



Verfahren des Rapid Prototyping – Möglichkeiten und Grenzen

Dipl.-Ing. J. Hoffmann

Einleitung

Die Vielfalt der am Markt verfügbaren Systeme des Rapid Prototyping (RP) nimmt immer mehr zu. Gleichzeitig wächst der Umfang der nutzbaren Werkstoffe. Die Preise der verschiedenen Systemanbieter und Dienstleister werden immer undurchschaubarer.

Alle diese Faktoren führen dazu, daß für einen Interessenten die Zuordnung des relevanten Verfahren zu seinem Problem, seinem Werkstück, seinem Fertigungsauftrag immer schwieriger wird. Eine Übersicht über die aktuellen und zukünftigen Verfahren und Werkstoffe, ihre Möglichkeiten und auch ihre Grenzen (speziell auf Deutschland bezogen) soll einen ersten Einstieg in diese Verfahrensgruppe ermöglichen.

Bereits in der Produktentwicklung sind die sich aus dem realen Einsatz der Erzeugnisse ergebenden Anforderungen im Rahmen der notwendigen Untersuchungen weitgehend zu erfüllen. Im Widerspruch dazu stehen die für eine serienidentische Fertigung der Werkstücke erforderlichen hohen Kosten. Es gilt einen guten Kompromiß für die Herstellungsverfahren der Prototypen sowie die dabei entstehenden Kosten zu finden (Bild 1). Verschiedene Tests sind auch mit seriennahen Teilen möglich. Das „seriennah“ bezieht sich dabei sowohl auf das Fertigungsverfahren als auch auf den verwendeten Werkstoff und seine Eigenschaften.

Konzeptmodelle	Prototypen	Werkstücke	Werkzeuge
kurzfristig verfügbar sehr kostengünstig relativ ungenau geringe Belastungen	kurzfristig verfügbar kostengünstig relativ genau Belastungen je nach Einsatz - Designmodell - Anschauungsm. - Rekonstruktionsm. - Funktionsmodell - Fertigungsmodell	kurzfristig verfügbar kostengünstig genau z.T. hoch belastbar	kurzfristig verfügbar kostengünstig genau hohe Belastungen - thermisch - mechanisch
Konzeptmodeller - actua Rapid Prototyping - 3D-Printing - Multi Jet Modelling - FDM	Rapid Prototyping - Stereolithographie - Lasersintern - Cubital-Verfahren - 3D-Printing - ...	Rapid Prototyping Vervielfältigung HSC	Rapid Prototyping Abformung Vervielfältigung HSC

Bild 1: Teile im Bereich der Produktentwicklung und dazu mögliche Fertigungsverfahren

Ein wesentliches Merkmal der für den Einsatz in der Prototypenfertigung vorgesehenen Systeme ist das nutzbare Arbeitsvolumen bzw. der für die generative Fertigung nutzbare Arbeitsraum, dessen Kantenlängen im Bereich von 250 ... 600 mm liegen. Wichtig ist weiterhin, daß für alle diese Verfahren das Vorliegen eines rechnerinternen, meist dreidimensionalen, Datenmodells, auf dessen Basis die Fertigung gesteuert.

Kriterien für die Verfahrensauswahl

Verfahrensvergleich und Verfahrensauswahl

Um diese Entscheidungen objektiv treffen zu können sind natürlich Kenntnisse zu den mittels der einzelnen RP-Verfahren direkt oder indirekt (mittels Folgeprozessen) realisierbaren Eigenschaften erforderlich. Neben den objektiven Verfahrensmerkmalen spielen auch die subjektiven Erfahrungen aus bereits abgeschlossenen Projekten oder aus bereits bestehenden Kontakten eine wesentliche Rolle bei der Auswahl der betreffenden Verfahren.

Generell kann zwischen den zwei Teilschritten **Verfahrensvergleich** und **Verfahrensauswahl** unterschieden werden. Der **Verfahrensvergleich** beinhaltet eine Analyse der verschiedenen RP-Verfahren bezüglich ihrer technologischen Eigenschaften (z.B. Material, Genauigkeit, Kosten). Der zweite Schritt **Verfahrensauswahl** ist die sich daran anschließende Definition des für die Fertigung eines bestimmten Werkstückes zu nutzenden Verfahrens.

Werkstückbezogene Kriterien

Der Konstrukteur gibt im Rahmen des Entwicklungsarbeiten eine Reihe von Eigenschaften für ein betreffendes Werkstück vor. Dazu gehören u.a. die geforderten Materialeigenschaften (bzw. der zu verwendende Werkstoff), die geometrische Gestalt sowie die möglichen Fertigungstoleranzen. Weiterhin spielt speziell im Bereich der Produktentwicklung der Einsatzzweck des zu fertigenden Prototypen eine wesentliche Rolle. Eine mögliche Unterscheidung dazu ist der Einsatz als Design-, Funktions- oder Fertigungsmodell.

Aus den in der Produktentwicklung geforderten Untersuchungen ergeben sich neben der geforderten Anzahl an Prototypen auch die realen Grenzen für die Variation der Materialeigenschaften und somit die Werkstoffauswahl.

Verfahrensbezogene Kriterien

Mit diesen konstruktiv und organisatorisch (sowie zum Teil auch durch den Gesetzgeber – Zertifizierung!) gesetzten Restriktionen ist jetzt die Auswahl des relevanten RP-Verfahren bzw. einer entsprechenden Prozeßkette möglich. Zu den wichtigsten Eigenschaften, die für den **Verfahrensvergleich** und die sich anschließende **Verfahrensauswahl** gehören:

- Verarbeitbare Materialien;
- Erreichbare Genauigkeiten;
- Herstellungskosten;
- Zeitaufwand für die Vorbereitung und Durchführung der Fertigung;
- Nachbearbeitungsaufwand;

In den folgenden Abschnitten sollen Ansätze für eine Gegenüberstellung der gängigen Verfahren des Rapid Prototyping an Hand der genannten Faktoren aufgezeigt werden.

Rapid Prototyping

Vorbemerkungen

Die RP-Verfahren lassen sich heute entsprechend ihres Nutzungsbereiches in zwei große Gruppen zusammenfassen. Zum einen die „klassischen“ RP-Systeme, zu denen u.a. die Stereolithographie und das Lasersintern gehören. Diese Systeme sind in den Entwicklungsabteilungen großer Unternehmen sowie bei Dienstleistern zu finden. Ihre Anschaffung und Nutzung ist immer noch relativ kostenintensiv. Zu der zweiten Gruppe von RP-Anlagen gehören u.a. die System Fused Deposition Modelling, Multi Jet Modelling und 3D Printing. Ihr Einsatzschwerpunkt verlagert sich immer mehr in Richtung des Konstruktions- und Entwicklungsbüros. Der Einsatz eines Druckers für dreidimensionale Objekte direkt am CAD-Rechner wird immer mehr zu Alltag werden.

Eigenschaften von RP-Systemen

Rapid Prototyping umfaßt die Verfahren zur kurzfristigen (ca. 1 ... 5 Arbeitstage zwischen Dateneingang und Auslieferung der Teile) generativen Fertigung von Werkstücken (auch mit sehr komplizierter Geometrie) aus formlosen Material unter Nutzung von chemischen und/oder physikalischen Gesetzmäßigkeiten direkt auf der Basis von rechnerinternen Datensätzen ohne den Einsatz spezieller Werkzeuge (Bild 2). Man spricht auch vom „sequentiellen Urformen“.

Zu den derzeit im Einsatz befindlichen RP-Verfahren gehören:

- Die Stereolithographie (STL)
- Das Lasersintern (SLS)
- Das Solider- oder Cubitalverfahren
- Das Laminated Object Manufacturing (LOM)
- Das Fused Deposition Modelling (FDM)
- Multi Jet Modelling (MJM)
- 3D Printing

Diese Verfahren erschließen bis heute einen sehr großen Anwendungsbereich sowohl hinsichtlich der Werkstücke (und ihres Einsatzes) als auch der verfügbaren Werkstoffe. Erweitert wird dieser Bereich noch durch klassische und moderne Verfahren zur Vervielfältigung der mittels RP erzeugten Urmodelle. Erwähnt seien an dieser Stelle nur der Sandformguß, das Kopierfräsen aber auch das Vakuumgießen und das Investment Casting. Diese Verfahren ermöglichen eine noch größere Vielfalt von möglichen Einsatzfällen als dies nur mit den RP-Verfahren derzeit möglich ist.

	Datenformate	Energiequelle	Komplexität der Teile	Verzugsempfindlichkeit	Oberflächen-güte	Kunststoffe	Papier	Metalle	Sand	Keramik
Stereolithographie	STL (CLI, VDAFS)	UV-Laser	unbegrenzt	sehr groß	gut	X	-	-	-	-
Lasersintern	STL (CLI)	Laser	unbegrenzt	mittel	sehr rau	X	-	<i>i.E. / X</i>	X	-
Solider-Verfahren	STL	UV-Lampe	unbegrenzt	gering	gut	X	-	-	-	-
LOM	STL	Laser	begrenzt	gering	gut (holzähnlich)	X	X	<i>i.E. / X</i>	-	-
3D-Printing	STL	Heizelement	begrenzt	gering	gut	X	-	-	-	X
FDM	STL	Heizelement	begrenzt	mittel	rau	X	-	-	-	-

X Stand der Technik - nicht vorhanden *i.E.* in Entwicklung

Bild 2: Einige technologische Informationen zu ausgewählten RP-Verfahren

Die verschiedenen RP-Systeme stellen differenzierte Anforderungen an den Nutzer sowohl bezüglich der entstehenden Kosten aber auch des zur sicheren Beherrschung des System notwendigen Aufwandes. Dementsprechend lassen sich Einsatzfelder definieren, für die bestimmte Systeme besonders geeignet sind. Aus der Sicht des Anwenders ist u.a. von wesentlichem Interesse, wo entsprechende Maschinen sinnvoll installierbar sind.

Rapid Prototyping im Konstruktions- und Entwicklungsbüro

Der Einsatz von RP-Systemen als Drucker für dreidimensionale Objekte („3D-Drucker“) direkt im Büro erfordert spezielle Eigenschaften dieser Technologien. Dazu zählen u.a.:

- Geringe Investitionskosten
- Geringer Aufwand bei der Installation und Nutzung
- Standardisierte Schnittstellen zu Rechnern
- Einfaches Handling
- Geringe Nutzungskosten (Materialkosten und Maschinenstundensatz)

Mit der Erfüllung dieser Anforderungen sind bestimmte Einschränkungen vor allem bezüglich der verwendbaren Werkstoffe und der erreichbaren Werkstückqualität verbunden. In diesen Bereich fallen speziell die RP-Anlagen, die nach dem FDM-, MJM- oder 3D-Printing-Prinzip arbeiten.

Der Einsatz der mit diesen Systemen erzeugten Modelle ist sehr schnell möglich. Entsprechende Software gestattet den Betrieb dieser Systeme analog zu herkömmlichen Druckern. Weiterhin zeichnen sie sich durch eine sehr kompakte Bauform aus. Außerdem verursachen die Systeme nur eine sehr geringe Belastung der Umgebung durch Abgase, Wärme oder Lärm.

Durch den Wegfall teurer Lasersysteme zur Realisierung der generativen Fertigung und die (nahezu) ausschließliche Nutzung von Wärmeenergie begrenzt die verarbeitbaren Werkstoffe auf ein sehr enges Spektrum. Es handelt sich zumeist um spezielle Wachse oder Harze, die bei einer relativ niedrigen Temperatur in flüssigem Zustand ohne chemische Veränderungen verarbeitet werden können. Der im Vergleich zu Stereolithographie- und Lasersinteranlagen technisch einfache Aufwand verringert neben den Anschaffungs- auch die Unterhaltungskosten wesentlich. Derzeit sind Systeme dieser Art in Abhängigkeit von Technologie und Baugröße am Markt ab ca. 100.000 DM verfügbar.

Ihr Belastbarkeit ist für die in der Produktentwicklung üblichen Untersuchungen meist nicht ausreichend. Es kann dementsprechend nur die Konstruktion des rechnerinternen Datenmodells durch physische Objekte, also des Konzeptes einer Entwicklung an Hand dieser Prototypen erfolgen. Auf Grund dieser Systemeigenschaften sind auch die Bezeichnungen Office- bzw. Konzeptmodeller gebräuchlich.

Rapid Prototyping durch Dienstleister

RP-Systeme wie die Stereolithographie und das Lasersintern gestatten die Herstellung von Prototypen mit einer größeren Bandbreite an Eigenschaften. Dies gestattet den Einsatz dieser Verfahren zu einem bereits recht fortgeschrittenen Zeitpunkt innerhalb der Produktentwicklung im Unterschied zu den Officemodellern.

Die aktuelle Bandbreite der verwendeten Werkstoffe reicht derzeit von verschiedene Polymeren wie ABS über Metalle und Legierungen bis zu Croningsand zur Herstellung von Sandgußformen. Diese Palette läßt sich mit Hilfe entsprechender Nachfolgeprozesse noch erweitern. Neben der Nutzung der erzeugten als Prototypen ist auch der Einsatz als Werkzeuge, das sogenannte Rapid Tooling möglich.

Ein weiteres Merkmal ist die erreichbare höhere Qualität der mit dieser Gruppe von RP-Verfahren erzeugten Prototypen, besonders in Bezug auf die Fertigungstoleranzen die Form- und Maßhaltigkeit der Teile. Bei den sich anschließenden Tests ist damit eine bessere Zuverlässigkeit der ermittelten Ergebnisse (und damit eine bessere Vorhersage der für die Serienfertigung noch notwendigen Änderungen) möglich.

Problematisch für die Nutzung dieser Systeme sind immer noch die hohen Investitions- und Betriebskosten der Anlagen. Sie sind damit auf absehbare Zeit eine Domäne von Dienstleistern und entsprechender Bereiche in Großunternehmen.

Ausgewählte RP-Verfahren im Vergleich

Nach diesen Betrachtungen zum Einsatz von RP-Systemen innerhalb der verschiedenen Stadien einige Informationen zum Vergleich verschiedener RP-Verfahren. Hier soll nur auf die gängigen Technologien eingegangen werden. Die auch in Deutschland eine größere Verbreitung gefunden haben oder in nächster Zukunft finden werden. Die Angaben beziehen sich auf eigene Erfahrungen sowie auf Informationen der Hersteller.

Stereolithographie

Am längsten im Markt etabliert und auch den meisten Anwender bekannt ist die Stereolithographie. Bei diesem Verfahren werden Teile mit Hilfe einer durch UV-Licht initiierten schichtweisen Polymerisation gefertigt. Die erforderliche Energie wird durch einen speziellen Laser bereitgestellt, der die für entsprechende Systeme erforderliche Investitions- und Betriebskosten erheblich beeinflusst.

Der Einsatz der sogenannten Photopolymere bedingt einen hohen Entwicklungsaufwand auf dem Materialsektor. Diese Kosten schlagen zusätzlich zu den erforderlichen großen Investitionssummen erheblich bei den Teilekosten zu Buche.

Die Spezifik des Verfahrens „Stereolithographie“ bedingt einige wesentliche Eigenschaften, die sich (entsprechend der jeweiligen Anwendungen) als vor- oder nachteilig erweisen können. Hierzu zählen u.a.:

- geringe Abfallmenge;
- nicht verbrauchtes Material kann weiter verwendet werden;
- flüssiger Zustand des zur Herstellung der Teile genutzten Monomers;
- Stereolithographieteile sind leicht spanend bearbeitbar;

An Nachteilen sind u.a. zu nennen:

- Fixierung der Teile auf der Bauplattform (Stützkonstruktion häufig erforderlich);
- bei der Reaktion des Monomers zu einem Polymer können Volumenveränderungen auftreten, die zu Deformationen führen
- bei der Nutzung von Folgeprozessen können chemische Reaktionen auftreten (z.B. Zerstörung von Vakuumgießformen aus Silikon durch Lösungsmittelbestandteile)
- nicht vollständige Durchhärtung des Materials auf der Modellbauanlage (Nachbehandlung erforderlich)
- begrenzter Umfang der zur Verfügung stehenden Materialien
- Umgang mit den Ausgangsstoffen erfordert bestimmte Schutzvorkehrungen
- hohe Materialkosten
- hohe Anschaffungs- und Unterhaltungskosten der Anlage

Die Software der Stereolithographiesysteme gestattet es, gleichzeitig beliebig viele verschiedene Teile herzustellen. Eine Begrenzung bildet lediglich der zur jeweils Verfügung stehende Bauraum (Bild 3). Dies führt zu einer Verringerung der Kosten für jedes einzelne Teile gegenüber der getrennten Fertigung der Teile, die Bauzeit für die gemeinsam gefertigten Teile geringer ist als die Summe der Einzelbauzeiten bei konstantem Kostensatz für die Stereolithographieanlage.

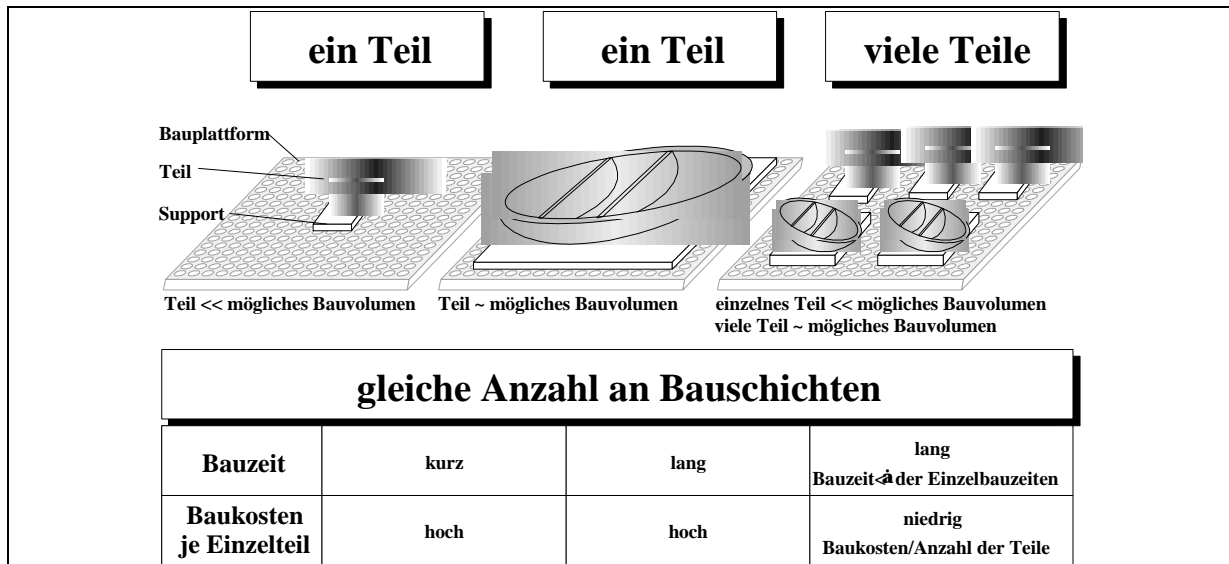


Bild 3: Zusammenhang zwischen gefertigten Teilen und Kosten pro Teil

Aus der Summe der Vor- und Nachteile der Stereolithographie ergeben sich als Haupteinsatzfelder die seriennahen Prototypen mit hohen Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit und Oberflächengüte, einer komplizierten geometrischen Struktur mit der Option zur Nachbearbeitung und zur Vervielfältigung. Als Werkstoffe stehen nur Kunststoffe zur Verfügung.

Lasersintern

Ein weiteres RP-Verfahren, welches die Energie eines Laser zur Herstellung von Teilen aus einem formlosen Material nutzt, ist das Lasersintern, welches auch als SLS-Verfahren (Selective Laser Sintering) bekannt ist. Im Unterschied zur Stereolithographie verwenden die Lasersintersysteme ein Pulver als Ausgangsmaterial. Dieses Pulver kann sowohl aus einem schmelzfähigen Kunststoff als auch aus einem Metall bzw. einer Metallegierung oder aus Croningsand bestehen.

Ein wesentlicher Vorteil des Lasersinterns besteht in dem weitgehenden Verzicht auf den Bau einer Stützgeometrie. Dies wird möglich, da das nicht zur Herstellung der Teile benötigte Material zum Abstützen der Teile genutzt werden kann. Im Gegensatz zur Stereolithographie besitzt das verwendete Sinterpulver eine dazu ausreichende Stabilität. Während der Fertigung entstehen nur geringere materialinterne Spannung (kein Übergang von flüssigen Ausgangsstoff zu festem Material), was zu einer nur sehr geringen Gefahr von Verzügen führt. Ein weiterer Vorteil ist der Einsatz von kostengünstigen Materialien, welche speziell bei den Kunststoffpulvern mit sehr vielfältigen Eigenschaften zur Verfügung stehen. Diese müssen entweder als ganzes (bei Kunststoffen) schmelzfähig sein oder aber eine niedrig schmelzende Komponente (Metallegierungen, Croningsand) besitzen, die durch Erwärmung zur Vernetzung der Komponenten führt.

Bei den Lasersinteranlagen wird die Energie des Lasers nur zum Erwärmen des Materials genutzt. Dies gestattet den Einsatz kostengünstigerer Laser als bei der Stereolithographie, da die verwendete Wellenlänge des Laserstrahls nur eine untergeordnete Rolle spielt. Durch das Aufschmelzen des Rohmaterials ist bei der Fertigung eine höhere Temperatur im Arbeitsraum erforderlich. Bei der Verarbeitung von Metallpulvern ist darüber hinaus der Einsatz einer Schutzgasatmosphäre sinnvoll. Als dies führt zu einem hohen Investitionsbedarf beim Einsatz einer solchen Anlage.

Die mittels Lasersintern erzeugten Werkstücke besitzen eine sehr raue Oberfläche. Für eine Reihe von Einsatzfeldern ist deshalb eine Nachbearbeitung erforderlich. Eine Abhilfe ist

ebenfalls mit einer Verringerung der verwendeten Korngröße des Pulvers möglich, was aber gleichzeitig zu einer Erhöhung der Fertigungskosten in Folge einer Erhöhung der Fertigungszeit führt. Weiterhin kann die Entfernung von nicht benötigten Hinterschneidungen und Hohlräumen problematisch sein.

In der Summe all dieser Eigenschaften ergeben sich als Einsatzfelder besonders bei Kunststoffteilen die Nutzung als Funktions- und Fertigungsmodelle. Sinterteile aus Metallen oder Metalllegierungen sind besonders im Bereich des Rapid Toolings zur kurzfristigen Bereitstellung von Werkzeugeinsätzen zum Beispiel für das Spritzgießen von Interesse. Sie gestatten die kostengünstige Herstellung von Vor- und Kleinserien im Originalverfahren und aus dem Originalwerkstoff.

Das Lasersintern zählt in den nächsten Jahren sicherlich zu den RP-Verfahren, die über das größte Innovationspotential verfügen. Durch die Vielzahl der laufenden Entwicklungen ist gerade hier eine beträchtliche Erhöhung der Anwendungsbreite zu erwarten.

Solider- oder Cubitalverfahren

Das Soliderverfahren (auch nach der Anlagenherstellerfirma Cubitalverfahren genannt) ist der Stereolithographie sehr ähnlich. Es wird ein Photopolymer verwendet, welches ebenfalls unter dem Einfluß von UV-Licht polymerisiert. Im Unterschied zu dieser wird jedoch eine UV-Lampe, welche durch eine Maske hindurch diese chemische Reaktion initiiert, verwendet. Auf dieser Maske werden die in der Bauschicht zu fertigenden Bereiche als Negativ aufgebracht. Unabhängig vom Flächeninhalt der zu belichtenden Struktur ist die Bauzeit je Schicht konstant. Außerdem entstehen durch die gleichzeitige Herstellung aller Strukturen einer Schicht nur sehr geringe Spannungen im Bauteil. Dies hat seine Auswirkungen direkt in der Werkstückqualität.

Während des Fertigungsprozesse wird das nicht verbrauchte Photopolymer abgesaugt und durch ein spezielles Wachs ersetzt. Dieses wasserlösliche Material dient zur Fixierung der gefertigten Strukturen während des Bauprozesses (keine Stützgeometrie erforderlich) und muß nach dessen Beendigung wieder entfernt werden. Dies erfolgt durch Auswaschen. Hierbei besteht die Gefahr des Quellens der Teile durch Flüssigkeitsaufnahme.

Nachteile dieser RP-Systeme bestehen im hohen Umfang des entstehenden Sondermülls (Harz-, Wachsabfälle, Waschrückstände) sowie des besonders bei der Herstellung von kleinen Einzelteilen hohen Materialbedarf. Der Umfang der zur Verfügung stehenden Materialien ist geringer als bei der Stereolithographie.

Das Haupteinsatzgebiet des Soliderverfahrens ist die Herstellung von massiven und großflächigen Kunststoffteilen, die in ihrer Fertigungsqualität ähnlich der Stereolithographie einzuschätzen sind. Die Oberflächengüte sowie die Nachbearbeitbarkeit ist etwas schlechter als bei der Stereolithographie. Ungünstig ist weiterhin die sehr geringe Anzahl der in Deutschland für kommerzielle Zwecke installierten Systeme dieser Art.

Laminated Object Manufacturing (LOM) und Papier Laminier Technik (PLT)

Ein weiteres RP-Verfahren ist das Laminated Object Manufacturing (LOM). Hierbei wird aus einer Endlosbahn von kleberbeschichteten Material mit Hilfe eines Lasers die Kontur des Teiles ausgeschnitten und miteinander verklebt. Derzeit wird vor allem Papier dazu verwendet. Erste Anwendungen existieren auch für Kunststofffolien, Metall- und Keramikmaterialien bilden einen aktuellen Forschungsgegenstand.

Die Vorteile des Verfahrens liegen besonders in der sehr kostengünstigen Herstellung von Modellen begründet. Diese günstige Kostensituation resultiert u.a. aus den sehr geringen Materialkosten, den günstigen Investitionskosten für die Anlagentechnik in Verbindung mit niedrigen Wartungskosten.

Das Verfahren eignet sich besonders für die Herstellung von Teilen mit großflächigen Konturen mit nur geringen Hinterschneidungen. Hierzu zählen u.a. Modelle für Gußteile (z.B. für Sandformguß). Bei komplizierten technischen Teilen ergeben sich hohe Aufwände für die Entformung der Teile und das anschließende Finishen. Es besteht dabei auch die Gefahr der Zerstörung von filigranen Formelementen (kritisch bei Wandstärken ab ca. 2,0 mm. Ein Problem kann das Quellen speziell der Papierteile durch Aufnahme von Feuchtigkeit aus der Umgebung darstellen, welches durch einen sicheren Verschuß der Oberfläche zum Beispiel mittels eines Lacküberzuges vermieden werden kann.

Das PLT-Verfahren nutzt ebenfalls Papier als Grundlage für die Herstellung von Modellen und Prototypen. Entsprechend der in der aktuellen Schicht zu fertigenden Kontur wird auf dieses Blatt Papier Kleber aufgebracht, so daß sich die Schichten verbinden. Anschließend wird mit einem Maschinenmesser die Kontur ausgeschnitten. Nach der Fertigstellung der Teile sind diese einfach aus dem Block zu entnehmen. Die Nachbehandlung der Teile sowie deren Einsatzmöglichkeiten entsprechen weitgehend dem LOM-Verfahren.

Fused Deposited Modelling (FDM)

Ein weiteres Verfahren, das auf den Einsatz von Lasern verzichtet ist das Fused Deposited Modelling, auch als FDM-Verfahren bezeichnet. Hierbei werden schmelzfähige Kunststoffe in einer Heizdüse verflüssigt und entsprechend der geforderten Kontur aufgebracht. Auf Grund der Konstruktion des Kopfes mit den Heizdüsen können gleichzeitig zwei Materialien eingesetzt werden. Eines davon wird zumeist als leichtentfernbares Stützmaterial zur Fixierung der Werkstücke während der Fertigung genutzt.

Die FDM-Systeme können mit einem ähnlich großem Spektrum an kostengünstigen Materialien wie das Lasersintern von Kunststoffteilen genutzt werden. Im Unterschied dazu wird das Rohmaterial jedoch als Faden zugeführt. Die erreichbaren Genauigkeiten der Teile liegen in einem Bereich von etwa $\pm 0,1$ mm. Die Oberflächen der gefertigten Teile sind ähnlich aufwendig nachzubearbeiten wie beim Lasersintern.

Der kompakte Aufbau und das Handling der FDM-Systeme gestatten eine Nutzung der Anlagen auch im Bereich der Konstruktion. Die günstigen Anschaffungs- und Betriebskosten der Anlagen unterstützen diesen Einsatz im Bereich der Erstmusterfertigung erheblich. Ein weiteres interessantes Einsatzfeld ist die Herstellung von Wachslingen für die Gießverfahren mit verlorenem Urmodell.

3D-Drucker

Ein in der letzten Zeit stark angewachsenes Segment des Rapid Prototyping sind die Drucker für dreidimensionale Objekte, die 3D-Printer. Wie der Name bereits sagt, ist der Einsatz als peripheres Gerät in einem Rechnersystem geplant, wo mit Hilfe von verschiedenen gestalteten Druckverfahren räumliche Objekte entstehen. Neben einem sehr kostengünstigen Einsatz zeichnen sich die Systeme durch eine einfache Handhabung aus. Sie ist von der Installation und dem Starten eines Druckauftrages mit dem bekannten Drucken unter Windows vergleichbar.

Bei diesen Verfahren (bekannt auch als 3D-Printing und als Multi Jet Modelling – MJM) kommt ebenfalls ein schmelzfähiger Kunststoff zum Einsatz. Entsprechend den aus dem 3D-Datenmodell abgeleiteten Steuerinformationen wird dieser durch eine oder mehrere Düsen mit Hilfe eines plotterähnliches System schichtweise aufgetragen. Damit erfolgt die Generierung eines physischen Modells.

Einschränkungen für den Einsatz dieser RP-Systeme ergeben sich bisher besonders aus der relativ geringen Belastbarkeit der erstellten Muster sowie aus der zum Teil noch nicht in den Bereich anderer RP-Systeme heranreichende Fertigungsqualität. Weiterhin sind Teile mit

Hinterschneidungen nur sehr begrenzt zu fertigen. Durch weitere Entwicklungen bei der Verbesserung der Systeme werden diese Probleme sicherlich in nächster Zeit überwunden sein und ihren verstärkten Einzug in die Konstruktionsbüros beginnen.

Ausblick

Der Rapid Prototyping Sektor besitzt derzeit eine hohe Innovationsgeschwindigkeit. Die Entwicklung der RP-Systeme konzentriert sich zur Zeit auf die Verbesserung der Qualität der erzeugten Werkstücke besonders durch eine technologische Optimierung und weitere Materialentwicklungen. So wird der Einsatz von Metallen und Legierungen direkt zur Herstellung von Prototypen eine größere Bedeutung als bisher erlangen. Weiterhin besteht eine Tendenz in der verstärkten Anpassung der Systeme an spezielle Kundenanforderungen.

Ausgangsbasis	Idee	physisches Modell	Skizze Zeichnung	File	Bild
Datenaufbereitung	CAD-Konstruktion	Digitalisieren	Scannen	Bilddatenaufbereitung	
Erzeugung der 3D-CAD-Modells					
Datenbereitstellung	STL-Schnittstelle	CLI-Schnittstelle			
Spezifische Rapid Prototyping Daten					
Prototypenherstellung	klassischer Modellbau	Stereolithographie	Lasersintern	LOM	HSC
Vervielfältigung	Kopierfräsen	Vakuumgießen	Sandformgießen	Investment-Casting	Spritzgießen
Ergebnis	Designmodell	Funktionsmodell	Fertigungsmodell	Einzelteil	Serienteil

Bild 4: Möglichkeiten zur Verfahrensauswahl bei der Festlegung der für den konkreten Anwendungsfall zu nutzenden Prozeßkette

In Verbindung mit weiteren modernen Verfahren (Bild 4) wie 3D-Modellierung, Digitalisieren und entsprechenden Abformverfahren (Vakuumgießen, Investment Casting) besteht für Anwender die Möglichkeit, erhebliche Einsparungspotentiale in der Produktentwicklung, aber auch in der Einzelstück- und Kleinserienfertigung zu realisieren. Aus dem bekannten Rapid Prototyping entwickelt sich immer mehr ein Rapid Prototyping und Manufacturing. Diese Tendenz bildet sicherlich die Basis für weitere interessante und innovative Produkte.

Literaturhinweise

Hoffmann, J.: Lehrbrief für den Ausbildungskurs "Automatisierte Modellfertigung", Dresden: Technische Universität Dresden, 1995-97

Hoffmann, J.: Rapid Product Development senkt Kosten in der Vorserienfertigung. Maschinenmarkt 104 (1998) 19, S. 32-35