



Volker Gießbach

Rapid Manufacturing

#Formgebungsverfahren

Handbuch

Verfahren zur Herstellung
von Produkten aus Polymerwerkstoffen

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Vorwort | V |
| Terminologie und Definitionen | IX |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Systematik der Rapid-Manufacturing-Verfahren | 3 |
| 2.1 Gruppierung der Fertigungsverfahren für Polymerprodukte | 3 |
| 2.2 Anwendungsbereiche | 5 |
| 2.3 Prozessketten | 6 |
| 2.4 Post-Prozesse zur Verbesserung der Produkteigenschaften | 8 |
| 3 Schnelle Formgebungsverfahren | 9 |
| 3.1 Additive Teilefertigung | 9 |
| 3.1.1 Verfahrensgruppen | 9 |
| 3.1.1.1 UV-optische Stoffartänderung im Harzbad | 9 |
| 3.1.1.2 IR-optische Stoffzustandsänderung im Pulverbett | 10 |
| 3.1.1.3 Lokaler flüssiger Stoffauftrag mit Stoffverfestigung – 3D-Druck (3DP) | 10 |
| 3.1.1.4 Lokaler plastischer Stoffauftrag mit Stoffverfestigung – Extrusionsformen (EM) | 12 |
| 3.1.1.5 Kompakter Stoffauftrag mit lokaler Trennung des Reststoffes vom Bauteil | 13 |
| 3.1.2 Spezifische Merkmale und Potenziale der additiven Formgebungsverfahren | 14 |
| 3.1.3 Prinzipien der Schichterzeugung und Konturbildung | 15 |
| 3.1.4 Beschreibung der additiven Verfahrensprinzipien | 20 |
| 3.1.4.1 Stereolithographie (SL) | 20 |
| 3.1.4.2 Lasersintern (LS) | 23 |
| 3.1.4.3 3D-Druck (3DP) | 27 |
| 3.1.4.4 Extrusionsformen (EM) | 30 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.2 | Subtraktive Teilefertigung | 36 |
| 3.2.1 | 3D-CNC-Fräsen (3D-CNC) | 36 |
| 3.2.2 | 2D-CNC-Strahlschneiden (2D-CNC) | 38 |
| 3.3 | Formative Teilefertigung | 39 |
| 3.3.1 | Spritzgießen (SG) | 39 |
| 3.3.2 | Vakuumgießen (VG) | 41 |
| 3.3.3 | Thermoformen (TF) | 44 |
| 4 | Geometrische Produktspezifikation | 47 |
| 4.1 | Allgemeines | 47 |
| 4.1.1 | Grundsätze zur wirtschaftlichen Fertigung und Tolerierung | 48 |
| 4.1.2 | Wichtige Normen zur Tolerierung von Längenmaßen | 48 |
| 4.1.3 | Maßgebende Einflussfaktoren auf die Fertigungsgenauigkeit | 56 |
| 4.2 | Produkt-, Funktions- und Fertigungsgenauigkeit | 63 |
| 4.3 | Gruppierung der Maßtoleranzen in Toleranzklassen | 65 |
| 4.4 | Fertigungstoleranzen für Rapid-Manufacturing-Verfahren | 68 |
| 4.4.1 | Erstellung der Toleranzwertetabellen | 68 |
| 4.4.2 | Toleranzwertetabellen für die Teilefertigung aus Polymerwerkstoffen | 75 |
| 4.5 | Verifikation der Maß- und Formabweichung additiver Fertigungsverfahren | 90 |
| 5 | Polymerwerkstoffe für Rapid Manufacturing | 98 |
| 5.1 | Kennzeichnung und Kurzzeichen der Polymerwerkstoffe | 100 |
| 5.2 | Werkstoffe für die additive Fertigung | 108 |
| 5.2.1 | Stereolithographiewerkstoffe | 109 |
| 5.2.2 | Lasersinterwerkstoffe | 110 |
| 5.2.3 | 3D-Druck-Werkstoffe | 111 |
| 5.2.4 | Extrusionsformwerkstoffe | 112 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.3 | Werkstoffe für die subtraktive Fertigung | 113 |
| 5.4 | Werkstoffe für die formative Fertigung | 114 |
| 5.4.1 | Spritzgießwerkstoffe | 114 |
| 5.4.2 | Vakuumgießwerkstoffe | 116 |
| 5.4.3 | Thermoformwerkstoffe | 117 |
| 6 | Leistungsvergleich und Leistungsabnahme | 118 |
| 6.1 | Leistungskriterien für Rapid Manufacturing | 118 |
| 6.2 | Leistungsvergleich der Rapid-Manufacturing-Verfahren | 120 |
| 6.3 | Leistungsabnahme von Rapid-Manufacturing-Produkten | 123 |
| 6.3.1 | Rapid-Prototyping-Produkte | 123 |
| 6.3.2 | Marktfähige Produkte | 125 |
| 7 | Zusammenfassung | 127 |
| | Autor | 128 |
| | Quellenverzeichnis | 129 |
| | Literaturnachweis | 129 |
| | Normen und Richtlinien | 130 |
| | Patente und Gebrauchsmuster | 131 |
| | Firmeninformationen | 132 |

Terminologie und Definitionen (nach Sachgebieten geordnet)

| Begriff | Erklärung |
|----------------------------------|--|
| Rapid Technologien | Zusammenfassende Bezeichnung aller Technologien zur sehr schnellen computergestützten Entwicklung und Fertigung von Produkten. Die Unterteilung der Rapid Technologien erfolgt nach vielfältigen technischen und organisatorischen Möglichkeiten, um ein bestimmtes Ziel sehr schnell zu erreichen. |
| Rapid Manufacturing | Fertigungsverfahren zur sehr schnellen, bedarfsgerechten und wirtschaftlichen Herstellung von Produkten. Mit der durchgängigen Nutzung von 3D-CAD-Geometriemodellen, Werkstoff-, Fertigungs- und Qualitätssicherungsdaten wird die technologische, organisatorische, personelle und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit des Fertigungsprozesses verbessert (Basis für Industrie 4.0). |
| Rapid Prototyping | Fertigungsverfahren zur sehr schnellen Herstellung von Modellen, Mustern, Prototypen und Vorserienteile zum Vorstellen, Prüfen und Erproben von neuen Produkten. |
| Rapid Tooling | Zusammenfassende Bezeichnung aller Verfahren zur sehr schnellen Herstellung von Vorrichtungen, Werkzeugen und Formen. Rapid Tooling ist die vorgelagerte Prozessstufe für die subtraktive bzw. formative Fertigung von Rapid-Prototyping- und Rapid-Manufacturing-Produkten. |
| Rapid Product Development | Begriff für die sehr schnelle Produktentwicklung durch Nutzung rechnergestützter Entwurfs-, Konstruktions-, Fertigungs-, Simulations-, Dokumentations- und Prüfprogramme. |
| Rapid Management | Begriff für spezifische Organisationsformen zur sehr schnellen Herstellung von Modellen, Mustern, Prototypen, Vorserien und marktfähigen Produkten in Einzelstücken oder Kleinserien. |
| Rapid Testing | Zusammenfassende Bezeichnung für Mess- und Prüftechniken zum sehr schnellen Nachweis der Qualität der verwendeten Werkstoffe, des Fertigungsprozessablaufes und der Produkteigenschaften. |

| Begriff | Erklärung |
|--|--|
| Geometrische Produktspezifikation (GPS) | Geometrische Produktspezifikation ist ein Normensystem, das die Geometrie (Form), die Maße und die Oberflächenmerkmale eines Produktes in technischen Dokumentationen festlegt, um die Produktfunktionalität zu sichern. Es definiert die zulässigen Abweichungen, bei denen die Funktion des Produktes immer noch gewährleistet ist. |
| Maßgenauigkeit | Grad der Übereinstimmung von Nennmaß und Istmaß. |
| Abbildegenuigkeit | Grad der Übereinstimmung zwischen den vom Konstrukteur vorgegebenen und den am Produkt vorhandenen Strukturen. |
| Produktgenauigkeit | <p>Ausdruck für die Umsetzung der Konstruktions- und Gestaltungsvorgaben, z. B. Maß- und Abbildegenuigkeit.</p> <div data-bbox="512 598 998 1101" data-label="Figure"> <p>Das Diagramm zeigt ein 2x2-Matrix-Layout zur Bewertung der Produktgenauigkeit. Die vertikale Achse (y-Achse) ist mit 'Abbildegenuigkeit' beschriftet und hat die Werte 'hoch' (oben) und 'gering' (unten). Die horizontale Achse (x-Achse) ist mit 'Maßgenauigkeit' beschriftet und hat die Werte 'schlecht' (links) und 'gut' (rechts). - Oben links (hoch Abbildegenuigkeit, schlecht Maßgenauigkeit): Ein gelber Ring mit unregelmäßiger Form, beschriftet mit 'Aufmaßfertigung'. - Oben rechts (hoch Abbildegenuigkeit, gut Maßgenauigkeit): Ein grüner Ring mit perfekter kreisförmiger Form. - Unten links (gering Abbildegenuigkeit, schlecht Maßgenauigkeit): Ein roter Ring mit unregelmäßiger Form, beschriftet mit 'Untermäßfertigung'. - Unten rechts (gering Abbildegenuigkeit, gut Maßgenauigkeit): Ein gelber Ring mit perfekter kreisförmiger Form.</p> </div> <p><i>Bild 1: Beispiel für die Maß- und Abbildegenuigkeit</i></p> |

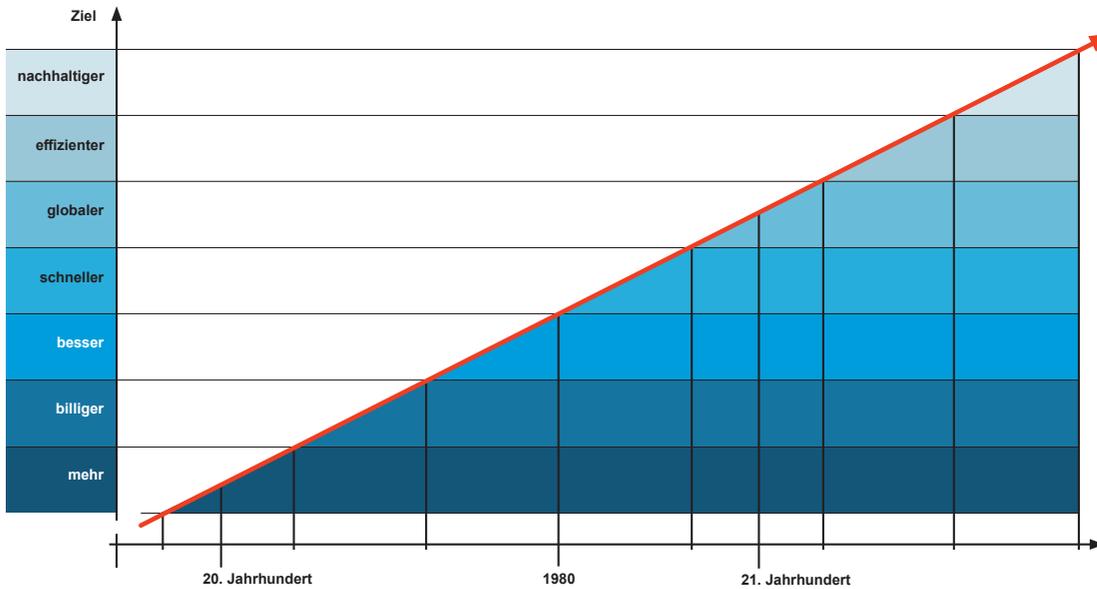
| Begriff | Erklärung |
|------------------------------|--|
| Funktionsgenauigkeit | Ausdruck für die Pass- und Funktionsfähigkeit des Produktes. |
| Fertigungsgenauigkeit | Ausdruck für die Qualität des Fertigungsprozesses. |
| Datengenauigkeit | Ausdruck für die Genauigkeit der mathematischen Beschreibung eines 3D-CAD-Datenmodells. |
| Genauigkeitsniveau | Ausdruck für Qualitätsstufen der Produktgenauigkeiten. |
| Nennmaß | Maß für die Größenangabe eines Geometrieelementes am Produkt. |
| Istmaß | Durch Messung am Produkt ermitteltes Maß. |
| Prüfmaße | Für die Funktion des Produktes wichtiges Maß. Prüfmaße werden durch den Konstrukteur festgelegt. |
| Kontrollmaße | Für die Fertigung des Produktes wichtiges Maß. Kontrollmaße werden zur Qualitätssicherung des Herstellungsprozesses durch den Teilefertiger festgelegt. |
| Toleriertes Maß | Tolerierte Maße sind anzuwenden, wenn für Funktion, Montage, Austauschbau oder aus weiteren Gründen Grenzmaße nicht überschritten werden dürfen. |
| Toleranzmittenmaß | Nennmaß für 3D-Daten-Datensätze. Die Toleranzgrenzen liegen symmetrisch zur Nennmaßgeometrie. Dadurch verbessert sich die durchgängige Nutzung der 3D-Daten von der Entwicklung über die Fertigung bis zur Prüfung der Teile. |
| Toleranz | Zulässige Abweichung vom Nennmaß. |

| Begriff | Erklärung |
|--|---|
| Allgemeintoleranz | Nichttolerierete Nennmaße können durch Allgemeintoleranzen indirekt toleriert sein. Allgemeintoleranzen werden als symmetrische Grenzabmaße für einen Nennmaßbereich angegeben. Ist bei Toleranzüberschreitung die Montage und Funktion des Produktes trotzdem gewährleistet, darf die Abnahme nicht verweigert werden. |
| Funktionstoleranz | Toleranz für eine Geometrie, die die geforderte Funktion am Produkt sichert. |
| Fertigungstoleranz | Fertigungstoleranzen sind ermittelte Maßabweichungen an Produkten, die unter konkreten Fertigungsbedingungen hergestellt wurden. Sie sollten die Funktionstoleranzen nicht überschreiten. |
| Passtoleranz | Passtoleranzen sind tolerierte Maße zweier Bauteile, die zu einer Passung gehören. |
| Passung | Passung ist ein Fügezustand zwischen zwei Bauteilen, z.B. einer Bohrung und einer Welle. |
| Spielpassung | Die Spielpassung gewährleistet beim Fügen der Bauteile immer ein Spiel. Die Bauteile lassen sich ohne Kraftaufwand fügen und trennen. |
| Übermaßpassung | Bei der Übermaßpassung (Presspassung) entsteht durch die Lage der Toleranzzonen der Bauteile immer ein Übermaß. Die Bauteile lassen sich nur mit großem Kraftaufwand oder bei großen Temperaturunterschieden zu einem dauerhaften Verbund fügen. |
| Übergangspassung | Die Übergangspassung kann theoretisch durch die Lage der Toleranzzonen der Bauteile sowohl ein Spiel als auch ein Übermaß aufweisen. Praktisch entsteht eine Übergangspassung nur anhand der Istmaße zueinander. Das kleine Spiel oder das geringe Übermaß lassen die Bauteile mit geringem Kraftaufwand fügen und trennen. |
| Toleranzklassen (Toleranzgruppen) | Gruppen von Toleranzen, die für alle Nennmaße durch ein gleiches Genauigkeitsniveau gekennzeichnet sind. Sie sind der Ausdruck für den zu mobilisierenden Aufwand zur Herstellung und Sicherung der Funktion von Produkten und haben einen wesentlichen Einfluss auf die Fertigungskosten. |

1 Einleitung

Die industrielle Fertigung prägt unsere Zeit und ist Träger des wirtschaftlichen Fortschrittes und der ökologischen Belastung unserer Welt. Der zunehmende arbeitsteilige, mechanisierte, automatisierte und digital vernetzte Fertigungsprozess macht es möglich, Produkte in hohen Stückzahlen, zu niedrigen Kosten, in bester Qualität herzustellen. Durch den Einsatz der Rechentechnik in Produktentwicklung und Fertigung hat sich das Spektrum der industriellen Fertigung ab den 1980er Jahren erheblich verändert. Die traditionellen Zielsetzungen „mehr“, „billiger“ und „besser“ wurden

mit „schneller“, „globaler“ und „effizienter“ sowie „nachhaltiger“ erweitert. Jede neu hinzukommende Zielsetzung hat einen Zeitabschnitt geprägt und die Gesamtzielsetzung der industriellen Fertigung erweitert, ohne dass ein vorangegangenes Ziel aufgegeben werden musste. Die ökologische Entlastung unserer Welt ist ohne Aufgabe der Maximierung der genannten Zielsetzungen nicht zu erreichen. Eine nachhaltige industrielle Fertigung ist nur zu realisieren, wenn alle ressourcenschonenden, umweltbezogenen und sozialen Aspekte in jeder Einzelzielsetzung berücksichtigt werden.



*Bild 1:
Entwicklung der Zielsetzungen für die industrielle Fertigung*

Die Zielsetzung „schneller“ konnte zuerst in der Produktentwicklung mit der Prozesskette CAD/CAM durch das 3D-Konstruieren und das 3D-CNC-Fräsen von Modellen, Mustern und Prototypen erschlossen werden. So entstand bereits Anfang der 1980er Jahre der Begriff **Rapid Prototyping**. Mit der industriellen Nutzung der additiven Fertigungsverfahren ab den 1990er Jahren und des schnellen Formenbaus (**Rapid Tooling**) für das Spritzgießen und Vakuumgießen von Polymerformteilen wurde der zusammenfassende Begriff **Rapid Technologien** verwendet.

Es war anfangs nicht einfach, die Rapid Technologien mit den bisherigen Erfahrungen in der traditionellen Produktfertigung im Einklang zu bringen. Vorbehalte, fehlende Sachkenntnis und übertriebene Wunsch-Ziel-Vorstellungen führten dazu, dass beim Vergleich der Rapid Technologien mit den herkömmlichen Verfahren nur deren wirtschaftlicher Ersatz und nicht die sich eröffnenden Chancen für eine ressourcenschonende Fertigung von völlig neuartigen Produktgeometrien und Fertigungsabläufen gesehen wurden.

Mit der Zeit erweiterten sich die Anwendungsbereiche der Rapid Technologien durch die Verbesserung der Produkteigenschaften und die Reproduzierbarkeit des Fertigungsprozesses. Es war nun möglich, belastbare, maßgenaue und sehr komplex gestaltete Produkte kurzfristig herzustellen. Das führte zur Reduzierung von Fertigungsstufen sowie der Entlastung des zeitaufwendigen und kapitalintensiven Werkzeug- und Formenbaus. Damit erschloss sich ein weiterer Anwendungsbereich der Rapid Technologien unter dem Begriff **Rapid Manufacturing**, der sehr schnellen und bedarfsgerechten Herstellung von neuen Produkten. Ohne größeren Aufwand kann kurzfristig das Produktdesign nach Kunden-

wunsch modifiziert werden und die Fertigung der Produkte erfolgen. Aufgrund der geringen Aufwendungen in der Fertigungsvorbereitung und der schnellen Durchlaufzeit wird auf die Vorgabe einer Mindestlosgröße verzichtet und damit eine kostenaufwendige Überproduktion und Lagerhaltung vermieden. Zu den Rapid-Manufacturing-Verfahren gehören nicht nur, wie oft angenommen, die additiven Fertigungsverfahren, sondern auch die subtraktiven und formativen Formgebungsverfahren.

Dieses Handbuch soll dem Konstrukteur und Rapid-Manufacturing-Anwender Informationen geben, welche Wege zur schnellen Fertigung von Produkten aus Polymerwerkstoffen eingeschlagen werden können. Es zeigt die Potenziale und Grenzen der gebräuchlichsten Verfahren und Werkstoffe, die die Anforderungen an Schnelligkeit, Qualität und Wirtschaftlichkeit erfüllen. Es liefert in konzentrierter Form Sachkenntnisse bei der Bewältigung der täglichen Aufgaben zur schnellen Produktentwicklung und Produkterprobung. Darüber hinaus soll es anregen, weitere Anwendungsfelder für die ressourcenschonende Herstellung von Produkten mit hoher Komplexität und funktionsintegrierten Teilegeometrien sowie die werkzeuglose Fertigung von individualisierten Bauteilen in bedarfsgerechten Stückzahlen zu erschließen.

Um diese umfangreiche Thematik verständlich, übersichtlich und transparent zu gestalten sowie dem Leser die praktische Anwendung zu erleichtern, wird mit zahlreichen Definitionen, Bildern und Tabellen gearbeitet. Auf Ausführungen zum theoretischen Hintergrund wird weitestgehend verzichtet. Dieses Buch ist kein Lehrbuch im üblichen Sinne, sondern ein Arbeitsmittel und Nachschlagewerk für den beruflichen Alltag.

2 Systematik der Rapid-Manufacturing-Verfahren

2.1 Gruppierung der Fertigungsverfahren für Polymerprodukte

Unter dem Begriff Rapid Manufacturing werden alle Fertigungsverfahren zur sehr schnellen Herstellung von Produkten zusammengefasst. In ihrer Gesamtheit, der durchgängigen rechnergestützten Fertigung auf der Basis von 3D-CAD-Datenmodellen, werden die Verfahren nach der

Art der Formgebung in drei Hauptgruppen unterteilt. Eine weitere Unterteilung der Hauptgruppen basiert auf der Stoffeigenschaftsänderung mit der Formgebung in Verfahrensgruppen.

Hauptgruppe 1: Additive Manufacturing – Stoffauftragende Fertigung

Die Produkte der additiven Fertigungsverfahren werden als **Bauteile** bezeichnet und überwiegend aus verfahrensmodifizierten Polymerwerkstoffen erzeugt.

| Gruppe | Stoffeigenschaftsänderung | Typenvertreter |
|--------|---|------------------------------|
| 1.1 | UV-optische Stoffartänderung im Harzbad | Stereolithographie-Verfahren |
| 1.2 | IR-optische Stoffzustandsänderung im Pulverbett | Lasersinterverfahren |
| 1.3 | Lokaler flüssiger Stoffauftrag mit Stoffart- oder Stoffzustandsänderung | 3D-Druck-Verfahren |
| 1.4 | Lokaler plastischer Stoffauftrag mit Stoffzustands- oder Stoffartänderung | Extrusionsform-Verfahren |
| 1.5 | Fester Stoffauftrag mit Schichtverbund und lokaler Trennung vom Reststoff | Schicht-Laminat-Verfahren |

Hinweis: Die additive Fertigung bezieht sich in diesem Buch auf die Teilefertigung anhand von 3D-CAD-Datenmodellen. Auf die ebenfalls zur additiven Fertigung gehörenden Verfahren Fügen und Beschichten wird nicht näher eingegangen.

Hauptgruppe 2: Subtractive Manufacturing – Stoffabtragende Fertigung

Die Produkte der subtraktiven Fertigungsverfahren werden als **Werkstücke** bezeichnet und aus handelsüblichen Halbzeugen oder Produktrohlingen gefertigt.

| Gruppe | Stoffeigenschaftsänderung | Typenvertreter |
|--------|--|---|
| 2.1 | Stoffformänderung mit geometrisch bestimmten Schneiden | CNC-Fräsverfahren CNC-Drehverfahren |
| 2.2 | Stoffformänderung mit geometrisch unbestimmten Schneiden | CNC-Laserstrahlschneidverfahren CNC-Wasserstrahlschneidverfahren |

Hauptgruppe 3: Formative Manufacturing – Stoffformende Fertigung

Die Produkte der formativen Fertigungsverfahren werden als **Formteile** bezeichnet und aus Thermoplasten, Duroplasten oder Elastomeren geformt.

| Gruppe | Stoffeigenschaftsänderung | Typenvertreter |
|--------|--|--|
| 3.1 | Formen im plastischen Zustand mit Stoffzustands- oder Stoffartänderung | Spritzgießverfahren Spitzpress- und Pressverfahren Extrusions- und Schäumverfahren |
| 3.2 | Formen im flüssigen Zustand mit Stoffartänderung | Vakuumgieß- und Gießharzverfahren Rotationsgieß- und Schäumverfahren |
| 3.3 | Umformen im thermoelastischen Zustand mit Stoffformänderung | Thermoform- und Blasformverfahren Prägeverfahren |

4 Geometrische Produktspezifikation

4.1 Allgemeines

Zum Erreichen einer korrekten und verlässlichen Funktion, Ästhetik und Haptik der Produkte sowie der Montier- und Austauschbarkeit einzelner Bauteile ist in der Fertigung eine bestimmte Genauigkeit einzuhalten.

Der Konstrukteur kann mit komfortablen CAD-Konstruktionsprogrammen das Bauteil exakt bis ins Detail beschreiben. Die Genauigkeit der 3D-CAD-Modellierung liegt unter 0,001 Millimeter. Diese hohe Genauigkeit ist zum einen für den Gebrauch des Produktes sehr selten erforderlich und zum anderen weder im industriellen Fertigungsprozess realisierbar noch mit gebräuchlichen Messmitteln ermittelbar.

Mit dem weiteren digitalen Datenfluss über Schnittstellenformate verändert sich die Datengenauigkeit. Für den Fertigungsprozess müssen die Geometriedatensätze in gegenseitlich verwertbare Maschinendatensätze umgewandelt werden. Das heißt, zum 3D-Datensatz werden prozess-, maschinen- und werkstoffspezifische Parameter hinzugefügt. Entsprechend der verfügbaren Rechnerleistung der Anlagentechnik und dem Anwendungsbedarf der Teile wird die Datengenauigkeit weiter verändert. Für die häufigsten Anwendungsfälle in der Teilefertigung aus Polymerwerkstoffen gilt eine Datengenauigkeit von 0,005 bis 0,02 mm als ausreichend.

Bevor der Konstrukteur mit der Produktmodellierung am CAD-Arbeitsplatz beginnt, analysiert er die Gebrauchsanforderungen an das Produkt und die Leistungsanforderungen für dessen wirtschaftlichen Fertigungsprozess. Dieser Vorgang erfolgt oft über mehrere Gestaltungsvarianten unter Beachtung der möglichen Fertigungsverfahren, der verfügbaren Werkstoffe und der geplanten Wirtschaftlichkeit.

Genauigkeits- und Toleranzanforderungen, die sich aus der Wechselwirkung von Produktgestaltung, Werkstoff und Fertigungsprozess ergeben, sollte der Konstrukteur am besten mit dem Teilefertiger und Formenbauer direkt beraten und bestimmen. So findet der Konstrukteur Lösungen für eine optimale Produktgestaltung sowie Werkstoffauswahl zur Sicherung der Produktfunktionen und der Teilefertiger Wege für eine wirtschaftliche, prozesssichere, material- und energieeffiziente Fertigung.

4.1.1 Grundsätze zur wirtschaftlichen Fertigung und Tolerierung

Zur wirtschaftlichen Fertigung von Produkten muss aufgrund der funktionellen Anforderungen die tatsächlich benötigte Genauigkeit innerhalb bestimmter Grenzen liegen.

Damit gelten folgende drei Grundsätze:

1. **„Toleriere das Produkt so genau wie erforderlich und so ungenau wie möglich.“** Die erforderlichen Funktionstoleranzen bestimmt der Konstrukteur über die ermittelten Funktionsgrenzen.
2. **„Fertige das Produkt so genau wie es die Funktionstoleranzen erlauben.“** Die möglichen Fertigungstoleranzen werden von der Verfahrens- und Werkstoffauswahl bestimmt.
3. **„Fertige so genau wie erforderlich und so wirtschaftlich wie möglich.“** Die erforderlichen Fertigungstoleranzen und die Wirtschaftlichkeit werden durch den mobilisierten Fertigungsaufwand des Teilefertigers bestimmt.

Wichtig ist, nicht jedes Maß am Produkt muss toleriert sein. Nur für bestimmte funktionssichernde Maße ist eine direkte Tolerierung verantwortungsvoll festzulegen bzw. zu vereinbaren. Nichttolerierete Maße können durch den Vermerk „Tolerierung ISO 8015 (AD) – Angabe des maßgebenden Dokumentes“ auf der Zeichnung oder in der technischen Dokumentation indirekt toleriert sein. So können übertriebene Genauigkeitsforderungen für nicht funktionssichernde Maße und damit ausufernde Kosten vermieden werden.

4.1.2 Wichtige Normen zur Tolerierung von Längenmaßen

Für die industrielle Fertigung von Einzel- oder Serienprodukten sind zur Gewährleistung zueinander passfähiger bzw. austauschbarer Bauteile oder Baugruppen Regeln zur Maßsicherheit einzuhalten.

Bereits in der Produktentwicklungsphase hat der Konstrukteur für die Bestimmung des Fügezustandes zwischen den Bauteilen Maßtoleranzen vorzugeben. Zur Charakterisierung der Passungsart zwischen zwei Bauteilen durch die Größe und Lage der Maßtoleranzen entstand die Norm zum ISO-Toleranzsystem, die DIN EN ISO 286-1.

Weiterhin fordert die Herstellung passfähiger und austauschbarer Bauteile eine maßhaltige Fertigung innerhalb definierter Grenzen. So entstanden eine Vielzahl von branchenspezifischen Normen und Richtlinien, die verfahrens-, werkstoff- und aufwandsabhängig die möglichen Fertigungstoleranzen für Nennmaßbereiche angeben. Trotz der Vielzahl von verfügbaren Normen, Richtlinien und der durchgängigen Nutzung der 3D-CAD-Daten von der Produktentwicklung über die Fertigung bis zur Endkontrolle gibt es Schwierigkeiten im angemessenen Umgang mit Toleranzen.

Zur Verbesserung dieser Situation sind in der Norm „Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen“ (DIN EN ISO 8015) die grundlegenden Konzepte und Prinzipien zur Erstellung, Auslegung und Anwendung aller Normen und Dokumentationen zur geometrischen Spezifikation des Bauteils, Werkstücks oder Formteils geregelt.

Für die Auslegung der Toleranzen gilt, dass die allgemeinen und individuellen auf der Zeichnung oder in der technischen Dokumentation eingetragenen Spezifikationen immer beachtet werden müssen. Die Toleranzen sind gemäß diesem Standard mit folgenden drei Annahmen verbunden:

- 1. Die Funktionsgrenzen sind für das Bauteil, Werkstück oder Formteil vollständig untersucht und ohne Unsicherheit bekannt.**
- 2. Die Toleranzgrenzen stimmen mit den Funktionsgrenzen überein.**
- 3. Das Bauteil, Werkstück oder Formteil funktioniert innerhalb der Toleranzgrenzen zu 100 Prozent und außerhalb gibt es keine Funktionssicherheit.**

Sind die Funktionsgrenzen noch nicht sicher bekannt, können unter Anwendungsbedingungen Erprobungsmuster oder Prototypen geprüft werden. Das ermöglicht dem Konstrukteur, die Maß- und Funktionsgenauigkeit der Teile unter dem Einfluss verschiedener Belastungsbedingungen zu prüfen, das Anforderungsprofil des Werkstoffes zu optimieren und experimentell die Funktionsgrenzen zu ermitteln.

Auf folgende Dokumente für Funktions- und Fertigungstoleranzen wird im weiteren Text eingegangen:

DIN EN ISO 286-1

„Geometrische Produktspezifikation (GPS) – ISO-Toleranzsystem für Längenmaße, Teil 1: Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und Passungen“

DIN ISO 2768-1

„Allgemeintoleranzen – Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung“

DIN ISO 20457

„Kunststoff-Formteile – Toleranzen und Abnahmebedingungen“

DIN ISO 3302-1

„Gummi-Toleranzen für Fertigteile – Teil 1: Maßtoleranzen“

4.1.3 Maßgebende Einflussfaktoren auf die Fertigungsgenauigkeit

Nach der Art der Formgebung, ob additive, subtraktive oder formative Verfahren, ist der Einfluss auf die Maß- und Abbildegenauigkeit recht unterschiedlich.

Additive Formgebung – Stoffauftragende Fertigung

Die charakteristische Stufigkeit der Bauteile ist das wesentlichste Merkmal dieser Verfahren und wird von der Lage und Form des Teiles in z-Baurichtung bestimmt.

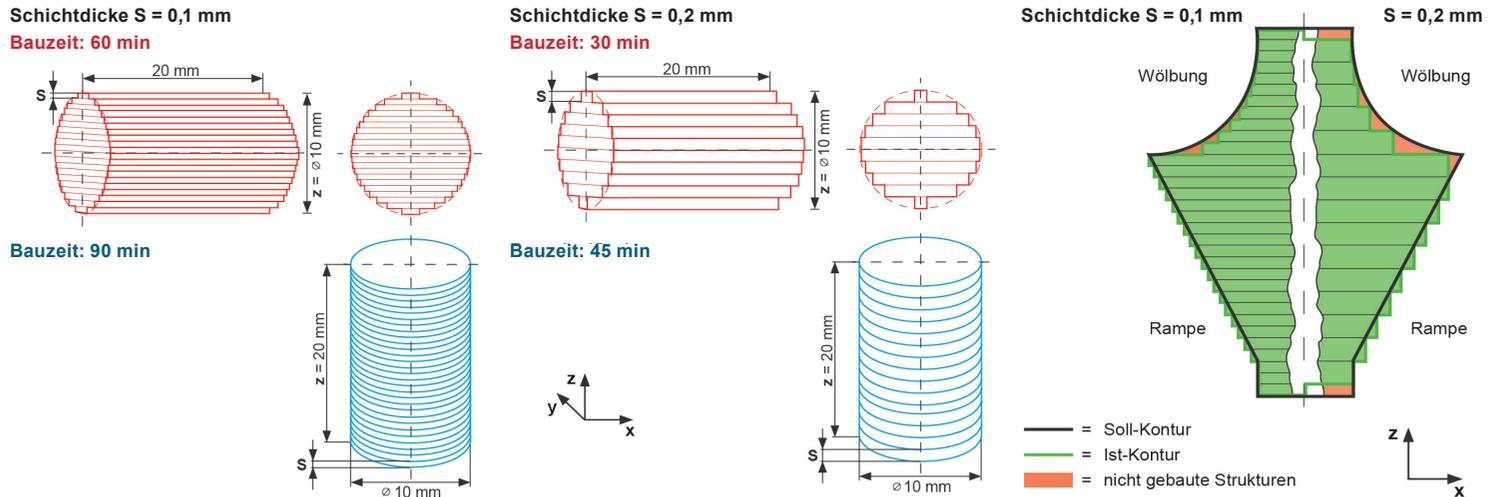
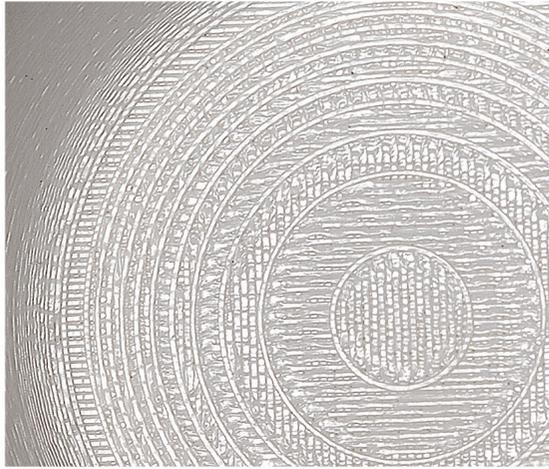
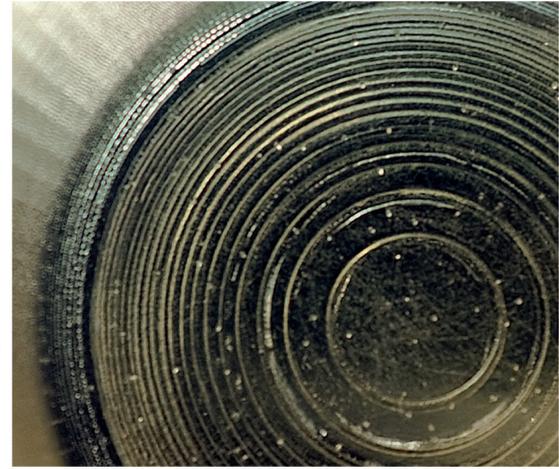


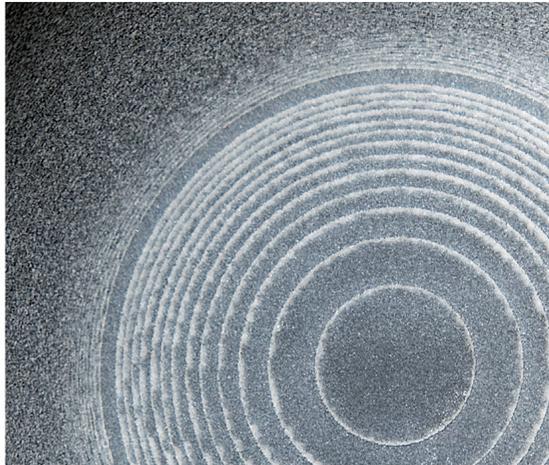
Bild 20: Schichtdicken und baurichtungsabhängige Oberflächenqualitäten (Bauzeitangaben für das Lasersintern)



*Extrusionsformen $S = 0,2 \text{ mm}$,
Seitenwand vektorgeführt,
Fläche Linienraster,
Werkstoffablage schichtweise
um 90° gedreht*



*Stereolithographie $S = 0,1 \text{ mm}$
Seitenwand vektorgeführt,
Fläche Linienraster*



*Lasersintern $S = 0,1 \text{ mm}$,
Seitenwand vektorgeführt,
Fläche Linienraster*



*3D-Drucken $S = 0,02 \text{ mm}$,
Punkteraster $B = 0,03 \text{ mm}$*

Bild 21: Einfluss der Verfahren und Schichtdicken auf die Oberflächenqualität am Beispiel „Wölbung Tassenboden“

Tabelle 14: Fertigungstoleranzen für Stereolithographie-Bauteile (Wasseraufnahme < 1,0 %)

| Nennmaßbereich in mm | | Toleranzklasse | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-----|-----------------------------------|------|------|---------|---------|---------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | PR | QU | NOR | ALL | LOW | LOW | | | |
| über | bis | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 3 | | | | ± 0,030 | ± 0,030 | ± 0,030 | ± 0,05 | ± 0,10 | | | | |
| 3 | 6 | | | | ± 0,030 | ± 0,030 | ± 0,040 | ± 0,07 | ± 0,14 | | | | |
| 6 | 10 | | | | ± 0,030 | ± 0,034 | ± 0,055 | ± 0,09 | ± 0,18 | | | | |
| 10 | 18 | | | | ± 0,030 | ± 0,044 | ± 0,07 | ± 0,11 | ± 0,22 | | | | |
| 18 | 30 | | | | ± 0,039 | ± 0,061 | ± 0,10 | ± 0,15 | ± 0,30 | | | | |
| 30 | 50 | | | | ± 0,050 | ± 0,080 | ± 0,13 | ± 0,20 | ± 0,40 | | | | |
| 50 | 80 | | | | ± 0,065 | ± 0,105 | ± 0,17 | ± 0,27 | ± 0,54 | | | | |
| 80 | 120 | | | | ± 0,085 | ± 0,14 | ± 0,22 | ± 0,35 | ± 0,70 | | | | |
| 120 | 180 | | | | ± 0,110 | ± 0,17 | ± 0,28 | ± 0,44 | ± 0,88 | | | | |
| 180 | 250 | | | | ± 0,140 | ± 0,21 | ± 0,34 | ± 0,54 | ± 1,08 | | | | |
| 250 | 315 | | | | | ± 0,26 | ± 0,40 | ± 0,65 | ± 1,30 | | | | |
| 315 | 400 | | | | | ± 0,33 | ± 0,50 | ± 0,80 | ± 1,60 | | | | |
| 400 | 500 | | | | | ± 0,42 | ± 0,65 | ± 1,00 | ± 2,00 | | | | |
| Toleranzen und Nennmaße in mm | | IT 6 | IT 7 | IT 8 | IT 9 | IT 10 | IT 11 | IT 12 | IT 13 | IT 14 | IT 15 | IT 16 | IT 17 |
| | | Grundtoleranzgrade nach ISO 286-1 | | | | | | | | | | | |

Tabelle 23: Fertigungstoleranzen für Spritzgießteile aus thermoplastischen Polymerwerkstoffen (Zug-E-Modul > 1000 MPa < 5000 MPa, Verarbeitungsschwindigkeit > 0,5% < 1,5%)

| Nennmaßbereich in mm | | Toleranzklasse | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----|----------------|------|------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | | | | | EX | SO | PR | QU | NOR | ALL | LOW | LOW | |
| über | bis | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 3 | | | | ± 0,013 | ± 0,020 | ± 0,030 | ± 0,05 | ± 0,07 | ± 0,12 | | ± 0,25 | |
| 3 | 6 | | | | ± 0,018 | ± 0,030 | ± 0,045 | ± 0,07 | ± 0,10 | ± 0,20 | | ± 0,40 | |
| 6 | 10 | | | | ± 0,023 | ± 0,040 | ± 0,06 | ± 0,09 | ± 0,15 | ± 0,25 | | ± 0,50 | |
| 10 | 18 | | | | ± 0,030 | ± 0,050 | ± 0,08 | ± 0,12 | ± 0,20 | ± 0,30 | | ± 0,60 | |
| 18 | 30 | | | | ± 0,040 | ± 0,065 | ± 0,10 | ± 0,15 | ± 0,25 | ± 0,40 | | ± 0,80 | |
| 30 | 50 | | | | ± 0,055 | ± 0,085 | ± 0,13 | ± 0,20 | ± 0,35 | ± 0,55 | | ± 1,10 | |
| 50 | 80 | | | | ± 0,070 | ± 0,105 | ± 0,18 | ± 0,27 | ± 0,50 | ± 0,70 | | ± 1,40 | |
| 80 | 120 | | | | ± 0,090 | ± 0,15 | ± 0,22 | ± 0,35 | ± 0,60 | ± 0,90 | | ± 1,80 | |
| 120 | 180 | | | | | | ± 0,18 | ± 0,27 | ± 0,45 | ± 0,75 | | ± 1,20 | ± 2,40 |
| 180 | 250 | | | | | | ± 0,23 | ± 0,35 | ± 0,57 | ± 0,95 | | ± 1,45 | ± 2,90 |
| 250 | 315 | | | | | | | ± 0,45 | ± 0,75 | ± 1,15 | | ± 1,70 | ± 3,40 |
| 315 | 400 | | | | | | | ± 0,60 | ± 0,95 | ± 1,45 | | ± 2,30 | ± 4,60 |
| 400 | 500 | | | | | | | ± 0,70 | ± 1,15 | ± 1,75 | | ± 2,80 | |
| Toleranzen und Nennmaße in mm | | IT 6 | IT 7 | IT 8 | IT 9 | IT 10 | IT 11 | IT 12 | IT 13 | IT 14 | IT 15 | IT 16 | IT 17 |
| Grundtoleranzgrade nach ISO 286-1 | | | | | | | | | | | | | |

6 Leistungsvergleich und Leistungsabnahme

6.1 Leistungskriterien für Rapid Manufacturing

Rapid Manufacturing beschleunigt die Produktentwicklung und Produkterprobung und ermöglicht es, den Gebrauchswert der Produkte zu verbessern. Die Rapid-Manufacturing-Produkte können schnell in anwendungsgerechter Qualität und in geringen, bedarfsgerechten Stückzahlen wirtschaftlich wie auch ressourcenschonend hergestellt werden.

Für einen Leistungsvergleich zur Beurteilung der Verfahren und ihrer Produkte sind zunächst eindeutige Leistungskriterien festzulegen. Diese Leistungskriterien müssen deutlich machen, mit welchen messbaren Zielsetzungen die Kriterien erreicht und verbessert werden können.

Schnelligkeit, Qualität, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit sind die Leistungskriterien zur Bewertung der Rapid-Manufacturing-Verfahren.

Zu den bedeutendsten Zielsetzungen der Verfahren gehören:

- Beschleunigung der Produktentwicklung und des Markteintritts
- Verbesserung der Gebrauchswertes der Produkte
- Steigerung des Verkaufserlöses
- Schnelle Prozessdurchlaufzeiten
- Reduzierung der Entwicklungs- und Fertigungskosten
- Effiziente Nutzung der Ressourcen
- Reduzierung der Umweltbelastung

Je nach Gewichtung der einzelnen Zielsetzungen führt eine Bewertung der Verfahren und Produkte zu unterschiedlichen Ergebnissen. Während die Bewertung einer Zielsetzung noch einfach ist, wird es bei Mehrfachzielsetzungen kompliziert und unübersichtlich. So gibt es schon erhebliche Schwierigkeiten dadurch, dass die Zielsetzungen untereinander konkurrieren bzw. gegeneinander gerichtet sind. In diesem Fall ist immer ein Kompromiss zu suchen. Hier geht es nicht um die Frage, ob die Leistungskriterien wie auch die Zielsetzungen gut oder weniger gut erfüllt sind. Vielmehr geht es um ein Zielgebiet, das aus einer Menge von effizienten und nachhaltigen Lösungen besteht, um die komplexen Anforderungen des Marktes und die speziellen Wünsche des Kunden zu erfüllen. Damit wird klar, nicht alle Ziele und Wünsche können bis ins Detail berücksichtigt werden. Die Lösung ist nur ein Abbild einer Kompromissmenge der ausgewählten Kriterien und Zielsetzungen.

Häufig wird der Aufwand zur Findung der optimalen Kompromissmenge gescheut und sich für den billigsten Beschaffungspreis des Produktes entschieden.

Tabelle 37: Leistungskriterien – Zielsetzungen – Prozessanforderungen

| Leistungskriterien | Zielsetzungen | Prozessanforderungen |
|---------------------------|--|--|
| Schnelligkeit | <ul style="list-style-type: none"> • Produktentwicklung beschleunigen • Markteintritt vorzeitig sichern • Prozessdurchlaufzeiten senken | <ul style="list-style-type: none"> • Umfassende Nutzung der Computertechnik • Schnelle Entscheidungen durch Management • Fertigungsstufen und -schritte reduzieren • Ausreichende Fertigungskapazitäten bereitstellen • Leistungsfähige und zuverlässige Technik sicherstellen • Lieferzeiten reduzieren |
| Qualität | <ul style="list-style-type: none"> • 100 % Produkterprobung vor Markteintritt • Gebrauchswerte der Produkte verbessern • Erforderlichen Fertigungsaufwand sichern | <ul style="list-style-type: none"> • Eindeutige Produktspezifikation • Qualifizierte Technologie- und Werkstoffauswahl • Prozessfähige Ausrüstungen benutzen • Spezifizierte Werkstoffe verwenden • Qualifiziertes Personal bereitstellen • Reproduzierbare Fertigung gewährleisten |
| Wirtschaftlichkeit | <ul style="list-style-type: none"> • Verkaufserlös erhöhen • Entwicklungskosten senken • Fertigungskosten senken | <ul style="list-style-type: none"> • „Time-to-Market“ verkürzen • Entwicklungsaufwand reduzieren • Fertigungs-, Material- und Energieaufwand reduzieren • Aufwand für Formen- und Werkzeugbau reduzieren • Produktionsvorbereitungsaufwand reduzieren • Minimierung der Teile pro Produkt |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Bedarfsgerechte Fertigung • Ausschussrate senken • Ausbeuteverluste senken | <ul style="list-style-type: none"> • Bestands- und Lagerkosten reduzieren • Prozessstörende Einflüsse reduzieren • Fertigungsgerechte Produktgestaltung und Maßtolerierung |
| Nachhaltigkeit | <ul style="list-style-type: none"> • Ressourcen effizient nutzen • Umweltschutz verbessern • Gesundheit der Menschen schützen | <ul style="list-style-type: none"> • Werkstoff-, Energie- und Personaleinsatz minimieren • Boden-, Wasser-, Luft- und Klimabelastung minimieren • Gefahrlose Herstellung, Handhabung und Entsorgung der Produkte |

6.2 Leistungsvergleich der Rapid-Manufacturing-Verfahren

Welche Verfahren die erforderliche Qualität am schnellsten und wirtschaftlichsten erfüllen, kann nur anhand des konkreten Produktes, seines Verwendungszweckes, der Werkstoffanforderungen, der Bedarfsmengen und der Lieferfristen bestimmt werden.

In den folgenden Tabellen ist eine grobe Bewertung der Fertigungsverfahren für einen Leistungsvergleich zu den allgemeinen Produkthanforderungen, den realisierbaren Fertigungstoleranzen und den anteiligen Herstellungskosten am Produkt dargestellt.

Tabelle 38: Leistungsvergleich zu den allgemeinen Produkthanforderungen

| Produktanforderungen Rapid Technologien | Verwendungszweck | | | | Gestalterische Forderungen | | Geometrische Forderungen | | Belastungs-forderungen | | | | Bedarfsmengen | | | | Lieferfristen | | | |
|--|------------------|--------|----------|----------------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|------------------------|-----------|------------|----------|---------------|--------------|---------------|----------------|---------------|-------------|-------------|--------------|
| | Modell | Muster | Prototyp | Marktfähiges Produkt | Abbild- genauigkeit | Oberflächenstruktur, Farbe | Tolerierte Maße | Nicht tolerierte Maße / Low-Cost | Mechanisch | Thermisch | Elektrisch | Chemisch | Bis 3 Stück | Bis 20 Stück | Bis 100 Stück | Über 100 Stück | Bis 3 Tage | Bis 10 Tage | Bis 30 Tage | Über 30 Tage |
| SL | + | + | ○ | ○ | + | ○ | ○ | + | ○ | ○ | ○ | ○ | + | + | ○ | ○ | + | ○ | ○ | △ |
| LS | + | + | ○ | ○ | + | ○ | ○ | + | ○ | ○ | ○ | ○ | + | + | ○ | ○ | + | ○ | ○ | △ |
| 3DP | + | + | ○ | ○ | + | + | ○ | + | ○ | ○ | ○ | ○ | + | + | ○ | ○ | + | ○ | ○ | △ |
| EM | + | + | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | + | ○ | + | ○ | ○ | + | + | ○ | ○ | + | ○ | ○ | △ |
| 3D-CNC | + | + | + | ○ | ○ | + | + | + | + | + | + | + | ○ | + | + | ○ | ○ | + | ○ | ○ |
| VG | □ | + | + | ○ | + | + | ○ | + | + | ○ | ○ | ○ | □ | + | + | ○ | ○ | + | ○ | ○ |
| SG | □ | □ | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | □ | □ | ○ | + | □ | ○ | + | ○ |

Legende

Produktanforderungen: + erfüllt

○ begrenzt oder mit Mehraufwand erfüllt

○ bei großen Mengen toleriert

□ nicht wirtschaftlich

△ nicht marktüblich

7. Zusammenfassung

Die Rapid-Manufacturing-Verfahren zur Herstellung von Produkten aus Thermoplasten, Duroplasten und Elastomeren erschließen seit Jahren stetig neue Anwendungsbereiche. Es begann mit Rapid Prototyping, der schnellen Fertigung von Modellen, Mustern und Prototypen, zur Beschleunigung der Produktentwicklung. Durch leistungsfähigere Anlagen- und Computertechnik sowie verbesserte Werkstoffe werden diese Verfahren inzwischen zur industriellen Fertigung von marktfähigen Produkten in Einzelstücken oder Kleinstserien erfolgreich genutzt.

In diesem Handbuch sind in übersichtlicher Form die gebräuchlichsten Formgebungsverfahren mit ihren besonderen Merkmalen erklärt. Das erleichtert dem Konstrukteur die Auswahl des geeigneten Verfahrens für seinen Anwendungsfall und zeigt ihm die Potenziale und Grenzen zur Sicherung der Gebrauchstauglichkeit der Produkte.

Dieses Buch zeigt weiterhin, dass

- jedes Verfahren seine Besonderheiten hat und nicht allgemein für jeden Einsatzfall anwendbar ist,
- die Fertigungsgenauigkeit und die Produkteigenschaften vom Verfahren, dem Werkstoff und dem mobilisierten Aufwand des Teilefertigers abhängig ist,
- die verfahrensspezifisch modifizierten Werkstoffe nur ein begrenztes Anforderungsprofil erfüllen,
- Schnelligkeit, Qualität und Wirtschaftlichkeit der Verfahren von der Mitwirkung des Managements, des Konstrukteurs und des Teilefertigers beeinflusst werden,
- die umfassende Erprobung am realen Produkt dem Konstrukteur die Belastungsgrenzen sichtbar macht und den Teilefertiger auf die funktionssichernden Qualitäts- und Prüfmerkmale hinweist.

Zum Schluss: Ab und zu stehen Konstrukteur und Teilefertiger in der Praxis vor einem Phänomen oder Dilemma.

Das Phänomen: Die vorgegebenen Prüfmerkmale werden nicht eingehalten, aber die Produkte sind gebrauchsfähig!

Das Dilemma: Die vorgegebenen Prüfmerkmale werden eingehalten, aber die Produkte sind nicht gebrauchsfähig!

Die Ursache: Nicht immer stimmen die zu prüfenden Maß- und Eigenschaftstoleranzen mit den für den Gebrauch erforderlichen Eigenschaften der Produkte überein oder die Bestimmung der Prüfwerte ist fehlerhaft.

Die Lösung: Teilefertiger und Konstrukteur haben sich bei Unklarheiten unverzüglich zu verständigen. Oft benötigen sie dazu die Unterstützung der Prüftechniker und anwendbare sowie verlässliche Informationen der Anlagenhersteller und Werkstofflieferanten, um die Prüfmerkmale zu verbessern.



ISBN 978-3-9822135-0-7



9 783982 213507

Rapid Manufacturing #Formgebungsverfahren

Dieses Buch zeigt Konstrukteuren die Potenziale und Grenzen der bewährten Rapid-Manufacturing-Verfahren. Das vereinfacht ihm die Auswahl eines geeigneten Formgebungsverfahrens, um die erforderliche Gebrauchstauglichkeit und Fertigungsgenauigkeit der Produkte sowie eine wirtschaftliche Herstellung zu sichern.

Es liefert viele sachkundige Informationen und ist ein Arbeitsmittel für den beruflichen Alltag in der Produktentwicklung und Produkterprobung.