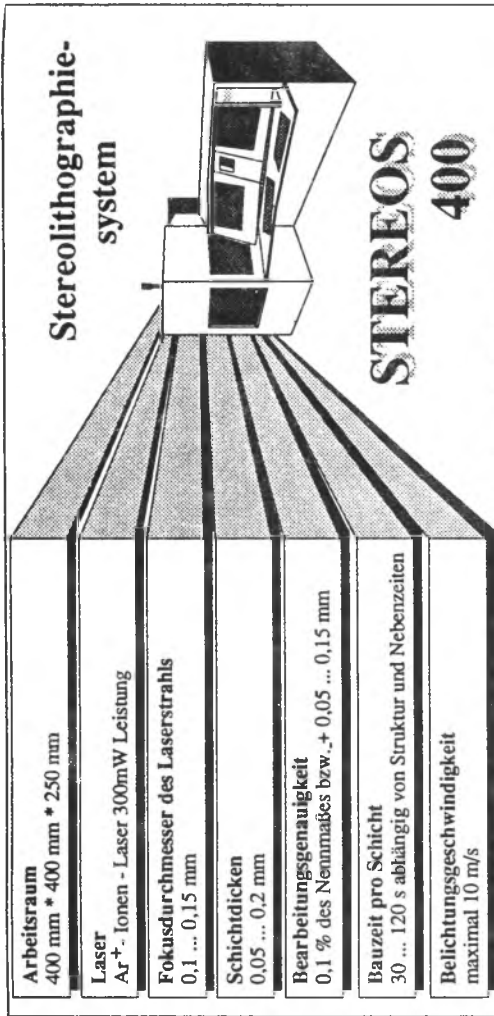


Bild 5. Leistungsparameter der Stereolithographieanlage STEREOS 400

Einen wesentlichen Einfluß auf die Qualität des Erzeugnisses hat die Lage des Teiles im Bad. Diese Lage bestimmt wesentlich die Richtung und Stärke der möglicherweise auftretenden Spannungen. Diese Spannungen haben als Ursache die verschieden großen Materialanhäufungen sowie den nicht vollständigen Aushärtungsgrad der Teile nach dem Abschluß des unmittelbaren Bauprozesses.

Durch den Anlagenhersteller werden jetzt auch zwei weitere Photopolymere mit modifizierten Eigenschaften angeboten. Der Einsatz dieser neuen Polymere ist jedoch zur Zeit an der TU Dresden wegen der dazu erforderlichen Investitionen noch nicht möglich.

3.2. Nachbearbeitung und Weiterverwendung der Modelle

Ein wesentlicher Faktor bei der Anwendung der SFM-Verfahren ist der Umfang der erforderlichen Nacharbeiten. Diese Arbeiten umfassen bei der Stereolithographie folgende Schwerpunkte die Grobreinigung, die Nachhärtung sowie die Finishbearbeitung. Im Rahmen der Nachbearbeitung werden folgende Aufgaben realisiert :

- vollständiges Entfernen der Stützkonstruktion
- Entfernen nicht ausgehärteter Polymerreste
- Nachbehandeln der Oberfläche zum Erreichen der geforderten Qualität

Bei diesen Bearbeitungsschritten ist der Anteil der manuellen Arbeit noch sehr hoch. Der Zeitaufwand ist in Abhängigkeit von der geforderten Qualität des Teiles zum Teil sehr umfangreich.

Der Aufwand für die Grobreinigung wird wesentlich durch die Gestalt, die Dichte sowie den Aushärtungsgrad der Stützkonstruktion bestimmt. Unmittelbar nach der Entnahme der Teile aus dem Polymerbad kann die Stützkonstruktion relativ leicht von Hand vom Werkstück entfernt werden. Dies sollte so gründlich wie möglich erfolgen, da nach dem anschließenden Nachhärteprozeß unter UV-Licht das Entfernen der Überreste nur mit Hilfsmitteln erfolgen kann und damit der Zeitaufwand wesentlich steigt. Das Problem bei der Grobreinigung besteht darin, auch schwer zugängliche Bereiche des Werkstückes zu erreichen. Im Rahmen der Grobreinigung wird das Werkstück je nach der ge-

forderten Weiterverwendung mit dem Lösungsmittel TPM, mit technischem Alkohol bzw. mit normaler Waschlauge gewaschen. Diese Waschprozesse dienen zum Reinigen der Oberfläche von Harzresten, die nur mit Hilfe des speziellen Lösungsmittels entfernt werden können, sowie dem anschließenden vollständigen Entfernen des Lösungsmittels.

Es können dabei folgende Probleme auftreten :

- mechanische Beschädigung der Kontur beim Reinigen (Bruch, Verformung);
- Verformung infolge ungleichmäßigem Aushärten durch Zutritt von UV-Licht;

Diese Risiken können durch eine fertigungsgerechte Konstruktion der STL-Teile und durch sorgfältiges Arbeiten verringert werden. Ein weitere Möglichkeit besteht in der optimalen Anordnung von Teil und Stützkonstruktion im Bad während des Bauprozesses.

Das Nachhärten der Teile dient dem Ziel, eine möglichst vollständige Aushärtung der Polymere zu erreichen. Hierzu werden die Teile im Anschluß an die Grobreinigung in einem speziellen Nachhärteschrank für mehrere Stunden mit UV-Strahlung belichtet. Die benötigte Nachhärtezeit ist von folgenden Faktoren abhängig :

- Größe des Bauteiles
- Struktur (Materialanhäufungen, Lage der einzelnen Formelemente)
- Durchhärtung während des Bauprozesses
- Abschirmung durch Gegenstände bzw. Formelemente

Die Abschirmung von einzelnen Formelementen ergeben sich aus der Notwendigkeit der Fixierung bestimmter Strukturen während des Nachhärtens. So treten bei bestimmten Materialkonzentrationen zum Teil erhebliche Verzüge auf. Diese Problematik ist ähnlich den Verzügen während der Nachbearbeitung von Kunststoffstücken. Diese Tatsache erfordert ein erhebliches Erfahrungswissen für die Konstruktion der Hilfsmittel zum Spannen und Fixieren.

Die anschließende Finishbearbeitung erfolgt ebenfalls entsprechend der geplanten weiteren Verwendung der STL-Teile. Dazu gehört folgende Schwerpunkte :

- Entfernen der Überreste der Stützkonstruktion;
- Verbesserung der Qualität der vertikalen Flächen durch Entfernen der Schichtstruktur;
- Entfernen der technologiebedingten Wabenstruktur an den horizontalen Flächen;
- Verbesserung der Maßgenauigkeit;
- Fertigung bestimmter nicht im Rahmen des STL-Prozesses erzeugter Konturelemente (Bohrungen, Nuten u.a.)

Diese Maßnahmen erfordern den Einsatz spanender Bearbeitungsverfahren. Ihr Umfang bestimmt wesentlich den Zeitaufwand für die Nachbearbeitung. Das Vorhandensein des Datenmodells der zu fertigenden Teile ermöglicht die effektive Programmierung moderner NC-Maschinen für die Nachbearbeitung.

Bei Bedarf können diese Tätigkeiten um Maßnahmen zur optischen Verbesserung der STL-Teile durch Farbgebung ergänzt werden. Dies ist besonders für Designmodelle von Interesse. Entsprechend der Nutzungsmöglichkeiten der STL-Teile als Funktions-, Fertigungs- und Designmodell ergeben sich differenzierte Anforderungen mit diesen Werkstücken.

3.3. Schlußfolgerungen

Aus den bisher getroffenen Aussagen lassen sich folgende Schlußfolgerungen treffen :

- Die Form der Teile bestimmt wesentlich die erreichbare Fertigungsqualität im Rahmen des STL-Prozesses. Hierbei können kompakte Teile mit relativ gleichmäßiger Materialverteilung besser gefertigt werden als Teile mit großen Ausdehnungen in ein oder zwei Dimensionen.
- Die relativ hohen Kosten bei der Erstellung der SFM-Modelle rechtfertigen den Einsatz der Stereolithographie bei komplexen Bauteilen mit einer Vielzahl an Formelementen sowie bei Bauteilen, die mit Hilfe konventioneller Fertigungsverfahren nicht herstellbar sind
- Die Effektivität des Einsatzes moderner Modellbauverfahren hängt wesentlich von der Gestaltung der gesamten Prozeßkette ab.

4. Schlußbemerkungen und Ausblick

Die Anlage an der TU Dresden wird seit dem März 1993 genutzt. Zwischenzeitlich erfolgte eine Umrüstung der Lasertechnik auf eine größere Leistung in Verbindung mit einer verbesserten Belichtungsstrategie. Dies führte zu einer verbesserten Stabilität des Prozesses sowie zu einer Erhöhung der Einflußmöglichkeiten.

Nach dem Abschluß der Inbetriebnahmephase der Anlage stehen jetzt erste Untersuchungen zur Verbesserung der Prozeßbeherrschung auf dem Programm. Zielstellung ist der Aufbau einer entsprechenden Datenbasis mit Prozeßparametern für bestimmte Geometrieformen.

Zusätzlich wird die Prozeßkette *3D-CAD-Modellierung* → *Stereolithographieprozeß* → *Vacuumgießen* untersucht. Mit dieser Verfahrenskopplung können kleine Serien von Werkstücken mit einem geringeren materiellen Aufwand als bei reinem Einsatz der Stereolithographie gefertigt werden.

Außerdem besteht die Möglichkeit, verschiedene Kunststoffwerkstoffe zu nutzen. Ein weiterer Schwerpunkt unserer Arbeit wird der Einsatz neuer Polymere sein. Mit diesen verbesserten bzw. modifizierten Materialien soll eine Senkung der Kosten bei gleichzeitiger Verbesserung der Qualität erreicht werden.

Zusätzlich zu diesen Untersuchungen wird die Nutzung spanender Verfahren zur Nachbearbeitung der STL-Teile besonders bezüglich der realisierbaren Schnittwerte vorbereitet. Das Vorhandensein leistungsfähiger CAD- und NC-Technik am Institut für Produktionstechnik ermöglicht diese Projekte besonders.

Zur praxisnahen Gestaltung dieser Forschungsvorhaben ist das SFM-Zentrum an einem möglichst breiten Spektrum von relevanten Werkstücken interessiert. So werden für Industriepartner entsprechende Teile aus ihrem Sortiment als Modelle gefertigt und für die weitere Nutzung als Design-, Funktions- und Fertigungsmodelle zur Verfügung gestellt.

Bei allen diesen Verbesserungen des Stereolithographieprozesses bleibt eine Prämisse jedoch auch weiterhin bestehen :

Jedes Stereolithographie-Teil kann nur so gut gefertigt werden, wie es das zugehörige

Volumenmodell ermöglicht.

Dies setzt ein 3D-CAD-System mit einer leistungsfähigen Software zur Modellierung in Verbindung mit einem hohen Grad der Beherrschung des Systems durch den Nutzer voraus.

Gutachter: Ryszard Knosala

Rudolf KOLLER

Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaues
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Deutschland

METHODISCHES KONSTRUIEREN VON LASERSCHWEIßVERBINDUNGEN; GRUNDLAGEN

Zusammenfassung. Durch Laserstrahlschweißen ergeben sich für zu verbindende Bauteile und deren Schweißverbindungen neue, vorteilhafte Gestaltungsmöglichkeiten. Bisherige Anwendungen dieses Verfahrens beschränken sich oft darauf, andere Fügeverfahren nur zu substituieren, ohne die durch das Laserschweißen gegebenen neuen Gestaltungsmöglichkeiten zu nutzen. Die folgenden Ausführungen sollen auf die vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten von Laserschweißverbindungen dünner Bleche hinweisen und zu deren Anwendung anregen. Darüber hinaus wird auf die Lösung des Problems der Erzeugung präziser Schweißfügen eingegangen.

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Zum Bau technischer Systeme werden häufig Bauteile sehr komplexer Gestalt benötigt, die nicht oder nur sehr aufwendig aus einem Bauteil hergestellt werden können. Die in Bild 1 gezeigte PKW-Motorhaube sowie Karosserie-Details können hierzu als Beispiele gelten. Aus Einzelteilen gefügte Schweißbaugruppen sollen einem gewünschten Bauteil in Aussehen und Eigenschaften möglichst nahe kommen. Hierbei erweisen sich Schweißverbindungen gegenüber Nieten, Schrauben und anderen Verbindungsarten hinsichtlich Aussehen (Design), Festigkeit und Kosten häufig als die besseren Lösungen. So wird beispielsweise das Laserstrahlschweißen an Fahrzeugkarosserien und anderen Dünnpblechkonstruktionen bereits vorteilhaft eingesetzt, weil es manche Verbindungsaufgaben besser zu lösen vermag als konventionelle Schweißverfahren.

Neben der Funktion, zwei Bauteile starr zu verbinden, haben Schweißverbindungen häufig noch weitere Bedingungen zu erfüllen; so beispielsweise "dicht zu sein", ein "gutes Aussehen" oder "Flansflächen für weitere Anbauteile" zu besitzen, "korrosionsunempfindlich zu sein" u. a. m. Um Schweißverbindungen mit entsprechenden Eigenschaften zu entwickeln, steht dem Konstrukteur - neben der Variation von Werkstoffen - nur noch die Variation der Gestaltparameter von Schweißverbindungen als Lösungsmittel zur Verfügung. Die Gestaltparameter sind für die