

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die Globalisierung der Märkte, zunehmende Komplexität und Diversifikation der Produkte sowie die Produkt- und Prozessinnovationen als zentrale Wettbewerbsfaktoren haben die Unternehmen zu neuen Strategien der Produktentwicklung gezwungen. Die stetig wachsende Zahl interdisziplinärer Wechselwirkungen innerhalb der Produktentwicklung in den letzten Jahren führte zur weitestgehenden Parallelisierung einzelner Prozessabläufe (sog. *Simultaneous Engineering*) anstelle der traditionell sequenziellen Abarbeitung. An die am Produktentwicklungsprozess beteiligten Unternehmensbereiche werden hohe Erwartungen hinsichtlich der Reaktionsfähigkeit und der Flexibilität gestellt, da hier die Qualität, Zeit und Kosten für das Produkt und den Produktentstehungsprozess wesentlich beeinflusst werden. Insbesondere die Fertigung von Prototypen für die in einem Produktentwicklungsprozess notwendigen Designüberprüfungen und Funktionstests zur Sicherstellung der Entwicklungsabsichten tragen maßgeblich zur Entwicklungszeit bei. Dies beeinflusst auch den Zeitpunkt der Markteinführung (*Time-to-Market*), der zunehmend für den Produkterfolg entscheidend ist. Daher gewinnt die Integration generativer Fertigungsverfahren zur Erzeugung physischer Prototypen (*Rapid Prototyping – RP*) als Verifikationsobjekt zunehmend an Bedeutung. Die sogenannte Rapid-Technologie zeichnet sich besonders durch geringe Fertigungszeiten aus, so dass in jeder Entwicklungsphase schnell Prototypen hergestellt werden können, die die zur Entscheidungsfindung notwendigen Bewertungsmerkmale (Qualität, Maßgenauigkeit, Optik, Haptik, Festigkeit, Funktion, etc.) unter gegebenen Rahmenbedingungen (Qualität, Zeit, Kosten) liefern. Die rasante Weiterentwicklung dieser Technologie hat zudem die Erschließung weiterer Anwendungsbereiche ermöglicht, die weit über die Herstellung von Muster- oder Prototypenbauteilen hinausgehen: die generative Fertigung von Vor- und Kleinserienwerkzeugen bis hin zu Bauteilen mit Fertigteilecharakter (*Rapid Manufacturing – RM*). Einhergehend mit den Verfahrensverbesserungen und dem zunehmenden Einsatzspektrum steigt jedoch auch die Anzahl verfahrensspezifischer Wechselwirkungen und somit die Komplexität der Prozessvorbereitung. Dies betrifft insbesondere die Festlegung der Bauteilorientierung unter Berücksichtigung fertigungstechnischer Kriterien, die einen wesentlichen Einfluss auf die Bauteil- und Prozessqualität ausüben. Während noch zahlreiche Einflussgrößen nur unzureichend bekannt sind, baut das Verfahrens-Know-how im Wesentlichen auf den zumeist langjährigen Erfahrungen der Anlagenhersteller und Anlagenbediener auf. Eine in Normen und Richtlinien festgehaltene Wissensbasis liegt bis dato nicht vor. Dies hat zu einer bis heute anhaltenden fehlenden Breitenwirksamkeit der Technologie geführt. Des Weiteren wird hierdurch sowohl die Neueinführung dieser Technologie in Unternehmen, als auch die Substitution traditioneller Fertigungsverfahren im Konstruktionsprozess erschwert. Die Prozesskette von der Konstruktion hin zur generativen Fertigung ist durch eine fehlende Interdisziplinarität gekennzeichnet, so dass aufgrund des fehlenden Prozesswissens im Konstruktionsumfeld eine funktions- und fertigungsgerechte Gestaltung mit gleichzeitiger Absicherung der Konstruktionsziele nur bedingt möglich ist.

1.2 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit

Bisher existiert kein Ansatz zur Schließung der CAD-RP/RM-Kette durch Integration prozessspezifischen Wissens in den Konstruktionsprozess. Zudem fehlt völlig eine zur Standardisierung und Automatisierung notwendige Wissensbasis. Aus dieser Motivation heraus ist es Ziel dieser Arbeit, ein rechnergestütztes Optimierungsmodell zu entwerfen, das auf Basis zu entwickelnder Kennwerte und Regeln die Entscheidungsfindung hinsichtlich der Auswahl der Bauteilorientierung unter Berücksichtigung qualitativer und wirtschaftlicher Aspekte unterstützt. Zugleich soll hiermit die Visualisierung der Wechselwirkungen, insbesondere bei Bauteilen komplexer Geometrie, ermöglicht werden. Auf diese Weise soll der Einsatz des Optimierungssystems im Konstruktionsprozess die Umsetzung von Konstruktionsabsichten mit Hilfe der generativen Fertigung und unter Beachtung der damit verknüpften Besonderheiten fördern. Zu diesem Zweck sind die bei der Wahl der Orientierung zu berücksichtigenden Einflusskriterien zu quantifizieren und mit Hilfe mathematischer Modelle entsprechende Gütekriterien zu definieren. Das Ziel in dieser Arbeit ist nicht die Verbesserung der Prozesssteuerung, sondern vielmehr die Optimierung der Bauteilorientierung unter geometrischen Gesichtspunkten, jedoch unter Berücksichtigung fertigungstechnischer Randbedingungen. Zur multikriteriellen Bewertung möglicher Orientierungen sind schließlich entsprechende Algorithmen zu entwickeln, die eine Mehrzieloptimierung in vertretbaren Antwortzeiten gewährleisten. Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen, die nur vereinzelt Qualitätsfaktoren adressieren, soll in dieser Arbeit eine ganzheitliche Betrachtung der Auswahl der Bauteilorientierung umgesetzt werden. Ein weiteres wesentliches Unterscheidungsmerkmal stellt die allgemeine Anwendbarkeit dar. So soll das Optimierungsmodell nicht auf einfache Geometrien, wie geometrische Primitive oder konvexe Körper, beschränkt sein und möglichst für verschiedene Verfahren Anwendung finden können. Zudem soll das Optimierungssystem eine in die CAX-Umgebung integrierbare Lösung darstellen.

1.3 Gliederung der Arbeit

Die Arbeit ist systematisch aufgebaut und beginnt im Kapitel 2 mit einer Einführung in die Grundlagen der Rapid-Technologie. Hier sollen wesentliche technologische Aspekte, die bei der Konzeptentwicklung berücksichtigt werden müssen, vermittelt werden. Auf Grundlage der aufgezeigten Potenziale und Grenzen der hier behandelten Fertigungstechnologie erfolgt im Kapitel 3 die Konzeption der Optimierungsaufgabe. Wesentliche Inhalte sind hier die entwickelten Anforderungen an die Bauteilorientierung sowie der Konzeptentwurf. Das Kapitel 4 enthält den Stand der Wissenschaft und dient unter anderem zur Abgrenzung sowie wissenschaftlichen Einordnung der vorliegenden Arbeit. Kapitel 5 und Kapitel 6 schließen den ersten Teil der Arbeit mit der Herleitung sowie Präsentation der entwickelten Konzepte zur Lösung von Teilproblemen und der methodischen Umsetzung der Mehrzieloptimierung ab. Der zweite Teil der Arbeit enthält im Kapitel 7 die praktische Umsetzung des Gesamtkonzepts sowie die Validierung und Evaluierung der Algorithmen im Kapitel 8. Die Arbeit wird schließlich mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel 9 abgeschlossen. In der heutigen Praxis werden generische Bezeichnungen der einzelnen Verfahren der Rapid-Technologie häufig mit Produktnamen und Herstellerbezeichnungen vermischt. In dieser Arbeit werden ausschließlich die generischen Bezeichnungen verwendet, während vorkommende Herstellerbezeichnungen explizit als solche gekennzeichnet werden.

2 Grundlagen der Rapid-Technologie

Die generative Fertigung basiert in Abgrenzung zu klassischen Fertigungsverfahren auf dem Schichtbauprinzip und ist durch eine nahezu unbegrenzte Freiheit der Formgestaltung gekennzeichnet. Bei dem Versuch der fertigungstechnischen Einordnung wird deutlich, dass die generativen bzw. schichtorientierten Fertigungsverfahren (engl. *layered manufacturing*) sich prinzipiell nicht eindeutig einer Gruppe der nach DIN 8580 festgelegten Einteilung der Fertigungsverfahren zuordnen lassen. Einerseits wäre eine Zuordnung zu den urformenden Verfahren für die meisten Anwendungen am ehesten zutreffend. Andererseits verfolgen nicht alle generativen Verfahren ein urformendes Verfahrensprinzip, so dass diese aufgrund ihres additiv wirkenden Charakters den fügenden Verfahren zugeordnet werden müssten. Daher ist die Forderung nach einer eigenen Hauptgruppe durchaus berechtigt. Die Vielzahl verschiedener Verfahrensprinzipien der generativen Fertigung führt schließlich zu mehreren Möglichkeiten der Klassifizierung. Eine gebräuchliche Methode ist die Einteilung nach dem Zustand des Ausgangsmaterials. Weitere mögliche Unterscheidungen orientieren sich an der Anzahl der Prozessschritte oder dem Einsatzzweck im Produktentstehungsprozess. Im Rahmen nationaler sowie internationaler Bestrebungen zur Standardisierung der Nomenklatur generativer Prozesse erfolgt in der VDI-Richtlinie 3404 [VDI07] eine Einteilung und Abgrenzung der Verfahren nach den kommerziell bedeutendsten Anwendungen. So uneindeutig sich derzeit noch die Klassifizierung darstellt, so fällt auch das Verständnis der Begriffsdefinitionen aus. Die mögliche Einteilung der Fertigungsverfahren in *subtraktiv*, *additiv* und *formativ* hat dazu geführt, dass sich der Begriff *Additive Manufacturing* im englischen Sprachgebrauch durchgesetzt hat. Im nordamerikanischen Raum wird dagegen primär der Begriff *Solid Free-Form Fabrication* verwendet. Der europäische Soziolekt¹ ist dadurch gekennzeichnet, dass häufig generative Fertigungsverfahren unabhängig von ihrem Einsatzzweck verallgemeinernd als *Rapid Prototyping* bezeichnet werden. Wissenschaftlich betrachtet findet hierdurch die Differenzierung in der Anwendung bzw. in dem Verwendungszweck des herzustellenden Bauteils keine angemessene Berücksichtigung mehr. Daher werden in dieser Arbeit alle schichtweise arbeitenden generativen Verfahren unter dem Begriff *Rapid-Technologie* zusammengefasst. Gelegentlich finden sich in der Literatur jedoch Definitionen dieses Begriffes, die auch abtragende Hochgeschwindigkeitsverfahren (z. B. High Speed Cutting) einschließen. Hierdurch soll die Eigenschaft der „schnellen“ Fertigung in den Vordergrund gestellt werden. In der Praxis findet diese Begriffsdefinition jedoch kaum Anwendung, so dass der Begriff „Rapid-Technologie“ in diesem Zusammenhang als ein Oberbegriff angesehen werden kann. Neben dieser Bezeichnung wird in der vorliegenden Arbeit auch der Begriff *generative Fertigung* (GF) zur Betonung des schichtweise additiv arbeitenden Charakters verwendet. Eine gute Einführung in die Grundlagen der Rapid-Technologie bieten [BeTa98], [CLL03], [Geb07], [KaNa06], [Noo06] und [Zäh06].

¹ Als Soziolekt (bzw. Gruppensprache) wird das Sprachsystem einer definierten Gruppe (z. B. Fachgruppe) bezeichnet. Jede Fachsprache kann somit als Soziolekt angesehen werden.

2.1 Systematik der Technologieanwendungen

Die ersten Anwendungen generativer Fertigungsverfahren Ende der 80er Jahre wurden als Rapid Prototyping bezeichnet. Dieser Begriff hat sich bis heute etabliert und wird häufig irreführenderweise auch für verwandte Verfahren verwendet. Die umfangreichen Weiterentwicklungen und die Ausweitung des Einsatzgebietes der generativen Fertigungsverfahren erfordern aus heutiger Sicht eine feinere Abgrenzung der Anwendungen (Abb. 2-1). Demnach gliedert sich die Rapid-Technologie in die Anwendungen zur Herstellung von Modellen und Prototypen (Rapid Prototyping) sowie zur Fertigung von Bauteilen mit Endproduktcharakter (*Rapid Manufacturing*). *Rapid Tooling* bezeichnet die generative Fertigung von Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen und ist je nach Anwendungsfall dem Rapid Prototyping oder dem Rapid Manufacturing zuzuordnen.

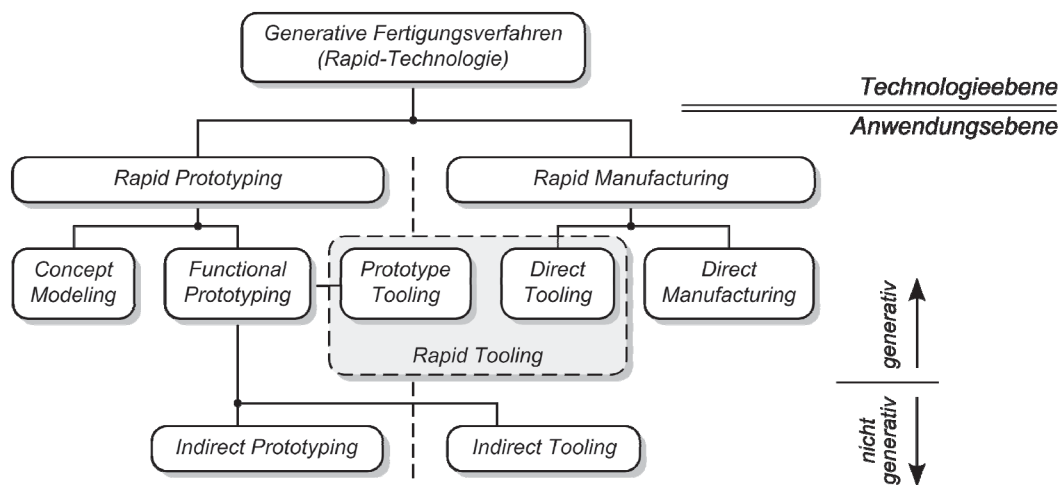


Abb. 2-1: Systematik der Anwendungen der Rapid-Technologie (in Anl. an [Geb07])

2.1.1 Rapid Prototyping

Diese älteste Form der Anwendung der Rapid-Technologie dient zur schnellen Herstellung physischer Bauteile ohne Endproduktcharakter. Je nach Verwendungszweck (Design-, Geometrie-, Funktionsprototyp, etc.) weisen diese Bauteile repräsentative Eigenschaften eines zu fertigenden Produktes auf, während die für die Produktverifikation nicht relevanten Eigenschaften so weit wie möglich abstrahiert werden. Rapid Prototyping ermöglicht demnach die Erzeugung aussagekräftiger Modelle zur Absicherung einzelner Produkteigenschaften. Werden die Modelle zur 3D-Visualisierung verwendet, so spricht man von *Concept Modeling* oder auch *Solid Imaging*.

2.1.2 Rapid Manufacturing

Unter Rapid Manufacturing versteht man die schnelle und kostengünstige Herstellung von Bauteilen mit Endproduktcharakter. Im Gegensatz zu den ursprünglichen Anwendungen der Rapid-Technologie handelt es sich bei den hier gefertigten Bauteilen aufgrund der zahlreichen Verfahrensverbesserungen und des erweiterten Materialspektrums um marktfähige Produkte (*Direct Manufacturing*) oder um Vor- und Kleinserienwerkzeuge (*Direct Tooling*).

Dadurch, dass die generativ gefertigten Bauteile mechanisch-technologische Zieleigenschaften aufweisen sollen, lässt sich die Notwendigkeit einer Anpassung der Konstruktionssystematik ableiten. Anstelle der konstruktiven Auslegung im Hinblick auf die Nutzung traditioneller Fertigungsverfahren tritt hier die RM-Gerechtigkeit der Konstruktion verstärkt in den Vordergrund. Nur auf diese Weise lassen sich die Potenziale der direkten Fertigung ausschöpfen. Weiterführende Informationen zu Anwendungsbereichen des Rapid Manufacturing oder den damit verbundenen Potenzialen finden sich in [Bar08] und [HHD06].

2.2 Die Rapid-Technologie im Produktentstehungsprozess

Die industrielle Serienproduktion ist gekennzeichnet durch eine aufgrund der Berücksichtigung von Kundenwünschen vorangetriebene Diversifikation, eine zunehmende Produktkomplexität und somit einen stetig auf den Produktentwicklungsprozess wirkenden Zeitdruck zum Erhalt kurzer Innovationszyklen. Die Globalisierung der Märkte und der damit einhergehende Wettbewerbsdruck auf die Unternehmen haben dazu geführt, dass die Umgehung des Wettbewerbs durch Konzentration auf Marktnischen nur noch selten zum Erfolg führt. Stattdessen gilt es, mit Hilfe geeigneter Simulations- und Verifizierungstechniken moderne Produktentwicklungsstrategien anzuwenden, die zu einer Technologieführerschaft beitragen können. Virtuelle sowie physische Prototypen als Simulations- und Verifikationsobjekte bilden dabei die Grundlage interdisziplinärer Zusammenarbeit und unterstützen die Entscheidungsfindung hinsichtlich der Produktgestaltung und der Produktfunktionalität. Darüber hinaus sichern sie fehlerarme Prozessabläufe im Rahmen der Produktion und begünstigen verborgene Innovationskräfte. Generativ hergestellte Bauteile weisen hierbei die größten Potenziale für die physische Produktverifikation auf, welche, neben zur Herstellung von Design-, Geometrie- und Funktionsprototypen (Rapid Prototyping), zunehmend für die Fertigung von Vor- und Kleinserienwerkzeugen (Rapid Tooling) genutzt werden. Aktuelle Statistiken zur Verteilung der Technologie-Nutzung (Abb. 2-2) spiegeln dies wider.

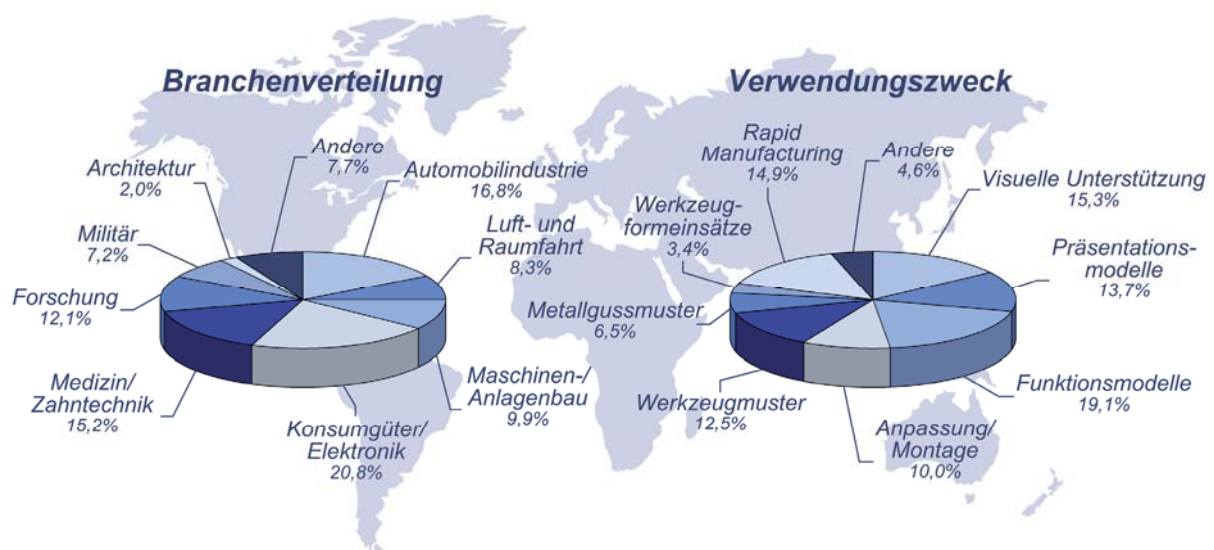


Abb. 2-2: Nutzung der Rapid-Technologie (in Anl. an [Woh08])

So wird die Rapid-Technologie neben anderen Branchen maßgeblich in der Automobil- sowie in der Konsumgüterindustrie zur visuellen Unterstützung, Erstellung von Funktionsmodellen

oder zur Fertigung von Werkzeugmustern bzw. Werkzeugformeinsätzen angewendet. Darüber hinaus haben zahlreiche Entwicklungen dazu geführt, dass generative Verfahren zunehmend zur werkzeuglosen Fertigung von Bauteilen mit seriennahen Eigenschaften (Rapid Manufacturing) eingesetzt werden, wobei der derzeitige Einsatz noch auf Nischenanwendungen in der Kleinserien-Fertigung beschränkt bleibt. Ein davon zunehmend profitierender Sektor stellt die Medizin bzw. Zahntechnik dar.

2.2.1 Einordnung der GF-Verfahren

Die Einsatzmöglichkeiten generativer Fertigungsverfahren sind grundsätzlich breit gefächert. Dies drückt sich insbesondere dadurch aus, dass die verschiedenen Technologieanwendungen in nahezu jeder Phase der Produktentstehung Anwendung finden. Eine scharf abgrenzende Zuordnung der Verfahren zu den einzelnen Phasen ist jedoch kaum möglich, da dies in der Regel produktabhängig ist. Daher liefert Abb. 2-3 lediglich einen groben Überblick der Verteilung mit zum Teil fließenden Übergängen. Hieraus ist erkennbar, dass das Rapid Prototyping im Wesentlichen den Phasen der Produktentwicklung zuzuordnen ist, hingegen das Rapid Tooling und das Rapid Manufacturing in der Fertigungsphase bzw. der Fertigungsvorbereitung angesiedelt ist. Trotz früherer Forschungsaktivitäten zur weitergehenden Integration der Rapid-Technologie in den Produktentwicklungsprozess, insbesondere in die Konstruktionsphase ([Bir02], [Geu96], [Mach99]), ist die Nutzung der Rapid-Technologie nach wie vor nicht Bestandteil einer durchgängigen CAD/CAM-Lösung.

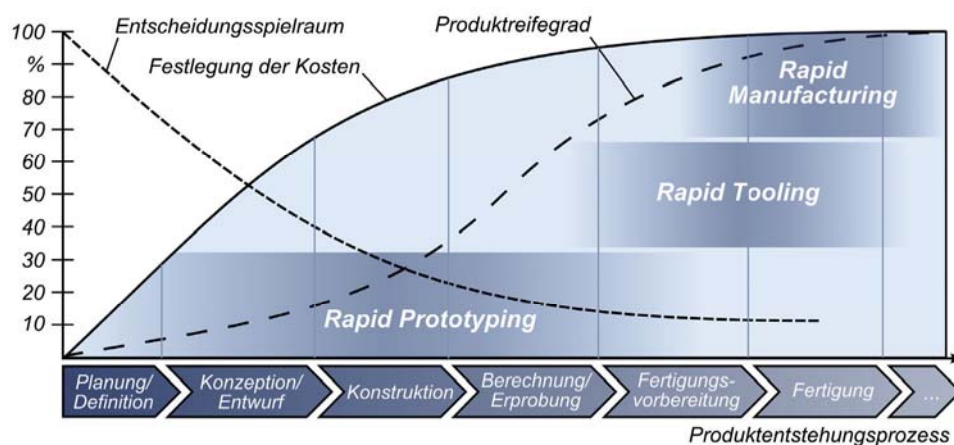


Abb. 2-3: Einsatz der Rapid-Technologie im Produktentstehungsprozess

2.2.2 Zukünftige Technologienutzung

Während die Rapid-Technologie im letzten Jahrzehnt noch vornehmlich zur Erzeugung physischer Prototypen angewendet wurde, haben die zahlreichen Weiterentwicklungen und die damit verbundenen Verbesserungen dazu geführt, dass neue Anwendungsfelder erschlossen werden konnten und sich die Rapid-Technologie in einigen Unternehmen als fester Bestandteil der Produktentwicklung etabliert hat. Der allgemeine wirtschaftliche Rückgang um die Jahrtausendwende hatte eine Marktberreinigung der Anlagenhersteller zur Folge, konnte jedoch aufgrund der sichtbaren Nutzenpotenziale nicht die Ausbreitung der Technologie verhindern. Vielmehr haben die Erschließung neuer Anwendungsfelder (z. B. durch neue ein-

setzbare Materialien) und der eingetretene hohe Kostendruck in den Unternehmen zu einem Umbruch in der Branche geführt. Daher werden derzeit von den Herstellern vermehrt kostengünstige Anlagen angeboten. Dabei handelt es sich zunehmend um Desktop-Lösungen für den schnellen Einsatz, insbesondere für das Concept Modeling. Der anhaltende Trend zur Senkung von Anschaffungs- und Betriebskosten könnte in Zukunft dazu führen, dass auch in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) generative Fertigungsanlagen zur Absicherung von Konstruktionszielen eingesetzt werden. Neben der günstigen Kostenentwicklung haben gerade neue einsetzbare Materialien den Weg der Rapid-Technologie für neue Anwendungen eröffnet (z. B. Explosionsschutz [TGKE09]). Dies spiegelt sich vor allem auch in dem in den letzten Jahren registrierten sprunghaften Anstieg medizinischer Anwendungen (z. B. orthopädische Implantate, chirurgische Planung, chirurgische Instrumente [Witt09], Dental-Applikationen u. v. a. m.) als auch in der vermehrten On-Demand-Fertigung personalisierter Produkte wider [Woh08]. Somit wird der Einsatz generativer Fertigungsverfahren auch zukünftig nicht auf den Produktentstehungsprozess beschränkt bleiben, sondern sich zunehmend auf angrenzende Phasen ausbreiten. Während das Concept Modeling zunehmend in den frühen Phasen eines Produktlebenszyklus angewendet werden kann, führen die materialbedingten Verbesserungen der mechanischen Eigenschaften generativ hergestellter Bauteile zur vermehrten Anwendung des Rapid Manufacturing und Rapid Tooling. Hierdurch ergibt sich die Notwendigkeit organisatorischer Anpassungen, wie z. B. die stärkere infrastrukturelle Einbindung der GF-Anlagen in die Fertigungsprozesskette. Die Erzeugung seriennaher oder sogar serienidentischer Bauteile mit Hilfe der generativen Fertigungstechnik erfordert eine engere Verknüpfung mit Nachbearbeitungsanlagen. Darüber hinaus muss der durchgängige Datentransfer gewährleistet sein, der sich derzeit auf eine manuelle Konvertierung der 3D-Geometrie und eine einseitige Datenübertragung zur GF-Anlage beschränkt.

2.3 Verfahrensgrundlagen

Generative Fertigungsverfahren basieren im Allgemeinen auf zwei grundlegenden Verfahrensschritten:

1. Erzeugung von Schichtinformationen auf Basis einer geeigneten Bauteilbeschreibung,
2. Generierung des Schichtenmodells durch schichtweise Abarbeitung bzw. fertigungstechnische Umsetzung der Schichtinformationen.

Hierbei muss jedoch zwischen der technologischen und der datentechnischen Prozesskette unterschieden werden. Zum besseren Prozessverständnis werden diese im Folgenden kurz erläutert.

2.3.1 Technologische Prozesskette

Die technologische Prozesskette beschreibt den Ablauf der Technologieschritte zur Erzeugung des Schichtenmodells (Abb. 2-4). Ausgangspunkt dieser Kette stellt die Datenerfassung bzw. die Datenerstellung (z. B. CAD-Modellierung) dar. Falls notwendig, wandelt die Anwendung mathematischer Methoden die vorliegende Bauteilbeschreibung in eine für die generative Fertigung geeignete Datenform um (z. B. Triangulierung). Anschließend erfolgt die Ori-

entierung des Modells zur Definition der Fertigungslage, so dass schließlich eine virtuelle Schichtzerlegung zu den für den generativen Fertigungsprozess notwendigen Schichtinformationen führt. Die physische Bauteilgenerierung erfolgt letztendlich durch die sequenzielle Erzeugung der jeweiligen Einzelschichten.

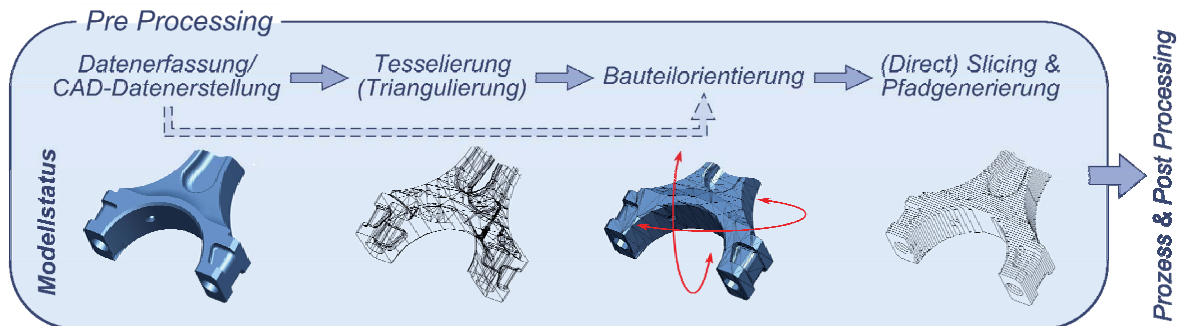


Abb. 2-4: Technologische Prozesskette der Rapid-Technologie

2.3.2 Datentechnische Prozesskette

Betrachtet man den Verfahrensablauf aus Sicht des zugrunde gelegten Datenmodells zur Bauteilbeschreibung, so gelangt man zur datentechnischen Prozesskette (Abb. 2-5). Sie zeigt die erforderlichen Schritte, um aus beliebigen Eingangsdaten (Punktwolke, Bilddaten oder 3D-Datenmodell) ein für den generativen Fertigungsprozess verwendbares Datenmodell mittels GF-gerechter Datenaufbereitung zu erhalten. Da die erforderlichen Konvertierungen der Modellrepräsentationen häufig mit Fehlern in der Interpretation einhergehen, wird in dieser Arbeit der Datenaufbereitung besondere Aufmerksamkeit gewidmet (Abschnitt 2.4).

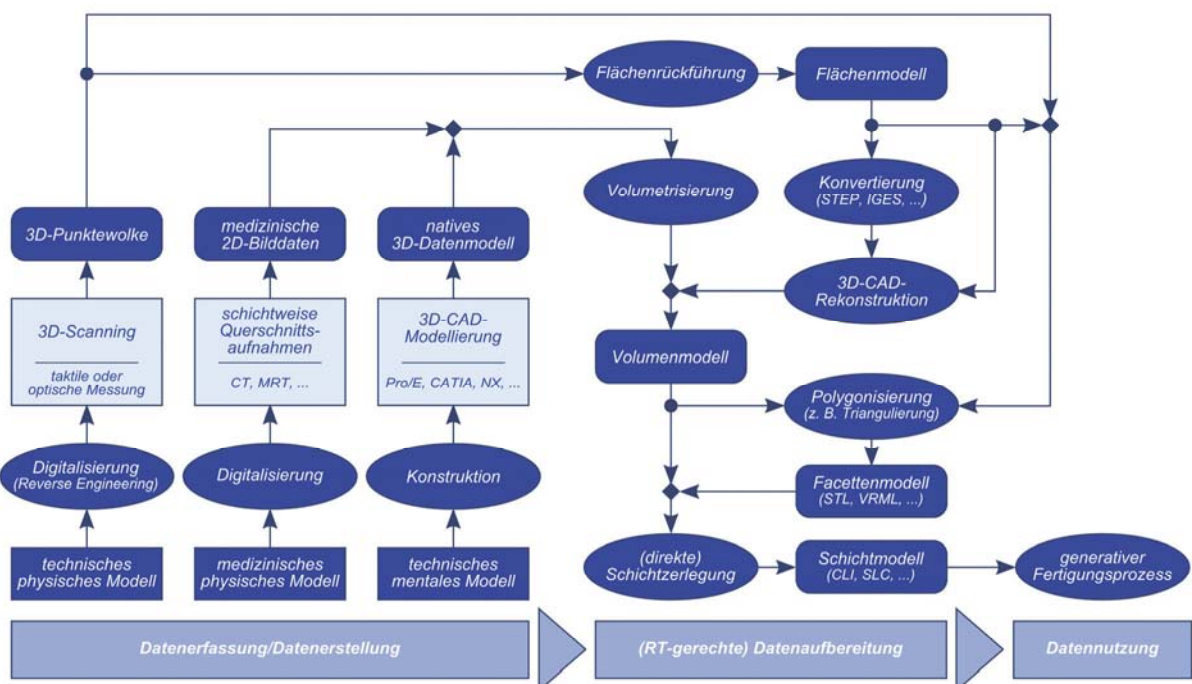


Abb. 2-5: Datenmodellierung für den Einsatz generativer Fertigungsverfahren