

**Flexible Integration von  
Rapid Prototyping  
Prozessketten in die  
Produktentstehung**

vorgelegt von  
Diplom-Ingenieur  
Stefan Dreher  
aus Heidelberg

Von der Fakultät V ‚Verkehrs- und Maschinen-  
systeme‘ der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Herr Prof. Dr.-Ing. H.-J. Meyer

Berichter: Herr Prof. Dr.-Ing. F.-L. Krause

Berichter: Frau Prof. Dr.-Ing. L. Blessing

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 14. September 2004

Berlin 2005  
D 83



## VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Berlin und am Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik Berlin (IPK).

Für die Bereitschaft zur Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. H.-J. Meyer. Die Aufgabe des Zweitberichters hat dankenswerter Weise Prof. Dr.-Ing. L. Blessing übernommen. Mein Dank gilt insbesondere Prof. Dr.-Ing. F.-L. Krause, dem Leiter des Bereiches Konstruktionstechnik am IPK Berlin für die Unterstützung und konstruktive Kritik im Rahmen der Erstellung dieser Arbeit. Darüber hinaus bin ich außerordentlich dankbar für die Jahre interessanter und abwechslungsreicher Zusammenarbeit.

Die Mitarbeiter der Abteilung Technologische Planungssysteme haben in zahllosen konstruktiven Gesprächen viele Anregungen gegeben, ein gutes Arbeitsklima geschaffen und waren jederzeit bereit, an der Entwicklung neuer Ansätze und Ideen mitzuwirken. Herrn Michael Ciesla habe ich die Einführung in die Thematik und eine hervorragende Anleitung zu wissenschaftlicher Arbeit zu verdanken. Meinem Kollegen Philip Elsner danke ich für die hervorragende, bereichsübergreifende Zusammenarbeit auf dem Gebiet des Rapid Prototyping. Armin Ulbrich danke ich für seine konstruktiven Anregungen.

Durch ihre tatkräftige Unterstützung haben die Studierenden Bailiang Zhang, Alexander Timm und Timo Gleichner bei der Realisierung von RP-Projekten und der Softwaremodule einen wertvollen Beitrag zur vorliegenden Arbeit geleistet.

Meine Familie und Freunde haben mir den Rahmen geschaffen, um diese Arbeit verwirklichen zu können, durch Geduld und Verständnis, aber auch Ermahnung und Ermunterung. Einen Dank von Herzen möchte ich ihnen dafür aussprechen.

Stefan Dreher

Berlin, den 21.2.2005



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>0</b>	<b>English Abstract</b> .....	<b>i</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b> .....	<b>4</b>
	2.1.1 <i>Begriffe und Definitionen</i> .....	4
	2.2 Entstehung generativer Fertigungstechnologien.....	7
	2.3 Übersicht der generativen Verfahrensprinzipien .....	8
	2.4 Einsatz generativer Fertigungsverfahren in der Produktentstehung ..	12
	2.5 Informationstechnische Unterstützung .....	18
	2.6 Schnittstellenformate .....	21
	2.7 Bewertung verfügbarer Methoden und Systeme.....	23
	2.7.1 <i>Durchführung von RP Projekten</i> .....	27
<b>3</b>	<b>Präzisierung der Zielsetzung</b> .....	<b>29</b>
	3.1 Hauptziel .....	29
	3.2 Vorgehensweise .....	30
	3.3 Abgrenzung .....	31
<b>4</b>	<b>Konzept zur ganzheitlichen Unterstützung physischer Produktverifikation</b> .....	<b>33</b>
	4.1 Anforderungen an das Konzept .....	33
	4.2 Bestandteile des Gesamtkonzeptes.....	34
	4.3 Vorschlag einer Klassifizierung .....	36
	4.3.1 <i>Ergebnisorientierte Klassifizierung von RP-Technologieketten</i> .....	36
	4.3.2 <i>Kategorisierung von Rapid Prototyping Projekten</i> .....	38
	4.3.3 <i>Unterstützung strategischer Entscheidungen</i> .....	45
	4.4 Entwicklung einer Methode zur Konfiguration generativer Technologieketten.....	51
	4.4.1 <i>Einleitung</i> .....	51
	4.4.2 <i>Ansatz</i> .....	52
	4.4.3 <i>Produktgetriebene Ableitung des Zielsystems</i> .....	54

4.4.4	<i>Aufbereitung von Prozessinformationen</i>	62
4.4.5	<i>Auswahl geeigneter Prozesse</i>	64
4.4.6	<i>Anordnung der Prozesse</i>	68
4.4.7	<i>Abstimmung der Technologiekette</i>	73
4.5	Entwicklung eines RP-Datenmodells	77
4.5.1	<i>Einleitung</i>	77
4.5.2	<i>Datenmodellierung</i>	78
4.5.3	<i>Aufbau der Objektstrukturen</i>	81
4.5.4	<i>Schaffung eines prozessübergreifenden Schnittstellenformates</i>	85
4.6	Synthese zum Gesamtkonzept	91
<b>5</b>	<b>Prototypische Systemimplementierung</b>	<b>97</b>
5.1	Konfigurationsmodul RPSelector als Anwendungssystem	97
5.1.1	<i>Anwendungsbezogene Anforderungen</i>	97
5.1.2	<i>Systemarchitektur</i>	97
5.1.3	<i>Prozess- und Materialspezifikation</i>	99
5.1.4	<i>Ergebnispräsentation</i>	101
5.2	RPSelector als iViP-Service	103
5.2.1	<i>Grundlagen der iViP Plattform</i>	103
5.2.2	<i>Angepasste Systemarchitektur</i>	105
5.2.3	<i>Integration der Anwendungssysteme</i>	107
<b>6</b>	<b>Anwendungsszenario</b>	<b>110</b>
6.1	Industrielles Anwendungsbeispiel	110
6.2	Erkenntnisse aus der Anwendung	112
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>114</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>116</b>

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Bild 1-1: Heutiger technologischer Ablauf von RP-Projekten .....	2
Bild 2-1: Typische Einsatzfelder physischer Prototypen .....	6
Bild 2-2: Verfahrensprinzipien generativer Fertigung .....	7
Bild 2-3: Klassifizierung nach Aggregatzustand (nach Kruth) .....	8
Bild 2-4: Klassifizierung nach Wirkprinzip (nach Kruth) .....	9
Bild 2-5: Entwicklung der Verfahrenseigenschaften 1991 – 2001 (nach Gebhardt) .....	11
Bild 2-6: Phasenmodell der Produktentstehung .....	13
Bild 2-7: Prozessreihen in RP-Projekten .....	14
Bild 2-8: Anordnung von Bauteilen im Bauraum von RP-Anlagen .....	20
Bild 2-9: Segmentbasiertes Adaptive Slicing (nach Ciesla) .....	21
Bild 2-10: STL Beschreibung .....	22
Bild 2-11: Folgen von Änderungen .....	27
Bild 3-1: Management von Prototyping Aktivitäten [] .....	29
Bild 3-2: Angestrebte Auswirkungen der entwickelten Vorgehensweise .....	30
Bild 4-1: Gesamtkonzept .....	35
Bild 4-2: Strukturierung nach Ergebnis .....	37
Bild 4-3: Strukturierung nach Prozesseigenschaften .....	38
Bild 4-4: Anwendungsorientierte Kategorien von RP-Projekten .....	43
Bild 4-5: Entscheidungsebenen bei der Durchführung von RP-Projekten .....	46
Bild 4-6: Strategische Einsatzzweckplanung .....	49
Bild 4-7: Abstrahiertes Basissystem zur Konfiguration .....	54
Bild 4-8: Struktur der Produktfunktionen .....	55
Bild 4-9: Produktmerkmale steuern die Definition von Technologieketten ..	57
Bild 4-10: Vorgehensweise bei der Projektdefinition .....	59
Bild 4-11: Phasenspezifische Eigenschaften .....	61
Bild 4-12: Prozessanalyse .....	63
Bild 4-13: Anwendungsgebiete von Bewertungsmethoden .....	65
Bild 4-14: Definition von Fuzzy Sets .....	68
Bild 4-15: Alternative Lösungen für die Anordnung der Prozesse .....	70
Bild 4-16: Zuordnung der Anforderungen .....	72

Bild 4-17: Definition von Korrekturprozessen .....	76
Bild 4-18: Grobdarstellung des Datenmodells .....	79
Bild 4-19: SADT-Diagramm.....	80
Bild 4-20: Objekt RPProject und dessen Bindungen .....	81
Bild 4-21: Rollenkonzept für den Datenzugriff .....	82
Bild 4-22: Das Objekt RPPrototype.....	83
Bild 4-23: Inhalte der Klasse ‚Prozess‘ .....	84
Bild 4-24: Objektstruktur RP-Service .....	85
Bild 4-25: Schnittstellenbedarf in RP-Projekten.....	87
Bild 4-26: Definition von XML Dokumenten .....	88
Bild 4-27: Beispielhafte Struktur der Projektdatei .....	90
Bild 4-28: Repräsentation von Formelementen .....	92
Bild 4-29: Aktualisierungskonzept .....	93
Bild 4-30: Workflow des Geschäftsprozesses ‚Vermittlung‘ .....	94
Bild 5-1: Systemarchitektur des Konfigurationsmoduls .....	99
Bild 5-2: Materialspezifikation .....	100
Bild 5-3: Prozessspezifikation .....	101
Bild 5-4: Übersicht der Erfüllungsgrade gestellter Anforderungen.....	102
Bild 5-5: Begründung für nicht erfolgte Prozesskonfiguration .....	103
Bild 5-6: iViP-Gesamtarchitektur.....	104
Bild 5-7: Systemarchitektur des iViP-RPSelector .....	106
Bild 5-8: iViP-RPMonitor.....	107
Bild 5-9: Übergabe der Auswahlergebnisse an den iViP-RPBroker .....	108
Bild 6-1: Ground Connector Bracket.....	110

## TABELLENVERZEICHNIS

Nummer	Seite
Tabelle 2-1: Qualitativer Vergleich der Methoden zur Produktverifikation..	17
Tabelle 2-2: Eigenschaften von RP-Schnittstellenformaten.....	23
Tabelle 2-3: Charakterisierung der Ansätze zur Prozessauswahl .....	25
Tabelle 2-4: Ursachen und Folgen mangelhafter Integration.....	28
Tabelle 4-1: Eigenschaften der Klassen von RP-Projekten .....	44
Tabelle 4-2: Betriebswirtschaftliche Aspekte .....	51
Tabelle 4-3: Verwendbarkeit bauteilbezogener Beschreibungen .....	58
Tabelle 4-4: Eignung organisatorischer Parameter .....	60
Tabelle 4-5: Zuordnung von Wertebereichen bei der Meilensteindefinition.	62
Tabelle 6-1: Beteiligte Partner der Evaluierung.....	112



## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

<b>RP</b>	Rapid Prototyping
<b>RT</b>	Rapid Tooling
<b>ASCII</b>	American Standard Code for Information Interchange
<b>CAD</b>	Computer Aided Design
<b>CAM</b>	Computer Aided Manufacturing
<b>CLI</b>	Common Layer Interface
<b>SLC</b>	Slicing Contour Format 3D Systems Inc.
<b>SML, SSL</b>	Slicing Format Stratasys Inc.
<b>STEP</b>	Standard for the Exchange of Product Model Data
<b>STL</b>	Urspr. ‚Standard Transfer Language‘, später auch als ‚Stereolithography Tessellation Language‘ definiert. Dateiformat für die →triangulierte Darstellung von Bauteilgeometrien
<b>SLS</b>	Selektives Laser Sintern
<b>LLM</b>	Layer Laminated Manufacturing
<b>LOM</b>	Layer Object Manufacturing
<b>CORBA</b>	Common Object Request Broker Architecture. Ziel: Architektur für die Verteilung und Zusammenarbeit objektorientierter Softwarebausteine in heterogenen und vernetzten Systemen. ORB: Kommunikationsschnittstelle zwischen den Objekten
<b>XML</b>	EXtensible Markup Language



## GLOSSAR

<b>Adaptive Slicing</b>	Veränderliche Schichtdicken beim generativen Bauprozess
<b>Beam Offset</b>	Die Verschiebung des Laserstrahlmittelpunktes um den halben Durchmesser bei den lasergestützten generativen Fertigungsverfahren
<b>Constraint</b>	Zwangsbedingungen an Form- und Lageparameter, die durch Gleichungen und Ungleichungen dargestellt werden
<b>Daten</b>	Fakten ohne Interpretation
<b>Design Freeze</b>	Einfrieren eines definierten Entwicklungsstandes eines Bauteils oder einer Baugruppe
<b>Eigenschaftsprofil</b>	Menge von Einzelwerten qualitativen und quantitativen Typs, die den Eigenschaften von Objekten zugeordnet werden
<b>Entwurf</b>	Festgelegte Baustruktur einer Lösung
<b>Gestalt</b>	Form, Lage, Größe und Anzahl technischer Gebilde
<b>Gestaltungsraum</b>	Variationsmöglichkeiten unter Einhaltung der definierten Anforderungen zur Erfüllung einer bestimmten Aufgabe
<b>Inferenz</b>	Schlußfolgerung
<b>Information</b>	Schlußfolgerungen aus der Analyse und Interpretation von Daten
<b>Informationslogistik</b>	Das zielgerichtete Verteilen von Informationen
<b>Konstruktion</b>	Gestaltung unter Berücksichtigung der gestellten Anforderungen
<b>Konstruktionsraum</b>	Teilraum des dreidimensionalen euklidischen Raumes, der für die aktuell durchzuführende Konstruktion zur Verfügung steht.
<b>Layer</b>	Eine Schicht definierter Stärke beim generativen Aufbau von Werkstücken
<b>Lösung</b>	Definierter Zustand unter Einhaltung der definierten Anforderungen
<b>Lösungskonzept</b>	prinzipielle Lösung; Funktionen + gestalterische + stoffliche Lösung
<b>Lösungsraum</b>	Bereich einer Konstruktionslösung, den der Konstrukteur innerhalb der Konkretisierung heranzoomt bzw. wieder verkleinert
<b>Methode</b>	Planmäßiges Vorgehen zum Erreichen eines bestimmten Ziels
<b>methodisches Konstruieren</b>	Planmäßiges und schrittweises Erarbeiten der Herstellungs- und Nutzungsunterlagen
<b>Modell</b>	Materielles oder immaterielles Gebilde zur Repräsentation eines Originals zu einem bestimmten Zweck
<b>Polyeder</b>	Ein ausschließlich durch ebene Flächen begrenzter Körper
<b>Produkt</b>	Erzeugnis, das als Ergebnis des Entwickelns und Konstruierens hergestellt und angewendet wird.
<b>Produkteigenschaften</b>	Beobachtbare, meßbare Größen

<b>Produkt-entstehung</b>	Produkt- und Produktionsentwicklung
<b>Produkt-entwicklung</b>	Produktplanung, -konstruktion und –erprobung
<b>Produkt-merkmal</b>	Gestaltungselement eines Produktes hinsichtlich Formgebung, Aussehen, Funktion oder Ausprägung von Stammdaten
<b>Produktstruktur</b>	Gliederung eines Produkts in Baugruppen, -teile und Einzelteile
<b>Prozess</b>	Gesamtheit von in Wechselbeziehungen stehenden Abläufen, Vorgängen und Tätigkeiten, durch welche Werkstoffe, Energien und Informationen transportiert oder umgeformt werden
<b>Prozessfluss</b>	Erweiterung der Prozesskette von einer linearen, sequentiellen Struktur hin zu vernetzten und teilparallelen Prozessen
<b>Prozesskette</b>	Informationstechnisch verbundene Folge von Prozessen, so dass keine Medienbrüche auftreten
<b>Qualität</b>	Realisierte Beschaffenheit einer Einheit bezüglich einer Forderung
<b>System</b>	Gesamtheit geordneter Elemente, die aufgrund ihrer Eigenschaften durch Relationen verknüpft und durch Systemgrenzen umgeben sind
<b>Systematik</b>	Ganzheitliche Betrachtung mit ordnenden Gesichtspunkten bzw. Merkmalen
<b>Toleranz</b>	zulässiger Abweichungsbereich von einer Sollgröße
<b>Triangulation</b>	Ersetzen von analytisch beschriebenen Oberflächen durch kleinste Dreiecke. Die Qualität der ersatzweisen Darstellung wird durch die Parameter max. Sehnenlänge und max. Abweichung gesteuert
<b>Verifikation, Versuch</b>	Der Vergleich von Prototypeneigenschaften mit den im Lastenheft geforderten Werten durch gezielte Belastung oder Beurteilung
<b>Virtuell</b>	der Möglichkeit nach vorhanden; denkbar
<b>Warp, Warping</b>	Verzugsform bei den generativen Verfahren, ähnlich dem Bimetall-Effekt
<b>Wirkprinzip</b>	Grundsatz, von dem sich eine bestimmte Wirkung zur Erfüllung der Funktion ableitet





## 0 English Abstract

One of the industry's answers to shorter product lifecycle, an increasing number of product variants and distributed product development is the usage of methods which offer the potential to come to early decisions concerning product styling, design and manufacturing. The implementation of Simultaneous Engineering and Frontloading techniques have shown that the cooperation between product and process engineers, as well as the intense exchange of information between all contributing departments, become one of the most critical factors to stay competitive in global markets. Besides communication tools, physical and virtual prototyping are widely accepted as convenient strategies to verify all aspects and characteristics of currently developed products. Additionally, production planning benefits from having an early input regarding the requested product behaviour.

Physical prototyping is referred to as a process of building pre-production models of a product to test various aspects of its design. Usually it is slow and expensive. Rapid Prototyping (RP) techniques are defined as methods that allow to produce physical prototypes in a layer-wise manner within hours, enabling product developers to discuss efficiently with non technical personnel, improve product design cooperatively in all development phases and shorten the effort and time for product verification.

Rapid Prototyping, also known as generative manufacturing, which inspired engineers due to its tool free build process, allowing the fabrication of geometrically complex structures, started as a fast alternative process in the domain of manual model making. Since then rapid prototyping methods have developed into effective tools for the acceleration and improvement of product development. Today, the amount of facilities sale confirms high industrial demand of RP systems. Many new ideas have come up, many patents have been deposited and no less than about 30 new processes have been invented.

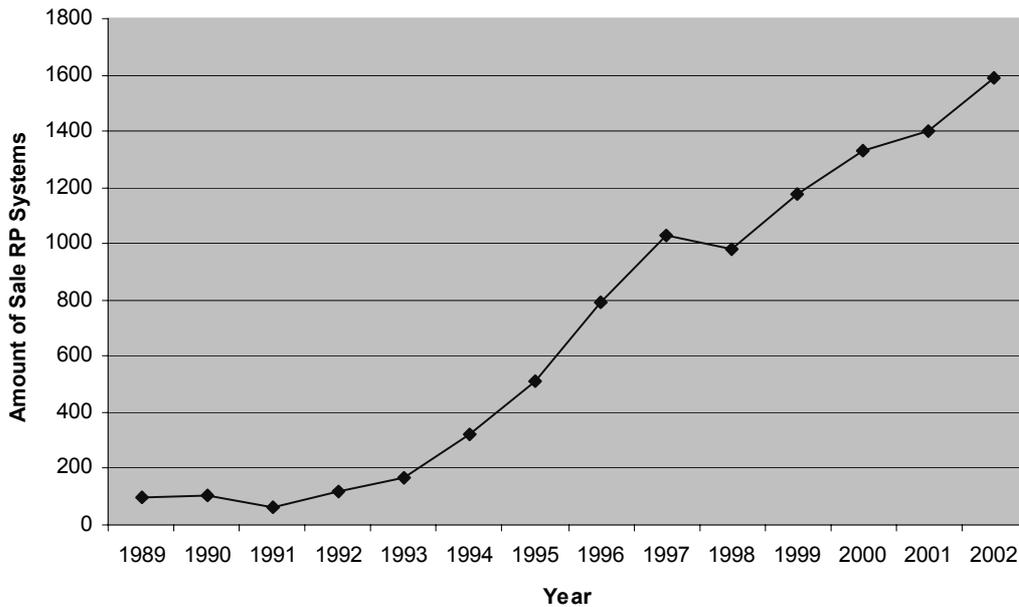


Figure i: Worldwide sales of RP equipment [5]

In contrast to manufacturing process development, the data integration of Rapid Prototyping and product development has not been developed adequately. Still, RP projects are conducted on the basis of incomplete and inconsistent information, using unstructured decisions. In order to achieve a better information and work flow, two main aspects have to be considered:

- Organisational integration of work processes and
- Technological integration of generative manufacturing processes.

Integrating RP on an organisational level implicates the chaining of business processes. Product verification always starts with the definition of a subset of product characteristics that have to be checked. Taking all relevant criteria into account, enterprises have to decide whether to perform the evaluation process with either the employment of virtual or physical or even mixed prototyping activities. A verification project comprises requirement evaluation, selection, planning and control of prototype manufacturing process chains, verifying the physical prototypes under given conditions and finally sending back the conclusions in order to initiate product modification.

The aim of this thesis is to deliver a concept and an exemplary implementation for the integration of Rapid Prototyping activities. Regarding Rapid Prototyping projects, the concept includes the internal integration of all project tasks and the external integration into product development, thus eliminating many deficits of today's mode of operation.

Based on a worldwide investigation of RP implementations and research activities, the present state of the art is described briefly, separating the two fields *process execution* and *information technology*. The chapter concludes with a critical analysis of current methods and systems, leading to the extraction of shortcomings of today's Rapid Prototyping projects. The overall result of a problem categorization reveals the main fields where an improvement is necessary. As a result, in the next chapter an extensive concept is developed that includes three main modules:

1. New RP process and project classification
2. Novel method for RP process chain configuration
3. Integration of all RP activities based on a RP specific data model and corresponding interface

Existing classification systems of generative processes are based on either material type or physical curing mechanisms. They do not take into account the specific product characteristics that are produced by the distinctive layer-wise manufacturing method. Therefore, a new classification is proposed with the aim to form a basis for decision support and integration of activities. Using the developed structure, rapid prototyping methods and subsequent processes can be grouped, allowing the selection of adequate process chains which are capable of creating the physical prototype in the best available way. Additionally, a project classification is proposed, emphasising requirements, conditions and work flows of verification projects. Project planning can be simplified through the usage of this structure as a reference.

RP process chain configuration often turns out to be the most important project task. Resulting prototype functionality and hence the conduction of specified verification procedures become worthless if the requirements originating in product design are not mapped correctly to manufacturing process specifications. Therefore the method of functional design is adapted to transform general requirements into product functions, which get represented as multiple product properties in a second step. These properties serve as criteria for the selection and configuration of RP process chains.

A data model is formed that is capable to serve as an information hub during the whole RP project, representing much more than geometry. The main objects contained in the hub are RPProduct, RPProcess, RPProject and RPVerification. The objects are related to each other, offering an assignment of product geometry and characteristics to manufacturing processes and to verification methods and results. Several solution alternatives are discussed and available approaches are included where possible.

Finally, an approach for the integration of all activities, employing the RP data model and utilizing the method for RP process chain configuration, is presented.

XML has been selected for data exchange, due to its flexibility and readability. This approach offers new dimensions in the cooperation of Original Equipment Manufacturers, their suppliers and Rapid Prototyping service bureaus. Interfaces to a wide range of systems, including CAD, PDM and ERP applications can be implemented within short time periods.

A prototypical implementation of a software module for the interactive configuration of RP process chains has been done. Two variants of an adequate software architecture are presented. The first implementation forms a stand-alone product for company-wide internal usage. Additionally, in a second step this software has been integrated into a comprehensive platform for product creation. The project framework and integration platform are given by iViP (Integrated Virtual Product Creation), coordinated by IPK Berlin and sponsored by German Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, project key 02PL10xxx) in the years 1998 – 2002.

The software components get evaluated in an industrial use case, including all the above mentioned parties that contribute to physical product verification. As a result, it could be shown that the developed approach offers the potential to prevent uncoordinated work, simplify RP project execution and reduce time and effort in all phases of product development. Special thanks go to Mr. Alexander Timm and Mr. Bailiang Zhang for supporting the development of the software modules.

# 1 Einleitung

Die industrielle Serienproduktion ist gekennzeichnet durch eine zunehmende Variantenvielfalt und steigende Komplexität der Produkte, verbunden mit schnell aufeinander folgenden Innovationszyklen und den damit einhergehenden verkürzten Produktentwicklungszeiten [1]. Die steigende Qualifizierung der internationalen Konkurrenten zwingt europäische Unternehmen zur kontinuierlichen Erschließung neuer Alleinstellungsmerkmale in Forschung und Entwicklung und deren Umsetzung im Sinne einer Technologieführerschaft [2]. Der Erfolg führender Unternehmen beruht nicht selten auf der konsequenten Anwendung ganzheitlicher Methoden und der Verwendung von physischen und virtuellen Prototypen der zu entwickelnden Produkte [3, 4].

Prototypen werden in diesem Rahmen als Hilfsmittel verstanden, die in unterschiedlichsten Bereichen der Produktentstehung angewandt werden. Sie unterstützen die menschliche Innovationskraft, liefern die Grundlage für interdisziplinäre Diskussionen, fördern Entscheidungen bezüglich der Produktgestaltung und -funktionalität und sichern einen fehlerarmen Produktionsanlauf.

Eine neue Verfahrensklasse zur schnellen Herstellung physischer Bauteile, die generativen Fertigungsverfahren, hat in den letzten 15 Jahren die Möglichkeiten der physischen Produktverifikation stark verändert. Sie werden meist in Technologieketten eingebunden, zusammenfassend als *Rapid Prototyping* bezeichnet. Aktuelle Daten über die Anzahl der weltweit generativ hergestellten physischen Prototypen zeigen eindeutige Schwerpunkte in der Phase der Produktformgebung und im Bereich der Funktionsprüfung der seriennahen Eigenschaften [5]. Doch die Potenziale der Technologien des *Rapid Prototyping* werden, über die Herstellung geometrischer und funktionaler Prototypen hinaus, zunehmend auch für die Fertigung von Vor- und Kleinserienwerkzeugen genutzt [6].

Projekte zur Produktverifikation auf Basis virtueller oder physischer Prototypen sind durch Interdisziplinarität, hohen Zeitdruck, schnelle Veränderungen in den Rahmenbedingungen der Durchführung und hohe strategische Bedeutung gekennzeichnet. Innerhalb eines Verifikationsprojektes sind zahlreiche Entscheidungen zu treffen, die den Gesamterfolg wesentlich beeinflussen, wie Bild 1-1 zeigt. Diese Rahmenbedingungen stellen hohe Ansprüche an die Planung und Durchführung der Rapid Prototyping Projekte.

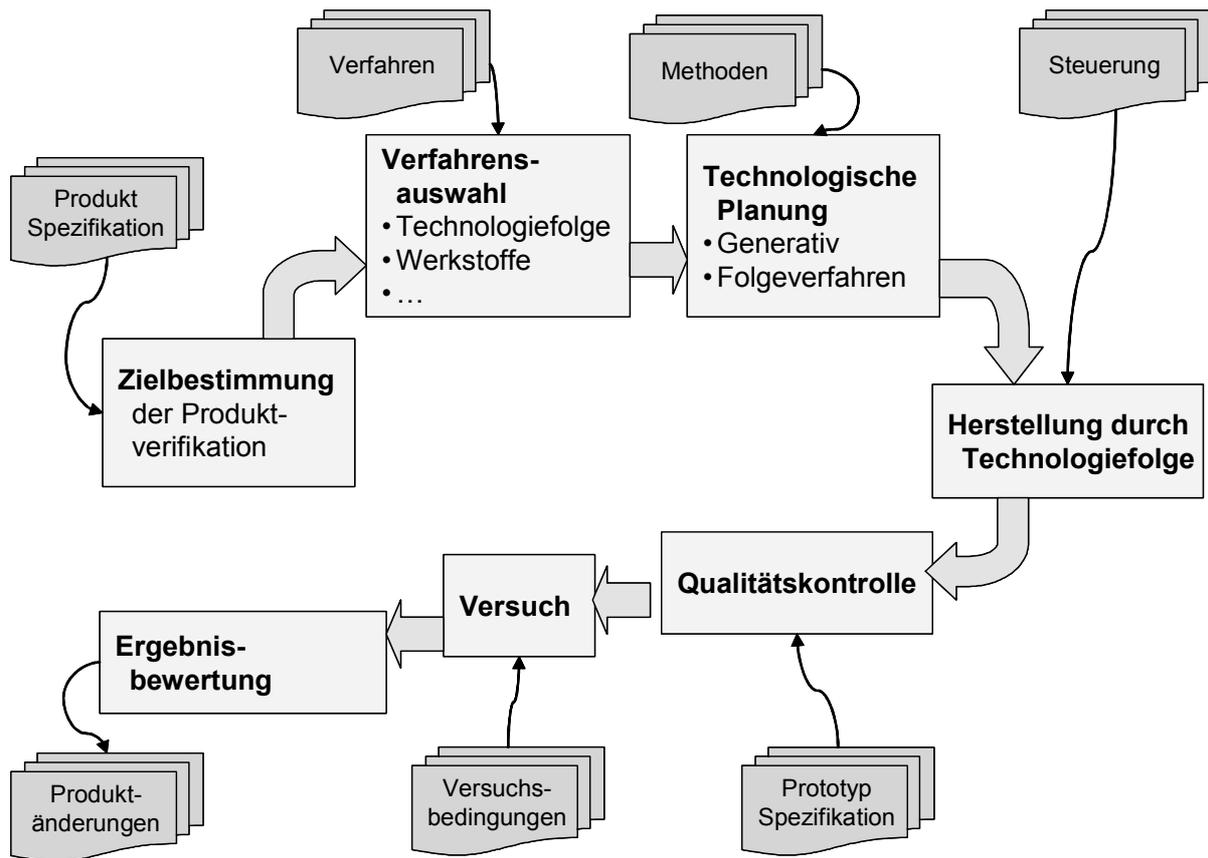


Bild 1-1: Heutiger technologischer Ablauf von RP-Projekten

Beim physischen Prototyping sind zwei Transformationen zu leisten. Die erste überführt das digitale Modell in ein physisches Bauteil, wobei zahlreiche Randbedingungen zu beachten sind. Nach der Prüfung anhand der vorgesehenen Versuchsbedingungen sind Erkenntnisse in die Produktentwicklung zurück zu transformieren, um ausgewählte Produkteigenschaften abzusichern und Entscheidungen oder Änderungen einzuleiten. Die mangelhafte Unterstützung dieser Transformationen führt oft zu einer ineffizienten Vorgehensweise und geringer Verwendbarkeit der Ergebnisse.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich daher auf die Integration der physischen Produktverifikation auf der Basis generativer Technologieketten. Dabei ist sowohl die innere Verkettung der Arbeitsschritte als auch die Anbindung an die Produktentstehung zu berücksichtigen. Wichtige organisatorische und informationstechnische Voraussetzungen zur Erreichung einer durchgängigen Unterstützung aller Aktivitäten der physischen Produktverifikation sollen im Rahmen dieser Arbeit entwickelt werden.

Hierzu wird zunächst der Stand der Technik im Bereich der physischen Produktverifikation dargestellt und insbesondere die informationstechnische Unterstützung aller Prozessschritte auf Defizite hin untersucht. In einer kritischen

Betrachtung der vorgefundenen Methoden und Systeme werden notwendige Schwerpunkte der Arbeit herauskristallisiert. Daraus ergeben sich Zielsetzung und Vorgehensweise für ein ganzheitliches Konzept zur durchgängigen Unterstützung des Rapid Prototyping und dessen Integration in die Produktentwicklung, welches im Hauptteil dieser Arbeit entwickelt wird.

Die prototypische Realisierung eines Softwaremoduls zur Definition von RP-Technologieketten dient der Konzeptevaluierung. Abschließend wird ein industrielles Anwendungsbeispiel vorgestellt, das im Rahmen des Leitprojektes iViP<sup>1</sup> durchgeführt wurde.

---

<sup>1</sup> „innovative Verfahren für die integrierte Virtuelle Produktentwicklung“ koordiniert durch das Fraunhofer IPK Berlin, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, Projektnr. 02PL10xxx, 1998 – 2002

## 2 Stand der Technik

### 2.1.1 Begriffe und Definitionen

Vorbereitend ist der Begriff des Prototyps zu klären. Prototypen haben Modellcharakter und sind daher durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

- Vereinfachtes Abbild einer komplexen Realität,
- Zweckorientierung,
- Trennung des für die Aufgabe Wesentlichen vom Unwesentlichen,
- Widerspiegelung einer Untergruppe von Eigenschaften des Produktes und
- Verhalten lässt Rückschlüsse auf das Produktverhalten zu.

Im Rahmen der Produktentstehung stehen Verfahren der virtuellen Produktverifikation denen der physischen Überprüfung gegenüber. Unter dem Begriff des Virtuellen Prototyping werden alle Methoden verstanden, die eine digitale Überprüfung von Produkt- und Prozesseigenschaften ermöglichen [7, 8]. Beispiele sind das Digital Mock Up (DMU) zur Kollisionsbetrachtung komplexer Produkte oder zur Überprüfung der Montagepfade von Produktkomponenten [9]. Die Vorteile der Systeme liegen in einer guten informationstechnischen Einbindung und einem vergleichbar niedrigen Durchführungsaufwand.

Die Vorteile physischer Prototypen zeigen sich überall dort, wo die Nähe zum realen Produkt gefragt ist. Dies ist beispielsweise bei Fragen der menschlichen Rezeption

oder der Überprüfung serienidentischer Eigenschaften einzelner Bauteile der Fall. Daher sind physische Modelle für die Bewertung der Formgebung und des funktionalen Produktverhaltens sehr gut geeignet. Im Anschluss an die Produktentwicklung lassen sich ausgewählte Eigenschaften der für die Herstellung vorgesehenen Werkzeuge, beispielsweise für das Spritzgießen und die Blechumformung, sehr vorteilhaft anhand physischer Prototypen überprüfen [10].

Physische und virtuelle Prototypen können einander abwechseln, ergänzen oder eine neue, gemeinsame Einheit bilden, die als 'Mixed Reality' bezeichnet wird. Mixed Reality (MR) beschreibt die Möglichkeit, eine reale Umgebung mit einer virtuellen Umgebung zu verknüpfen. Augmented Reality (AR), die Überlagerung realer Welten mit virtuellen Daten, sowie Augmented Virtuality (AV), die Überlagerung virtueller Welten mit realen Daten, sind Formen von Mixed Reality [11].

Nach GEBHARDT werden unter dem Begriff *Rapid Prototyping Verfahren* alle additiv oder generativ arbeitenden Verfahren zusammengefasst [12]. Auf diese Weise ergibt sich eine klare Abgrenzung der Kerntechnologie der Verfahren gegenüber den werkstoffabtragenden, subtraktiven Verfahren. In der Regel erreichen die Verfahren die Materialaddition durch schichtweises Arbeiten, wie später noch detailliert erläutert wird. Da der Begriff *Rapid Prototyping* auch für die Entwicklung von Softwaremodulen verwendet wird, ist vielfach eine eindeutige Begriffsbildung angeregt worden [13]. Bezeichnungen wie Solid Freeform Manufacturing oder Solid Freeform Fabrication zeigen, dass oft versucht wurde, Alleinstellungsmerkmale durch die Erfindung immer neuer Bezeichnungen zu erreichen. Im Zuge der Einrichtung von Dienstleistungszentren, die ausschließlich auf die Herstellung physischer Prototypen spezialisiert sind, wurde die Definition oft ausgeweitet. So verstehen viele Anwender den Begriff als eine Bezeichnung aller Arbeitsschritte, die der schnellen Herstellung prototypischer Bauteile dienen. Ob es sich dabei um generative oder konventionelle Verfahren handelt, wird hier vernachlässigt. Oft wird in diesem Zusammenhang das Hochgeschwindigkeitsfräsen (HSC) angeführt. Es wurde in den letzten Jahren erheblich verfeinert und grenzt in einigen Aspekten an die generative, schichtweise Fertigung. Parallelen können darin gesehen werden, dass automatisch arbeitende Planungswerkzeuge oftmals die Werkzeugwege auf Schnittebenen definieren, was die Betrachtung von Kollisionen stark vereinfacht.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die generativen Verfahren als Kernelement der Herstellung physischer Modelle, denn nur sie bieten eine hohe Integrationsfähigkeit, bedingt durch das weitgehende Fehlen geometrischer Restriktionen und das Entfallen der Spann- und Fixierplanung.

Es sollen folgende Definitionen festgehalten werden:

*Generative Verfahren* erzeugen physische Gegenstände durch inkrementelles, meist schichtweises, Hinzufügen von Material. Sie sind an ein spezifisches Wirkprinzip gebunden. Durch den Verfahrenstyp wird ein bestimmter Aufbau der entsprechenden Fertigungseinrichtungen vorgegeben.

Unter *Rapid Prototyping* (RP) werden alle Prozessschritte zur Herstellung physischer Prototypen zusammengefasst. Demnach beinhaltet der Begriff im Kontext der Produktentstehung neben dem Einsatz von generativen Verfahren alle Vor- und Nachbearbeitungsschritte, die zur Erzeugung des Werkstückes notwendig sind.

*RP-Projekte* durchlaufen alle Schritte von der Anforderungsdefinition und Versuchsplanung über die Verfahrensauswahl und Prozessplanung bis hin zur Qualitätsprüfung und Verifikation der Funktionen der hergestellten Prototypen.

*Rapid Tooling* (RT) bezeichnet analog zum Rapid Prototyping alle Prozessschritte, die zur generativen Herstellung von Werkzeugen und Formen führen [14, 15]. Die so erzeugten Werkstücke stellen demnach das Werkzeug eines nachfolgenden Formgebungsprozesses dar. Dies kann ein urformender oder auch ein umformender Prozess sein. Weder die Qualität des Werkzeuges noch die Stückzahl der damit produzierten Werkstücke spielen hierbei eine Rolle.

*Rapid Manufacturing* (RM) ist die Übertragung des Ansatzes der additiven Fertigung auf die Serienherstellung von Produkten, die nicht prototypischer Natur sind und direkt an den Endkunden ausgeliefert werden [16].

*Rapid Technologies* bezeichnet konsequenterweise die Zusammenfassung aller Methoden, Werkzeuge und Verfahrensketten, die im Kern eine generative Gestalterzeugung enthalten, mit dem Hauptziel der Verkürzung aller Phasen der Produktentstehung.

Bild 2-1 zeigt abschließend typische Einsatzbereiche physischer Modelle in den Phasen der Produktentstehung.

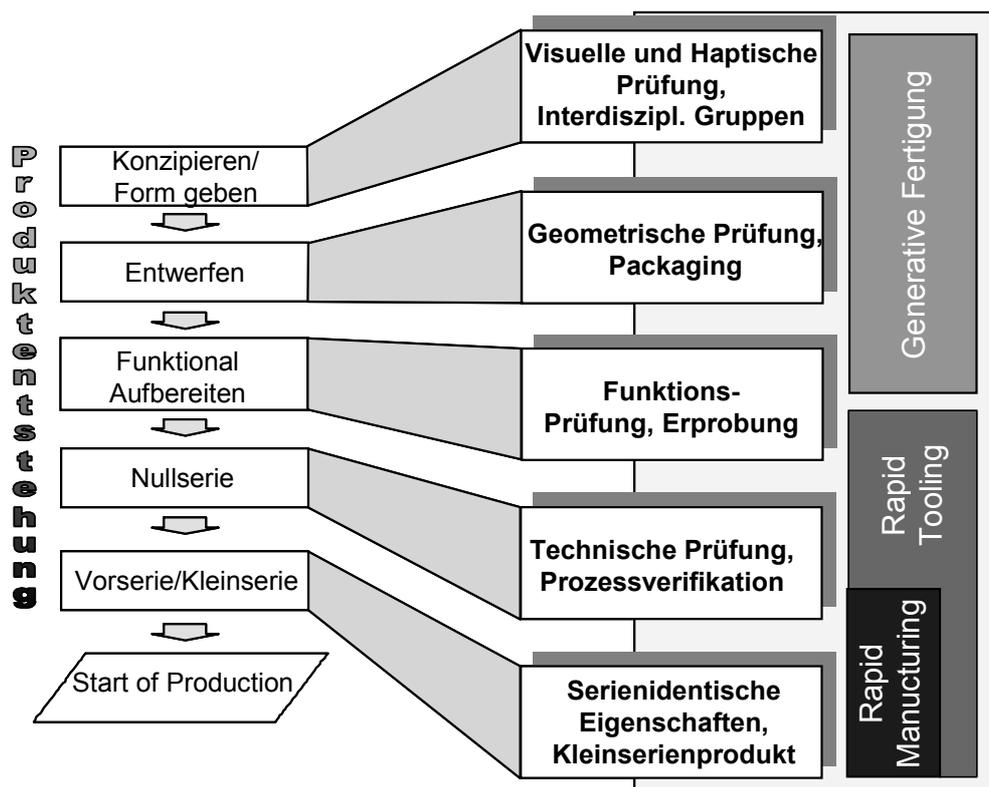


Bild 2-1: Typische Einsatzfelder physischer Prototypen

## 2.2 Entstehung generativer Fertigungstechnologien

Die erste Erwähnung der Idee zur schichtweisen Herstellung dreidimensionaler Bauteile für den industriellen Einsatz stammt aus dem Jahr 1951 von Munz, der die schichtweise lokale Aushärtung von Photopolymeren patentieren ließ<sup>2</sup>. Ein Entwurf des Selektiven Lasersinterns findet sich bei Ciraud im Jahre 1971. Hi-Deo Kodama (1981) und wenig später Charles Hull<sup>3</sup> formulierten als Erste eine realisierbare Maschine für die generative Herstellung von prototypischen Bauteilen, die im Jahr 1987 auf der AUTOFACT Messe in Detroit vorgeführt werden konnte [17].

Konventionelle Fertigungsverfahren erstellen Bauteile durch Urformen, Umformen, Trennen oder Fügen [18]. Im Gegensatz dazu arbeiten die generativen Verfahren in der Regel unabhängig von Werkzeugen und Formen, wie aus Bild 2-2 ersichtlich. Die Formgebung wird ausschließlich durch lokale Verfestigung des verwendeten Materials durch thermische, photonische oder chemische Energie erreicht [19].

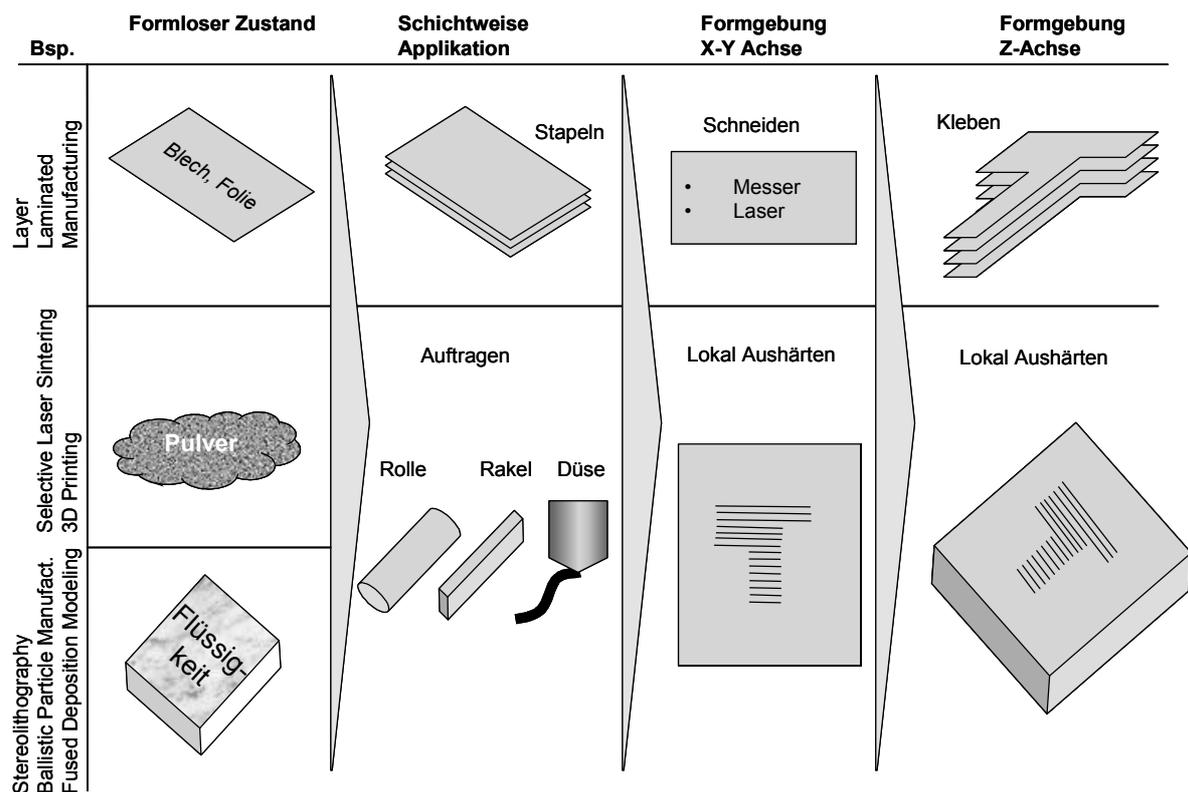


Bild 2-2: Verfahrensprinzipien generativer Fertigung

<sup>2</sup> US Patent 2.775.758

<sup>3</sup> US Patent 4,575,330

Aber auch hier gibt es Ausnahmen, die eine einfache Einteilung erschweren. Das Layer Laminated Manufacturing (LLM) arbeitet zwar mit dem generativen, d.h. schichtweisen Ansatz, der Aufbau von Werkstücken erfolgt jedoch durch Verkleben von vorgefertigten Folien.

Die ausschlaggebende Motivation für die Realisierung von generativ arbeitenden Verfahren im Rahmen der Produktentstehung war zunächst die Suche nach einer Lösung zur dramatischen Zeitverkürzung im industriellen Modellbau.

Die Idee einer Fertigungseinrichtung, die sich neben dem Zeichnungsplotter im Entwicklungsbüro befindet und physische Bauteile in wenigen Minuten und in Originalgröße produziert, war der Beginn für eine Reihe von mehreren hundert Patentanmeldungen und deren Umsetzung.

## 2.3 Übersicht der generativen Verfahrensprinzipien

Eine erste Klassifizierung generativer Verfahren nahm KRUTH im Jahr 1991 vor, wobei er zwei alternative Einteilungen vorschlägt. Anhand des Aggregatzustandes der verwendeten Ausgangsmaterialien ergibt sich die in Bild 2-3 dargestellte Struktur. Ordnet man die Verfahren nach dem physikalischen Wirkprinzip, ergibt sich eine Darstellung, die in Bild 2-4 wiedergegeben ist [20].

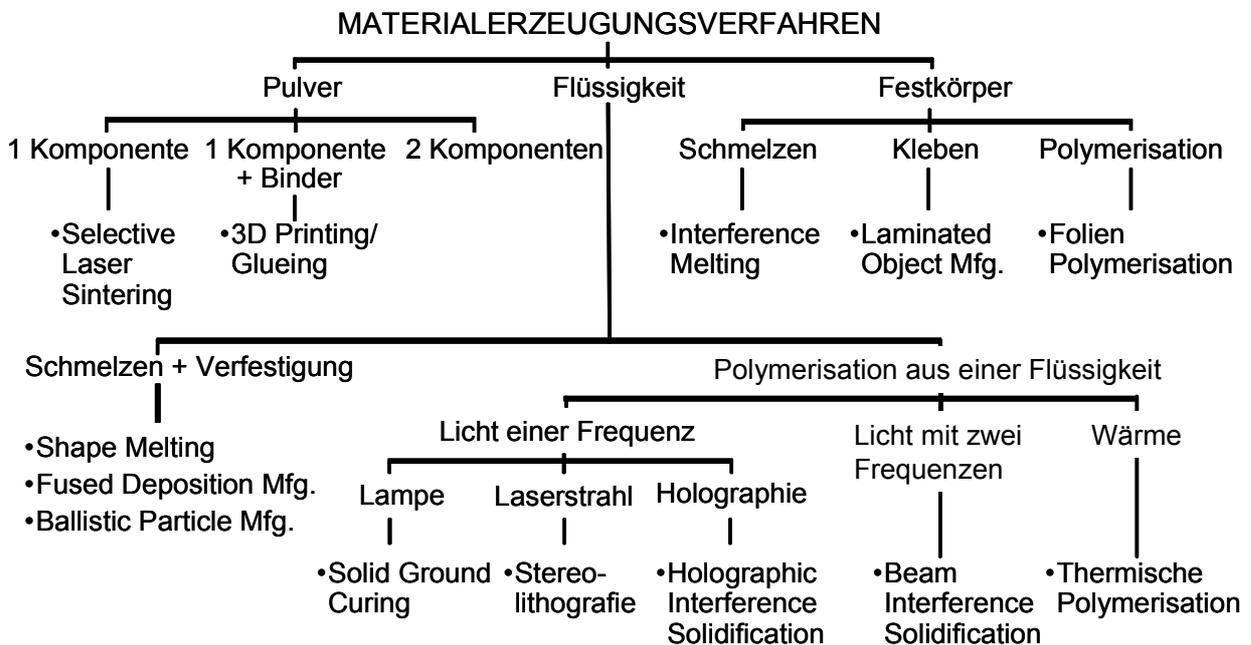


Bild 2-3: Klassifizierung nach Aggregatzustand (nach Kruth)

Alle generativen Verfahren machen sich den Übergang des eingesetzten Materials aus dem formbaren in den festen, geformten Zustand zunutze. Diese Um-

wandlung ist durch Einbringung von Energie zu bewerkstelligen. Leider ist anhand der dargestellten physikalischen Klassifizierungen eine eindeutige Zuordnung nicht immer möglich, wie sich am Selective Laser Sintering zeigt. Der dem Prozess zugeführte Aggregatzustand ist hier zwar *pulverförmig*, doch die Aushärtung geschieht durch Schmelzen und Verfestigen, wie ebenfalls für den Aggregatzustand flüssig beansprucht. Dennoch behält die Klassifizierung ihre Bedeutung und ist bis heute unter Berücksichtigung einiger Erweiterungen gültig.

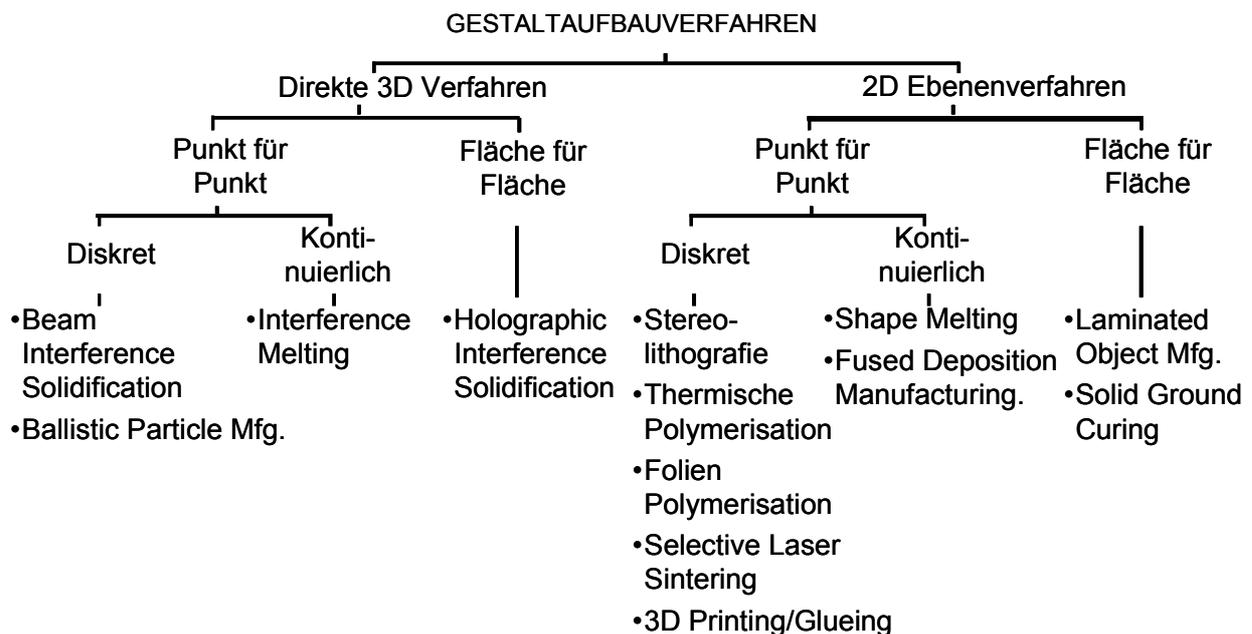


Bild 2-4: Klassifizierung nach Wirkprinzip (nach Kruth)

Im Folgenden soll eine kurze Übersicht der realisierten generativen Verfahrensprinzipien gegeben werden. Das Ziel dieser Aufstellung ist eine grundlegende Klassifizierung der genutzten physikalischen und chemischen Effekte vor dem Hintergrund der Auswahl, Planung und Steuerung der Fertigungstechnologien.

### **Thermische Phasenumwandlung durch Lichtwellen**

Unterschiedliche Laserquellen kommen hier zur Anwendung. Der Laser hat den Vorteil einer geringen räumlichen Ausdehnung, einer hohen skalierbaren Energiedichte und der guten Steuerbarkeit des Verfahrensweges durch schnelle Ablenkspiegel. Für die thermische Phasenumwandlung sind prinzipiell alle Werkstoffe geeignet, die sich kontrolliert und reversibel vom flüssigen in den festen Zustand überführen lassen [21, 22]. Auch Metalle erfüllen diese Forderung. Es entstehen nahezu homogene, dicht gesinterte Werkstücke aus Stahl, Titan und Legierungen [23, 24].

### **Thermische Phasenumwandlung durch Wärmeleitung**

Thermoplastische Materialien sind die Voraussetzung für diese Verfahrensgruppe. Die thermische Phasenumwandlung wird jedoch nicht lokal im Bauraum bewerkstelligt. Der flüssige Werkstoff wird einem Vorratsbehälter entnommen und durch einen beweglichen Kopf lokal aufgebracht. Die Verfestigung erfolgt direkt nach dem Auftragen und führt durch Anschmelzen der Vorgängerschicht zur Verbindung des Bauteils in Z-Richtung. Es sind auch Verfahren entwickelt worden, die beispielsweise den Phasenübergang des Wassers zu Eis für den indirekten Aufbau von Formen nutzen, indem der Eisblock im Anschluss an die Herstellung durch einen speziellen Feingusschlicker umhüllt wird. Dies hat den Vorteil, dass die Anomalie des Wassers im Gegensatz zu üblichen Formwachsen eine Druckbelastung der Form verhindert [25].

### **Chemische Phasenumwandlung durch Lichtwellen**

Chemische Aushärtung erfolgt in der Regel durch die Vernetzung organischer monomerischer Kunststoffe wie beispielsweise Harze, deren Moleküle durch Licht einer ausgewählten Wellenlänge zur Vernetzung angeregt werden [26]. Die mechanischen Eigenschaften der fertiggestellten Bauteile sind durch feine Abwandlungen der Materialzusammensetzung in immer weiteren Bereichen steuerbar [27].

### **Schaffung lokaler Adhäsion**

Diese Verfahrensklasse greift auf ein Patent<sup>4</sup> des Massachusetts Institute of Technology (MIT) zurück. Mittels Mikrodosierung wird ein flüssiger Klebstoff in ein Pulverbett eingebracht. Die Verklebung der Pulverpartikel erzeugt einen lokalen Materialzusammenhalt. Ähnlich dem Selective Laser Sintering sind beliebige Geometrien realisierbar, denn das Bauteil befindet sich während des gesamten Prozesses im Pulverbett. Ein thermisch bedingter Bauteilverzug kann nicht auftreten.

### **Hybride Verfahren**

Die additive Prozesskomponente erzeugt zunächst eine endkonturnahe Rohform. Anschließend wird durch eine subtraktive Prozesskomponente, in der Regel ein Fräs Werkzeug, die geforderte Genauigkeit und Oberflächengüte erzeugt [28]. Die beiden Komponenten werden sequentiell anhand der aktuellen Steuerdaten für jede Schicht wiederholt. Die Materialwahl wird durch die additive Komponente bestimmt.

### **Indirekte Verfahren**

Die Klasse der indirekten generativen Verfahren ist durch drei aufeinander folgende Einzelprozesse gekennzeichnet. Im ersten Schritt wird schichtweise ein Grünteil erzeugt. Es besteht aus einem nicht schmelzenden Matrix- und einem

---

<sup>4</sup> US Patent 5,204,055. Sachs, E.M. et al, MIT 1993

bindenden Trägerwerkstoff. Der Trägerwerkstoff ist für die Formgebung durch die generative Prozesskomponente erforderlich. Er wird im nächsten Prozessschritt durch Erhitzen oder chemisches Auslösen von der entstandenen Matrix getrennt. Das so erzeugte Braunteil besitzt eine Dichte von 50 bis 70 Prozent. Zur Erreichung einer vollständigen Materialdichte folgt daher im dritten Schritt das Infiltrieren des Braunlings mit einem niedriger schmelzenden Sekundärwerkstoff, der sich durch eine gute Adhäsionsfähigkeit auszeichnet. Im Ergebnis entstehen prototypische metallische oder keramische Werkstücke [29, 30].

Zusammenfassend zeigt Bild 2-5 die Entwicklung der Bandbreite wichtiger Verfahrenseigenschaften innerhalb der letzten 10 Jahre in einer Übersicht.

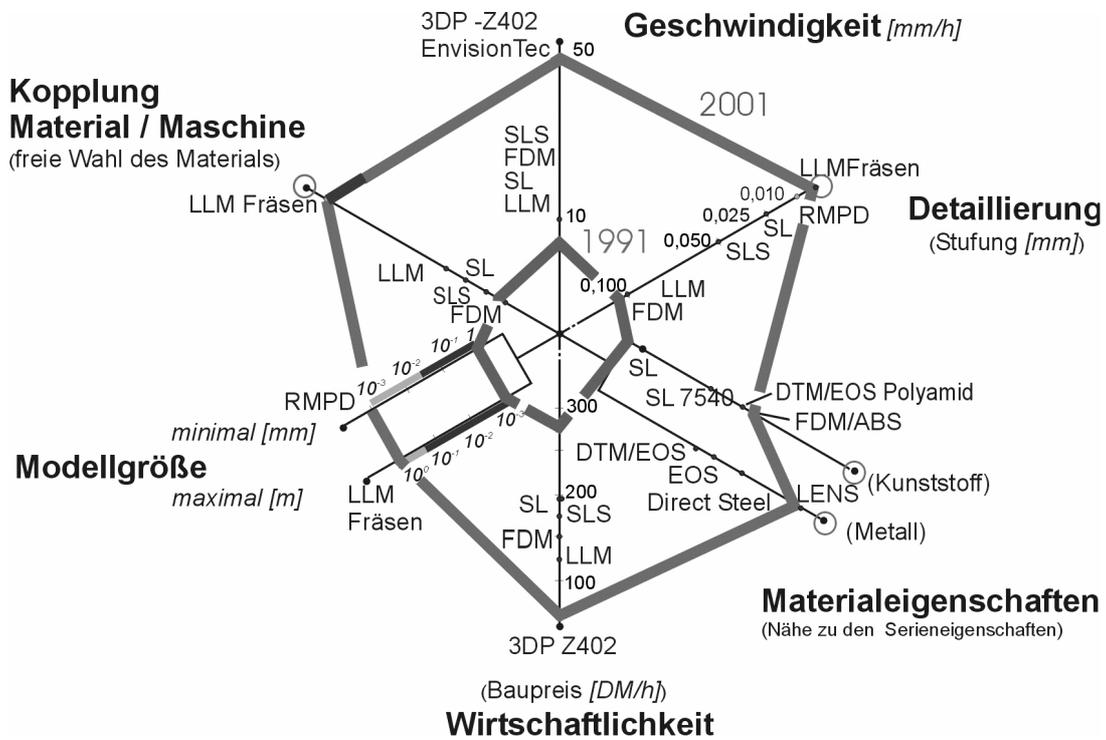


Bild 2-5: Entwicklung der Verfahrenseigenschaften 1991 – 2001 (nach Gebhardt)

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Vielfalt generativer Verfahren und die daraus entstandenen Anlagenkonzepte den Weg bereiten für eine große Anwendungsbreite, bezogen auf Stückzahl, Werkstoffe, Komplexität und Größe.

## 2.4 Einsatz generativer Fertigungsverfahren in der Produktentstehung

Die Entstehung technischer Produkte läuft grundsätzlich in aufeinander aufbauenden Phasen ab. Innerhalb der einzelnen Phasen können sich Entwicklungsschritte überlappen. Auch die Verteilung von Teilaufgaben oder parallele Abarbeitung ist üblich, zusammengefasst unter dem Begriff des *Concurrent Engineering* [31, 32]. Am Ende einer Phase steht die interdisziplinäre Beurteilung des Entwicklungsstandes. In den Unternehmen werden hierfür Freigabeprozesse definiert.

Die frühen Entwurfsphasen sind durch intuitive Arbeitsmethoden geprägt, die auf eine erste Form- und Funktionsfindung zielen. Als Eingangsinformation dienen Anwenderbefragungen oder komprimierte Informationen aus der Erfassung von Felddaten [33]. Die Methode des Quality Function Deployment bietet sich als generisches Hilfsmittel an. Sie kann sowohl für die Produktkonzeption als auch für die Bestimmung wichtiger Einflussgrößen im Rapid Prototyping herangezogen werden [34].

Die Produktentstehung kann in die beiden Hauptaufgaben Produkt- und Produktionsentwicklung eingeteilt werden. Sie endet mit dem Beginn der Serienproduktion (Start of Production, SOP) oder der Fertigung der vom Kunden bestellten Losgröße des entwickelten Produktes, wie in Bild 2-6 dargestellt.

Innerhalb der Produktentwicklung wird ein methodisches Vorgehen durch die Zuordnung von Arbeitsinhalten und die Definition von Entscheidungskriterien und –zeitpunkten unterstützt, anhand derer die entstandenen Konstruktionsergebnisse verifiziert werden. Der Prozess des Entwickelns eines technischen Produktes setzt sich nach PAHL und BEITZ aus mehreren Zyklen der Analyse und Synthese auf unterschiedlichen Ebenen zusammen [35, 36]. Die Arbeitsweise des Produktentwicklers wird also maßgeblich durch den Problemlösungsvorgang bestimmt.

Die vier Hauptphasen lassen sich danach benennen in

- Klären der Aufgabenstellung,
- Konzipieren,
- Entwerfen und
- Ausarbeiten.

Ein iteratives Vorgehen ist umso effizienter, je kürzer die Zeiten für Rückmeldungen, je niedriger die Kosten der Änderungen und je höher die Qualität des Startpunktes der Iteration war [37]. Physische und virtuelle Prototypen dienen hier der Entwurfsabsicherung oder zum Nachweis der Lastenheftkonformität und unterstützen damit die Verifikation ausgewählter Funktionsträger [38].

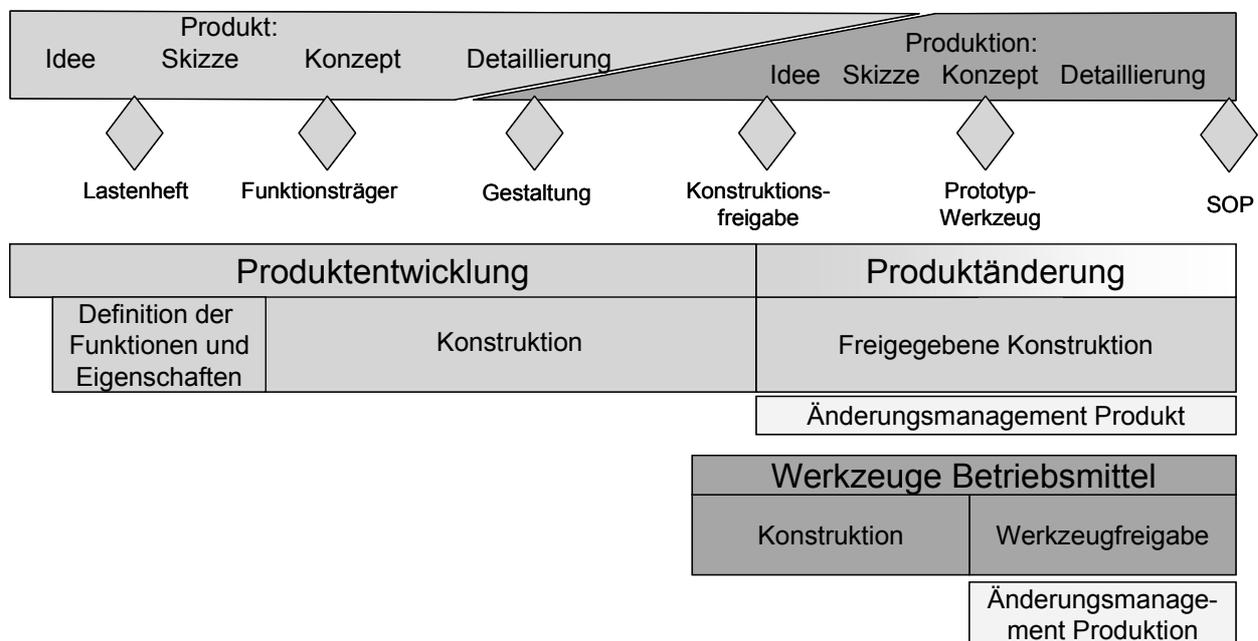


Bild 2-6: Phasenmodell der Produktentstehung

Der Anteil klein- und mittelständischer Unternehmen, die RP als Technologie kennen, aber aufgrund fehlender Kenntnisse nicht oder nur selten anwenden, lag 1996 bei 90 % laut einer Umfrage der TU München und sank bis 1998 auf 88,5 % [39]. Heute ist er auf etwa 80 % gesunken und zeugt damit noch immer von einer sehr geringen Anwendungsbreite. Die Ursachen hierfür sollen in den folgenden Abschnitten ermittelt und abschließend zusammengefasst werden. Eine umfangreiche Untersuchung der Abläufe von Rapid Prototyping Aktivitäten im industriellen Alltag hat gezeigt, dass für eine Analyse der Aufwände die Betrachtung dreier parallel ablaufender Prozessreihen notwendig ist [40, 49]. Es handelt sich hierbei um datenverarbeitende, fertigungstechnologische und logis-

tische Prozesse, Bild 2-7. Der Begriff *Prozessreihe* spiegelt hier die vorhandenen Medienbrüche in der Verknüpfung der Einzelprozesse wider.

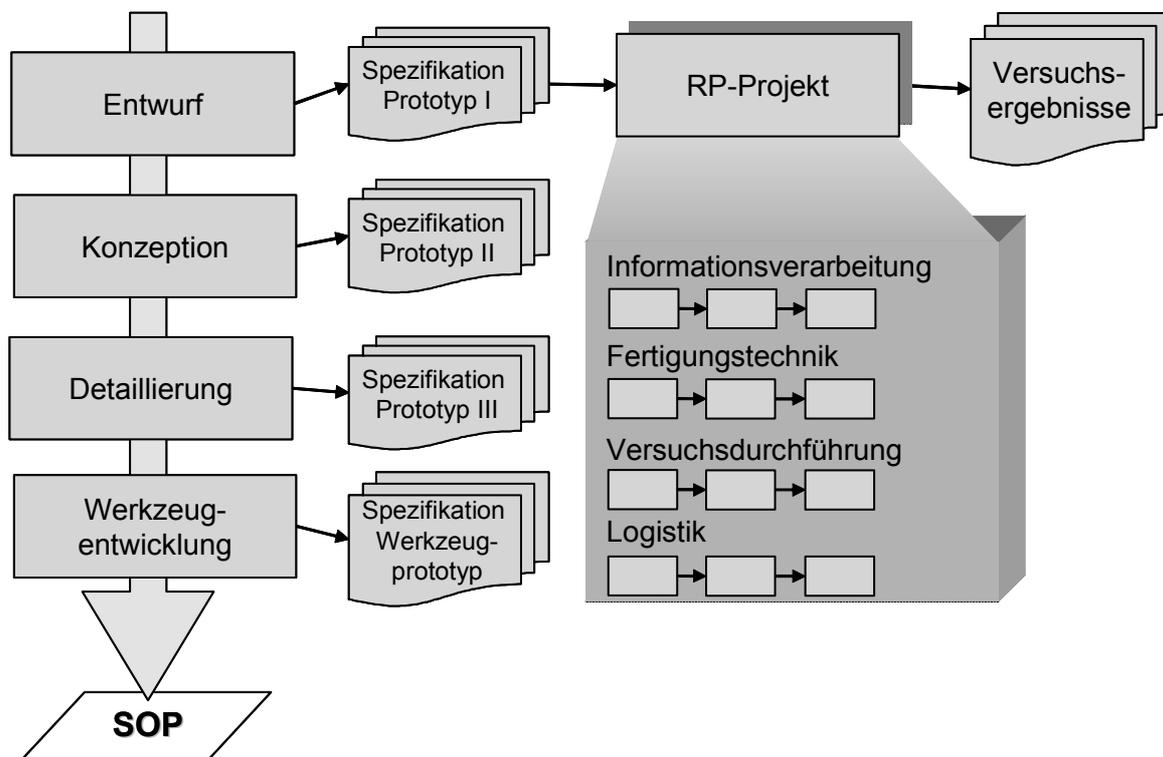


Bild 2-7: Prozessreihen in RP-Projekten

Die informationstechnischen Prozesse dienen der Aufbereitung von geometrischen, technologischen und betriebswirtschaftlichen Eingangsdaten und bilden damit die Schnittstelle zur virtuellen Produktentstehung. Die Prozessreihe der Fertigung beinhaltet neben dem generativen Verfahren zur Erstellung der Bauteilgeometrie weitere Folgeprozesse, die zur Erfüllung der gestellten Anforderungen notwendig sind. Sie endet mit der Bereitstellung der Prototypen in der vereinbarten Losgröße. Logistische Prozesse, ebenso Bestandteil von RP-Projekten, beinhalten Informations- und Warenlogistik, beginnend mit der Anforderungsdefinition über die Fertigung bis hin zur Lieferung der Versuchsergebnisse. Wenig Beachtung findet bisher die planerische Einbindung der eigentlichen Verifikation der avisierten Produktmerkmale im Rahmen der Versuchsdurchführung.

Die digitale Repräsentation dreidimensionaler Körper stellt eine zwingende Eingangsbedingung für alle Rapid Prototyping Verfahren dar, denn ohne sie ist die Berechnung einzelner Querschnitte im geforderten Umfang aus Zeitgründen nur theoretisch möglich. Das Fehlen leistungsfähiger 3D Geometriemodellierer war bis 1985 ein wichtiger Hinderungsgrund für die Realisierung generativ arbeitender Fertigungsverfahren. Im folgenden werden verschiedene Ansätze der Geo-

metriemodellierung kurz vorgestellt und vor dem Hintergrund der generativen Fertigung beurteilt.

Für die *Flächenmodellierung* existieren im wesentlichen zwei Ansätze. Bei der Kurveninterpolation wird eine Fläche so konstruiert, dass eine dreidimensionale Raumkurve deren Begrenzung darstellt. Eine weit verbreitete Methode wurde von Coons entwickelt. Sie interpoliert eine geschlossene Kette von vier Kanten, die jeweils gekrümmt sein dürfen, ohne jedoch Wendepunkte zu enthalten. Durch Zusammensetzen vieler Coons-Flächen erhält man beliebig komplexe und dabei gut steuerbare Flächen. Die populärste Darstellung arbeitet mit einem Kontrollnetz ebener Flächen. Diese Methode wird auch als diskrete Approximierung bezeichnet und wurde vom Entwicklungsingenieur Pierre Bézier bei Renault auf Basis der Erkenntnisse von de Casteljau entwickelt. Bézier realisierte als einer der Ersten in Europa eine CAD/CAM Lösung zum Fräsen von Tonmodellen, die im Modellbau zur Erzeugung der Referenzgeometrie von Karosserien verwendet werden. Sind komplexe Körper durch Flächenmodellierung zu beschreiben, zeigen sich Schwächen des Ansatzes. Zum einen wird das Bauteilvolumen nicht explizit modelliert, zum anderen sind Fehlstellen, Miniflächen und Überlappungen nicht auszuschließen [41]. Verwendet man Flächenmodelle für die generative Herstellung, muss sich ein geschlossener, ‚wasserdichter‘ Körper ergeben, für den folgende Eigenschaften erfüllt sein müssen:

- Geschlossene Hülle
- Keine Fehlstellen und Überlappungen
- Definition einer Normalen, die die Materialseite anzeigt

Die *Volumenmodellierung*, auch Solid Modelling, verfolgt das Ziel, die geometrische und topologische Information physischer Objekte zur Verfügung zu stellen. Die wichtigsten Repräsentationsformen sind Constructive Solid Geometry (CSG) und Boundary Representation (BRep). Bei CSG handelt es sich um die Abarbeitung von Vorschriften zur booleschen Verknüpfung dreidimensionaler Grundkörper. Das Modell entsteht daher erst nach Abarbeitung der Vorschriften in der richtigen Reihenfolge, es ist implizit beschrieben. Die Geometrie eines Bauteils wird erst nach der Verarbeitung der CSG Daten vorübergehend explizit verfügbar. Dies macht eine Referenzierung konkreter Oberflächen, beispielsweise für die Zuordnung einer Toleranzangabe, unmöglich [1].

Die BRep Repräsentation speichert geometrische und topologische Informationen unabhängig voneinander. Dieses Vorgehen garantiert, dass zu jedem Zeitpunkt die Integrität der Abbildung eines physischen Körpers gewahrt bleibt. Die explizite Darstellung des Körpers erlaubt eine eindeutige Zuordnung von Attributen zu den Geometrie-Elementen des Körpers.

Der Ansatz der *Virtuellen Tonmodellierung* überträgt die in der Automobilindustrie zur Formgebung der Karosserie verwendete Vorgehensweise auf ein interaktiv veränderbares, rechnerinternes Voxelmmodell. Als Voxel wird ein Volumenelement bezeichnet, meist in Form eines Würfels. Analog zum Bildaufbau durch Pixel entsteht durch die Anordnung von Voxeln ein digitaler dreidimensionaler Körper. Er kann im Rahmen der Virtuellen Produktentwicklung für die Abbildung lokaler physikalischer Eigenschaften herangezogen werden und stellt damit eine ideale Bauteilrepräsentation für die Planung und Steuerung generativer Fertigungsprozesse dar [42, 43, 44].

Aber auch aus realen Körpern können die benötigten Eingangsinformationen gewonnen werden. Die Geometrie von Körpern ohne Hohlstrukturen oder Hinterschnitte kann durch taktiles scannendes oder durch optisches Messen erfasst und durch *Punktwolken* angenähert werden. Eine Digitalisierung komplexer Werkstücke ist durch den Einsatz der Computertomografie (CT) möglich. Die Genauigkeit der errechneten Konturen befindet sich im Bereich 2 – 20  $\mu\text{m}$  [45]. Die hierbei entstandenen, unstrukturierten Koordinatenpunkte der Oberfläche besitzen nach einer Aufbereitung die geeignete Qualität und sind als Eingangsinformation für generative Verfahren verwendbar.

Liegt die herzustellende Bauteilgeometrie vor, schließen sich die Aufgaben der strategischen und technologischen Verfahrensauswahl an. Strategische Aspekte sind durch Technologiekalender oder Leitfäden unterstützbar. EVERSHEIM schlägt eine systematische Gegenüberstellung der Produkte und die daraus ableitbaren, geeigneten alternativen Fertigungstechnologien vor [46]. Der Faktor Zeit wird durch grundsätzliche Überlegungen wie die Antizipation zukünftiger Entwicklungen berücksichtigt [47, 48].

Obgleich zahlreiche Veröffentlichungen sich dem zielgerichteten Einsatz von RP Technologien widmen, existieren keine methodischen oder systematischen Ansätze zur Lösung dieser Frage [49, 50]. Tabelle 2-1 zeigt eine qualitative Einschätzung wichtiger Kriterien zur Auswahl der Vorgehensweise im Bereich der Produktverifikation. Die Anforderungen an die Prototypeigenschaften liegen meist nur in unstrukturierter Form vor. Unternehmen stützen sich daher oft lediglich auf Erfahrungswerte, wobei die aktuelle technologische Entwicklung der virtuellen und physischen Verfahren immer einzubeziehen ist, um neue Optimierungspotenziale frühzeitig zu erschließen.

Kriterium	Konventioneller Modellbau	Rapid Prototyping	Virtual Prototyping
Einsatz der Informationstechnik	schlecht	mittel	gut
Art des Modells	Physisch	Physisch	Virtuell
Aussage-Genauigkeit der Ergebnisse	gut	mittel	mittel
Vollständigkeit der Aussagen	gut	mittel	schlecht
Werkstoffspektrum	gut	gut	n.a.
Geometrieflexibilität	niedrig	hoch	hoch
Dauer eines Zyklus	lang	kurz/mittel	kurz/mittel
Kosten	hoch	niedrig	mittel
Rückführung der Ergebnisse	schlecht	schlecht	mittel
Intuitive haptische Rezeption	gut	gut	schlecht
Intuitive optische Rezeption	gut	mittel	mittel

Tabelle 2-1: Qualitativer Vergleich der Methoden zur Produktverifikation

Für die anschließende Technologieplanung sind neben den Maschineneigenschaften die Interdependenzen von Prozess und Material zu berücksichtigen. So wirken sich beispielsweise unterschiedliche Laserleistungen beim SLS infolge der veränderten Bautemperaturen auf die Schrumpfung des Gesamtbauteils aus [51]. Dies erschwert eine anlagenunabhängige Prozessplanung erheblich. Dennoch existieren Ansätze für die Offline Programmierung generativer Anlagen, die in Kapitel 2.5 dargestellt und analysiert werden [52, 53, 54].

Bei der generativen Fertigung physischer Prototypen setzt das Verfahrensprinzip und die verfügbaren Materialien enge Grenzen hinsichtlich der geometrischen und stofflichen Eigenschaften. Für die meisten Anwendungsfälle ist daher eine passende Nachbereitung der erzeugten Prototypen erforderlich, um die für eine zuverlässige Produktverifikation geforderten Eigenschaften und Stückzahlen zu erreichen. Hier ist grob zu unterscheiden zwischen Material erhaltenden und Material ersetzenden Folgeverfahren. Im ersten Fall werden die generativ erzeugten Bauteile lediglich nachbearbeitet. Dies kann durch abtragende oder beschichtende Verfahren geschehen. Im zweiten Falle wird der generative Prototyp als Urmodell für einen oder mehrere Gießprozesse genutzt. Die Form

bleibt dabei erhalten, das Urmodell selbst wird jedoch nicht in Versuchsreihen überprüft, sondern die Modellabgüsse.

## 2.5 Informationstechnische Unterstützung

Der erste erfolgskritische Schritt in der Bearbeitung eines RP-Projektes ist die Auswahl der geeigneten Technologiekette zur Erreichung der geforderten technologischen, qualitativen und zeitlichen Eigenschaften. Softwaresysteme, die diesen Schritt unterstützen, müssen auf einen aktuellen Datenbestand von Technologien, Anlagen und Materialien zurückgreifen und in der Lage sein, konkurrierende Zielkriterien zu verarbeiten. Im Folgenden werden die bekanntesten Ansätze kurz vorgestellt.

Am Institut BIBA (Bremen) wurde in Zusammenarbeit mit Unternehmen im Rahmen des Brite EuRam Forschungsprojektes BE 5278 eine Datenbankanwendung entwickelt. In dem vom BIBA Bremen entwickelten Softwaremodul wird neben der Prozessdatenbank eine Materialdatenbank eingeführt. Die Software besteht aus den Komponenten Bauteilfestlegung, Prozessdatenbasis und dem Auswertungsmodul [55, 56]. Im Arbeitskreis ‚Technologievergleich‘ der NC-Gesellschaft e.V. wurde auf Basis dieser Arbeiten zunächst eine Empfehlung ausgearbeitet, die die Anwender-Dienstleister Kommunikation durch strukturierte Formblätter unterstützt [57].

An der RWTH Aachen wurde im Rahmen des Projektes “Bewertung alternativer Fertigungsfolgen im Hinblick auf die Produktgestaltung” eine kombinierte Fuzzy-AHP (Analytic Hierarchy Process) Methode entwickelt [58]. Sie ist jedoch nicht auf generative Verfahren ausgerichtet. Im Sonderforschungsbereich 374 „Entwicklung und Erprobung innovativer Produkte – Rapid Prototyping“ erfolgt die Automatisierung der Prozessauswahl zur Prototypherstellung nach technischen, zeitlichen und qualitativen Vorgaben und wird über eine Entscheidungsmatrix realisiert. Darüber hinaus werden, anders als in den vorangegangenen Entwicklungen, organisatorische Kriterien wie Zulieferer- und Dienstleistungsmerkmale einbezogen [59].

KASCHKA stellt eine Methodik zur Entscheidungsunterstützung und ein dazugehöriges Softwarewerkzeug vor. Die zweistufige Vorgehensweise ermöglicht eine Technologie-Strategie Auswahl und die anschließende Prozessketten-Auswahl und Bewertung. Anhand einer Regelbasis wird in der ersten Stufe durch Analyse von sogenannten Schlüsseleigenschaften des Bauteils entschieden, ob generative Verfahren prinzipiell für die Fertigung in Frage kommen [60, 61]. Am Institute of Physical and Chemical Research in Saitama, Japan, wurde ein Auswahlsystem entworfen, das die Methode des Quality Function Deployment (QFD) für die vergleichende Bewertung von Alternativen verwendet. QFD hat sich seit vielen Jahren bewährt, insbesondere für die frühzeitige Planung

der Umsetzung von Anforderungen an Produkte in Funktionseinheiten. Das entwickelte System nutzt ein House of Quality, um Bauteilanforderungen den technischen Merkmalen von Prozessen zuzuordnen [62].

Die Technologieplanung generativer Verfahren schließt sich an die Auswahl an und umfasst die informationstechnisch zu unterstützenden Arbeitsschritte

- Bauteilorientierung,
- Bauteilplatzierung,
- Skalierung zur Kompensation prozessbedingter Materialveränderungen,
- Generierung von Stützgeometrien
- Verfahrenwegserzeugung, auch als Scanstrategie-Definition bezeichnet [63].

Darüber hinaus ist der Verlauf der Technologieparameterwerte über die Dauer des gesamten Bauprozesses festzulegen. Hierzu gehören beispielsweise die Laserleistung, Bauraumtemperatur oder Menge der Materialzufuhr. Da der optimale Prozessverlauf unter anderem auch durch die Charakteristik der hergestellten Bauteile beeinflusst wird, bieten aktuell verfügbare Planungssysteme Funktionen zur Abspeicherung erfolgreich getesteter Einstellungen und Parameterverläufe, um bei ähnlichen Bauteilen darauf zurückgreifen zu können.

Der Import der Bauteilgeometrie kann bei allen Anlagen durch Verwendung des STL-Formates geschehen, welches in Kapitel 2.6 detailliert beschrieben ist. Für die Beschreibung der Anforderungen, Funktionen und Toleranzen der Bauteile müssen textbasierte Lastenhefte verwendet werden, da hierfür weder geeignete Schnittstellen noch geeignete Systemfunktionalitäten existieren. Die Planungssoftware visualisiert den Bauraum und stellt nach dem Geometrieimport alle für den aktuellen Bauprozess geladenen Bauteile dar. Die Bauteilorientierung ist vom Planer anhand seiner Erfahrungen vorzunehmen, eine informationstechnische Unterstützung existiert bei den verfügbaren Systemen nicht. Die Platzierung kann interaktiv oder automatisch erfolgen. Die meisten Systeme ermitteln Bauteilkollisionen anhand der das Bauteil umschließenden Bounding Box, einige neuere Versionen analysieren die tatsächliche Bauteilgeometrie und ermöglichen so die Verschachtelung von Bauteilen, Bild 2-8.

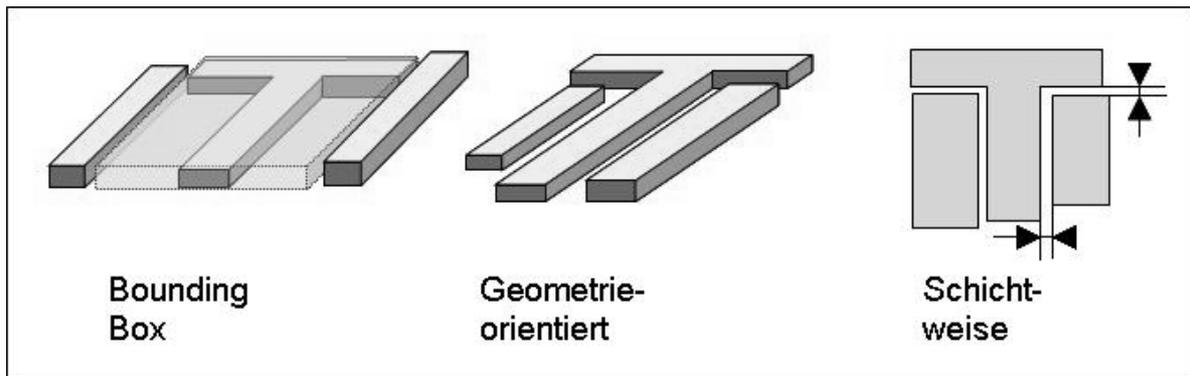


Bild 2-8: Anordnung von Bauteilen im Bauraum von RP-Anlagen

Prozessbedingte Bauteilveränderungen wie Schrumpfung und Verzug sind so weit wie möglich zu eliminieren. Eine informationstechnische Unterstützung, die unter Berücksichtigung von Regeln oder Vorgaben entsprechende Skalierungsfaktoren oder Korrekturwerte errechnet, ist in verfügbaren Systemen nicht implementiert [64]. Ebenso wenig können prozessübergreifende Einflüsse berücksichtigt werden. Der Verfahrensplaner stellt die entsprechenden Werte weitgehend aufgrund seiner Erfahrungen ein.

Die Erzeugung von Stützgeometrien, Schichtkonturen und Verfahrenswegen erfolgt weitgehend automatisch, wobei auch hier in der Regel keine interaktive Optimierung hinsichtlich einer optimalen Prozesssicherheit und Bauteilqualität angeboten wird. Lediglich die Bauzeit kann durch gezielte Aushöhlung der Bauteile reduziert werden. Bei einigen Systemen kann der Planer zwischen einigen vorgegebenen Baustrategien wählen, eine anforderungsgerechte Detailplanung ist nicht möglich [65].

Ein wichtiger Ansatz, bekannt als *Adaptive Slicing* versucht eine Verkürzung der Bauzeit bei gleichzeitigem Qualitätserhalt [66, 67, 68]. Die Kernfunktionalität stützt sich auf die Ermittlung der Konturdifferenzen zwischen zwei aufeinander folgenden Schichten. Die daraus ableitbaren Veränderungen in der Prozessführung beziehen sich in der Regel auf die Schichtdicke und Variation der Laserverfahrenswege [69].

Das am Fraunhofer IPK entwickelte Verfahren des *Segment Based Adaptive Slicing* nutzt Algorithmen zur Analyse der Bauteilgeometrie [70]. Als Informationscontainer zur Kapselung geometrischer und technologischer Daten dient das Segment. Auf diese Weise lässt sich beispielsweise ein Bereich mit besonders geringer Wandstärke berücksichtigen. Aber auch Bereiche, die sich durch Materialanhäufung auszeichnen und daher bei Verfahren mit thermoplastischer Aushärtung zur Überhitzung neigen, können in ein solches Segment eingebettet werden. Bild 2-9 zeigt die Unterschiede zwischen klassischer und segmentbasierter Herangehensweise.

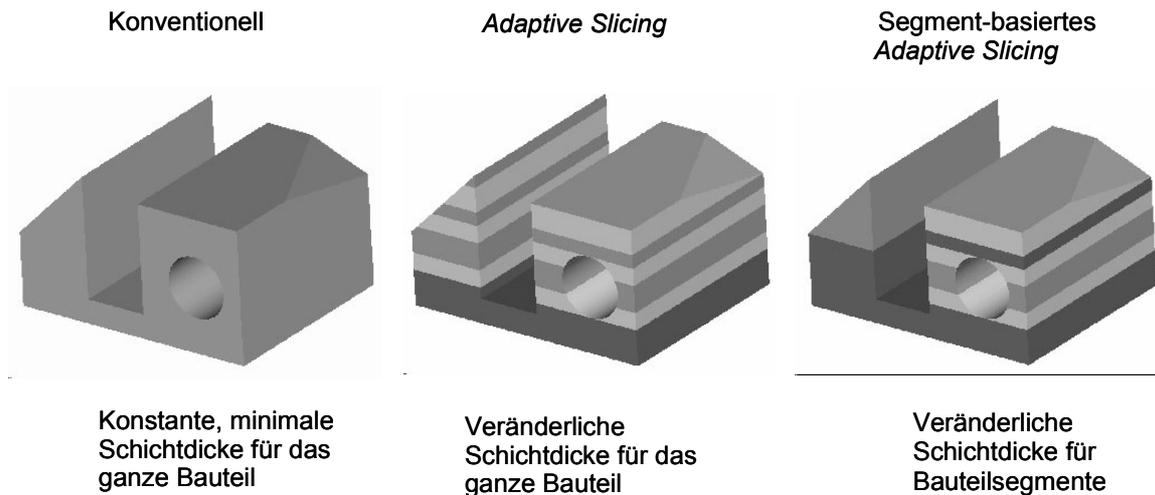


Bild 2-9: Segmentbasiertes Adaptive Slicing (nach Ciesla)

Anwendungssysteme zur Aufbereitung von 3D-Koordinatenmengen, die beispielsweise bei der Digitalisierung physischer Bauteile entstehen, eliminieren Ausreißer, reduzieren Konturen auf die wesentlichen Stützpunkte und verknüpfen die Einzelpunkte durch Triangulation zu geschlossenen Flächen. Zur Steuerung des Auflösungsgrades stehen zwei Methoden zur Verfügung, die ‚multi resolution wavelet‘ Methode und die ‚level of detail‘ (LOD) Herangehensweise [71, 72]. Spezielle Algorithmen finden analytische Elemente wie Kreise oder Geraden und im nächsten Schritt auch Ebenen oder Zylinderflächen. Gelingt dies, ist der Vergleich der erfassten Geometrie mit analytisch beschriebenen Geometrieelementen aus der CAD-Repräsentation möglich [73]. Ist ein Auffinden analytischer Flächen nicht oder nur teilweise möglich, besteht die Option der Flächenrückführung. Die Punktwolke wird anhand statistischer Einpassungsalgorithmen in B-Spline oder NURBS Darstellungen überführt. Probleme bereiten vor allem scharfe Kanten, da hier ein Bruch in der C1- oder C2-Stetigkeit von Flächen vorliegt [74].

## 2.6 Schnittstellenformate

Der heute leistungsfähigste Standard zum Austausch von Produktdaten entlang des gesamten Produktentstehungsprozesses ist unter dem Begriff STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data) zusammengefasst. Mit seiner Entwicklung wird das Ziel verfolgt, ein international gültiges Referenzmodell bereitzustellen. Es unterstützt aufgrund seines generischen Definitionsvokabulars in der EXPRESS Beschreibungssprache den Aufbau segmentierter Produktmodelle [75]. Ein effizientes Format zur Übertragung hochwertiger, d.h. in ihrer Stetigkeit kontrollierbarer Flächen wurde mangels geeigneter Alternativen von der deutschen Automobilindustrie entwickelt und ist als VDA-FS (VDA-Flächenschnittstelle) bekannt [76, 77].

Ein besonders einfach aufgebautes Schnittstellenformat wurde mit dem Ziel einer schnellen und problemlosen Berechnung von Schnittgeometrien definiert. Es erhielt den Namen Standard Transfer Language (STL) und diente zunächst nur dem Transfer der Bauteilgeometrie zur ersten industriell gefertigten Stereolithographiemaschine. Es besitzt zwar zahlreiche Nachteile, hat sich aber aufgrund seiner Robustheit und des einfachen Aufbaus zu einem de facto Industriestandard entwickelt. Die STL Spezifikation verlangt, dass jeweils zwei nebeneinanderliegende Dreiecke eine gemeinsame Kante besitzen. Wird diese Restriktion nicht eingehalten, entsteht ein instabiles Geometriemodell, wie in Bild 2-10 veranschaulicht. Die Spezifikationen OpenInventor und VRML repräsentieren ebenfalls polygonisierte Flächenverbände, bieten jedoch darüber hinaus die Möglichkeiten, Metadaten und Strukturen abzubilden [78].

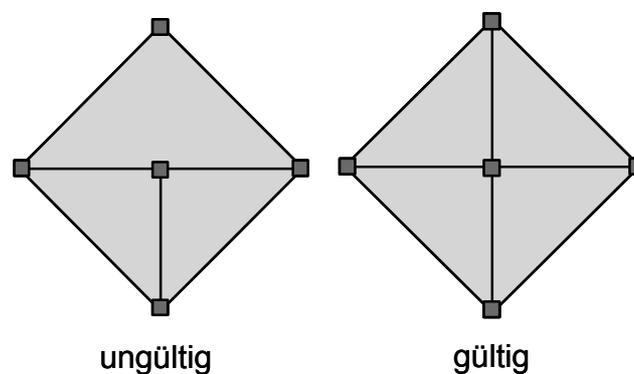


Bild 2-10: STL Beschreibung

Zur Steuerung des generativen Prozesses wird die Bauteilgeometrie in einzelne Schichten zerlegt. Die Schnittstellenformate Common Layer Interface (CLI) und Slicing Format (SLC) wurden von RP-Maschinenherstellern für die interne Datenübertragung von der Prozessplanung zur Steuerung definiert und später veröffentlicht. CLI und SLC enthalten nur die Konturgeometrien der Schichten und Angaben zur Schichtdicke und -lage, bieten aber keine Möglichkeit zur Speicherung von Technologieinformationen.

Die Tatsache, dass die Arbeitsergebnisse generativer Verfahren stark von der verwendeten Technologie und darüber hinaus von den im Bauprozess eingestellten Parameterwerten beeinflusst werden, hat zur Entwicklung einiger neutraler Datenformate geführt, die in der Lage sind, über die Konturdaten der einzelnen Layer hinaus weitere Informationen bezüglich der einzustellenden Technologieparameter abzubilden.

Das NSF-Format wurde an der Universität Stuttgart mit dem Ziel einer verbesserten Prozessplanung entwickelt und enthält bereits wesentliche Ansätze zur integrierten Übertragung von Geometrie und Technologie [79]. Die Beschreibungssprache Rapid Prototyping Data Format (RPDF) wurde am Fraunhofer

IPK im Rahmen des WISA RP entwickelt und bietet hinsichtlich der Übertragung technologischer Daten das größte Potenzial.

Die Dateiformate zur integrierten Übertragung von geometrischen und technologischen Schichtdaten sind in der nachfolgenden Tabelle nochmals zusammengefasst und anhand wesentlicher Kriterien bewertet. Das STL-Format ist nicht in der Lage, technologische Informationen zu transportieren und wird daher nicht berücksichtigt.

Eigenschaften	CLI	SLC	NSF	RPDF
Vollständigkeit Geometrie	→	↗	↗	↑
Vollständigkeit Technologie	↓	↓	→	↑
Darstellung von Segmenten	↓	↓	↑	↑
Neutrale Formulierung	↘	↘	↗	↗
Exaktheit	→ (Polylinien)	→ (Polylinien)	→ (Polylinien)	↗
Vermeidung von Redundanz	↗	↗	↗	↗
Erweiterbarkeit	→	→	↗	↗
Konvertierbarkeit	↗	↗	→	→
Informationsgehalt	↘	↘	↗	↗
Lesbarkeit	↗	↗	↗	↗

Tabelle 2-2: Eigenschaften von RP-Schnittstellenformaten

## 2.7 Bewertung verfügbarer Methoden und Systeme

Nachdem der Stand der Technik in den Bereichen Einsatz, Technologie und informationstechnische Unterstützung im vorangehenden Kapitel analysiert und dargelegt wurde, soll nun die vorgefundene Situation hinsichtlich ihrer Potenziale für die Integration des Rapid Prototyping in die virtuelle Produktentstehung bewertet werden. Aus den herauszuarbeitenden Defiziten heutiger Vorgehensweisen leitet sich im Wesentlichen die präzisierte Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ab. Die Bewertung erfolgt in Anlehnung an die Aufgabenkomplexe in RP Projekten.

### Auswahl und Planung von RP-Verfahren

Im Folgenden werden die bekannten Methoden und Systeme zur Auswahl und Planung von RP-Verfahren anhand einer Beurteilungsmatrix dargestellt. Als beschreibende Parameter dienen

- der Umfang der betrachteten Anforderungen,
- die Verarbeitung unscharfen Wissens,
- die Bewertung mehrstufiger, gemischter Prozessketten,
- die Abstimmung der Einzelprozesse
- die Unterstützung der anschließenden Auftragsdurchführung,
- die Möglichkeit zur direkten Übernahme von Geometrie- und Technologiedaten und
- die Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte.

Alle bekannten Ansätze zur Auswahl von RP-Technologieketten verfolgen das Ziel, dem Produktentwickler eine Orientierung, dem Einkauf eine Plausibilitätskontrolle oder dem RP-Dienstleister ein Lösungsfeld für den zielgerichteten Einsatz physischer Prototypen zu bieten. Es kann eine Unterscheidung der Methoden und Systeme nach technologischer und strategischer Ausrichtung getroffen werden.

Technologieorientierte Auswahlssysteme arbeiten in der Regel mit einer Technologiedatenbank, in der konkrete Anlagen und Materialien abgelegt sind. Daher sind sie gut algorithmierbar und stehen meist als prototypische Anwendungssysteme zur Verfügung. Die strategischen Ansätze sind aufgrund der hohen Komplexität der Entscheidungsfindung nicht in entsprechenden Anwendungssystemen implementiert worden. Dennoch ist der Wert dieser Broschüren oder Leitfäden durchaus als hoch einzuschätzen, da anhand der Fragenkataloge eine solide Basis für grundsätzliche Investitionsentscheidungen erstellt werden kann. Für die Beurteilung der Eignung einer RP-Technologie für ein konkretes Rapid Prototyping Projekt sind die strategischen Ansätze jedoch nicht verwendbar.

Die untersuchten Ansätze bieten in unterschiedlicher Qualität und Umfang die Möglichkeit, Anforderungen an zu fertigende Prototypen zu definieren. Grundsätzlich werden zentrale quantitative Parameter wie Stückzahl, Größe oder Oberflächenqualität der physischen Prototypen berücksichtigt. Qualitative Merkmale wie beispielsweise der Einsatzzweck werden nicht in allen Systemen verarbeitet. Tabelle 2-3 zeigt die untersuchten Ansätze und deren wichtigste Eigenschaften.

Projekt	Verantwortlich	Anforderungsumfang	Unscharfes Wissen	Mehrstufige Prozessketten	Abstimmung der Einzelprozesse	Auftragsdurchführung	Übernahme von Daten	Wirtschaftlichkeit
SFB 361	IPT/WZL Aachen	groß	ja	ja	nein	nein	teilweise	teilweise
SFB 374	Universität Stuttgart	mittel	eingeschränkt	ja	nein	eingeschränkt	teilweise	teilweise
SFB 582	TU München	mittel	nein	nein	nein	nein	nein	ja
RIT	Tsinghua Universität	groß	nein	ja	nein	nein	nein	ja
RP System Selector	BIBA Bremen	mittel	eingeschränkt	ja	nein	nein	teilweise	ja
Strategische Bewertung	IPA Stuttgart	mittel	nein	eingeschränkt	nein	nein	nein	ja
RP- Leitfaden	IWB Augsburg	mittel	eingeschränkt	ja	nein	eingeschränkt	nein	ja
IPD	Universität Tokyo	mittel	nein	nein	nein	nein	nein	teilweise
PROTOCOL	Universität Chermnitz	groß	ja	ja	nein	eingeschränkt	teilweise	eingeschr.

Tabelle 2-3: Charakterisierung der Ansätze zur Prozessauswahl

Mehrstufige Prozessketten werden bei vielen Ansätzen zwar angeboten, doch meist werden lediglich vordefinierte Gesamtlösungen berücksichtigt, was die Freiheitsgrade der Konfiguration stark einschränkt. Die Übergangsbedingungen zwischen den einzelnen Prozessschritten finden in keinem Ansatz Berücksichtigung. Eine informationstechnisch unterstützte Übernahme von Informationen, die zur Auswahl und Planung von Verfahrensketten erforderlich sind, erfolgt bei keiner der untersuchten Vorgehensweisen in ausreichender Qualität. Ebenso fehlen Erklärungsmodule, die die getroffenen Entscheidungen nachvollziehbar darstellen.

Die sich an den Auswahlprozess anschließende Auftragsdurchführung wird nur von wenigen Systemen durchgängig unterstützt. Zwar sind einige Systeme zur Vermittlung von RP-Dienstleistungen verfügbar, jedoch fehlt diesen die Integration mit vor- und nachgelagerten Prozessen im Rahmen der Durchführung von RP-Projekten. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen beschränken sich bei strategischen Ansätzen auf grobe Abschätzungen, bei technologischen Ansätzen kommen konkrete Berechnungsmodelle wie Maschinenstundensatz, Materialverbrauch oder bauraumbezogene Kosten zum Einsatz.

### **Informationsaustausch**

als Grundlage für Erweiterungen des austauschbaren Informationsumfanges diene mehrfach das bereits beschriebene STL-Format [80]. Die Firma Materialise stellt beispielsweise das Konzept des ‚Digital Engineering‘ vor. Unter diesem Begriff verstehen die Autoren die Verwendung eines polygonbasierten Datenmodells, repräsentierbar durch das STL-Datenformat, unter Hinzunahme von Funktionen und Strukturen für die Zuordnung von Eigenschaften zu Flächenverbänden. Ein wesentliches Defizit dieses Ansatzes besteht jedoch in der Tatsache, dass Geometrie, Topologie und Features nicht im Datenmodell gespeichert werden können. Vielmehr entsteht die vollständige Bauteilbeschreibung erst zur Laufzeit durch Funktionen zur Geometrieverarbeitung.

Im Bereich des Rapid Prototyping wurde nach Kenntnisstand des Autors bisher kein adäquates Datenmodell entwickelt, welches in der Lage wäre, alle im Auftragsdurchlauf benötigten und produzierten Daten zu repräsentieren. Die derzeit umfangreichste Definition von anwendungsorientierten Datenmodellen in der Produktentstehung entstand im Rahmen der internationalen *STEP*-Normungsaktivitäten. Die im Kontext der vorliegenden Arbeit wichtigsten Datenmodelle des STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data) sind in den Anwendungsprotokollen 203 und 214 festgelegt und lassen eine umfangreiche Spezifikation von Geometrie-, Qualitäts-, Prozess- und Auftragsdaten zu. Sie eignen sich grundsätzlich sehr gut für die Geometrie- und Toleranzrepräsentation und zur Unterstützung der allgemeinen Prozessplanung. Für generative Verfahren wären jedoch Erweiterungen hinsichtlich der Abbildung schichtbezogener Informationen notwendig.

### 2.7.1 Durchführung von RP Projekten

Zahlreiche Untersuchungen belegen, dass physische Modelle meist erst im Rahmen des Einsatzversuches zur Überprüfung der finalen Produkteigenschaften hergestellt werden [81]. Die daraus folgenden Änderungen an der Produktkonzeption erzeugen aufgrund der bereits weit fortgeschrittenen Entwicklung höhere Änderungskosten und induzieren einen erhöhten Aufwand bei der Planung von Fertigung und Montage, Bild 2-11. Hinzu kommt, dass der konventionelle Modellbau oftmals lediglich durch generative Verfahren ersetzt wird. In der Folge ändert sich der Einsatzbereich physischer Prototypen ebenso wenig wie die mangelhafte Rückführung der Erkenntnisse in die Produktentwicklung. Nur etwa 20 % der Unternehmen, die RP-Technologien einsetzen, tun dies im Rahmen der Konstruktion [49].

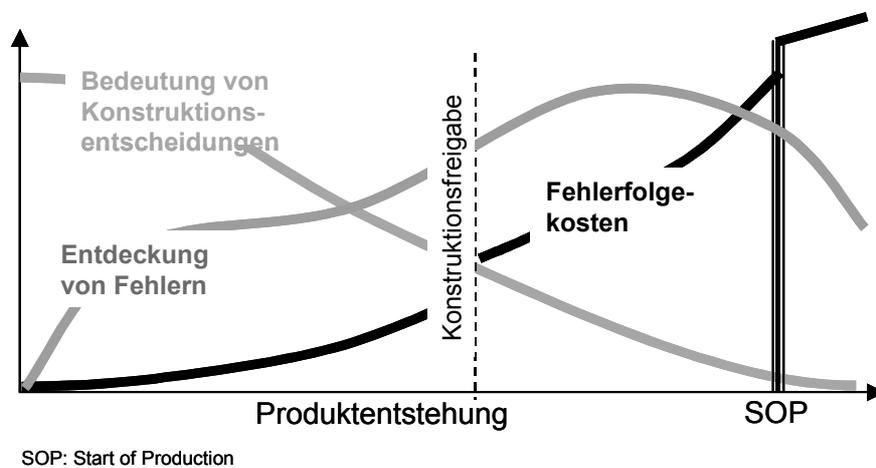


Bild 2-11: Folgen von Änderungen

Die informationstechnische Integration von RP-Projekten in die Prozesse der Produktentstehung und das Änderungsmanagement ist dabei unzureichend gelöst. Die Ursachen hierfür sind vielfältig. Zunächst fehlt meist die strategische Einbindung der Produktverifikation, die zu Beginn der Entwicklungsarbeiten zu leisten ist. Im weiteren Verlauf kommt es daher zu Unklarheiten bezüglich der richtigen Zeitpunkte und Ziele von produktverifizierenden Maßnahmen. Weiterhin fehlen bei der Auftragsdurchführung informationstechnische Schnittstellen, die neben der Geometrie technologische und organisatorische Informationen bündeln. Eine optimale Kommunikation und flexible Abwicklung der Rapid Prototyping Projekte wird dadurch verhindert. Große Teile, bis zu 70 % der Durchlaufzeit, werden für die Koordination der Teilschritte und die Korrektur fehlerhafter Prozesse verwendet und tragen demnach nicht zur Produktivität bei [82]. Ursachen und Folgen mangelhafter Integrationsansätze sind in Tabelle 2-4 abschließend zusammengefasst.

Kriterium	Ursache	Folgen
Entscheidungen	Grundlagen für objektive, zielgerichtete Entscheidungen zur Steuerung von RP-Projekten fehlen	Ineffizienz, erhöhte Kosten
Einsatzzeitpunkt	Zu späte und schlecht synchronisierte Einbindung von Prototypen	Hoher Korrekturaufwand in späten Entwicklungsphasen
Auswahl	Fehlende informationstechnische Unterstützung zur Prozesskettenauswahl	Falsche Prozesskette führt zu mangelhafter Prototypenqualität und unzureichenden Prüfaussagen
Integration	kein projektübergreifendes Management; STL-Format für die durchgängige Informationsübertragung ungeeignet.	Abstimmungsprobleme der beteiligten Partner, mangelhafte Anforderungsdefinition, unnötiger Verwaltungsaufwand
Erfahrungswissen	Erkenntnisse aus Prototypentests werden bauteilspezifisch in die Produktentwicklung zurückgeführt	Erfahrungswissen über Auswahl, Zeitpunkt und richtigen Einsatz von RP-Prozessketten ist nicht verfügbar
Auftragsmanagement	Organisatorische Abläufe sind nicht auf RP-Projekte abgestimmt	Vorteil der schnellen Herstellung geht durch organisatorische Verzögerungen wieder verloren
Technologische Planung	Die Prozessplanung erfolgt ohne Berücksichtigung der gesamten Technologieketten	Prototypen erfüllen nicht die gewünschte Spezifikation
Produktverifikation	Ziele sind nicht eindeutig definiert; Vorgaben sind unstrukturiert	Unsicherheit der Ergebnisse; Redundanz von Auswertungen

Tabelle 2-4: Ursachen und Folgen mangelhafter Integration

Aus der dargestellten Situation heraus wird im folgenden Kapitel die Zielsetzung der Arbeit präzisiert und auf wesentliche Kernpunkte von zentraler Bedeutung reduziert.

## 3 Präzisierung der Zielsetzung

### 3.1 Hauptziel

Zukünftig muss eine immer engere Verzahnung von physischen und virtuellen Prototypen durchgängig unterstützt werden, Bild 3-1. Zur Gewährleistung durchgängiger *Prozessflüsse* im Rahmen dieser verteilten Aktivitäten werden projektübergreifende Informationen zur Abstimmung und Planung der Projekthinhalte benötigt.

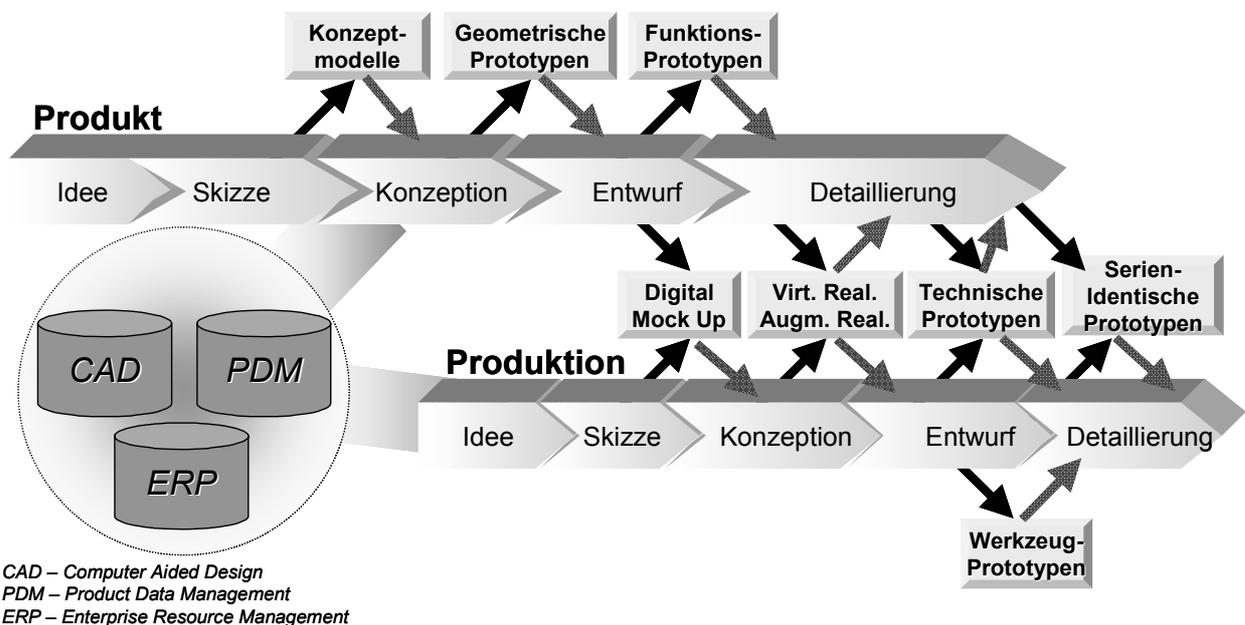


Bild 3-1: Management von Prototyping Aktivitäten [83]

Der Komplexität der Aufgabenstellung einer modularen, verteilten Produktverifikation können die existierenden Vorgehensweisen und Systeme nicht gerecht werden. Daher liegt das Hauptziel der vorliegenden Arbeit in der Erreichung einer strukturierten Planung und Durchführung von Projekten zur physischen Produktverifikation. Durch eine ganzheitliche Sichtweise, die neben den prozessübergreifenden Wechselwirkungen auch die Auswertung der Ergebnisse einbezieht, kann das Potenzial zur Verkürzung der Entwicklungszeit, Vermeidung später Änderungen und Verbesserung der Produktqualität und der produktbezogenen Entwicklungs-, Fertigungs- und Montageprozesse genutzt werden. Zusammenfassend kann das Hauptziel in drei Teilziele gegliedert werden:

Optimierung der physischen Produktverifikation auf der Basis generativer Technologieketten durch prozessübergreifende Planung, Eliminierung von Medienbrüchen und Schaffung eines anwendungsneutralen Datenmodells. Bild 3-2 zeigt die angestrebten Auswirkungen auf die unterschiedlichen Aspekte eines RP-Projektes.

<b>RP Projekte</b>			
	<b>Planung</b>	<b>Versuch</b>	<b>Vernetzung und Integration</b>
<b>Organisatorisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbesserter Ablauf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhte Planungsqualität</li> <li>• Planung der Versuchsbedingungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eindeutige Dokumentation der Projekte</li> <li>• Nutzung der Erfahrungen</li> </ul>
<b>Technologisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimale Konfiguration der Technologiekette</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Integrierte Planung der Versuchsdurchführung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prozessübergreifende Datenbasis</li> </ul>
<b>Projektübergreifend</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkürzte Durchlaufzeit</li> <li>• Geringere Kosten</li> <li>• Reduzierter Aufwand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verzahnung mehrerer RP-Projekte</li> <li>• Verzahnung mit Virtuellen Prototypen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduzierter Aufwand</li> <li>• Nutzung von Wissen und Erfahrungen</li> </ul>

Bild 3-2: Angestrebte Auswirkungen der entwickelten Vorgehensweise

### 3.2 Vorgehensweise

Zur Erreichung der gesetzten Ziele werden zunächst die Anforderungen an die zu entwickelnden Bausteine gesammelt und strukturiert. Aus der Untersuchung der Einsatzfälle und –bedingungen der Technologie in produktentwickelnden Unternehmen wird eine Projektklassifizierung erarbeitet. Im zweiten Schritt werden die generativen Verfahren bezüglich ihrer Randbedingungen und Prozessplanungsparameter analysiert. Für die Klassifizierung werden, anders als in bekannten Vorgehensweisen, die Potenziale der Prozesse in Bezug auf die erreichbaren Bauteileigenschaften herangezogen. Eine Methode zur phasenspezifischen und produktfunktionsorientierten Konfiguration von RP-Prozessketten wird so erarbeitet, dass sie im Zusammenspiel mit dem Datenmodell den besonders wichtigen Schritt der Auswahl und Planung der gesamten Technologiekette zur Herstellung physischer Prototypen unterstützt. Die Schnittstelle zur Produktentstehung wird spezifiziert und eine Integrationslösung auf Basis existierender Anwendungssysteme entwickelt. Ein umfassendes Datenmodell wird so aufgebaut, dass es dem projektübergreifenden Informationsmanagement als

Basis dient. Die so aufgebaute Informationsbasis soll allen Prozessbeteiligten zur Verfügung stehen und aktualisierbar sein. Hierfür wird ein universell anwendbares, systemunabhängiges Schnittstellenformat definiert. Die prototypische Gesamtlösung wird abschließend einer Evaluierung im betrieblichen Alltag unterzogen.

### **3.3 Abgrenzung**

Die angestrebte Gesamtlösung soll für industrielle Anwendungen des physischen Prototyping auf der Basis generativer Technologieketten Gültigkeit besitzen. Die zeichnungsgebundene, manuelle Herstellung von Modellen stellt immer einen Medienbruch dar und ist daher nicht für die informationstechnische Integration geeignet. Werkzeuggebundene Herstellungsverfahren wie das Hochgeschwindigkeitsfräsen können zwar prinzipiell wie generative Prozesse betrachtet werden, unterscheiden sich jedoch insbesondere hinsichtlich der Notwendigkeit zur Werkzeugauswahl, der Festlegung eines Spannkonzeptes und der Eliminierung von Hinterschnitten. Daher soll nicht versucht werden, diese Technologien in die Verfahrensauswahl und –planung einzubeziehen.

Es wird nicht der Anspruch erhoben, eine vollständige Repräsentation der bekannten generativen Verfahren anzubieten. Vielmehr wird durch die vorgestellte Strukturierung eine verbesserte Einschätzung von Verfahrensprinzipien erreicht. Nicht die Verfahren selbst sind Gegenstand der Entwicklung, sondern deren Verwendung und Integration im Rahmen von RP-Projekten.

Da die entwickelten Methoden zur Integration aller Rapid Prototyping Aktivitäten führen sollen, ist die Auswertung von Versuchsreihen und die Rückführung der Ergebnisse mit dem Ziel der Produkt- und Prozessoptimierung ein wichtiger Bestandteil der Gesamtsystematik. In Bereichen, wo bereits Methoden und Systeme existieren, wird deren Integrationsfähigkeit untersucht und, falls notwendig, durch den Vorschlag von Erweiterungen sichergestellt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen neben Detaillösungen an Stellen, wo eine informationstechnische Unterstützung fehlt, vor allem die Voraussetzungen für einen medienbruchfreien Informationsfluss geschaffen werden.

Entscheidungen, die eine geometrische Analyse des Prototypenmodells erfordern, werden grundsätzlich dem Anwender überlassen, sofern es nicht möglich ist, CAD-Parameter direkt zu verarbeiten oder auf Featuredefinitionen zurückzugreifen. Als Ersatz für eine exakte Geometriebeschreibung werden dem Anwender Sammelbegriffe wie ‚Hohlstruktur‘ oder ‚Rippenstruktur‘ angeboten, die die Bauteilcharakteristik widerspiegeln.

Für Sonderfälle, die entweder eine generative Produktfertigung vorsehen, wie beim Rapid Manufacturing, oder den konventionellen Modellbau durch spanabhebende Verfahren oder Handarbeit nutzen, können Teile der Gesamtlösung möglicherweise nicht genutzt werden.

## 4 Konzept zur ganzheitlichen Unterstützung physischer Produktverifikation

### 4.1 Anforderungen an das Konzept

#### Grundforderungen

Formale und empirische Richtigkeit des Gesamtkonzeptes sind Grundanforderungen. Widerspruchsfreiheit und Konsistenz sind die wichtigsten formalen Forderungen und werden durch Bildung von Klassenstrukturen und die damit verbundene Prozess übergreifende Ordnung erzielt. Ein weiteres Element ist die Forderung nach möglichst quantitativen, zuverlässigen und nachprüfbareren Ergebnissen, die nach Anwendung einer Methode oder Einsatz eines Systems zur Verfügung stehen [84]. Empirische Anforderungen betreffen die Übereinstimmung der Modellbildung mit der abstrahierten betrieblichen Realität. Ein empirisch richtiges System folgt in seiner Struktur und seinem Verhalten den in der Realität beobachteten Abläufen. Um ein Projekt oder eine Aufgabe bearbeiten zu können, werden Werkzeuge, Methoden und Informationen benötigt. Durch die Forderung nach Vollständigkeit des entworfenen Konzeptes wird sicher gestellt, dass alle notwendigen Hilfsmittel zur Verfügung stehen oder deren Beschaffung geklärt ist. Dies beinhaltet technologische und organisatorische Aspekte der Aufgabebearbeitung.

Die verwendeten Informationen sollen stets aktuell sein. Dies impliziert die Forderung nach Mechanismen zur Überprüfung von Datenbeständen auf Korrektheit und Aktualität. Fehlende Aktualität führt zu Zeitverlust und minderwertiger Ergebnisqualität. Anpassbarkeit und Erweiterbarkeit sind elementare Forderungen, um vorhandene Methoden und Systeme integrieren und auf technologische Fortschritte reagieren zu können.

### **Inhaltliche Anforderungen**

Diese Gruppe von Anforderungen bezieht sich auf die Inhalte der zu unterstützenden Aufgaben und Abläufe zur Abarbeitung eines RP-Projektes. Sie ergeben sich einerseits aus der Notwendigkeit, die dargestellten Defizite zu überwinden und andererseits aus den Rahmenbedingungen bei der Durchführung von RP-Projekten. Das Gesamtkonzept steht und fällt mit der Vollständigkeit der im RP-Datenmodell vorhandenen Daten und deren Strukturierung. Daraus ergibt sich die Forderung nach Abbildbarkeit der in den einzelnen Arbeitsschritten von RP-Projekten erzeugten Informationen. Für viele Einzelaktivitäten existieren bereits befriedigende Lösungen. Diese sind in den Gesamtablauf zu integrieren.

Da die Einbindung des Rapid Prototyping in die virtuelle Produkterstellung im Vordergrund steht, müssen Daten mit verschiedenen Unternehmensbereichen austauschbar sein. Das Konzept muss sicherstellen, dass unterschiedliche Informationen beliebiger Herkunft miteinander vernetzbar sind. Ein größtmöglicher Teil dieser Daten soll anhand des zu entwickelnden Schnittstellenformates zwischen den Prozessen transportiert werden und durch geringst mögliche manuelle Eingaben verarbeitbar sein. Für das Schnittstellenformat bestehen insbesondere folgende Forderungen:

- Abbildbarkeit und Zuordnung der Anforderungen an Prototypen
- Einstellbarkeit des Informationsumfanges
- Abbildbarkeit von Schichtgeometrien
- Transport von Projektinformationen
- Vereinheitlichter Zugriff auf die Strukturen

Das Konzept muss in mittelständischen Unternehmen realisierbar sein, denn gerade dort sind die größten methodischen Defizite vorhanden. Zur Sicherstellung der Umsetzbarkeit müssen die Bausteine des Gesamtkonzeptes flexibel an betriebliche Gegebenheiten und zeitliche Veränderungen anpassbar sein. Dabei ist neben der Systemkommunikation auch die Kommunikation der beteiligten Personen in Bezug auf Art, Umfang und Zeitpunkt zu berücksichtigen.

## **4.2 Bestandteile des Gesamtkonzeptes**

Das Gesamtkonzept setzt sich aus den drei Schwerpunkten

- Anwendungsorientierte Strukturierung der RP-Verfahren und RP-Projekte

- Konfiguration und Planung von Rapid Prototyping Technologieketten
- Datenmodell und prozessübergreifendes Schnittstellenformat

zusammen. Die Integration dieser Bausteine in eine Gesamtlösung ist in Bild 4-1 in einer Übersicht dargestellt.

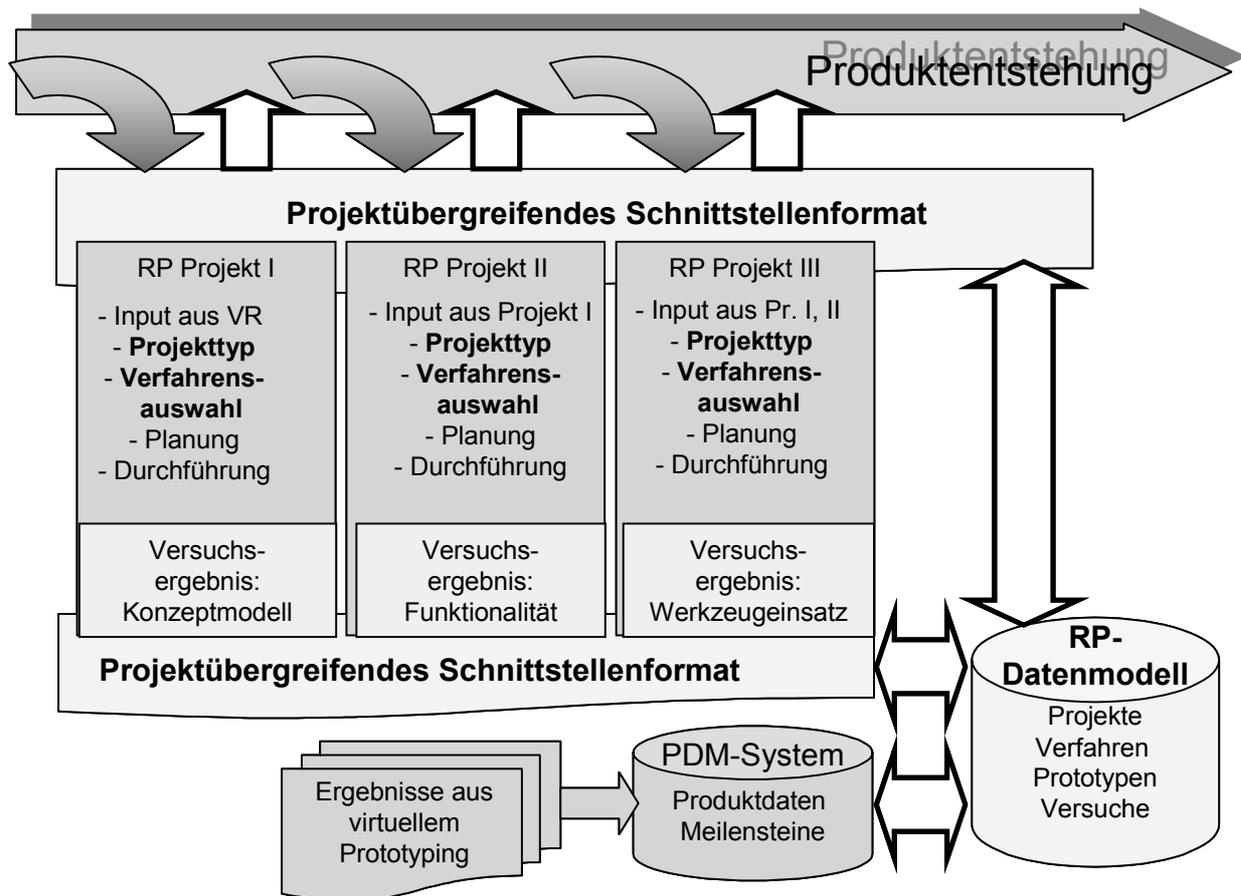


Bild 4-1: Gesamtkonzept

Mit der Klassifizierung der Verfahren und Projekte des Rapid Prototyping vor dem Hintergrund einer Unterstützung aller Durchführungsaufgaben wird der Grundstein für die Spezifikation des RP-Datenmodells und der dazugehörigen Schnittstelle gelegt.

Für die zentralen Bestandteile Konfiguration und Planung generativer Prozessketten und die abschließende Ergebnisrückführung werden Lösungsalternativen aufgezeigt, bewertet und die bestgeeigneten in eine Gesamtlösung überführt. Eine Entkopplung von Konstruktion, Prozessplanung und Bauteilfertigung wird dadurch insofern erleichtert, als dass prinzipiell die Möglichkeit besteht, durch-

gängig mit einer einzigen Referenzdatei zu arbeiten. Deren Inhalte nehmen von Arbeitsschritt zu Arbeitsschritt immer weiter zu und alle Beteiligten können auf die Ergebnisse und Festlegungen der vorangegangenen Prozesse zugreifen.

Ein konsistentes und umfassendes Datenmodell, welches in der Lage ist, die Besonderheiten generativer Fertigungsverfahren abzubilden, ist ein wichtiger Schritt hin zum umfassenden Management des Rapid Prototyping im Sinne einer Integrationslösung. Hierfür wird ein objektorientierter Ansatz verwendet, denn die Handhabung von Klassen und Objekten erleichtert die Definition der notwendigen Arbeitsschrittfolgen und der darin enthaltenen Prozesse und Ressourcen. Um allen Prozessen einen maßgeschneiderten Zugriff auf die relevanten Daten bieten zu können, wird ein rollenspezifisch definierbares Schnittstellenformat konzipiert. Auf diese Weise können aufeinander folgende Arbeitsschritte ohne Medienbrüche oder Datenverlust informationstechnisch zu Prozessketten verbunden werden.

In einer Synthese der Bausteine entsteht das Gesamtkonzept, bestehend aus einer Referenzlösung zur entwicklungsbegleitenden und ganzheitlichen Bearbeitung vernetzter RP-Projekte.

## **4.3 Vorschlag einer Klassifizierung**

### **4.3.1 Ergebnisorientierte Klassifizierung von RP-Technologieketten**

Bestehende Strukturierungen betrachten ausschließlich generative Verfahrensprinzipien. Sie orientieren sich entweder an DIN 8580, Teilmenge Urformen und leiten daraus eine Einteilung in gasförmige, flüssige, pulverförmige und feste Ausgangsstoffe ab oder unterscheiden nach physikalischen Prozessmechanismen, wie in Kapitel 2.2 dargestellt [85]. Im Rahmen der Konfiguration von Technologieketten auf Basis generativer Verfahren ist es jedoch notwendig, einen Bezug zwischen Bauteileigenschaften und der Kombination aus Prozess und Material herzustellen, denn hieraus bestimmt sich die grundsätzliche Verwendbarkeit eines prototypischen Bauteils für den spezifischen Anwendungsfall. Aus der Klassifizierung lassen sich demzufolge die Verfahrensprinzipien vorselektieren. Zusätzlich wird die Betrachtung der Eignung von Folgetechnologien eingeführt. Diese leisten meist einen wichtigen Beitrag zur Erreichung seriennaher Eigenschaften durch Nachbearbeitung oder Vervielfältigung der erzeugten Urmodelle.

Die Einteilung generativer Technologien erfolgt im Rahmen der vorliegenden Arbeit ergebnisorientiert und damit bezogen auf die produzierten Bauteile. Neben den genannten Kriterien ist außerdem die Bandbreite des Einsatzgebietes von Bedeutung. Die erarbeitete Struktur widerspricht bestehenden Klassifizierungen in keiner Weise, sondern stellt eine zweckgerichtete Erweiterung dar.

Bild 4-2 zeigt die erarbeitete Strukturierung generativer Verfahren in einer Übersicht.

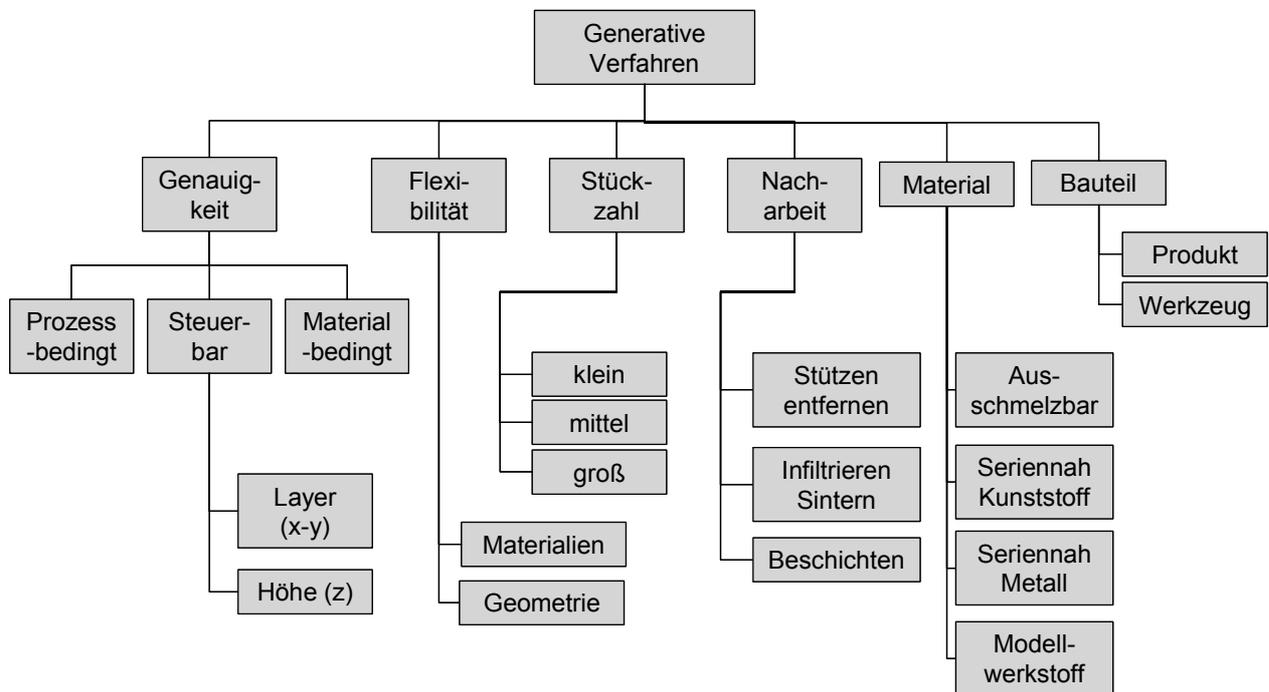


Bild 4-2: Strukturierung nach Ergebnis

Eine zweite, ergänzende Strukturierungssicht betrachtet den Charakter der Folgetechnologien, der die Auswahl und Planung der einzelnen Herstellungsprozesse mitbestimmt, vereinfacht dargestellt in Bild 4-3. Ziel dieser zweiten Klassifizierung ist die bedarfsorientierte Einteilung von Folgeverfahren. Deren Eingangsparameter sind die generativ erzeugten Bauteile, die durch die angewandten Prozesse so zu verändern sind, dass die geforderten Produkteigenschaften anhand der geforderten physischen Prototypen überprüfbar sind.

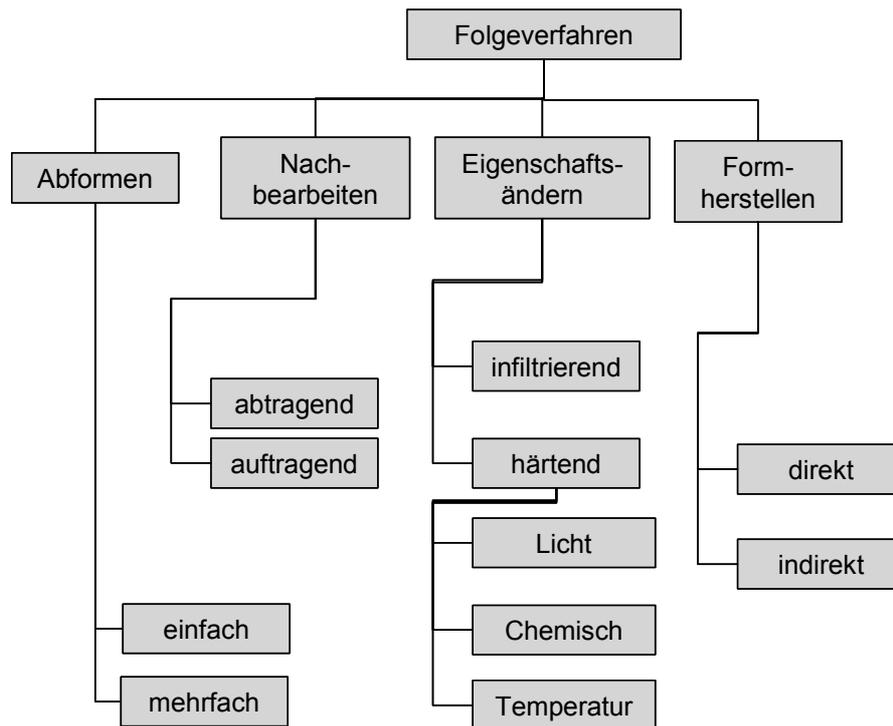


Bild 4-3: Strukturierung nach Prozesseigenschaften

Die Differenz zwischen Ein- und Ausgangseigenschaften der bearbeiteten Bauteile setzt sich dann aus der sequentiellen Anwendung einer beliebigen Anzahl von Einzelschritten zusammen. Jedes Charakteristikum einer Folgetechnologie zieht entsprechende Einschränkungen bei der Auswahl nach sich. Dies ist bei der Implementierung der Auswahlregeln zu berücksichtigen. Beispielsweise kann ein infiltrierendes Folgeverfahren nur Anwendung finden, wenn der erzeugte Bauteilzustand des vorhergehenden Prozesses mit einem infiltrierbaren Material gearbeitet hat und das Bauteil selbst eine gewisse Porosität aufweist.

#### 4.3.2 Kategorisierung von Rapid Prototyping Projekten

Im Folgenden wird die ergebnisorientierte Sichtweise auf RP-Technologieketten durch eine Kategorisierung von RP-Projekten ergänzt. Dies ist zweckmäßig, um die verfügbaren Softwarebausteine auf ihre Funktionalität hin kritisch zu beleuchten und Schwachstellen in den Prozessketten der RP-Projektdurchführung aufzuzeigen.

Damit sind bereits wichtige Kriterien für die Klassifizierung festgelegt:

- Generischer Projektablauf
- Rahmenbedingungen
- Notwendige Prozesse

- Optionale Prozesse
- Zielsetzung, Ergebnistyp und –umfang

Die Projektkategorien können später dazu herangezogen werden, vordefinierte Arbeitsabläufe zu nutzen oder das in der Datenbank abgelegte Projektwissen zielgerichtet abzufragen.

### **Projektkategorie 1: Kommunikation und Konzeption**

Projekte dieser Kategorie sind von geringem technologischen Anspruch an die herstellende Prozesskette, stellen aber im Gegenzug erhöhte Anforderungen an Durchlaufzeit und Gesamteindruck der Prototypen. Die teamorientierte, vergleichende Betrachtung alternativer Formen und Konzepte von Produkten steht im Vordergrund, nicht aber Funktionen der Baugruppen und Bauteile. Durch interdisziplinäre Kommunikation werden die Lösungsvorschläge überprüft und der Lösungsraum eingegrenzt. Die Produktgröße ist entscheidend für die Wahl der geeigneten Visualisierungs-Werkzeuge.

So wird in Projekten dieser Kategorie ein Handy-Gehäuse sicherlich eher durch generativ erzeugte physische Designmodelle veranschaulicht als eine Fahrzeugkarosserie, denn obgleich eine Skalierung meist akzeptabel und oft notwendig ist, ändert sich mit der skalierten Größe eines Produktes doch die Rezeption und damit die Beurteilbarkeit durch den Betrachter. Die Rahmenbedingungen sind durch eine geringe Produktreife gekennzeichnet. Nach heutigem Stand ist die Zusammenarbeit mit dem Modellbau durch informellen und unstrukturierten Datenaustausch geprägt, da in der Regel die Konstruktionen noch nicht freigegeben und damit auch nicht dem Änderungsmanagement unterworfen sind. Die Modelle werden direkt vom Konstruktionsteam und anderen Beteiligten bewertet. Informationstechnische Systeme fokussieren auf die Unterstützung menschlicher Kommunikation, der Abstimmung des Produktkonzeptes und optischer sowie haptischer Merkmale. Das Änderungsmanagement ist noch nicht aktiviert.

### **Projektkategorie 2: Bauteilfunktionalität**

Mit der Überprüfung einzelner Funktionen des Produktes und den damit zusammenhängenden Bauteilen tritt das Rapid Prototyping in Konkurrenz zu Softwarewerkzeugen, die auf der Basis triangulierter Geometrien oder an-

hand von FEM-Netzen eine Simulation des Bauteilverhaltens in der Virtuellen Realität durchführen. In ersten Projekten dieser Art ist in der Regel noch kein Freigabestatus erforderlich. Dennoch ist eine Koordination verteilter Prototyping Aktivitäten notwendig.

Aus technologischer Sicht ist im physischen Prototyping bereits eine enge Abstimmung des RP-Dienstleisters mit dem produktentwickelnden Unternehmen erforderlich. Die Ergebnisse sind meist durch die klar abgegrenzte Aufgabenstellung gut zu interpretieren und Konstruktionsänderungen leicht umzusetzen. Die herstellende Technologiekette kann optimal auf die phasen-spezifisch definierten Merkmale abgestimmt werden. Richtlinien zur Versuchsdurchführung orientieren sich eng an den formulierten Produktmerkmalen und den avisierten Einsatzbedingungen. Eine Bauteilskalisierung oder die Verwendung nicht-serienähnlicher Materialien ist zulässig, wenn Transformationsvorschriften zur Rückübertragung der Ergebnisse verbindlich vorliegen.

### **Projektkategorie 3: Baugruppenfunktionen**

Sollen gesamte Baugruppen im Zusammenspiel der Einzelteile untersucht werden, muss grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass Bauteile unterschiedlichen Reifegrades und Material- und Oberflächeneigenschaften aufeinander abzustimmen sind. Die Interaktionen zwischen den Bauteilen sind als technische Schnittstellen definiert und durch Toleranzen und Passungen spezifiziert. So ist beispielsweise eine Verschraubung durch zahlreiche physikalische Parameter wie Andruckkraft oder Anzugsmoment beschrieben und wird durch geometrische Toleranzen wie Ebenheit der Passflächen ergänzt. Für die Projektkategorie folgt hieraus die Notwendigkeit einer Koordination mehrerer parallel ablaufender RP-Prozessketten, mit dem Ziel einer zeitoptimierten Fertigstellung der gesamten Baugruppe.

Die Verifikation fokussiert auf Baugruppenmerkmale. Diejenigen Bauteilmerkmale, die weder von inneren noch von äußeren Interaktionen der Baugruppe betroffen sind, können bei der Prozessauswahl geringer gewichtet werden. Die Rückführung der Ergebnisse zeichnet sich durch eine erhöhte Komplexität aus, da die Zusammenhänge zwischen Bauteilfunktionen und

Baugruppenfunktionen zu berücksichtigen sind. Eine gute informationstechnische Unterstützung ist von herausragender Bedeutung für das Gelingen.

#### **Projektkategorie 4: Prüfung von Fertigungsprozessen**

In dieser Projektkategorie werden generative Technologieketten zur Herstellung von Werkzeugen genutzt. Diese kommen vielfach bei Gieß- und Umformprozessen zum Einsatz, um Eigenschaften wie Schrumpfung und Verzug der erzeugten Bauteile zu ermitteln und Werkzeugeigenschaften wie Temperaturführung und Entformbarkeit abzusichern. Projekte dieser Kategorie sollen quantitative Aussagen über die Betriebsmittel liefern. Sie sind auf höchste Seriennähe der gefertigten Bauteile ausgelegt, daher wird das Eigenschaftsprofil des Serienwerkstoffes zugrunde gelegt.

Typische Beispiele sind Sand- und Feingießwerkzeuge, die keine Entformungsschrägen enthalten müssen und daher keine geometrischen Restriktionen beinhalten. Hier kann der Vorteil generativer Verfahren, dem Konstrukteur alle Freiheiten der Gestaltung zu geben, voll ausgeschöpft werden. Rückzuführende Ergebnisse betreffen ausschließlich die Werkzeuge, können sich aber indirekt auf die Konstruktion der Bauteile auswirken.

#### **Projektkategorie 5: Einzelstückfertigung**

Projekte dieses Typs können mit dem Begriff *Rapid Manufacturing* in Verbindung gebracht werden. Die Aufgabenstellung derartiger Projekte bezieht sich zwar nicht auf konkrete Losgrößen, doch typischerweise entstehen, bedingt durch den Bauraum generativer Verfahren, Stückzahlen im Bereich von eins bis zu einigen hundert. Die direkte Einsetzbarkeit der hergestellten Bauteile beim Endkunden ist eine Grundforderung dieses Projekttyps. Ein einstufiger generativer Prozess führt bei Nischenanwendungen und der nahtlosen Einbindung in den Produktgestaltungsprozess zu hervorragenden Ergebnissen [86]. Beispielhaft können Designobjekte oder Individualprodukte im medizinischen Bereich genannt werden [87].

#### **Projektkategorie 6: Kleinserienfertigung**

Diese Kategorie erfordert eine klare Abgrenzung, einerseits zu Rapid Tooling und andererseits zu Rapid Manufacturing Projekten. Kleinserien, die auf

der Basis generativer Verfahren entstehen, werden definiert als das Produkt einer abformenden Prozesskette, deren Formwerkzeug direkt generativ oder indirekt durch Abformung eines Urmodells hergestellt wurde. Ein Rapid Tooling Projekt kann demnach ein Teilprojekt dieser Kategorie darstellen.

Die Notwendigkeit einer Versuchsdurchführung und Ergebnisdokumentation hängt von der Zielsetzung ab. Ist die Kleinserie das auszuliefernde Endprodukt, können diese Schritte entfallen. Für das RP-Datenmodell ergibt sich die Forderung, dass RP-Projekte, benannt als Hauptprojekt, andere RP-Projekte, benannt als Teilprojekt beinhalten können, die parallel oder sequentiell ablaufen und ihre Ergebnisse dem Hauptprojekt zur Verfügung stellen.

### **Projektkategorie 7: Reverse Engineering**

Reverse Engineering Projekte bedienen sich der beschriebenen Verfahren zur Digitalisierung vorhandener Werkstücke. Typische Einsatzbereiche sind neben Anwendungen in Medizin, Design und Architektur in erster Linie die Rückführung der Geometrie veränderter physischer Prototypen, die Reparatur beschädigter Werkzeuge und die Herstellung von Ersatzteilen für handwerklich gefertigte Werkstücke. Ein wesentlicher Erfolgsfaktor ist die erzeugte Datenqualität, denn sie ist für das Gesamtprojekt verbindlich. Dies zieht eine hohe Abhängigkeit von Systemen zur Aufbereitung von Digitalisierdaten nach sich.

Die vorgestellte Kategorisierung ist zusammenfassend in Bild 4-4 dargestellt. Sie kann als ein Bestandteil zur Orientierung für strategische Entscheidungen herangezogen werden. Auf der oberen Strukturierungsebene sind die Projekttypen wiedergegeben, darunter die möglichen Gegenstände der Produktverifikation. Hinsichtlich der Kriterien sind unternehmensspezifische Erweiterungen denkbar, die dann auf den Arbeitsablauf zur Durchführung von RP-Projekten zu übertragen sind.

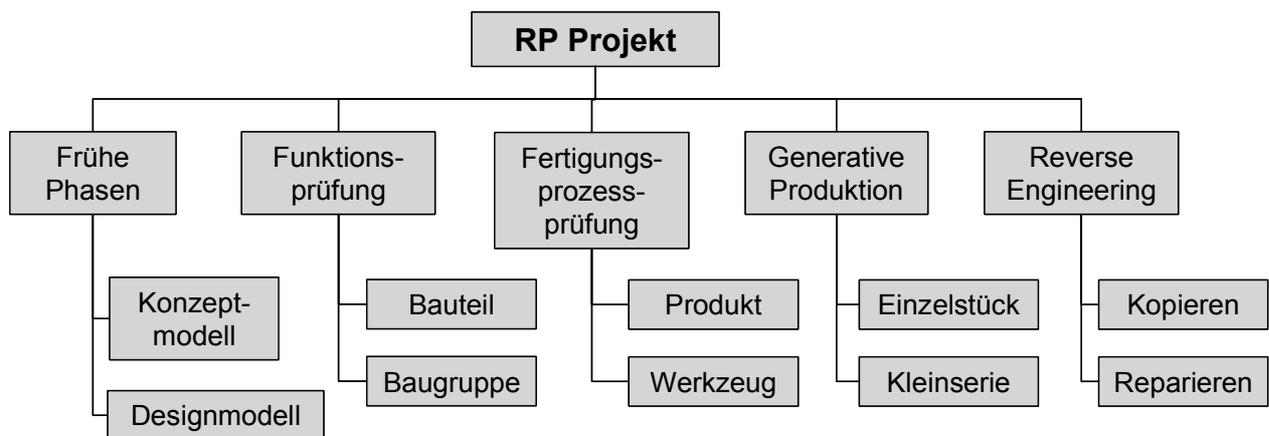


Bild 4-4: Anwendungsorientierte Kategorien von RP-Projekten

Den Kategorien sind in Tabelle 4-1 anhand der eingangs dargestellten Kriterien charakteristische Eigenschaften zugeordnet, um die im nächsten Kapitel behandelten informationstechnischen Systeme darauf abstimmen zu können.

Kategorie	Notwendige Prozesse	Optionale Prozesse	Rahmenbedingungen	Ergebnisse	Zeitaufwand
Kommunikation und Konzeption	RP-Verfahrensauswahl Herstellung Lösungsauswahl	RP-Prozesskonfiguration	Kommunikation	Formgebung	Sehr gering/Stunden
Kooperation und Bauteil-funktionen	RP-Prozesskonfiguration Herstellung Funktionsprüfung Ergebnisdokumentation Abgleich mit Lastenheft	Statistische Auswertungen Anwendung von Übertragungsformeln	Testbedingungen	Toleranzen Werkstoffkenngrößen	Mittel/1-5 Tage
Kollaboration und Baugruppen-funktionen	RP-Prozesskonfiguration Herstellung Funktionsprüfung Ergebnisdokumentation Rückführung	Ein-/Ausbauuntersuchung Abgleich mit Ergebnissen aus virtuellem Prototyping	Zulieferintegration	Interaktion	Mittel/1-2 Wochen
Produktions-verifikation	RP-Prozesskonfiguration Herstellung Werkzeugeinsatz im Serienverfahren Informationsrückführung	Generative Werkzeugreparatur Ergebnisabgleich mit virtuellem Prototyping	Hohe Seriennähe Hohe Anforderungen an Material und Oberfläche	Vorserie Nullserie Kleinserie	Hoch/2-6 Wochen
Kleinserien	RP-Prozesskonfiguration Herstellung	Qualitätssicherung	Direkte Einbindung des Kunden	Generativ hergestellte Produkte	Hoch/3-6 Wochen
Generative Einzelstückherstellung	RP-Prozesskonfiguration Herstellung	Digitalisierung	Direkte Einbindung des Kunden	Einzelstücke	Mittel/1-5 Tage
Reverse Engineering	Digitalisierung Aufbereitung der Daten RP-Prozesskonfiguration Herstellung	Modifikation der Digitalisierdaten	Vorliegen physischer Bauteile	Physische Abbildungen der Bauteile	Hoch/2-4 Wochen

Tabelle 4-1: Eigenschaften der Klassen von RP-Projekten

### 4.3.3 Unterstützung strategischer Entscheidungen

Die Art der Einbindung von Rapid Prototyping Prozessketten hat sich in den meisten Unternehmen aus den Erfahrungen mit Pilotanwendungen heraus entwickelt, eine methodische Unterstützung existiert nur in Ausnahmefällen, insbesondere trifft dies für die frühen Entwurfsphasen zu [88, 89]. In diesem Abschnitt werden daher die strategischen Aspekte der Produktverifikation erörtert, denn sie stellen die Voraussetzung für die erfolgreiche Durchführung von RP-Projekten dar, indem sie den zeitlichen und organisatorischen Rahmen schaffen. Strategische Entscheidungen sind dadurch gekennzeichnet, dass sie sich nicht auf einen spezifischen Anwendungsfall beziehen. Sie orientieren sich in der Regel an qualitativen Kenngrößen und Erfahrungen, was die Automatisierung stark erschwert.

Untersuchungen zeigen, dass ein Mensch bei komplexen Zielstellungen den Weg der Priorisierung von Teilzielen wählt und dabei in der Regel nicht mehr als sieben Einzelziele berücksichtigt [90]. Assistenzsysteme zur Unterstützung der Entscheidungsfindung können hier Vorteile erzielen, wenn die implementierten Methoden und Bewertungsverfahren der Zielstellung angemessen sind.

Entscheidungen können auf unterschiedliche hierarchische Ebenen des Unternehmens bezogen werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden die strategische, die taktische und die operationale Ebene unterschieden, in Anlehnung an Wheelwright [91]. Auf der strategischen Ebene werden Entscheidungen auf Basis der Unternehmensziele getroffen. Hier entsteht ein wesentlicher Einfluss auf Qualität und Kosten der zu entwickelnden Produkte. Von strategischer Bedeutung ist die Frage, ob physische Prototypen einen festen Bestandteil auf dem Weg zum fertigen Produkt darstellen und systematisch in den Entwicklungsablauf eingebunden sind, oder, wie oft in mittelständischen Unternehmen zu sehen, eine Entscheidung für die Herstellung derartiger Bauteile erst beim Auftreten von Problemen in Betracht gezogen wird. Ist die Strategie erst einmal auf physische Prototypen ausgerichtet, ist die Anwendung von Rapid Prototyping Technologien systematisch dahin zu entwickeln, dass die Schwachstellen der Produkt- und Produktionsentstehung frühest möglich aufgedeckt werden können. Auf taktischer Ebene werden die Entscheidungen der strategischen Ebene aufgenommen und phasenspezifische Projektpläne abgeleitet. Hier sind insbesondere Entscheidungen über Einsatzzeitpunkt und -zweck der physischen Prototypen zu treffen. Auch die RP-Projektplanung, insbesondere Termin- und Ressourcenzuordnung, wird hier vorgenommen. Die operationale Ebene ist schließlich für die Durchführung des RP-Projektes und Abarbeitung der Einzelschritte zuständig, dargestellt in Bild 4-5..

Unter der Voraussetzung, dass auf Unternehmensebene im Vorfeld der Entwicklung eine strategische Einbindung des virtuellen und physischen Prototyping beschlossen wurde, sind zu Beginn der Produktentwicklung die

Einsatzmöglichkeiten von Methoden zur Produktverifikation grundsätzlich zu prüfen. Im Gegensatz zu existierenden Ansätzen ist es vorzuziehen, die Bewertung der Vor- und Nachteile des Einsatzes nicht auf die Unternehmensstrategie zu beziehen, sondern auf die Phasen der Produktentwicklung, in deren Rahmen die Überprüfung von Konstruktion und Fertigungsplanung erfolgt.

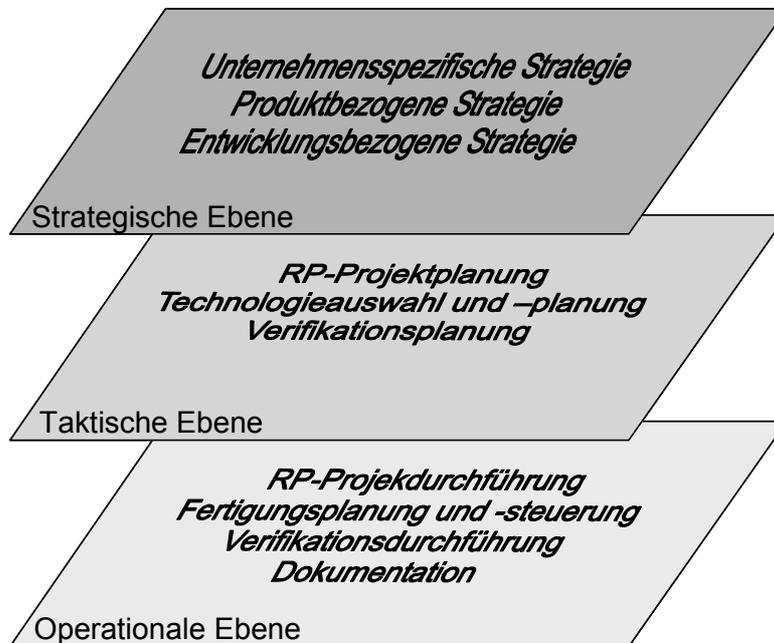


Bild 4-5: Entscheidungsebenen bei der Durchführung von RP-Projekten

Ein unternehmensspezifischer Methodenbaukasten kann hierbei sehr hilfreich eingesetzt werden, eine informationstechnische Unterstützung kann durch ein Diagnosesystem realisiert werden, das anhand eines gestuften Fragenkataloges eine Empfehlung ausspricht. Hierbei ist die Frage zu beantworten, welche Ergebnisse aus Prototyping Projekten erwartet werden. Aus der Zuordnung dieser erwarteten Ergebnisse zu dokumentierten Ergebnisumfängen aus vorangegangenen Projekten und einer aktualisierbaren Abbildung des Standes der Technik hinsichtlich der Aussagefähigkeit physischer und virtueller Methoden lassen sich Hinweise und Richtwerte für strategische Entscheidungen ableiten.

### **Bestimmung des Einsatzzeitpunktes**

Die Definition des geeigneten Zeitpunktes für die Durchführung eines RP-Projektes ist aus der Sicht des Prototyping strategischer Natur, leitet sich aber aus Entscheidungsvorgängen auf der taktischen Ebene der Produktentwicklung ab. Eine Phasendefinition der Produktentwicklung muss als Voraussetzung für eine erfolgreiche Produktverifikation gefordert werden. Innerhalb der Phasen können beliebige Arbeitsprozesse angesiedelt sein. Der Abschluss einer Phase

muss grundsätzlich durch ein Quality Gate oder einen Meilenstein gekennzeichnet sein, deren Ergebnisse inhaltlich beschrieben und beispielsweise anhand von Checklisten überprüfbar sind. Zu jedem Quality Gate werden die projektspezifisch vereinbarten Ziele überprüft und Entscheidungen über den Fortgang der Entwicklung getroffen. Diese Vorgaben liefern die Orientierung für die zeitliche Festlegung von RP-Projekten.

Eine Methode zur Ermittlung des richtigen Einsatzzeitpunktes kann nicht allein auf der Grundlage des Entwicklungsfortschrittes oder der Erreichung von Meilensteinen aufsetzen. Sie muss sich an nachvollziehbaren Kriterien orientieren. Ausnahmen müssen jedoch insbesondere in den frühen Phasen zugelassen sein, da hier die höchste Kostenbeeinflussung des Produktes liegt, noch kein Änderungsmanagement notwendig ist und eine hohe Anzahl von Iterationen zum größtmöglichen Vorziehen des Produktwissens beiträgt. Demnach bietet sich neben einer grundsätzlich phasenspezifischen Triggerung auch die Nutzung von Mechanismen der erfahrungs- und wissensbasierten Entscheidungsfindung in den frühen Entwicklungsphasen an.

Für das RP-Projektmodell ergibt sich daraus die Forderung nach zugeordneter Speicherung der Entscheidungsgrundlagen, der Prototypeigenschaften und einer Beurteilung der Zweckmäßigkeit des RP-Projektes vor dem Hintergrund des Zeitpunktes.

Als wesentliche Einflussfaktoren auf die Wahl des geeigneten Einsatzzeitpunktes ergeben sich folgende Daten für die Entscheidungsfindung:

- Phasenbezogene Vollständigkeit des produktbezogenen Lastenheftes
- Entwicklungsstand des Produktes
- Umfang und Art fehlender Erkenntnisse über das Produktverhalten
- Umfang und Art fehlender Erkenntnisse über die Produktherstellung
- Verfügbarkeit geometrischer und technologischer Eingangsinformationen für das Prototyping

Neben diesen Faktoren müssen weitere Motivationen berücksichtigt werden, die nicht durch Daten in Anwendungssystemen hinterlegt sind.

- Notwendigkeit einer Auswahl aus alternativen Produktkonzepten

- Technologische und wirtschaftliche Auswirkungen der Entscheidung

Da sich physische Prototypen hervorragend als Grundlage für die Bestätigung der angestrebten Produktreife heranziehen lassen, ist eine Rückterminierung des RP-Projektes, ausgehend vom Meilenstein, notwendig. Für diese Aufgabe können beispielsweise die Erfahrungen mit dem Zeitablauf aus vergangenen Produktentwicklungen aus dem RP-Datenmodell entnommen werden. Zusammenfassend wird die Vorgehensweise zur Bestimmung des Einsatzzeitpunktes von physischen Prototypen folgendermaßen spezifiziert:

1. Strategische Definition der Phasen und Meilensteine der Produktentwicklung
2. Bildung von Eigenschaftsgruppen des Produktes und Verknüpfung der Überprüfungszeitpunkte mit entsprechenden Meilensteinen in der Entwicklung. Auf diese Weise ist eine frühzeitige Vollständigkeitsprüfung der geplanten Maßnahmen möglich.
3. Triggern von RP-Projekten durch Rückterminierung von den Meilensteinen ausgehend. Berechnung der Durchlaufzeit kann beispielsweise anhand von Erfahrungswerten aus dem RP-Datenmodell erfolgen.

Findet aus unternehmensbezogenen Gründen eine Festlegung des Einsatzzeitpunktes aufgrund externer Notwendigkeiten statt, sind für die nachfolgenden Arbeitsschritte die methodischen Vorgaben entsprechend anzupassen. An dieser Stelle ist die Entscheidungsunterstützung dann als optional zu betrachten.

### **Bestimmung des Einsatzzweckes**

Eingangsinformationen für die Bestimmung des erwarteten Ergebnisumfanges und damit des Zweckes eines RP-Projektes sind

- Art der zu unterstützenden Entscheidungen im Produktentwicklungsprozess
- Reifegrad der Produktionsplanung
- Vorhandene Ergebnisse aus dem virtuellen Prototyping
- Ergebnisse aus RP-Projekten der vorgelagerten Phasen der Produktentwicklung

Demnach lassen sich aus dem Einsatzzweck bereits Hauptmerkmale des physischen Prototypen ableiten, Bild 4-6. Ist beispielsweise über die Formgebung und Ergonomie zu entscheiden, wirkt sich dies auf die Anforderungen hinsichtlich der zu erreichenden Oberflächen, Gewichte und weiterer haptischer Eigenschaften aus, wohingegen die Materialwahl in den Hintergrund treten kann. Für die Spezifikation des Datenmodells ergibt sich die Notwendigkeit, Vorschriften

und Restriktionen für die Übertragung ausgewählter Testergebnisse auf die Produkteigenschaften repräsentieren zu können.

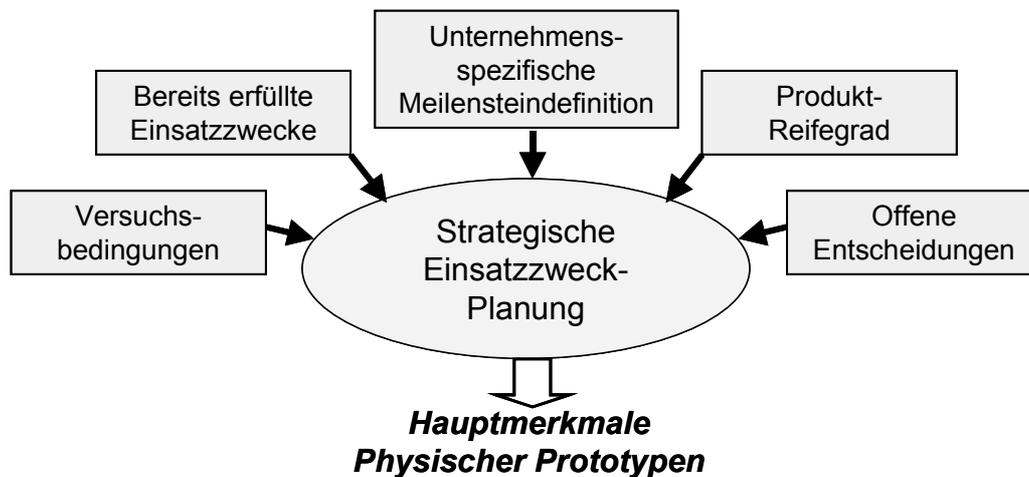


Bild 4-6: Strategische Einsatzzweckplanung

Da neben der Verifikation des Aussehens und der Funktionalität zukünftiger Produkte auch die Sicherung eines reibungslosen Serienanlaufes (ramp up) im Vordergrund der Bemühungen der Produktentwickler steht, sind mehr und mehr zuverlässige Erkenntnisse über Elemente der späteren Serienfertigung, wie beispielsweise das werkstoffliche Verhalten der Bauteile und Werkzeuge oder Eigenschaften des Herstellungsverfahrens gefragt. So kommt es in den späteren Phasen der Produktentwicklung zu einem Übergang von der Produktverifikation zur Produktionsverifikation und damit vom Rapid Prototyping zum Rapid Tooling (RT). Eine weitere Gruppe von Einsatzzwecken entsteht durch diese Ablösung vom Produkt, dessen Serieneigenschaften zu diesem Zeitpunkt nahezu vollständig vorliegen. Für die Einsatzzweckbestimmung sind demzufolge in erster Linie Einflussfaktoren heranzuziehen, die sich auf den Planungsfortschritt des produktbezogenen Fertigungsprozesses beziehen.

### **Betriebswirtschaftliche Aspekte**

Die Kosten und Laufzeiten von RP-Projekten sind in den frühen Phasen der Produktentwicklung niedrig, da der konzeptionelle Charakter der Modelle keine hohen Anforderungen an die fertigenden Verfahren stellt. In fortgeschrittenen Phasen steigen die Kosten meist aufgrund der komplexeren Anforderungen an Prototypen und der erhöhten Aufwände für die Funktionsprüfungen. Grundsätzlich kann jedoch immer davon ausgegangen werden, dass die Kosten für die Durchführung der Prototypenherstellung im Vergleich zum Erkenntnisgewinn vernachlässigbar sind. Beispielsweise zeigt sich bei der Planung von Spritzgießformen in vielen Fällen, dass der Einsatz physischer Modelle des Produktes in erheblichem Maße zur schnellen Erfassung der Problemstellungen beiträgt.

Kosteneinsparungen entstehen demzufolge durch Fehlervermeidung und sind im Vorfeld nur schwer bezifferbar. So ergibt sich die Unternehmensstrategie, RP gezielt zur Kostenreduktion einzusetzen, aus positiven Erfahrungen mit einzelnen Anwendungen, bei denen die Fehlerfolgekosten reduziert werden konnten. In diesem Zusammenhang muss eine Abschätzung der Kosten auf die Folgen einer verbesserten Lösungsfindung fokussieren.

Im Bereich des Rapid Tooling stellt sich das Bild etwas anders dar. Hier können die direkten Kosten in der Werkzeugfertigung erheblich reduziert werden, indem eine stückzahlangepasste Herstellung durch generative Verfahren den konventionellen und meist zeitaufwendigen Werkzeugbau ersetzt. Der Zeitvorteil zeigt sich im Vergleich zur klassischen Fertigung durch Senkerodieren in der stark verkürzten Prozesskette. Es können sich bei komplexen Werkzeugen, bezogen auf die Durchlaufzeit, Differenzen von mehreren Monaten ergeben [92].

In der Schlüsselstellung des Begriffes ‚time to market‘, der neben anderen Einflussfaktoren wie der Reduzierung von Produktionskosten oft mit höchster Priorität genannt wird, drückt sich die Bedeutung des Faktors Zeit für eine effiziente Produktentwicklung aus. Der durch Einsatz von Rapid Prototyping erzielbare Zeitgewinn wird daher oft in den Vordergrund der strategischen Überlegungen gestellt. Bei Standardanwendungen wie beispielsweise dem Selektiven Lasersintern von Kunststoff ist dies sicher auch gerechtfertigt, da die RP-Dienstleister heute in der Lage sind, derartige Aufträge binnen 24 Stunden auszuführen. Auch Nischenanwendungen wie Architektur oder medizinische Operationsvorbereitung profitieren am meisten vom Zeitgewinn [93]. Generell ist aber die Zeitspanne von der Anfrage bis zum Vorliegen der Verifikationsergebnisse prototypischer Bauteile ausschlaggebend für die Planung. Eine einseitige Betrachtung der reinen Fertigungszeit führt folglich aufgrund der engen Betrachtungsweise einzelner Prozessschritte zu Fehleinschätzungen bezüglich der Gesamteffekte.

Aus diesen Vorbetrachtungen können folgende Richtlinien für die betriebswirtschaftliche Beurteilung von RP-Projekten abgeleitet werden:

- RP-Projektkosten sind phasenabhängig zu bewerten
- Zeit und Kosten der Datenaufbereitung sind einzubeziehen
- Die Auswirkungen komplexer Technologieketten sind im Rahmen der Prozessplanung zu berücksichtigen
- Der Koordinationsaufwand zur Herstellung durch die ausgewählte Technologiekette ist zu schätzen
- Transport- und Liegezeiten sind einzurechnen

Die dargestellten Zusammenhänge sind in der folgenden Tabelle nochmals zusammengefasst. Es handelt sich hierbei um eine Abschätzung durchschnittlicher Effekte. Im konkreten Anwendungsfall können daher einzelne Aspekte anders zu bewerten sein. Für die Vorgabe einer Tendenz ist die Aussagekraft jedoch gegeben.

Anwendungsbereich	Direkte RP-Projektkosten	Potenzial vermiedener Änderungskosten	Zeitgewinn
Frühe Phasen	Niedrig	Hoch	Mittel
Funktionsprüfung	Niedrig	Hoch	Hoch
Fertigungsprozessprüfung	Mittel	Mittel	Hoch
Generative Produktion	Hoch	Niedrig	Mittel

Tabelle 4-2: Betriebswirtschaftliche Aspekte

## 4.4 Entwicklung einer Methode zur Konfiguration generativer Technologieketten

### 4.4.1 Einleitung

Im Produktentwicklungsprozess bedeutet der Begriff ‚Konfigurieren‘ das Zusammenstellen oder Anordnen existierender Elemente oder zusammengesetzter Elementgruppen zu einem neuartigen Ganzen [94]. Konfigurieren beschreibt die Auswahl, Zusammenstellung und Anordnung von standardisierten Elementen zur Erfüllung eines vorgegebenen Anforderungsprofils.

Die generativen Verfahren werden im Rahmen dieser Arbeit als Kerntechnologie und Initiator der Produkt- und Produktionsverifikation auf Basis physischer Prototypen betrachtet. Die richtige Einbettung dieser Technologie in eine Rapid Prototyping Prozesskette entscheidet wesentlich über den Erfolg von RP-Projekten. Dabei ist zu beachten, dass die generativen Verfahren an unterschiedlichen Positionen der Technologiekette integriert werden können. Als Ergebnis der Prozessdefinition wird eine Sequenz von Prozessschritten erwartet, die aufeinander abgestimmt sind und als Ergebnis physische Prototypen liefern, die in Anzahl und Eigenschaften der Prototypspezifikation entsprechen. Nicht immer ist auch die Übereinstimmung der quantitativen Werte der jeweiligen Eigenschaft gegeben. So kann die Eigenschaft ‚Biegemodul‘ durch Verwendung des Serienwerkstoffes zwar vergleichbar sein, beim Prototypen tritt jedoch durch das Fertigungsverfahren eine anisotrope Abweichung in Abhängigkeit der Belastung auf. Die Zusammenhänge zwischen Produkteigenschaft und Proto-

typeigenschaft müssen daher zu Beginn des Projektes definierbar sein. Nach Auswertung der Versuche sind die Soll-Eigenschaften mit den Ist-Eigenschaften zu verknüpfen und in die Produktentstehung zurückzuführen. Zur Abbildung dieser Zusammenhänge sind sowohl qualitative als auch quantitative Beschreibungen notwendig.

Durch zunehmenden Umfang der Datenmengen und höhere Komplexität der Aufgabenstellung bei verkürzter Durchlaufzeit wird eine intuitive Bearbeitung von Planungsaufgaben immer weiter erschwert. Ein gewisser Anteil an Interaktivität und Freiheit zur intuitiven Bearbeitung einzelner Aufgaben muss dennoch gewährleistet sein. An diesen Stellen ist besonders auf die Bereitstellung von Referenzen auf allgemeines anwendungsorientiertes Wissen oder Erfahrungswissen aus vorangegangenen Projekten mit ähnlicher Problemstellung zu achten.

#### 4.4.2 Ansatz

Rechnerunterstützte Konfigurationssysteme tragen vorrangig im Bereich der Konstruktion, zunehmend aber auch im Vertrieb komplexer Produkte mit einer hohen Anzahl an Varianten zu einer Effizienzsteigerung hinsichtlich Zeit, Kosten und Qualität bei. Die Rechnerunterstützung zur Lösung einer Konfigurationsaufgabe erfordert Wissen über die verfügbaren Elemente und ihre Beziehungen zueinander [95]. Weiterhin ist Wissen zur Bewertung alternativer Lösungen im System verfügbar zu machen.

Im Rahmen der klassischen Werkzeug gebundenen Bearbeitung sind methodische Lösungen zur automatisierten Ermittlung optimaler Fertigungsfolgen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Verfahrenstypen ansatzweise vorhanden [96]. Grundsätzlich eignet sich der Featurebegriff sehr gut für die Ableitung geeigneter Fertigungstechnologien, zumindest wenn nur die Herstellung von Produktgeometrie-Elementen zuzuordnen ist. ULBRICH schlägt ein Kernfeaturekonzept vor, um eine Verknüpfung zwischen Konstruktion und Fertigung zu schaffen. Kernfeatures werden als Objekte betrachtet, die betriebs- und produktspezifisch definiert sind und mit vorhandenen Betriebsmitteln herstellbar sind [97]. Die generativen Verfahren stehen einer solchen Lösung, zumindest teilweise, im Wege, denn ihr großer Vorteil liegt gerade in der geometrischen Restriktionsfreiheit begründet. Daher ist die Frage zu beantworten, welche geometrischen und technologischen Eingangsgrößen für die Auswahl und Konfiguration generativer Prozessketten heranzuziehen sind.

Ein physischer Prototyp wird immer nur einen Teil der Serieneigenschaften widerspiegeln. Durch die Verfahrensauswahl wird bestimmt, ob die realisierten Eigenschaften der physischen Prototypen mit den Vorgaben übereinstimmen und übertragbare Ergebnisse aus den Prototypuntersuchungen hervorgehen. Die Auswahl der Prozesse, die zur Herstellung verwendet werden, muss daher

in Abhängigkeit vom Reifegrad der Konstruktion an den Anforderungen orientiert werden, die in der jeweiligen Entwicklungsphase verfügbar sind. Es handelt sich dabei nicht um die Errechnung von Materialwerten oder zu erwartenden Kosten, sondern um ein Abwägen von zu erzielenden Vorteilen quantitativer und qualitativer Natur.

Im Folgenden sollen entlang der Arbeitsschritte von der Funktionsdefinition bis zur Versuchsauswertung die notwendigen Rahmenbedingungen für die effiziente Abwicklung von Projekten im Rapid Prototyping entwickelt werden.

Derartige Aufgabenstellungen lassen sich unter Zuhilfenahme des Systembegriffes und der daraus abgeleiteten Systemtheorie sehr vorteilhaft bearbeiten. Attribute, Funktionen, Strukturen und Hierarchie finden Verwendung als Beschreibungselemente [98]. Die daraus entstehenden Beziehungsnetze ersetzen monokausale Ursache-Wirkungs-Ketten und leiten den Übergang von einer eindimensionalen hin zur ganzheitlichen Sichtweise ein.

In der Theorie Abstrakter Systeme werden Komplexitäts-Klassen von Systemen unterschieden. Während ein Terminal-System lediglich Transformationen von Inputs in Outputs ausführt, muß ein zielsuchendes System beim Finden des Outputs ein Ziel verfolgen, d.h. eine Funktion minimieren bzw. maximieren. Die Essenz eines solchen Systems ist eine Hierarchie von Zielebenen und eine Rückkopplung zwischen den Ebenen. Wenn Komponenten eines komplexen Systems zielsuchend sind, dann heißt das System zielsuchendes System. Zielsuchende Systeme können weiter hierarchisch gegliedert sein. Sie heißen dann komplexe zielsuchende Systeme und bestehen aus einem Gesamtsystem, das in Subsysteme gegliedert ist. Die Eingangsgröße  $x$  wird dabei in Teileingangsgrößen  $x_i$  der Subsysteme aufgesplittet. Dementsprechend wird die Ausgangsgröße aus den Ergebnissen der Subsysteme kombiniert. Für jedes Subsystem wird ein lokales Ziel definiert, dessen Verfolgung durch einen Koordinator überwacht wird. Bild 4-7 veranschaulicht die Struktur eines komplexen zielsuchenden

Systems [99]. Der Koordinator  $D_0$  koordiniert Aktivitäten der lokalen Entscheidungssysteme  $D_i$ . Zur Erreichung des globalen Ziels sind Aspekte der Anordnung und Dimensionierung einzubeziehen.

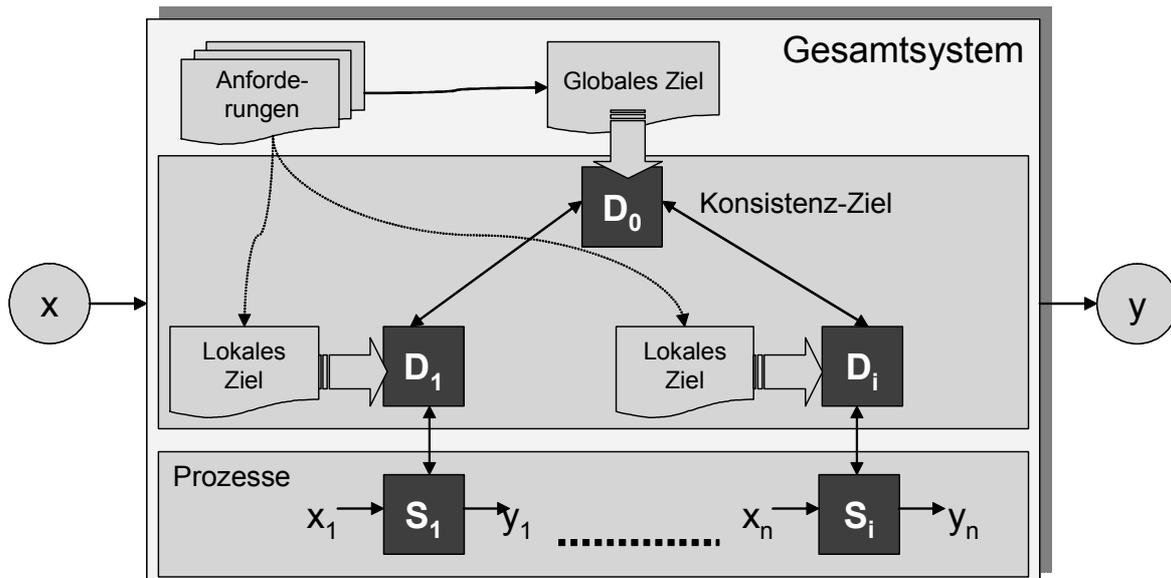


Bild 4-7: Abstrahiertes Basissystem zur Konfiguration

Zur Lösung der Auswahl, Anordnung und Spezifikation von Rapid Prototyping Prozessketten wird der Ansatz des zielsuchenden Systems übertragen und auf die dargestellten Randbedingungen angepasst. Unter Berücksichtigung der Sachverhalte sollen vier Phasen durchlaufen werden:

- die Ableitung der Anforderungen aus der Produktbeschreibung, um lokale Ziele festzulegen
- die Auswahl der verwendbaren Prozesse,
- die Zusammenstellung alternativer Prozessketten unter Berücksichtigung des globalen Ziels und
- die Parametrisierung der konfigurierten Instanzen zur Optimierung lokaler Ziele

In den folgenden Abschnitten werden die Phasen detailliert und deren Ablauf erarbeitet.

#### 4.4.3 Produktgetriebene Ableitung des Zielsystems

Von der Tatsache ausgehend, dass Produkte und deren Komponenten der Erfüllung von Aufgaben dienen, müssen zu Beginn der Produktentwicklung die vom Produkt zu erfüllenden Anforderungen spezifiziert sein. Sie lassen sich in Forderungen an Funktionen und Eigenschaftsforderungen unterteilen und werden nach Prioritätsstufe in Festforderungen, Zielforderungen und Wunschforderungen unterschieden. Die Festforderung muss zwingend erfüllt werden und schränkt auf diese Weise direkt die Anzahl möglicher Lösungen ein. Zielforde-

rungen lassen einen gewissen Spielraum für eine Gesamtoptimierung zu. Anhand der Wunschforderungen kann unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Auswirkungen beispielsweise die Produktakzeptanz verbessert werden. Hinsichtlich der Zuordnung zum Produkt sind direkte und indirekte Forderungen unterschiedlich zu handhaben. Direkte Forderungen beziehen sich auf spezifische Komponenten und sind daher gut abgrenzbar. Ist zunächst eine Übertragung der Forderung auf Funktionsgruppen oder Beziehungen der Komponenten notwendig, handelt es sich um indirekte Forderungen. Der Produktentwickler muss in den frühen Phasen der Produktkonstruktion die Anforderungen in Produktmerkmale umsetzen. Beispielsweise führt die Forderung nach Dichtheit einer Produktkomponente zur Realisierung von Dichtungselementen. Zur Spezifikation der Dichtungen sind weitere Parameter wie das abzudichtende Medium, der Druck, die Temperatur und weitere Rahmenbedingungen für die konkrete Lösung ausschlaggebend.

Jede Funktion kann demnach aus 0 bis beliebig vielen Teilfunktionen bestehen. So entsteht neben der Produktstruktur eine assoziierte Funktionsstruktur. Eigenschaften wie beispielsweise Farbe oder Gewicht sind statische Festlegungen und können sich auf einzelne Bauteile, Baugruppen oder das gesamte Produkt beziehen. Jede Komponente des Produktes muss Träger mindestens einer Funktion oder Eigenschaft sein, wie in Bild 4-8 verdeutlicht wird. Zusätzlich sollten Bauteile und Komponenten eine Information über deren Verwendungshäufigkeit enthalten, denn hierin spiegelt sich die Auswirkung eines Bauteilversagens wider.

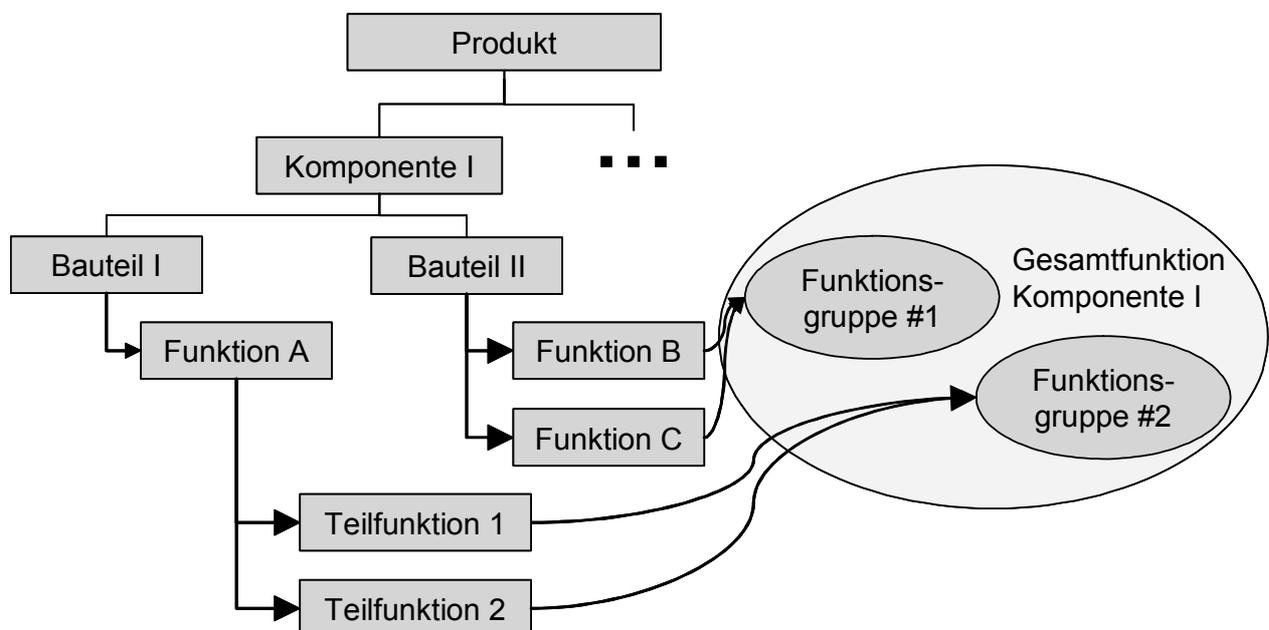


Bild 4-8: Struktur der Produktfunktionen

In Verifikationsprojekten geschieht die Überprüfung der Funktionen und Eigenschaften. Dies kann sowohl durch die Herstellung physischer Produktprototypen als auch physischer Werkzeugprototypen erreicht werden. Demzufolge ist auch eine funktionsorientierte Sichtweise auf die Werkzeugkonstruktion zweckmäßig. Dort ergeben sich die Funktionen aus dem Fertigungsprozess und aus den zu erzeugenden Produkteigenschaften wie Werkstoff und Oberflächenbeschaffenheit.

An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass Produkthanforderungen nicht gleichzusetzen sind mit denjenigen Anforderungen, die für die Definition von RP-Technologieketten zu verwenden sind. Daher wird eine Erweiterung der vorgestellten Strukturierung vorgenommen, mit dem Ziel, die aus dem Lastenheft hervorgegangenen Funktionen und Eigenschaften mit den für die Produktverifikation relevanten Anforderungen zu verknüpfen, wie in Bild 4-9 gezeigt. Das Produktmerkmal als zentrale Instanz verbindet so die Funktionen und Eigenschaften, die zu seiner Ausprägung geführt haben, mit den für die physische Verifikation erforderlichen Eingangsinformationen. Anschließend sind die Merkmale zu gruppieren und entsprechenden RP-Projekten zuzuordnen. Auf diese Weise wird erstens die Vollständigkeit der vorgesehenen Verifikationsumfänge bereits im Vorfeld sichergestellt, zweitens lassen die Ergebnisse verbesserte Rückschlüsse auf die Funktionen zu, was die Umsetzung in Produktänderungen erleichtert.

Die mit der Zuordnung verbundene Transformation beschreibt, wie das Merkmal im Rahmen der Verifikation Berücksichtigung findet und stellt sicher, dass jedes zu prüfende Produktmerkmal im Anforderungskatalog der Prototypherstellung enthalten ist. Damit ist eine bidirektionale Assoziativität geschaffen, die eine Brücke von der Produktdefinition zur physischen Produktverifikation schlägt.

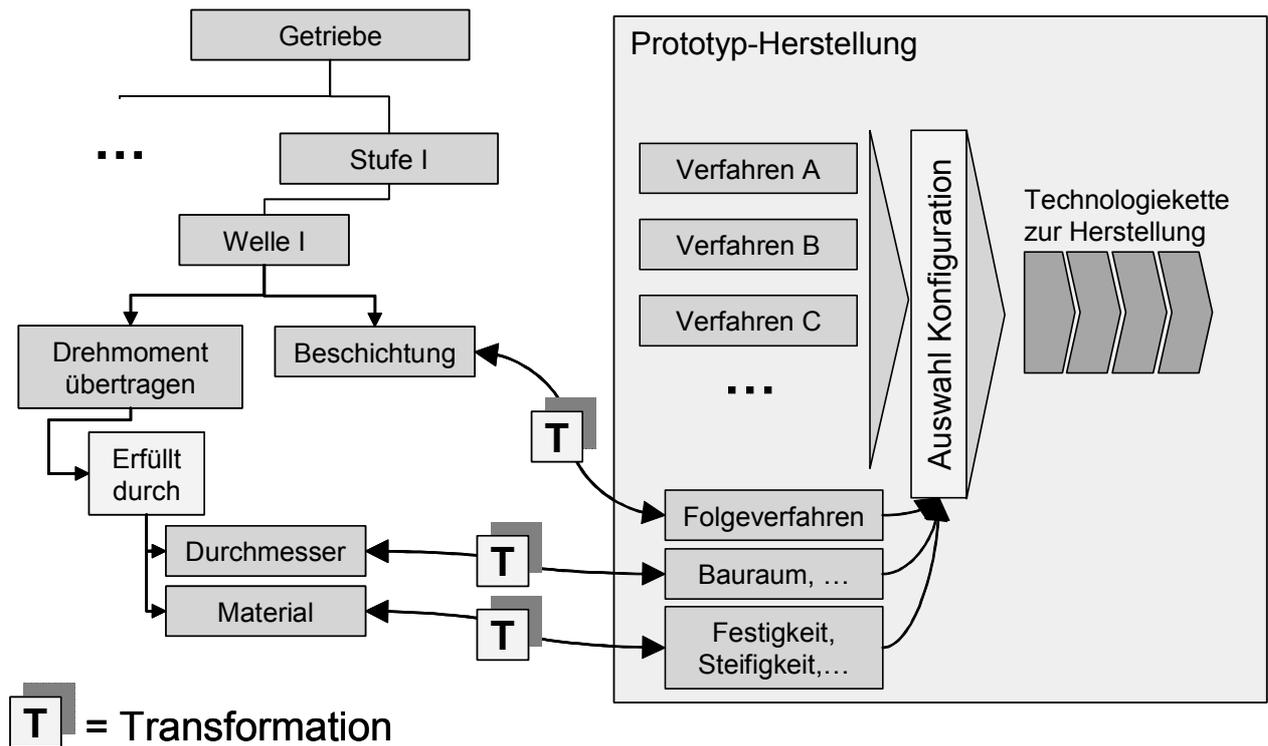


Bild 4-9: Produktmerkmale steuern die Definition von Technologieketten

Wie die Analyse bestehender Ansätze gezeigt hat, sind die meisten Methoden zur Verfahrensauswahl nicht ausreichend hinsichtlich ihres Angebotes an Mechanismen zur automatischen Berücksichtigung und Bewertung der Anforderungen an physische Prototypen, insbesondere derjenigen Forderungen, die projekt- und phasenspezifisch definiert sind. Eine integrierende Vorgehensweise muss daher insbesondere diejenigen Medienbrüche eliminieren, die bei der Übertragung der Anforderungen in das RP-Projekt auftreten. Funktionsorientierte Modellersysteme (Function Oriented Design, FOD) können an dieser Stelle einen wesentlichen Beitrag leisten [100].

Doch auch andere Systeme, auch bekannt als Requirement Engineering Systeme, bieten entsprechende Unterstützung [101]. Aus Tabelle 4-3 geht eine Übersicht der in Frage kommenden Informationen hervor.

Bauteil- beschreibung	Typ	Aus FOD, CAD exportierbar	Aussage- kraft	Eignung für RP Konfigura- tion und Pla- nung
Bounding Box (H*B*T)	Geometrie	Ja	Hoch	Sehr gut
Bounding Box Vo- lumen / Bauteilvo- lumen	Geometrie	Ja	Mittel	Gut
Analytische Geo- metrie	Geometrie	Ja	Hoch	Gut
Freiformgeometrie	Geometrie	Ja	Niedrig	Gering
Produktstruktur	Struktur	Ja	Hoch	Mittel
Funktionsstruktur	Struktur	Ja	Hoch	Sehr gut
Features	Geometrie/ Technolo- gie	Teilweise	Mittel	Gering
Toleranzangaben	Technolo- gie	Teilweise	Hoch	Sehr gut
Oberflächenanga- ben	Technolo- gie	Nein	Hoch	Sehr gut
Material	Technolo- gie	Ja	Hoch	Sehr gut
Physikalische Ei- genschaften	Technolo- gie	Teilweise	Hoch	Sehr gut
Farbe	Technolo- gie	Bedingt	Hoch	Gut

Tabelle 4-3: Verwendbarkeit bauteilbezogener Beschreibungen

Verifikationsaufgaben wie beispielsweise *„Druckbehälter in Form und Funktion fertiggestellt“* müssen in Einzelprüfungen zerlegt werden, um die benötigten Informationen selektieren zu können. Um das Beispiel eines Druckbehälters fortzuführen, wären entsprechende Prüfungen aufzugliedern in *Formgebung*, *Dichtheit bei Belastung* und *Einbauuntersuchung*. Zunächst ist, falls nicht bereits bei der strategischen Gesamtplanung geschehen, für jede Prüfung eine Festlegung zu treffen, ob Rapid Prototyping geeignet ist, die notwendigen Entscheidungsgrundlagen zu liefern. Im Anschluss lassen sich meist mehrere For-

derungen mit einem Prototypen assoziieren, beispielsweise *Formgebung* und *Einbauuntersuchung*. Redundanzen sollten dabei vermieden werden, es sei denn, dass explizit eine mehrfache Eigenschaftsüberprüfung zur Erreichung einer höheren Aussagesicherheit benötigt wird. Die vorgeschlagene Vorgehensweise ist in Bild 4-10 grafisch dargestellt.

Prototypische Funktionen können sich von Produktfunktionen unterscheiden, wenn sichergestellt ist, dass Vorschriften oder Algorithmen zur Übertragung der Testergebnisse auf die Produktfunktionen vorhanden sind. Beispielsweise können Untersuchungen an skalierten Bauteilen stattfinden, wenn der Einfluss der Skalierung auf das Produktverhalten bekannt ist.

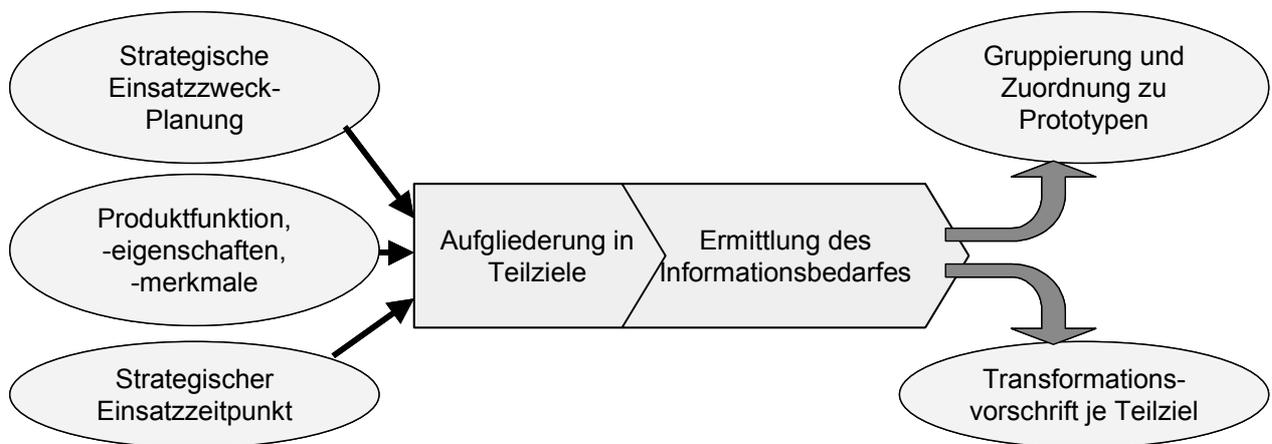


Bild 4-10: Vorgehensweise bei der Projektdefinition

Neben Kenngrößen der physischen Prototypen sind organisatorische Größen für die RP-Prozesskonfiguration notwendig. Derartige Daten können aus Enterprise Resource Planning (ERP) Systemen bezogen werden. Sie bestimmen im Wesentlichen über die zulässige Dauer der Produktverifikation und grenzen die Summe der geeigneten Technologieketten ein.

Die wichtigsten Parameter sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Parameter	Typ	Aus ERP exportierbar	Aussagekraft organisatorisch	Aussagekraft technologisch	Eignung für RP Konfiguration
Losgröße	Zahl	Ja	Hoch	Hoch	Hoch
Lieferzeit	Datum	Ja	Hoch	Mittel	Hoch
Ressourcen	Status	Ja	Hoch	Mittel	Mittel
Kosten	Zahl	Ja	Mittel	Mittel	Mittel

Tabelle 4-4: Eignung organisatorischer Parameter

Die Komponenten und Bauteile eines Produktes weisen bis in die späten Phasen der Entwicklung einen unterschiedlichen Reifegrad auf. Beispielsweise zeigt sich dies an der Formgebung. Manche Produkte erfordern ein Vorgehen, bei dem die Funktionsträger im Mittelpunkt des Styling stehen, auch als ‚form follows function‘ bezeichnet. Andere Produkte sind in ihrer Form durch Stylingvorgaben, aerodynamische Randbedingungen oder notwendige technische Schnittstellen stark vordefiniert und erhalten ihre Funktionalität durch geschickte Gestaltung und Anpassung der Funktionsträger. Bei der Berücksichtigung von Merkmalen, die zum Anforderungsumfang eines RP-Projektes beitragen, ist demzufolge auf die Bedeutung des Parameterwertes in Bezug auf die Entwicklungsreife zu achten. Dies soll an einem Beispiel erläutert werden.

Einem Bauteil, das aus Aluminium bestehen soll, wird in der Produktdokumentation dieses Material zugewiesen, unabhängig vom aktuellen Detaillierungsgrad der Geometrie. Zur Unterstützung des physischen Prototyping wäre hingegen eine Beziehung der entsprechenden Werte zu Quality Gates oder Meilensteinen wünschenswert, da die Eigenschaftsprofile der Bauteile sich mit der Entwicklungsreife verändern, wie in Kapitel 2.4 dargestellt. Die für Verifikationsprojekte relevante Materialzuweisung wird daher in frühen Phasen nur durch eine Mindestfestigkeit eingeschränkt sein, um das Zerbrechen von Konzeptmodellen zu verhindern. Im weiteren Verlauf schränkt sich der zulässige Wertebereich des Materials zunehmend ein, und letztendlich wird das Serienmaterial zu überprüfen sein. Zur Realisierung dieser Forderung wird vorgeschlagen, phasengesteuerte Regeln zu verwenden. So könnte beispielsweise eine Anfrage an das PDM-System gerichtet werden, die dem Anwendungssystem die Entwicklungsreife und die zu verifizierenden Produkteigenschaften übermittelt.

Die phasenspezifischen Prototypeigenschaften werden daraufhin entsprechend eingestellt, Bild 4-11.

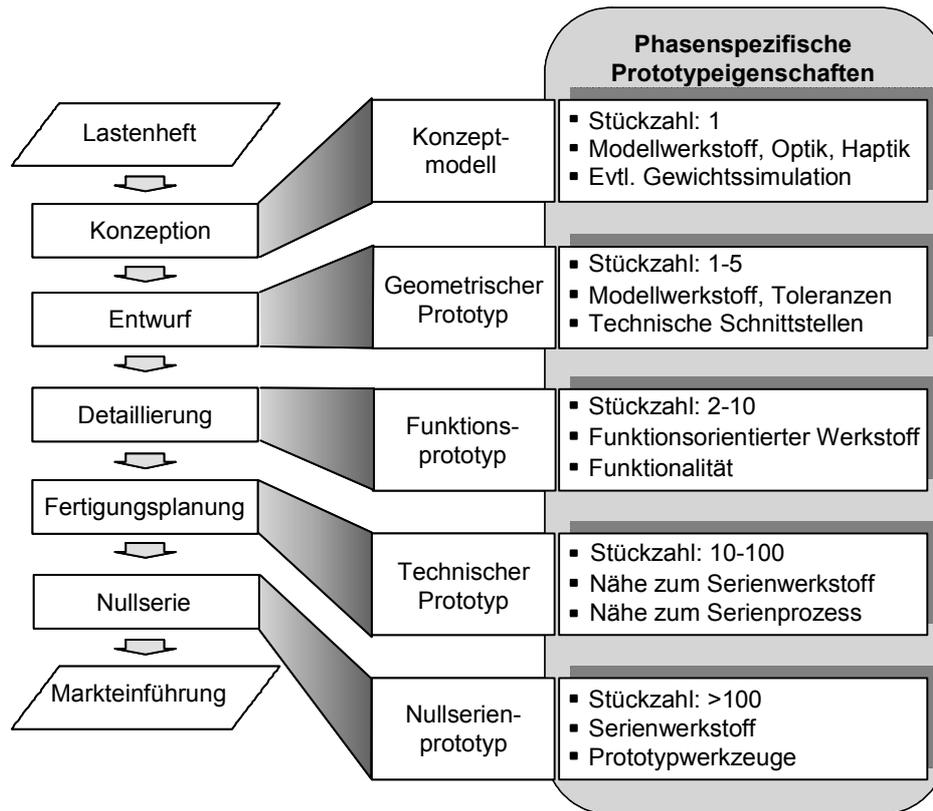


Bild 4-11: Phasenspezifische Eigenschaften

Eine entsprechende Vorgehensweise ist ebenfalls für toleranzbehaftete numerische Parameter wie Längen, Abstände oder Passungen realisierbar. Die Festlegung von phasenspezifisch gültigen Toleranzwerten wäre für die physische Produktverifikation durchaus hilfreich. Zulässige Toleranzbereiche stellen einen der wichtigsten Eingangsparameter für die Auswahl der Technologieketten dar und wirken direkt auf die Kosten von RP-Projekten. Im Sinne der durchgängigen Unterstützung kann diese Forderung durch Nutzung des beschriebenen Funktions- und Eigenschaftsmodells erfüllt werden. Ist beispielsweise eine Passungstoleranz für eine zu prüfende Funktion notwendig, wird sie in das Anforderungsprofil für das entsprechende RP-Projekt übernommen. Eine hohe Wichtigkeit der Funktion vererbt sich im Funktionsmodell automatisch auf die untergeordneten Forderungen wie ‚Passung innen‘ ‚Passung außen‘ in den entsprechenden Bauteilen. Ist die Funktion dagegen nicht Gegenstand des Projektes, wird eine Standardvorgabe aus der Beschreibung des nächsten Quality Gates übernommen.

Die Passung übt in diesem Fall einen geringeren Einfluss auf Auswahl und Konfiguration der Technologiekette aus. Ein Beispiel ist in Tabelle 4-5 zu sehen.

Phase	Zugeordnete Abmessungen	Zulässige Toleranz
Quality Gate I	Alle	0,2 %
Quality Gate II	0 – 100 mm	0,2 %
	>100 – 200 mm	0,15 %
	> 200 mm	0,1 %
Quality Gate III	0 – 100 mm	0,15 %
	>100 mm	0,1 %

Tabelle 4-5: Zuordnung von Wertebereichen bei der Meilensteindefinition

Um die Vorgehensweise einer dynamischen Zuweisung von Anforderungen zu RP-Projekten zu erreichen, wird für alle formulierten quantitativen Anforderungen ein Gewichtungsfaktor eingeführt. Er wird mit der Anforderung fest assoziiert, kann jedoch in Abhängigkeit äußerer Einflüsse wie bevorstehender Quality Gates oder in Abstimmung mit vorhergehenden Verifikationsprojekten unterschiedliche Werte annehmen, die jeweils im Rahmen des aktuellen RP-Projektes archiviert werden, um eine hohe Nachvollziehbarkeit zu erreichen. Ausgehend von der eingangs beschriebenen Aufteilung in Forderungsarten besteht dann innerhalb der RP-Projektplanung die Möglichkeit, entsprechende Gewichtungsbereiche im Vorfeld zu definieren. Beispielsweise wäre einer Festforderung ein Erfüllungsgrad von 100 % zuzuweisen, die damit ein K.O. Kriterium darstellt. Zielforderungen erhalten geringere Gewichtungen von 50 – 90 % und Wunschforderungen schließen sich im unteren Bereich zwischen 10 und 50 % an.

#### 4.4.4 Aufbereitung von Prozessinformationen

Die Konfiguration einzelner Verfahren zu einer Technologiekette ist nur möglich, wenn im Vorfeld eine Analyse der Prozesseigenschaften stattgefunden hat. Hierzu müssen die Mechanismen bekannt sein, die der Prozess verwendet, um die Eingangsobjekte in Ausgangsobjekte zu wandeln. Da neben den Fertigungsverfahren auch Verfahren zur Datenaufbereitung Gegenstand der Betrachtungen sind, können die Objekte sowohl informationstechnischer als auch physischer Natur sein. Jedem fertigenden Prozess wird eine entsprechende Repräsentation des physischen Prototypen zugeordnet. Die Mechanismen eines Prozesses müssen in ihrer Gesamtheit eine Umwandlung vom Eingangs- in den Ausgangszustand bewirken. Zwischen zwei Prozessen existiert immer genau eine Beschreibung des dort aktuellen Zustandes.

Im Folgenden wird beispielhaft die Analyse des Prozesses *Selektives Lasersintern* (SLS) präsentiert und daraus Richtlinien für die übergreifende Prozessplanung abgeleitet. Diese Vorgehensweise kann prinzipiell auf alle denkbaren Konfigurationen von Technologieketten übertragen werden. Die technologische Analyse ist für jeden Prozess einmalig durchzuführen.

In einem ersten Schritt erstellt ein Experte die Prozessbeschreibung, wie sie beispielhaft in Bild 4-12 dargestellt ist. SLS setzt sich technologisch aus zwei Komponenten zusammen, davon  $K_1$  zum Materialauftrag und  $K_2$  zur lokalen thermoplastischen Phasenumwandlung und anschließender Aushärtung. Pro Bauprozess ist genau ein Material vom Typ *Pulver* zugeordnet. Stützkonstruktionen sind nicht notwendig. Physikalischer Mechanismus ist thermische Aufheizung durch Lichtwellen.

- **Eigenschaften**
  - Kleinste Schichtdicke =  $f(\text{Korngröße, Maschinensteuerung})$
  - Kleinste Wandstärke =  $f(\text{Laserfokus, Korngröße})$
  - ...
- **Wirkmechanismus**
  - thermoplastische Umwandlung
- **Maschine**
  - Bauraum ( $B \cdot H \cdot T$ )
  - ...
- **Stellgrößen**
  - Laserleistung (wirkt auf Energiezufuhr im Material)
  - Schichtdicke (wirkt auf Schichtverbindung, Bauzeit,...)
  - Skalierung (wirkt auf Gesamtabmessung  $x, y, z$ )
  - ...
- **Eingangsobjekte:** Pulverförmiges Material, Geometriedaten
  - Materialeigenschaften<sup>Pulver</sup>
    - Schmelzpunkt
    - Korngröße
  - Datenformat
    - STL, SLC
- **Ausgangsobjekt**
  - Physischer Prototyp
    - Festigkeit =  $f(\text{Stellgrößen})$
    - Wärmedehnung =  $f(\text{Materialeigenschaften}^{\text{fest}})$
    - Oberflächenqualität =  $f(\text{Ausrichtung, Korngröße, Schichtdicke})$
    - Isotropie der Festigkeit =  $f(\text{Ausrichtung bezogen auf } x\text{-}y \text{ Ebene})$
    - ...

Bild 4-12: Prozessanalyse

Das Ergebnis des Prozesses ist ein physisches Bauteil aus thermoplastischem Material mit einer erwarteten Oberflächenrauigkeit; es ist im Verhältnis zu den Geometriedaten um die Faktoren  $S_x$ ,  $S_y$  und  $S_z$  geschrumpft und seine Abmessungen sind innerhalb einer definierten maximalen Ungenauigkeit reproduzierbar. Da Hinterschneidungen möglich sind, sind Arbeitsschritte bezogen auf Stützkonstruktionen nicht zu planen. Die Prozessgenauigkeit ist eine Funktion der eingesetzten Maschine und des Materials und kann errechnet oder den Angaben des Herstellers entnommen werden.

Daraus ergeben sich für die Prozessplanung folgende Konsequenzen:

Die lokale Temperaturänderung führt zu einem hohen Temperaturgradienten im Übergangsbereich zwischen pulverförmigem und geschmolzenem Werkstoff in der abgescannten Fläche, die auch als *Cross Section* bezeichnet wird. Sind Scanstrategien darauf abgestimmt, lässt sich dieser Effekt minimieren [102, 103]. Dies geschieht beispielsweise durch die Veränderung der Verfahrenswege des Lasers. Von Schicht zu Schicht werden der Scanverlauf oder die Reihenfolge der gescannten Teilflächen variiert. Der Experte, der die Analyse durchgeführt hat, dokumentiert derartige Zusammenhänge durch Parameterrelationen oder Anmerkungen. Parameterrelationen können sowohl numerische als auch qualitative Abhängigkeiten enthalten. So werden im vorliegenden Beispiel die Eigenschaften Oberflächenqualität und Scanstrategie in Relation gesetzt. Die für den Prozess definierten Relationen steuern beispielsweise im Rahmen der Technologiekonfiguration die Hinzunahme von Korrekturprozessen. Ist die Auswirkung einer Relation wie im Beispiel von nachfolgenden Planungsschritten abhängig, wird sie dokumentiert und diesen Schritten zusammen mit dem ausgewählten Prozess präsentiert. Der Planer erhält auf diese Weise die Möglichkeit, die konfigurierte Prozesskette durch Interpretation der Relationen nachträglich interaktiv abzustimmen.

Das Ergebnis der Analyse ist folglich eine Beschreibung der Prozesseigenschaften und ihrer Zusammenhänge. Für jeden Prozess wird ein entsprechendes Objekt in der Prozessdatenbank angelegt. Ist ein Fertigungsprozess vollständig beschrieben, steht er sofort für den Schritt der Konfiguration bereit.

#### 4.4.5 Auswahl geeigneter Prozesse

Zur Auswahl technologieorientierter Alternativen sind grundsätzlich regelbasierte, mathematische und Punktbewertungsverfahren in Betracht zu ziehen. Die Bereitstellung lexikalischen Wissens kann flankierenden Nutzen haben, ist jedoch aufgrund der unzureichenden Zielgerichtetheit für die Bearbeitung der Entscheidungsaufgabe nicht ausreichend. Bild 4-13 zeigt eine Einordnung typischer Bewertungsmethoden, die für den Einsatz im Kontext der vorliegenden

Arbeit relevant sind. Weitere bekannte Methoden sind die Argumentenbilanz, die Vorrangmethode oder das Benchmarking, deren informationstechnische Unterstützung wenig automatisierbar ist, da in der Regel mit Fließtext gearbeitet wird. Daher werden sie nicht näher betrachtet.

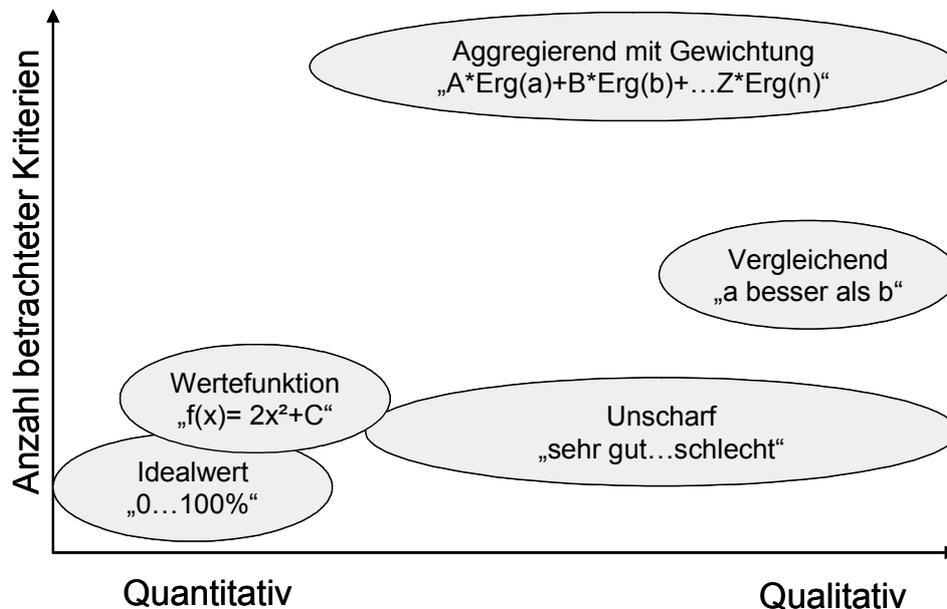


Bild 4-13: Anwendungsgebiete von Bewertungsmethoden

Aus der Forderung, dass sowohl quantitative als auch qualitative Aussagen für die Auswahl genutzt werden sollen, werden mehrere Bewertungsverfahren miteinander kombiniert, denn im Ablauf der Konfiguration sind unterschiedliche Bewertungsaufgaben zu lösen. Darüber hinaus kann die Eignung eines Prozesses zur Bewältigung einer Aufgabe oft nicht binär definiert werden, da dies an den Grenzen der Wertebereiche zu einem nicht stetigen Übergang von ‚geeignet‘ zu ‚ungeeignet‘ führt. Selbst bei Größenangaben wie dem Bauraum ist mit der Annäherung an die Grenzwerte mit einer stetig abnehmenden Eignung des Verfahrens aufgrund physikalischer Effekte zu rechnen. Daher wird für alle Werte die Möglichkeit vorgesehen, Akzeptanzbereiche zu definieren. Hierzu wird einerseits die Gewichtung der Anforderungen herangezogen. Der Nutzen dieser Vorgehensweise zeigt sich an folgendem Beispiel. Ein Bauteil ist unter Einhaltung einer Toleranz von  $\pm 0,1$  mm zu fertigen.

Hierfür stehen drei alternative generative Fertigungsverfahren zur Auswahl, mit zugeordneten Fertigungstoleranzen von

- Verfahren A:  $\pm 0,05$  mm
- Verfahren B:  $\pm 0,08$  mm
- Verfahren C:  $\pm 0,12$  mm

Ohne Gewichtung der Anforderung ‚zulässige Fertigungstoleranz‘ sind Verfahren A und B gleichermaßen geeignet, C kommt nicht in Betracht. Dies entspricht in der Regel nicht der Vorgehensweise zur Eignungsabschätzung im industriellen Alltag. Vielmehr ist neben der Einhaltung von Grenzwerten auch der Abstand des Istwertes vom Sollwert zu beachten. Eine Gewichtung der Anforderungen wird nun mit dem Ziel eingeführt, die Bereichsgrenzen aufzuweichen und den Abstand zum Idealwert zu ermitteln. Dies kann durch Formeln ausgedrückt werden, in Abhängigkeit des Parametertyps. Unterschieden werden Standard-, einseitig limitierte und beidseitig limitierte Parameter. Alle Einflussparameter müssen auf die drei Typen abgebildet werden.

Für den Standardparameter, beispielsweise die zulässige Maßtoleranz des Prototypen, kann folgende Beziehung aufgestellt werden:

$$\text{AkzeptierterNominalWert} = \text{NominalWert} \pm (\text{NominalWert} * (1 - \text{Gewichtung}))$$

(mit  $0 < \text{Gewichtung} < 1$ )

Der Parameterwert ‚Maßtoleranz‘ kann folglich im Extremfall um seinen Nominalwert abweichen, wenn der Anwender den Parameter als unwichtig deklariert, also eine Gewichtung von 0 setzt. Eine höhere Wichtigkeit grenzt diesen Freiheitsgrad zunehmend ein, bis zu einer absoluten Festlegung des Nominalwertes bei höchster Wichtigkeit.

Für den beidseitig begrenzten Parameter existiert eine beliebig festzulegende Ober- und Untergrenze. Beide Grenzen erhalten eine eigene Gewichtung, da die Grenzfestlegung unterschiedliche Gründe haben kann. Beispielsweise ist für die Ermittlung des erweiterten zulässigen Betriebstemperaturbereiches eines Prototypen zunächst der Nominalwert zu berechnen:

$$\text{NominalWert} = [\text{MinWert} + (\text{MaxWert} - \text{Minwert}) / 2]$$

Anschließend wird analog zum Standardparameter die zulässige Abweichung vom Nominalwert berechnet. und es ergibt sich für die Bereichsgrenzen folgender Zusammenhang:

AkzeptierterMinWert = NominalWert - (NominalWert \* (1-GewichtungMin))  
und

AkzeptierterMaxWert = NominalWert + (NominalWert \* (1-GewichtungMax))

Auf diese Weise wird verhindert, dass die zulässige Abweichung des Istwertes relativ zum Absolutwert der jeweiligen Grenze variiert.

Eine Herausforderung stellt die Bewertung der nichtnumerischen Einflüsse, wie beispielsweise der *Bauteilcharakteristik* dar, denn sie sind nicht quantifizierbar und tragen dennoch wesentlich zur Entscheidung für oder gegen einen bestimmten Prozess bei. Prinzipiell besteht bei triangulierten Bauteilgeometrien die Möglichkeit, unterschiedliche Analysen automatisiert ablaufen zu lassen. Voraussetzung hierfür ist eine hohe Integration von Produkt- und Prozessdaten. So ist beispielsweise zur Feststellung von Hinterschneidungen die Kenntnis über die Ausrichtung des Bauteils im Bauraum der herstellenden Anlage erforderlich. Auch das Auffinden von Materialhäufungen oder dünnen Wänden im Bauteil ist algorithmisch nicht trivial zu lösen. In diesen Fällen muss der Erfahrungsschatz des Maschinenbetreibers eingebracht werden. Voraussetzung ist eine eindeutige und verbindliche Vorgabe typischer Bauteilcharakteristiken anhand vorangegangener Projekte. Eine Bewertung des Einflusses kann hier durch die Archivierung von Erfahrungswissen in einer Regelbasis erfolgen. Die darin formulierten Regeln können sich zwar allein auf den Einfluss beziehen, meist wird jedoch das Zusammenspiel mehrerer Faktoren zu berücksichtigen sein. Jede Regel bildet dabei die Reaktion auf ein Entscheidungskriterium ab. Im Bedingungsteil jeder Regel können Einzelkriterien durch die booleschen Operationen UND oder ODER miteinander verkettet werden.

Sind Regeln durch sprachliche Begriffe wie niedrig, mittel oder hoch definiert, lässt sich ihre Auswertung gut durch die Nutzung von Fuzzy-Mechanismen realisieren. Sie arbeiten mit sogenannten Fuzzy-Sets, die den Bezug zwischen einem Zahlenwert und dessen unscharfer Beschreibung herstellen. Dies wird in Bild 4-14 am Beispiel einer Regel zur Einschätzung von Temperaturbereichen verdeutlicht. Bei der Anwendung der Zuordnung ist immer auf den Kontext zu achten. So wird eine mittlere Temperatur im Innenraum eines Fahrzeuges anders wiedergegeben als im Motorraum. Fuzzy Mechanismen kommen daher bei Parametern zum Einsatz, die der Anwender durch einen Begriff wie ‚niedrig‘ oder ‚hoch‘ definiert. Die Bauteileigenschaft *Komplexität* ist beispielsweise anwendungsabhängig zu bewerten. Daher wird für diese Parameterklasse in der Regel ein Kontext definiert, im vorliegenden Beispiel die Anwendung des Prototypen. Erst wenn beide Angaben vorliegen, entsteht die Zuordnung des Wertebereiches und die Bewertung kann erfolgen.

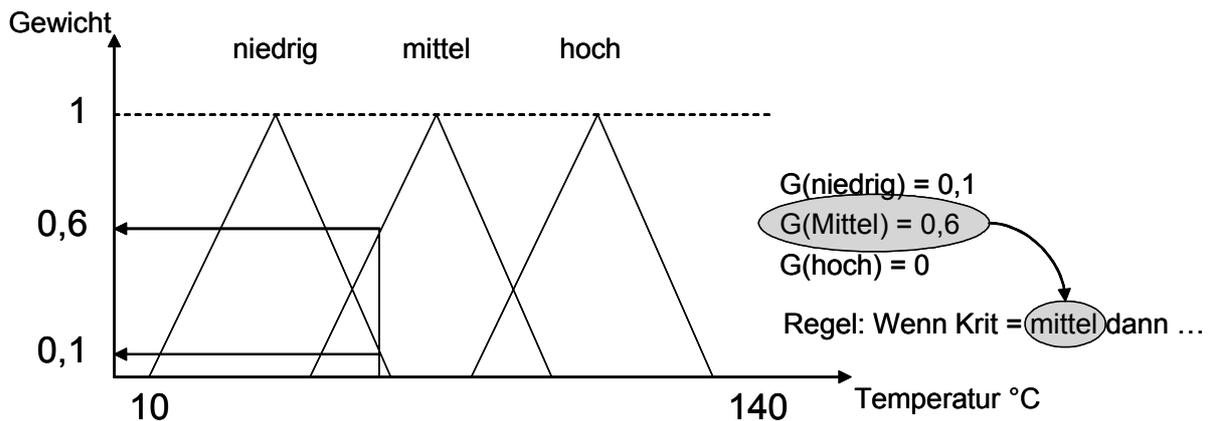


Bild 4-14: Definition von Fuzzy Sets

Liegt nun eine Anforderung vom Typ *Komplexität* mit dem vom Anwender definierten Wert 'hoch' vor, werden alle vorhandenen Komplexitäts-Relationen der Prozesse ausgewertet. Auswirkungen entstehen beispielsweise für die numerischen Parameter *Hinterschneidungswinkel* und *Bauteilvolumen/Bounding Box* Volumen. In Abhängigkeit der Anwendung wird der jeweilige zulässige Wertebereich festgelegt. Anschließend ist ein rein numerischer Vergleich von Soll- und Istwert der entsprechenden Prozesseigenschaften möglich. Das Ergebnis dieses Schrittes besteht aus einer Untermenge aller verfügbaren generativen und Folgeprozesse, deren Eigenschaften prinzipiell geeignet sind, die gestellten Anforderungen an die erzeugten physischen Prototypen zu erfüllen.

#### 4.4.6 Anordnung der Prozesse

Für die Anordnung der ausgewählten Prozesse bieten sich drei Lösungsalternativen an. Die erste besteht in der starren Zuordnung festgelegter Folgeschritte zu den den im Rahmen der Auswahl herausgestellten generativen Verfahren. Die Länge der Prozesskette ist dabei von der Vorkonfiguration abhängig und stützt sich auf wenige im Markt etablierte Vorgehensweisen. Die Flexibilität konfigurierbarer Alternativen ist jedoch gering und in den meisten Anwendungsfällen führt die mangelnde Reaktionsfähigkeit zu suboptimalen Lösungen.

Die zweite Lösung besteht in der Vordefinition sowohl des Anforderungsumfanges als auch der konfigurierbaren Anzahl der Prozesse. In diesem Falle steht eine zuvor festgelegte Anzahl von Positionen zur Verfügung, die durch entsprechende Prozesse zu belegen sind. Jedem Prozess in der Prozessdatenbasis ist dann ein Positionsindikator zugewiesen, der die zulässigen Positionen angibt. Dies zieht die Notwendigkeit nach sich, die Elemente der RP-Prozesskette so zu definieren, dass eine zweckmäßige Zuordnung von Anforderungstypen möglich ist, da jede Position eine spezifische Aufgabe bewältigt, wie beispielsweise Formerzeugung oder Endbearbeitung.

Bei der dritten Lösungsalternative gibt das System lediglich einen Gestaltungsrahmen für Typen und Umfang der Zuordnung vor und überlässt dem Anwender die Formulierung aller Rahmenbedingungen. Eine solche Herangehensweise ist in höchstem Maße flexibel, verpflichtet aber zu umfangreichen Vorgaben bei der Definition der Prozesse. Zusätzlich entsteht das Problem, dass keine Höchstzahl von Einzelprozessen vorgegeben ist, wodurch die konfigurierte Prozesskette eine unwirtschaftliche Komplexität erreichen kann.

Die Lösungsalternativen sind zusammenfassend in Bild 4-15 dargestellt.

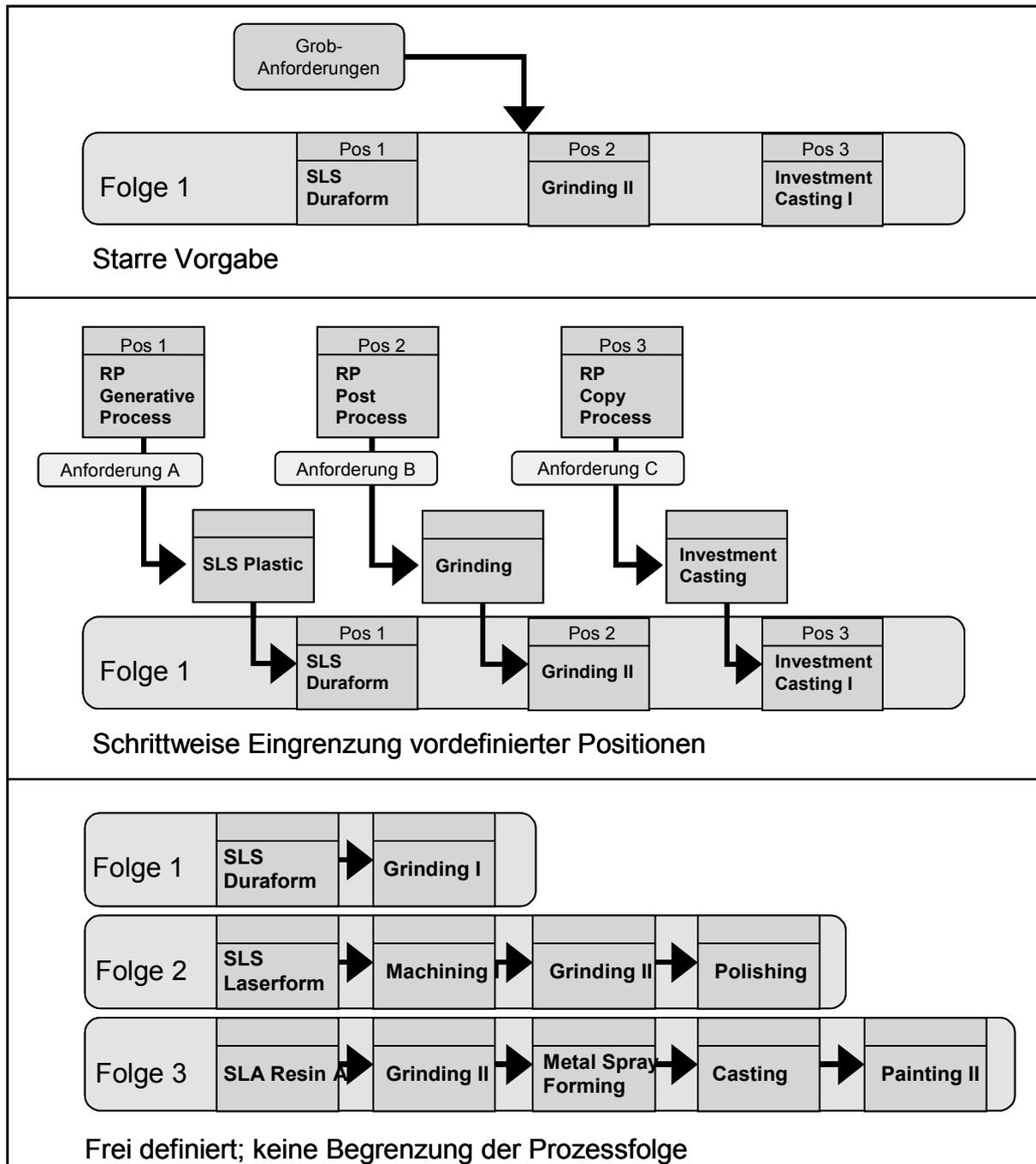


Bild 4-15: Alternative Lösungen für die Anordnung der Prozesse

In der vorliegenden Arbeit soll aufgrund dieser Vorbetrachtungen die zweite Lösungsalternative der Prozessanordnung weiterverfolgt werden. Sie vergleicht die beim Projektstart gestellten Anforderungen nach zuvor definierten Vorschriften mit den Eigenschaften der verfügbaren Prozessschritte. Jede Eigenschaft

einer Anforderungsgruppe muss mindestens einem Prozess zugeordnet sein. An dieser Stelle kommt die für den Prozess festgelegte Nomenklatur der verwendbaren Eingangsgrößen zur Anwendung.

Eine grundsätzliche Überlegung zeigt, dass die Menge der anzuordnenden Prozessketten, deren Instanzen eine Sequenz bilden, mit zunehmender Anzahl von möglichen Positionen erheblich ansteigt. Zunächst ergibt sich die Lösungsmenge  $L$  zu

$$L_i = N_{P_1} * N_{P_2} * N_{P_3} \dots * N_{P_i}$$

mit  $N_p$  als Anzahl der möglichen Alternativen an der jeweiligen Position der Prozesskette und  $i$  für die Gesamtanzahl möglicher Prozessschritte. Werden jedoch Restriktionen bezüglich der Kombinierbarkeit aufeinander folgender Prozesse berücksichtigt, wird der Lösungsraum eingeschränkt auf

$$L_i = \sum (N_{P_i} * N_{P_{(i+1)}} - ((X_{i-1}) * M_{P_1(X_{i-1})} + (X_{i-2}) * M_{P_1(X_{i-2})} + \dots + M_{P_1(1)}))$$

wobei  $i$  die Position in der Prozesskette angibt und  $X_i$  die Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten mit dem nachfolgenden Prozess. Die Kombinierbarkeit von Prozessen ist demnach ein zweckmäßiges Mittel zur Reduzierung des Gesamtaufwandes bei der Konfiguration.

Jeder Prozess wird nun so voreingestellt, dass er nur die relevanten Anforderungen verarbeitet. Diese ergeben sich aus der Position des Prozesses in der Technologiekette und aus dem Prozesstyp. Da die Elemente als Objekte behandelt werden, erfolgt die Zuordnung durch den Mechanismus der Objektattribute. Alle verfügbaren Anforderungen gehen dem Objekt zu, werden bei Verwendbarkeit über objektene Formeln und mit den Wertebereichen der Attribute verglichen.

So kann die Eigenschaft  $Rz < 12$  aus der Gruppe *Oberflächenqualität* für die Auswahl eines Prozesses herangezogen werden, der auf die generative Erstellung folgt. Zusätzlich wird die gleiche Zuordnung für den abschließenden Nachbearbeitungsprozess definiert. Die prozessübergreifenden Auswirkungen dieser Vorgehensweise werden im nächsten Abschnitt näher betrachtet. Zunächst ist jedoch sicherzustellen, dass alle für die Anordnung relevanten Kriterien mit der zugehörigen Gewichtung Berücksichtigung finden. Dies kann durch die Festlegung einer prioritätsbehafteten Beziehung zwischen geforderter Eigenschaft und Prozess geschehen. Es ergibt sich eine Referenzierung vom Typ 1:n, mit  $n \geq 1$ , unter Zuordnung einer Prioritätsstufe, wobei jede Stufe nur einmal für jedes Kriterium zu vergeben ist, denn sie legt die Reihenfolge fest, in der der Abgleich stattfindet. Im Beispiel, das in Bild 4-16 verdeutlicht wird, ist *Genauigkeit* den beiden Prozessen ‚Generative Fertigung Urmodell‘ und ‚Nacharbeit Urmodell‘

zugewiesen. Zweifellos ergibt sich in diesem Fall für die Herstellung des Urmodells eine höhere Priorität als für die Nacharbeit.

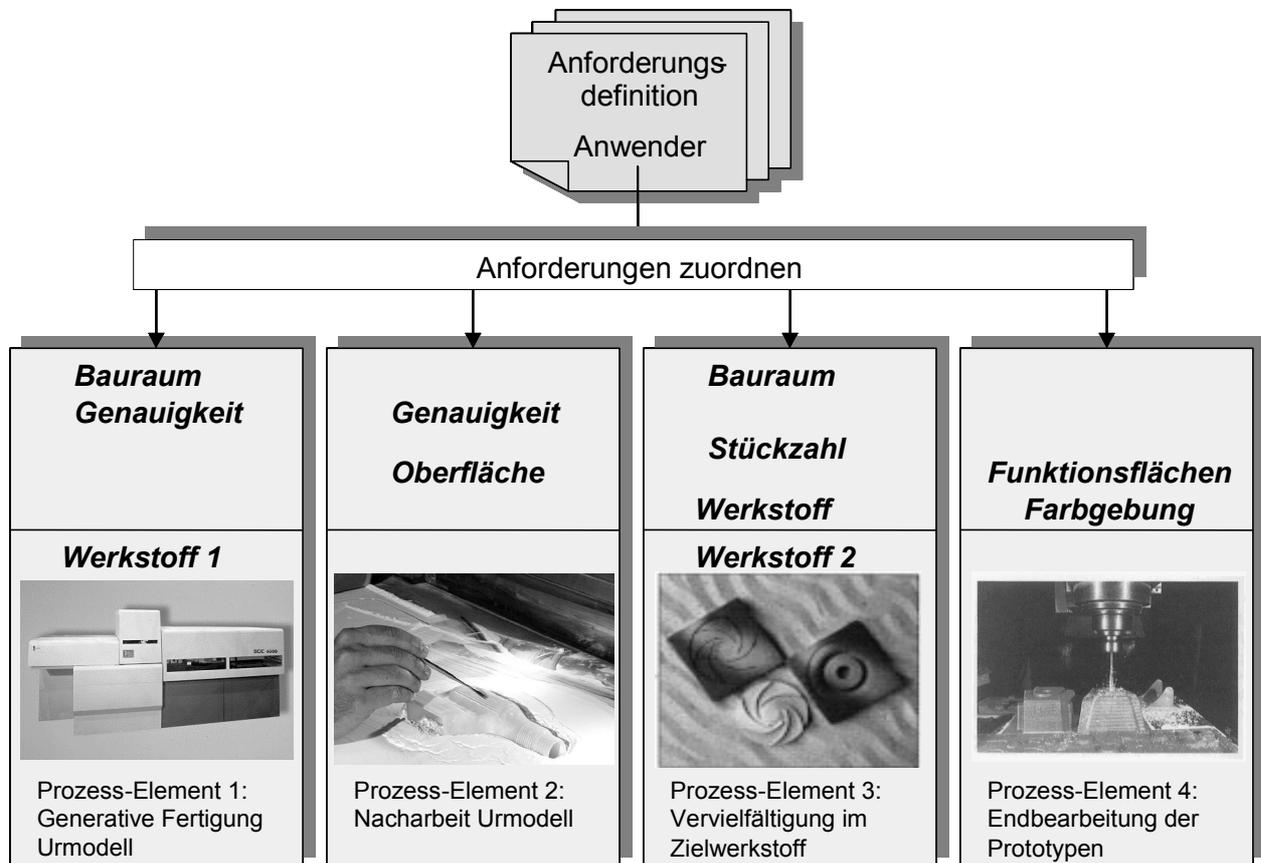


Bild 4-16: Zuordnung der Anforderungen

Die Priorität 1 für den generativen Prozess sorgt dafür, dass bei der Ausführung der Prozessauswahl zuerst nach generativen Prozessen gesucht wird, die die geforderte Genauigkeit erreichen. Erst wenn kein Verfahren für diese Position gefunden wurde, werden Prozesse für die ‚Nacharbeit‘ zur Erreichung der entsprechenden Eigenschaft, hier also der Genauigkeit, vorgesehen. Dieser Ansatz lässt sich weiter verfeinern, falls die Möglichkeit besteht, lokale Genauigkeitswerte zu verarbeiten. Beispielsweise erfüllt das generative Verfahren niedrige Genauigkeitsforderungen direkt, und für hohe Anforderungen werden weitere Prozessschritte mit niedrigeren Prioritäten lokal angewendet.

Die Modellherstellung soll immer durch ein generatives Verfahren repräsentiert sein und erhält grundsätzlich die Position 1. Die Positionen 2...n beschreiben die nachgelagerten Schritte in der Prozesskette und entsprechend wird  $-n...0$  für die vorgelagerten Prozesse zur Informationsaufbereitung reserviert. Für die

grundlegende Konzeption der Prozessfolge wird eine rückwärts gerichtete Festlegung der Schritte durchgeführt, da die Anforderungen der Produktentwickler sich auf das Endergebnis beziehen. Die Bestimmung der notwendigen Schritte zur Informationsaufbereitung erfolgen im späteren Verlauf der Anordnung, in Abhängigkeit der Technologiekette, damit sichergestellt ist, dass der bereitgestellte Informationsumfang ausreicht, um alle Prozesse mit Eingangsdaten zu versorgen. Als erstes Kriterium für die Anordnung wird das gewünschte Material herangezogen. Dabei sollen nur diejenigen Eigenschaften spezifiziert sein, die im Rahmen der Prototypentests zu überprüfen sind. Hier zeigt sich beispielhaft die Notwendigkeit einer guten Projektplanung, denn ohne die Vernetzung und zentrale Speicherung der RP-Projektdateien kann ein Abgleich mit anderen Prototyping Aktivitäten nicht stattfinden. Anhand der physikalischen Eigenschaften werden alle verfügbaren Materialien generativer Prozesse mit dem Wunschmaterial verglichen. Ergibt sich innerhalb der zulässigen Unschärfe keine Übereinstimmung, erfolgt eine Suche nach den entsprechenden Werten in der Gesamtheit der Materialdaten, die für Folgeprozesse zur Verfügung stehen. Auch hier empfiehlt sich eine Klassifizierung nach Typen wie *Thermoplast* oder *Aluminium*, um die Suche von vornherein einzugrenzen. Zu jeder Materialeigenschaft ist für die anschließende Bewertung ein Referenzwert mitzuführen, der die Abweichung vom Idealwert widerspiegelt. Die Prozessanordnungen, die eine Verarbeitung der ausgewählten Materialien erlauben und darüber hinaus alle weiteren Anforderungen erfüllen, können nun in den nächsten Schritt, die Untersuchung der Interoperabilität übernommen werden.

#### 4.4.7 Abstimmung der Technologiekette

Die Optimierung der ausgewählten Prozesselemente hinsichtlich ihrer Interoperabilität zielt darauf ab, Wechselwirkungen zu identifizieren und deren negative Einflüsse auf das Ergebnis, also die Ausprägung der physischen Prototypen zu minimieren. In komplexen Systemen treten Wechselwirkungen zwischen mehreren zu dimensionierenden Objekten auf [104].

Jede alternative Technologiekette ist, wie beschrieben, durch eine rückwärts gerichtete Festlegung von Bearbeitungsschritten entstanden. Dadurch sind die anfangs bestimmten Prozesse noch nicht auf die zuletzt gewählten abgestimmt, da deren Eigenschaften und Relationen zu Beginn noch nicht bekannt waren. Über die Verfahrensplanung der generativen Herstellung hinaus ist jedoch eine prozessübergreifende Berücksichtigung der Wechselwirkungen in der gesamten Prozesskette notwendig. Daraus ergeben sich für die Gesamtplanung veränderte Rahmenbedingungen. An einem typischen Beispiel soll dies verdeutlicht werden.

Für die Vorserienfertigung eines Fahrzeuggetriebes werden von vier unterschiedlichen Stellhebeln je 300 Stück aus gehärtetem Stahlguss benötigt. Die

Auswahl der Verfahrensfolge ergibt sich aus der Priorisierung der Parameter Zeit, Genauigkeit und Materialspezifikation.

Es wird die Prozesskette des Feingusses einer härtbaren Stahllegierung definiert, die aus den folgenden Elementen besteht:

- generative Fertigung der Urmodelle in Stückzahl eins,
- Nachbearbeitung zur Erreichung optimaler Passungen und Oberflächenqualität,
- Abformung der Urmodelle für das Vakuumgussverfahren,
- Gießen der 1200 Wachslinge zur Herstellung der Feingussformen,
- Anordnen der Wachslinge zur Gießtraube,
- Beschlickern und Brennen der Feingussformen,
- Abgießen im Serienwerkstoff,
- Spanende Endbearbeitung und
- Härten.

Von zentraler Bedeutung für die prozessübergreifende Planung der gesamten Kette ist die Fragestellung, welche Wirkung die einzelnen Prozesse auf die Bauteileigenschaften ausüben. Dabei ist die Prozesskette, vom letzten Prozessschritt ausgehend, zu durchlaufen und zu analysieren. Bei der Auswahl konnten Aspekte wie beispielsweise die Einflüsse durch Beschichtung oder prozessbedingte Schrumpfung zunächst nicht implizit berücksichtigt werden. Bei Bohrungen, denen eine Funktion und damit eine Passungstoleranz zugeordnet ist, sind mehrere übergeordnete Einflüsse zu beachten. Ist in der ausgewählten Prozesskette ein Gießverfahren enthalten, ist sowohl ein material- als auch ein prozessbedingter Skalierungsfaktor notwendig. Zum anderen ist die Fertigungsstrategie einzubeziehen, die im letzten Schritt Material auftragen kann, beispielsweise durch Beschichtung, oder auch Material abtragen kann, wie bei spanenden Nachbearbeitungsverfahren. Im Ergebnis liegt eine Beeinflussung des Prozesses ‚Endbearbeitung‘ auf den Prozess ‚Technologieplanung‘ vor, denn dort ist die Skalierung des gesamten Bauteils oder gar einzelner Segmente durchzuführen.

Die von einem Prozessschritt ausgehenden Veränderungen am erzeugten Bauteil müssen entsprechende Korrekturen in vorhergehenden Bearbeitungen nach sich ziehen, um das gewünschte Ergebnis konstant zu halten. Im vorliegenden Beispiel wirkt sich jeder Schrumpfungsprozess auf den Skalierungsfaktor der geometrischen Eingangsdaten für den generativen Prozess aus.

Hier bieten sich wieder die zu Beginn definierten Relationen an. Sie zeigen alle bekannten Wechselwirkungen auf und lassen sich auf die angeordneten Elemente anwenden. Da Relationen auch qualitativer Natur sein können, ist in diesen Fällen ein interaktives Vorgehen vorgesehen. Durch Einbindung der Prozesswissensbasis erhält der Anwender Vorgaben für die geeignete Parameterkombination, abhängig vom ausgewählten Verfahren. Als Resultat steht ein um Technologieparameter erweitertes Modell der angeordneten Prozesse zur Verfügung.

Ein weiterer Aspekt ist im Rahmen der übergreifenden Technologieplanung zu berücksichtigen. Generative Prozesse zeigen eine hohe Abhängigkeit der Qualität von der Bauteilgeometrie. Diese lässt sich im Wesentlichen reduzieren auf die Summe aus zufälligen und systematischen Fertigungsabweichungen. Zufällige Abweichungen sind in ihrer Wirkung anhand statistischer Methoden abschätzbar. Systematische Abweichungen zeichnen sich durch Reproduzierbarkeit aus und lassen sich vollständig eliminieren, wenn die physikalischen Wirkprinzipien, die die Abweichungen verursachen, bekannt und quantifizierbar sind. Die häufigsten systematischen Fehler bei generativ arbeitenden Verfahren sind lokaler Verzug und Schrumpfung oder Dehnung des Gesamtmodells. Lokaler Verzug entsteht beispielsweise durch die selektive Wärmeeinbringung bei lasergestützten Verfahren.

Für die Berücksichtigung dieser Effekte bei der Prozessplanung stehen zwei Herangehensweisen zur Auswahl. Die erste nähert sich dem Problem durch Berechnung nach der Finite Elemente Methode [105]. Das hier zugrunde liegende verallgemeinerte Hooke'sche Gesetz kann grundsätzlich Anwendung finden, wenn nicht-isotrope Spannungsverteilungen aufgrund von Eigenspannungen vorliegen. Der Nachteil dieses Ansatzes besteht im erheblichen Rechenaufwand, der dadurch entsteht, dass für jeden Layer eine erneute Berechnung notwendig ist.

Die zweite Möglichkeit einer Annäherung ist zur Bewältigung der vorliegenden Aufgabenstellung besser geeignet. Sie stellt zwischen den erwarteten Abweichungen und typischen Merkmalen der Bauteilgeometrie eine Beziehung her. Auf diese Weise wird der im Detail komplexe physikalische Wirkmechanismus zwar vernachlässigt, in seiner Wirkung jedoch in ausreichender Genauigkeit berücksichtigt.

Eine daraus folgende Strategie kann in der Aufteilung großer Werkstücke in Geometriebereiche und der Ableitung von Einzelteilen bestehen, die anhand jeweils anderer Prozessparameter hergestellt werden können. Auch an der Notwendigkeit der richtigen Bauteilorientierung im Bauraum lässt sich zeigen, dass eine nur eine funktionsorientierte Repräsentation des herzustellenden Bauteils die Entscheidungsgrundlage für eine optimale Ausrichtung liefern kann. Beispielsweise kann die werkstoffliche Anisotropie berücksichtigt werden, Trep-

penstufeneffekte minimiert und Formtoleranzen wie Rundheit Berücksichtigung finden.

Diese Aufgabe kann durch Kompatibilitäts-Checks der angeordneten Elemente gelöst werden. Das Hauptproblem besteht darin, dass eine gegenseitige Beeinflussung nicht nur bei direkt benachbarten Elementen auftritt. Daher ist hier eine Methode zu verwenden, die alle Abhängigkeiten stufenweise abarbeitet. In der ersten Stufe können Unverträglichkeiten durch eine Prüfung der Übereinstimmung der Eingangsinformationen des aktuellen Prozesses mit den Ausgangsinformationen des vorangegangenen Schrittes gefunden werden, Bild 4-17. Eine Ausnahme bilden die Korrekturprozesse. Ein derartiger Prozessschritt kann eingefügt werden, wenn der jeweils vorgelagerte Prozess einzelne Zieleigenschaften wie beispielsweise die Datenqualität bei informationstechnischen Prozessen, oder die Ebenheit einer Passfläche bei fertigungstechnischen Prozessen, nicht erzeugen kann.

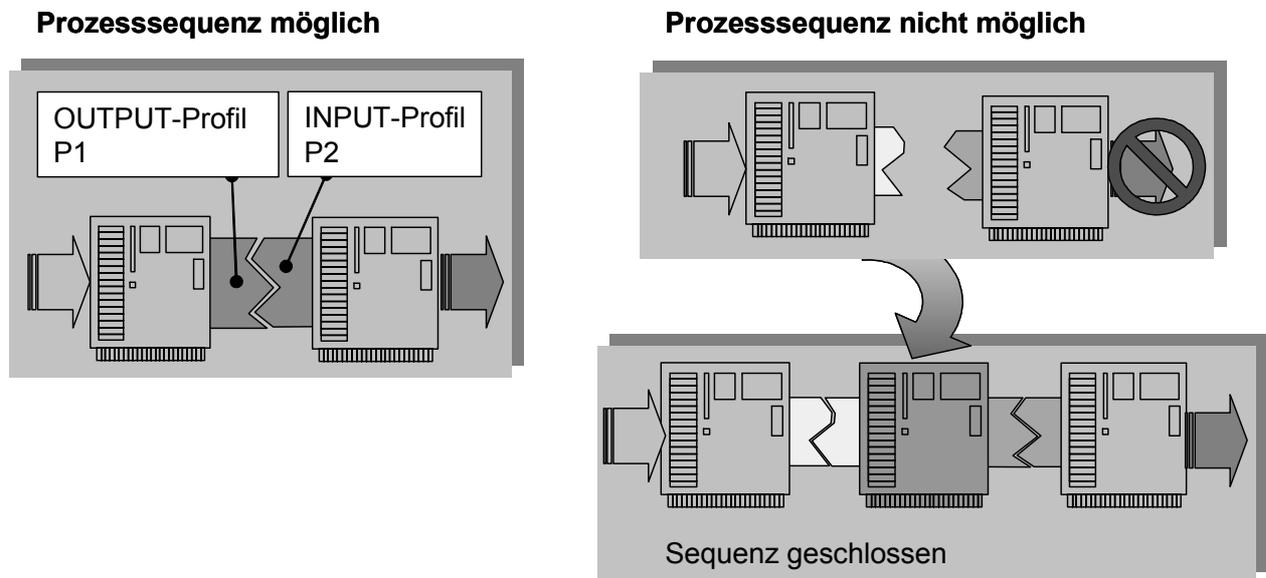


Bild 4-17: Definition von Korrekturprozessen

Um aus diesen Grundinformationen eine Rangfolge der potenziellen Prozessketten bilden und dem Anwender in übersichtlicher Form präsentieren zu können, wird anschließend eine Bewertung der Gesamtlösung ausgeführt. Im Wesentlichen kommen hierfür Eigenschaften der Gesamtkonfiguration wie *Durchlaufzeit* und *Kosten* in Frage, aufsummiert über alle Schritte. Die zentrale Aufgabe besteht darin, herauszufinden, welche Folge von Einzelprozessen besonders effizient zum gewünschten Ergebnis führt. Die Schwierigkeit liegt insbesondere darin, konkurrierende Anforderungen wie *geringste Kosten*, *kürzeste Zeit* oder *höchste Qualität* gegeneinander abzuwiegen, wobei die kürzeste Prozesskette nicht immer die schnellste oder auch kostengünstigste ist. Dieser

Problemstellung wird durch die Aufsummierung aller Kompatibilitätswerte begegnet, die sich aus der jeweiligen Anordnung ergeben. Diese Werte spiegeln die Flexibilität eines Prozesses wider, sich auf den jeweiligen Nachbarprozess optimal einstellen zu lassen. Eine hochkompatible Prozesskette erhält folglich eine bessere Gesamtwertung als eine suboptimal abstimmbare Kette. Die Ergebnisse der Abstimmung sind zu dokumentieren und nachfolgenden Anwendern zur Verfügung zu stellen.

## 4.5 Entwicklung eines RP-Datenmodells

### 4.5.1 Einleitung

Unter der Voraussetzung, dass Rapid Prototyping Projekte in der Regel unter extremem Zeitdruck stehen und gleichzeitig nur in seltenen Fällen der Projektablauf im Vorhinein definiert ist, muss jede Form von Fehlermöglichkeiten ausgeschlossen werden. Aufgrund ihrer engen Verbindung zum Änderungsmanagement stellen diese Projekte besondere Anforderungen an die informationstechnische Unterstützung.

Prinzipiell ist der Modellansatz der Digitalen Fabrik für die Planung von Rapid Prototyping Prozessketten geeignet. Zentraler Bestandteil dieses Ansatzes ist ein Datenmodell, das Produkt-, Prozess- und Ressourcendaten miteinander verknüpft. Die heute im Einsatz befindlichen Modelle werden jedoch dem Anspruch generativer Verfahrensketten nicht gerecht, da sie die Verifikationsergebnisse nicht abbilden. Der Datenaustausch ist in der Regel mit Informationsverlust behaftet und mit erheblichem Zusatzaufwand verbunden [106]. Weitere Argumente, die gegen den Einsatz dieser Systeme im RP Bereich sprechen, sind hohe Anschaffungskosten, hohe Betriebs- und Personalkosten und Defizite in der Verknüpfung technologischer Produktdaten mit Prozesseigenschaften.

Produktdaten umfassen die Geometrie der zu realisierenden Bauteile sowie geometriebezogene Spezifikationen bezüglich der Materialeigenschaften, und Toleranzen. Hier sind Maß-, Lage- und Formtoleranzen sowie die Oberflächenbeschaffenheit zu unterscheiden. Prozessdaten müssen für die gesamte Projektlaufzeit Gültigkeit besitzen. Sie bestehen aus der Beschreibung der Prozesseigenschaften, der benötigten Eingangs- und Ausgangsinformationen und integrieren die Komponenten Ressource, Operation und Werkzeug.

Prozessdaten müssen sowohl zu den gegebenen Toleranzen als auch untereinander korrelierbar sein. Sie sind für die technologische Aufbereitung des Bauteilmodells und dessen zielgerichtete Herstellung notwendig. Bauteilfehler können durch einzelne Prozessschritte oder deren Kombination auftreten. Systematische und zufällige Fehler sind zu unterscheiden, wobei zur Kompensation

sowohl quantitativ bestimmbare Änderungen der Parameterwerte einzelner Prozesse oder statistische Methoden zur Anwendung kommen.

Projektdateien beinhalten Angaben zu den während der Projektlaufzeit auszuführenden Aufgaben. Jede Aufgabe wird als Objekt betrachtet und referenziert auf andere Informationsgruppen, die zur Durchführung der Aufgabe notwendig sind. Besonders wichtig sind zeitliche Abfolgen und die Ergebnisdokumentation der einzelnen Schritte, denn sie können nur auf prozessübergreifender Ebene koordiniert und ausgewertet werden.

#### 4.5.2 Datenmodellierung

Die Beschreibung eines klar abgegrenzten Teils der realen Welt, in der Regel repräsentiert durch ein System, ist Ziel der Datenmodellierung. Die Modellierung von Systemen kann unter Anwendung unterschiedlicher Modellierungsparadigmen (zustandsorientiert, prozessorientiert, objektorientiert) erfolgen. Die Paradigmen sind orthogonal zueinander. Ein System kann, unabhängig von seiner Komplexität, im zustandsorientierten, prozessorientierten oder objektorientierten Paradigma modelliert werden. Neben den reinen Daten, die durch Typ und Speicherbedarf festgelegt sind, kommt im Datenmodell die Definition von Objekten und deren Beziehung zueinander hinzu. Ohne ein Modell liegen demnach keine Informationen vor, da erst die Verknüpfung von Daten zu auswertbaren Informationen führt. Für den Aufbau eines Datenmodells sind folgende Schritte zu durchlaufen:

- Identifizieren, Benennen und Definieren der Objekte
- Organisieren der Objekte in einer Klassenhierarchie
- Definieren der Relationen, Kardinalitäten und Einschränkungen
- Hinzufügen der Eigenschaften, die im Rahmen der Abgrenzung zur vollständigen Beschreibung der Objekte notwendig sind

Die Kardinalität einer Relation beschreibt die Anzahl der beteiligten Objekte (1:1; 1:m; n:1; m:n). Eigenschaften beziehen sich auf Merkmale und Werte, können demnach sowohl quantitativer als auch qualitativer Natur sein. Datentypen werden in der Spezifikationsphase so festgelegt, dass zur Laufzeit eine formale Prüfung der Plausibilität von Benutzereingaben stattfinden kann. Neben der Typfestlegung sorgt die Festlegung eines zulässigen Wertebereiches für eine zusätzliche Absicherung der Korrektheit der Datenmodellinhalte. In Bild 4-18 ist dieser Sachverhalt in übersichtlicher Form dargestellt.

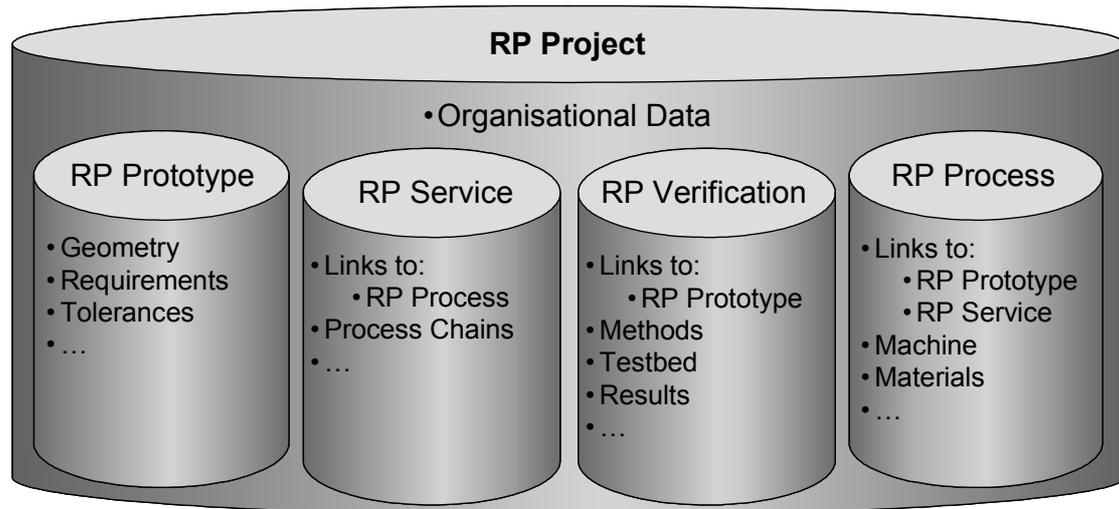


Bild 4-18: Grobdarstellung des Datenmodells

Die meist verbreitete Basismethode zur Modellierung von Prozessen und Prozessfolgen ist die aus der Structured Analysis and Design Technique bekannte Notation in SADT-Diagrammen. Sie wurde von D.T. Ross definiert und findet vielfach Verwendung bei der Geschäftsprozessmodellierung [107]. Die Methode arbeitet datenflussorientiert und unterstützt den Anwender bei der Analyse von Prozessen hinsichtlich Input, Output, Mechanismen und Steuerung. Den Vorteilen der großen Übersichtlichkeit, Eindeutigkeit und Modularisierbarkeit in Subprozesse stehen Nachteile hinsichtlich der Darstellung zeitlicher Bindungen und Defizite bei der Modellierung des Prozessverhaltens in Abhängigkeit externer Einflüsse gegenüber. Ein Beispiel der Notation ist aus Bild 4-19 ersichtlich.

Die international standardisierte Spezifizierungssprache UML (Unified Modeling Language) ist zur Erstellung wohldefinierter und vollständiger Modelle realer Systeme geeignet [108]. Der Sprachumfang gliedert sich in mehrere Diagrammtypen zur Abbildung statischer und dynamischer Systemzustände und der Wirkzusammenhänge, die Änderungen des Systemzustands auslösen. Als Konstruktionssprache unterstützt UML sowohl das Forward Engineering, denn aus einem grafischen Modell kann Code generiert werden; als auch Reverse Engineering, denn aus Code lässt sich ein Modell, bestehend aus verschiedenen Diagrammtypen, herleiten. Die wichtigsten Diagrammtypen stellen unterschiedliche Sichten auf ein Datenmodell dar, um neben der statischen Struktur des Modells auch Einsatzfälle und dynamisches Verhalten festlegen zu können.

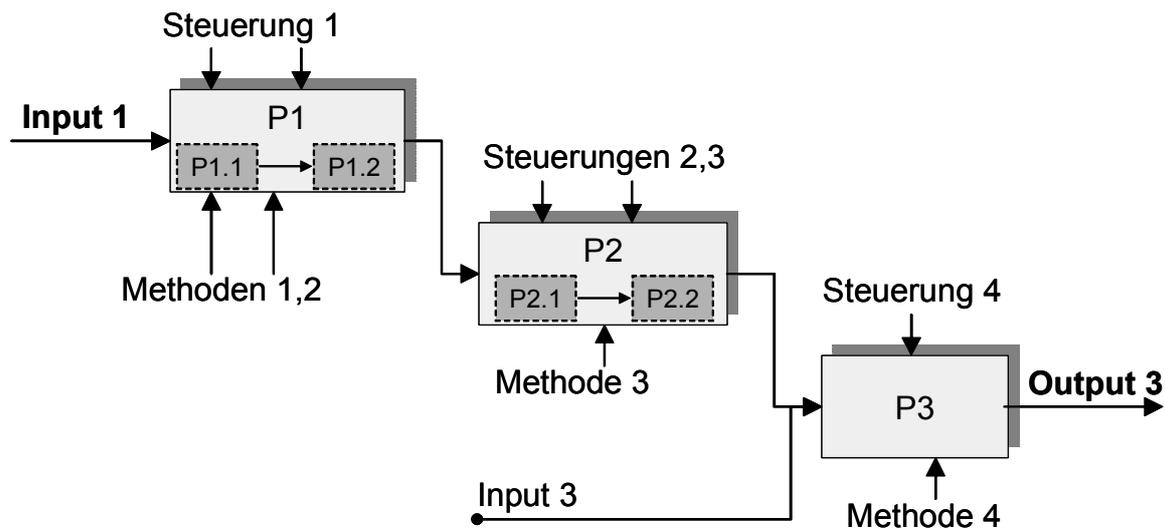


Bild 4-19: SADT-Diagramm

Um eine Modellierung von Prozessketten und auch der Verhaltensweisen ihrer Elemente zu gewährleisten, ist eine Kombination der beiden Methoden zweckmäßig, wobei die Vorteile des SADT-Diagramms zur Analyse der Einflussfaktoren auf RP-Prozesse und die Diagramme der UML für die Modellierung der Gesamtzusammenhänge genutzt werden. Der Definitionsumfang der UML wird demzufolge auf die Diagrammtypen Klassendiagramm, Aktivitätsdiagramm und Komponentendiagramm reduziert. Dadurch ist sicher gestellt, dass ein entsprechendes Datenmodell und standardisierte Projektabläufe abgeleitet werden können. Weiterhin erfüllt diese Sichtweise wesentliche formale und inhaltliche Anforderungen., denn sie erlaubt den Aufbau und die Abgrenzung von Systemen.

Zur Erreichung einer hohen Übersichtlichkeit werden Informationscluster gebildet. Die zur Clusterbildung heranzuziehenden Kriterien ergeben sich aus den Eigenschaften der zu unterstützenden Prozessschritte. Für alle projektrelevanten Cluster ist eine Quelle, Verwendungszweck und die darin enthaltenen Elemente zu definieren. Dies bedeutet für die Konzeption einer durchgängigen informationstechnischen Unterstützung, dass neben geometrischen und technologischen Daten auch Wirkzusammenhänge und Interdependenzen einzelner Prozesse zu modellieren sind.

Zunächst ist der Systeminhalt zu definieren. Er besteht aus Klassen von Objekten, deren Verhaltensweisen und Beziehungen untereinander. Die wichtigsten Betrachtungsgegenstände sind im Rahmen dieser Arbeit Projekte und Prozesse. Sie bilden die Grundlage für die Strukturierung des Datenmodells und werden als generische Klasse definiert. Aus diesen Klassen heraus ist die

Ableitung von Subklassen möglich, die jeweils einen Objekttypus implementieren. Jeder Prozessstypus kann beliebig oft instanziiert werden.

#### 4.5.3 Aufbau der Objektstrukturen

Die Entität ‚*RPProject*‘ beinhaltet Informationen der Durchführung des physischen Prototyping. Jedes RP-Projekt, welches zur Verifikation eines bestimmten Eigenschaftsumfanges eines Produktes durchlaufen wird, erhält eine Instanz dieser Entität. In erster Linie handelt es sich dabei um projektbezogene Daten wie Termine, Aufgaben, Verantwortlichkeiten, Kosten oder Rahmenbedingungen für die Versuchsdurchführung.

Das Modell muss jedoch erweitert werden um Informationscluster zur Repräsentation von Versuchsergebnissen, die der Unterstützung nachfolgender Aktivitäten im Rahmen derselben Produktentwicklung dienen. Neben Ergebnissen aus physischen Tests sollen auch Ergebnisse aus virtuellen Umgebungen wie dem Digital Mock Up (DMU) abbildbar sein, sofern sie die Durchführung nachfolgender RP-Projekte beeinflussen. Eine weitere Informationsgruppe ist für die Dokumentation von Bewertungen vorgesehen. Unter diese Kategorie fallen Bewertungen von Testergebnissen, Prozesskonfigurationen und Bewertungen bezüglich der Erreichung der in der Meilensteinplanung angestrebten Ziele. Bild 4-20 zeigt eine Übersicht der entwickelten Objektstruktur des *RPProject*. Sie bildet die Grundlage für die Entscheidungs- und Wissensunterstützung im Rahmen der Produktverifikation.

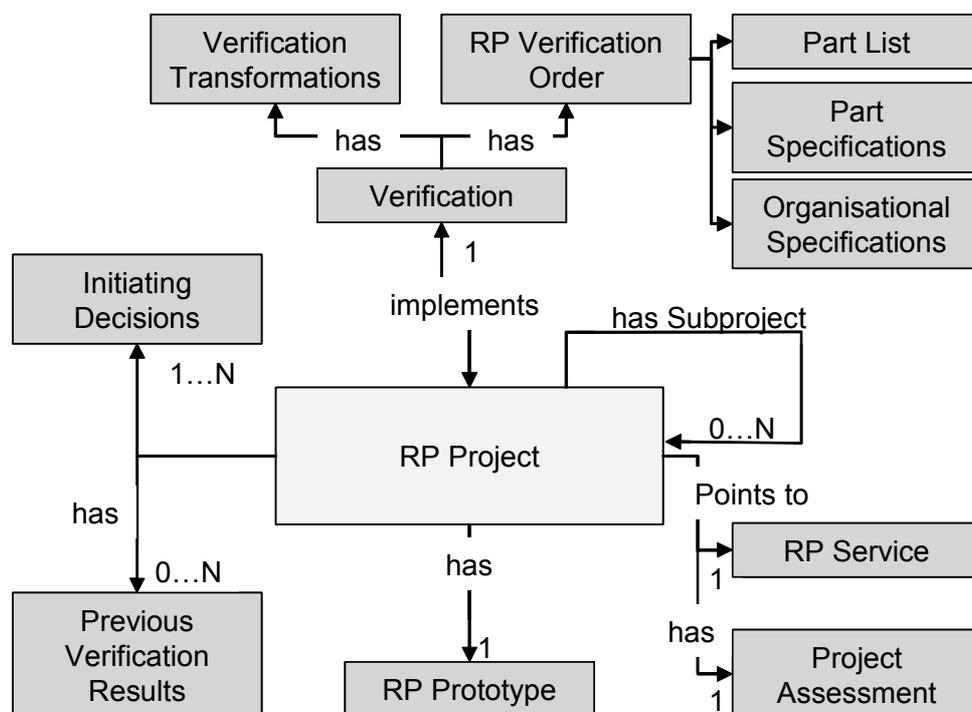


Bild 4-20: Objekt RPProject und dessen Bindungen

Der Zugriff auf die Datenbank wird durch ein Rollenkonzept gesteuert, dargestellt in Bild 4-21. Der *Anwender* nutzt das System produktiv und erwartet eine Entscheidungsunterstützung bei der Durchführung seines RP-Projektes und die Dokumentation der Inhalte. Für ihn ist das Modul *Bewertung* konzipiert, welches aus den Teilen Anforderungsdefinition, Inferenzmaschine und Ergebnispräsentation besteht. Der *Experte* erhält schreibenden Zugriff auf die Prozessdefinition, Materialspezifikation und die Regeldefinition. Der *Dienstleister* ist für die Aktualität der konfigurierbaren Prozesse zuständig und erhält schreibenden Zugriff für die Regeldefinition und Prozesskompatibilität.

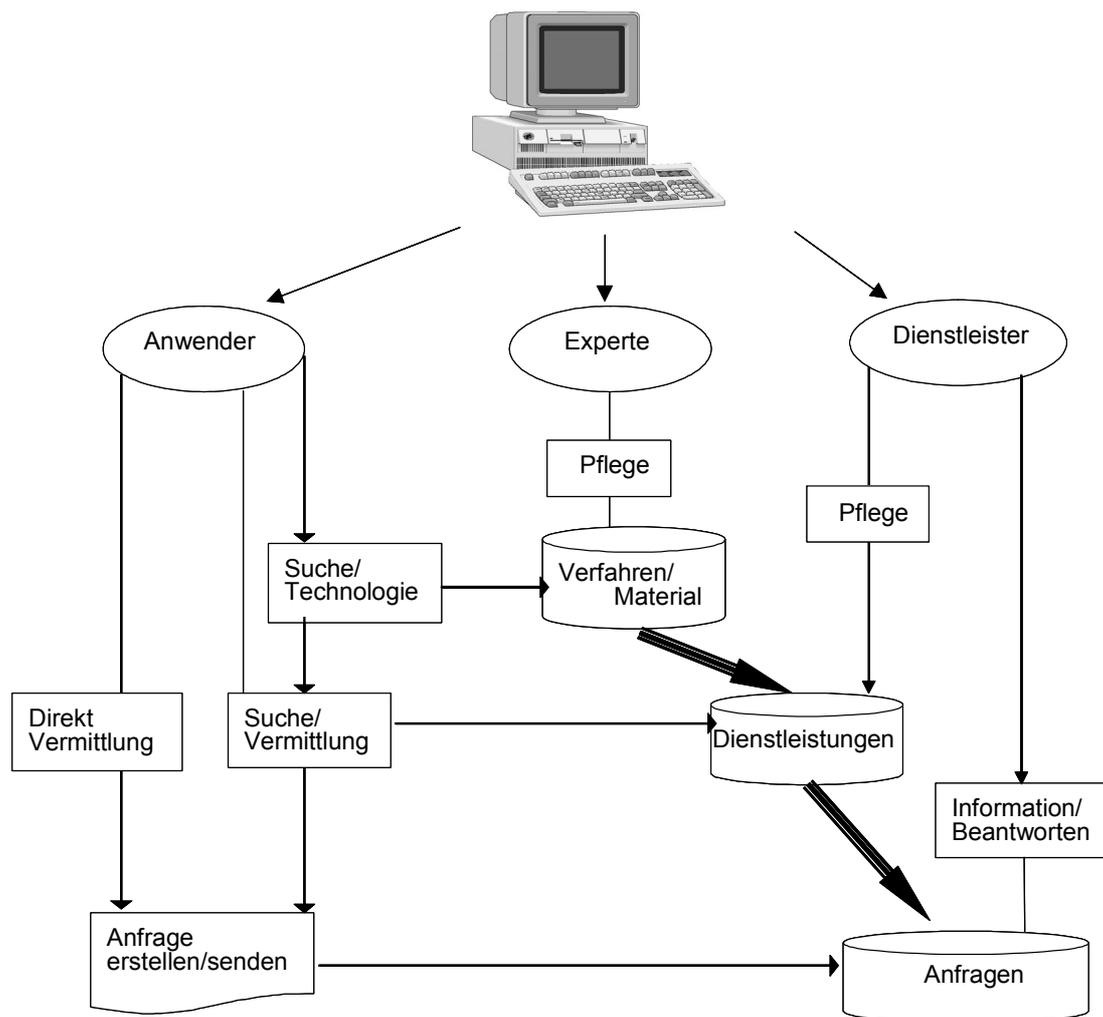


Bild 4-21: Rollenkonzept für den Datenzugriff

Die folgenden Informationscluster ergeben sich daraus:

- Im Projekt betrachtete Prototypeigenschaften
- Zeitplanung

- Beteiligte Unternehmen und Personen
- Anweisungen zur Versuchsdurchführung
- Ergebnisse der Verifikation

Die Entität ‚*RPPrototype*‘ enthält Datenstrukturen, die sich auf die Repräsentation der physischen Prototypen beziehen. Neben geometrischen und technologischen Daten sind die zu prüfenden Eigenschaften zu speichern. Daraus ergeben sich die Informationscluster

- Bauteilbezogene organisatorische Daten
- Im Test zu verifizierende Anforderungen an den Prototypen
- Geometrie und darauf bezogene Toleranzen
- Technologische Eigenschaften

In Bild 4-22 ist das entwickelte Objektmodell *RPPrototype* mit seinen Informationsbereichen dargestellt.

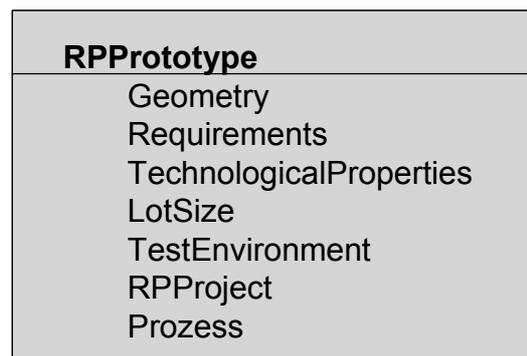


Bild 4-22: Das Objekt RPPrototype

Die Klasse *RPProcess* implementiert Prozesse, deren wichtigstes Merkmal in der Veränderung der Eigenschaften verarbeiteter Objekte zu sehen ist. Dabei ist zunächst unerheblich, ob die Objekte virtueller oder physischer Ausprägung sind. Demzufolge wird ein Prozess durch Eingangs- und Ausgangselemente beschrieben sowie durch Methoden und Mechanismen, die die Prozesswirkungen auslösen. Für die Erstellung von Prozessketten, die aus medienbruchfrei aufeinander folgenden Einzelschritten bestehen, bieten sich unterschiedliche Herangehensweisen an. Die erste ist für Einsatzfälle geeignet, in denen beim Anwender nur geringe Kenntnisse über die Durchführung von RP-Projekten vorliegen. Sie zeichnet sich durch vorkonfigurierte Objekte aus, die anhand von Regeln angeordnet werden. Dies impliziert einen mehrstufigen Auswahlprozess,

denn die zunächst nur grob beschriebenen Prozesse sind im Anschluss durch fachkundige Anwender weiter zu detaillieren. Hier kommt die in Kapitel 4.3.2 entwickelte Projektklassifizierung zum Tragen, denn sie erlaubt die Bereitstellung einer auf den Projekttyp abgestimmten Idealkonfiguration.

Die zweite Alternative fordert vom Anwender eine stärker ausgeprägte Interaktion und Beeinflussung des Auswahlprozesses. Alle Objektklassen werden neutral zur Verfügung gestellt. Erst im Anschluss an die Prozesskonfiguration erfolgt ein Plausibilitäts-Check, der Ausgangs- und Eingangswerte aufeinander folgender Prozesse abgleicht und mögliche Unstimmigkeiten an den Anwender meldet. Nachteile dieser Vorgehensweise sind in der geringeren Konfigurations-Sicherheit zu sehen, die dadurch entsteht, dass die Zweckmäßigkeit eines Prozessschrittes für eine bestimmte Position in der Prozesskette nicht automatisch prüfbar ist.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird daher die Methode der vorkonfigurierten Objekte verfolgt, da ein darauf basierendes System für Anwender mit geringen Kenntnissen die größten Unterstützungspotenziale bietet. Die Verwendbarkeit eines Prozesses und dessen mögliche Positionen in einer Prozesskette lassen sich durch die Definition von spezifischen Subklassen festlegen, wie beispielhaft in Bild 4-23 gezeigt.

<b>RPPProcess</b>
Lead Time:NUM
Build Volume:NUM
Process Type:CHOICE
Typical Applications:LIST
Materials:LIST
Surface Quality hor:NUM
Surface Quality ver:NUM
Shrinkage x,y,z:NUM
Size Factor x,y,z:NUM
PreviousProcess:OBJECT
NextProcess:OBJECT
InputObjects:LIST
OutputObjects:LIST
Machine:OBJECT

Bild 4-23: Inhalte der Klasse ‚Prozess‘

Als RP-Dienstleistung wird die Lieferung prototypischer Bauteile verstanden, basierend auf RP-Prozessketten. Jede Dienstleistung enthält demnach mindestens einen generativen Herstellungsvorgang. Sie kann weiterhin durch eine typische Durchlaufzeit sowie eine typische Stückzahl charakterisiert werden. Um diese Richtwerte berechnen zu können, wird vorgeschlagen, einen Referenz-

körper zu verwenden. Es handelt sich dabei um einen massiven Würfel der Kantenlänge 100 mm. Im Gegensatz zur Definition komplexer Bauteile, die alle erdenklichen Eigenschaften eines physischen Prototypen enthalten, ist diese Vorgehensweise praxisorientiert im Sinne einer einfachen Konsenslösung, die es erlaubt, Abschätzungen hinsichtlich der Herstellungsdauer und daraus resultierend eine Richtgröße für Durchlaufzeiten, Stückzahlen und Kosten abzugeben. Das Objekt RPService und seine Einbindung in die Gesamtstruktur zeigt Bild 4-24.

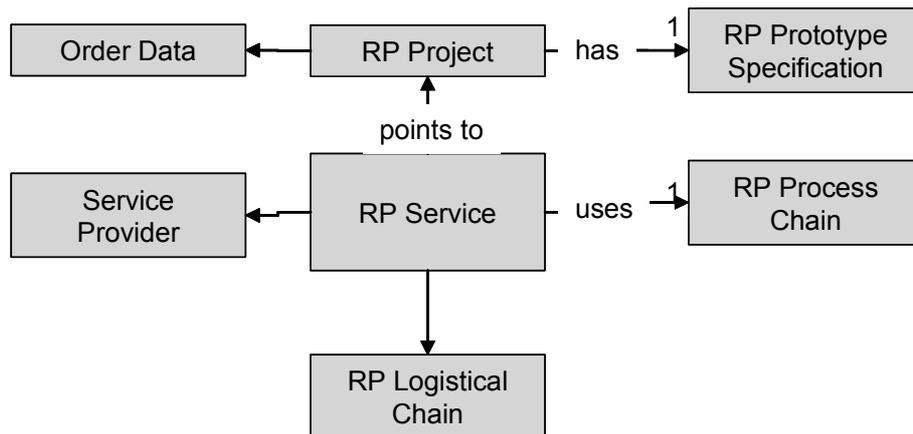


Bild 4-24: Objektstruktur RP-Service

#### 4.5.4 Schaffung eines prozessübergreifenden Schnittstellenformates

Die Integrationsfähigkeit von Prozessen ist im Wesentlichen von der Verfügbarkeit geeigneter Datenschnittstellen abhängig. Die im jeweiligen Prozessablauf erzeugten Ausgangsinformationen stehen nur dann allen nachfolgenden Prozessen als Eingangsinformationen zur Verfügung, wenn die Schnittstellen in der Lage sind, entsprechende Datenstrukturen zu transportieren. Im CAD-Bereich hat diese Notwendigkeit zur Entwicklung der bekannten Geometriedatenformate geführt. Eine Exportfunktionalität des sendenden Anwendungssystems liest die relevanten Daten aus dem internen Datenmodell aus und überträgt sie anhand einer definierten Übersetzungsvorschrift in das Schnittstellenformat. Das empfangende System nutzt dieselbe Vorschrift, um der Schnittstellendatei die für die Weiterbearbeitung des Projektes notwendigen Informationen zu entnehmen. Medienbrüche treten demzufolge an Stellen auf, an denen die Weitergabe von Informationen nicht stattfindet.

Ursachen hierfür sind:

- Unzureichende Spezifikation der Schnittstellen

- Mangelndes Wissen über die in der Prozesskette benötigten Daten
- Fehlende Strukturierung der Daten
- Fehlende Funktionalität in den Systemen für den Im- und Export

Bei der Spezifikation von Schnittstellen ist besondere Sorgfalt auf die eindeutige Datenzuordnung zu legen, denn Mehrdeutigkeit ist meist fehleranfälliger als Sinnlosigkeit, da sie nicht auf den ersten Blick erkennbar ist. Zur Herleitung einer Entscheidung für ein Format zur Datenübertragung im Rahmen von RP-Projekten müssen die folgenden Anforderungen erfüllt werden:

#### 1. Lesbarkeit des Formates für den Menschen

Das primäre Ziel des angestrebten Formates besteht in der Eliminierung von Medienbrüchen. In dieser Hinsicht ist die Lesbarkeit nicht notwendig. Dennoch soll die Möglichkeit bestehen, Objekte und Eigenschaften durch allgemein verständliche Namen zu kennzeichnen. Für den Im- und Export der enthaltenen Informationen können für nahezu alle Anwendungen entsprechende Parser mit geringem Aufwand erstellt werden.

#### 2. Verwendung des Formates zur Darstellung oder zur Datenverarbeitung

Da aufgrund der vielen interdisziplinären Partner bei RP Projekten eine größtmögliche Flexibilität erforderlich ist, muss neben dem Hauptziel der Verarbeitung auch die einfache, strukturierte Darstellbarkeit gefordert werden, um bei einzelnen Prozessschritten die Informationen manuell zuzuordnen.

#### 3. Anwendungsbreite

Eine hohe Anwendungsbreite, wie sie für einen Standard zu fordern ist, wird durch eine möglichst flexible Gestaltung des Formates unterstützt. So kann durch Anpassungen ein neues Anwendungsfeld einbezogen werden.

#### 4. Einschränkende Standards

Vorgaben, die die Gestaltungsfreiheit des Formates einschränken, sind nicht bekannt. Die entstandenen Dokumente können vom unternehmenseigenen PDM-System gemeinsam mit der Produktstruktur verwaltet werden. Geometrieinformationen werden gekapselt und durch vorhandene Standards wie STEP oder STL übertragen. Bild 4-25 zeigt den Bedarf an informationstechnischen Schnittstellen von RP-Projekten zu anderen Aufgabenbereichen.

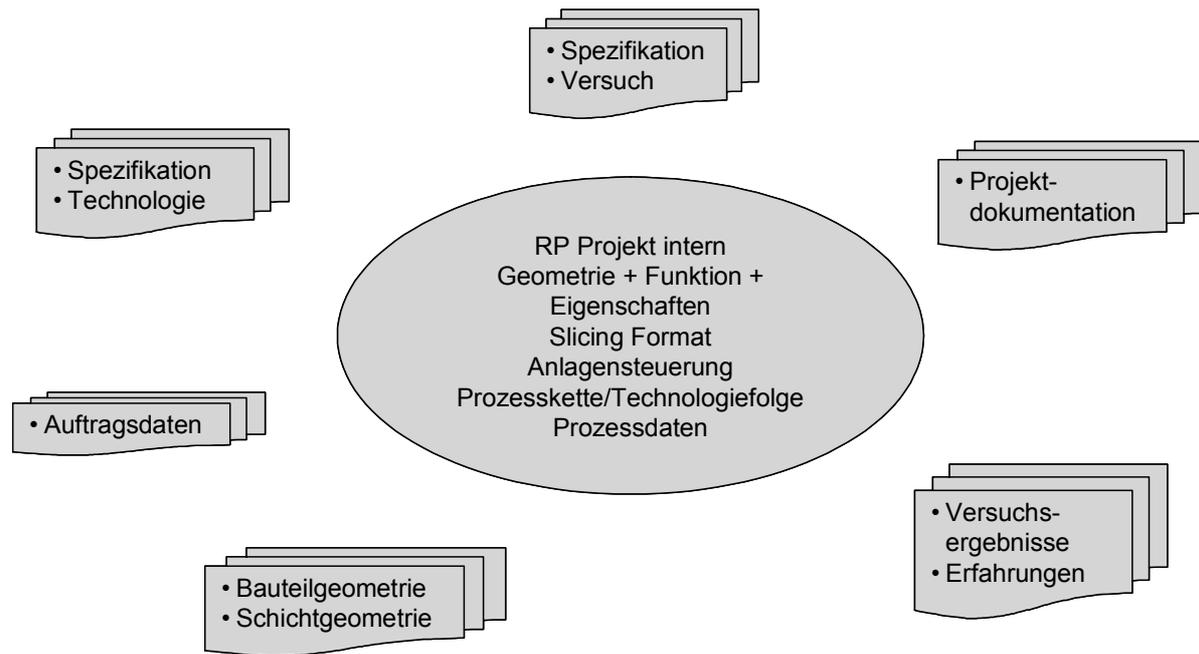


Bild 4-25: Schnittstellenbedarf in RP-Projekten

Die genannten Anforderungen werden sehr gut durch die XML (Extensible Markup Language) Spezifikation erfüllt. Sie bietet darüber hinaus weitere Vorteile:

- Der Datenaustausch ist plattformunabhängig
- XML ist selbst dokumentierend
- Struktur und Inhalt sind getrennt
- Die Struktur eines XML Dokumentes kann in der Dokument-Typdefinition (DTD) überprüft werden [109].

XML selbst ist nicht, wie der Name suggeriert, eine Auszeichnungssprache (Markup Language), sondern liefert eine formale Vorgabe zur Definition von konkreten Auszeichnungssprachen. Die Erstellung von XML Dokumenten ist an die Einhaltung von Regeln gebunden, die vom World Wide Web Consortium definiert wurden [110]. Syntaktische und semantische Regeln kann der XML Anwender selbst entwickeln und dokumentieren, Bild 4-26. Gültige Dokumente entsprechen den Auszeichnungsregeln und besitzen eine zugehörige Document Type Definition (DTD), die die Objektstruktur des XML Dokumentes wiedergibt. Im Wesentlichen sind dies Angaben über die Elemente und deren Attribute und Beziehungen. Eine wichtige Restriktion besteht in der Tatsache, dass jedes XML Dokument nur einen einzigen Strukturbaum enthalten darf. Sind mehrere Strukturbaume zu übertragen, ist dies durch Verwendung einer Dokumentgruppe zu realisieren.

Das STL Format und alle darauf aufbauenden Schnittstellendefinitionen, wie in Kapitel 2.6 dargelegt, sind ohne Weiteres in eine XML Struktur integrierbar, um die Abwärtskompatibilität zu STL-basierten Systemen zu gewährleisten. Dies war eine wichtige Anforderung der industriellen Anwender.

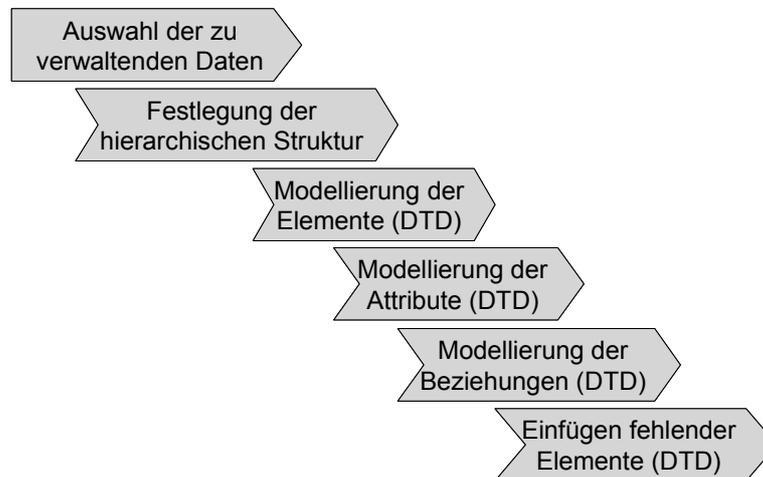


Bild 4-26: Definition von XML Dokumenten

Die DTD wird durch Deklarationen und die Vorgabe von Schlüsselwörtern eingeleitet. Für den Aufbau einer Objektstruktur sind die Schlüsselwörter

- ENTITY
- ELEMENT
- ATTLIST

ausreichend. Sie ermöglichen eine Repräsentation von Objekten und deren Eigenschaften. Die Inhalte relationaler Datenbanken sind unter Einhaltung einiger Abbildungsvorschriften vollständig in das XML Format transformierbar.

Für den Zugriff auf XML Dokumente spezifizierte das World Wide Web Consortium ein Document Object Model (DOM), welches sehr speicherintensiv ist. Alternativ kann SAX (Simple API to XML) genutzt werden. Die Implementierung dieser Schnittstellen zwischen Dokument und Anwendung kann auf einfache Weise durch Parser in der Programmiersprache des Anwendungssystems realisiert werden. Die Daten des XML Dokumentes transformiert der Parser in das anwendungsspezifische Objektmodell.

Ein Software-Modul, genannt *XML-Prozessor*, dient dazu, XML-Dokumente zu lesen und den Zugriff auf ihren Inhalt und ihre Struktur zu erlauben. Ein XML-Prozessor verrichtet seine Arbeit als Teil eines anderen Moduls, genannt Anwendung. Diese Spezifikation beschreibt das notwendige Verhalten eines XML-

Prozessors soweit es die Frage betrifft, wie er XML-Daten einlesen muss und welche Informationen er an die Anwendung weiterreichen muss.

XML erfüllt damit alle Forderungen an ein Schnittstellenformat, welches in RP-Projekten einsetzbar ist und darüber hinaus eine Kommunikation mit anderen Anwendungen ermöglicht. Der Aufbau des entwickelten Formates wird im Folgenden anhand eines Beispiels verdeutlicht. Entsprechend der Anforderungen an eine Integrationslösung sind die Informationscluster Projekt, Prototyp und Prozess abzubilden und zu vernetzen. Im Ergebnis steht eine *Projektdatei* zur Verfügung, die entlang des Workflows alle relevanten Informationen strukturiert zur Verfügung stellt und die im jeweiligen Prozessschritt erzeugten Zusatzinformationen speichert, um sie wiederum dem nächsten Schritt als Eingangsinformation anzubieten, wie in Bild 4-27 beispielhaft dargestellt. XML bietet im Wesentlichen zwei Alternativen zur Repräsentation von Objekten und deren Struktur. Die Wahl der passenden Alternative ist von den abzubildenden Daten und deren Vernetzung abhängig. Am Beispiel eines Prozesses RPPProcess1, der einen Verweis auf die Instanz RPMachine2 enthält, können die beiden Vorgehensweisen miteinander verglichen werden.

```

<?xml version=„1.0“ encoding=„ISO-8859-1“ ?>
<RPDATA>
  <HEAD>
    <INV_NO>sd-12345</INV_NO>
    <ORDER_NO>45a287-55</ORDER_NO>
  </HEAD>
  <DATA>
  <RPPrototype
    Name=„Ground Connector Bracket“>
  <Geometry>
    <Facet
      FacetName=„f023“
      FacetNormal=„0,0,1“
      Coords=„1.000,1.452,12.500“/>
    <Facet
      FacetName=„f024“
      FacetNormal=„0,0.7,0.7“
      Coords=„4.550,2.520,11.610“/>
    ...
  <GeometricalSubset>
    Name=„Face.34“
    Facets=„f023,f024,f025,f027,f030“>
    <TOLERANCE
      TolType=„Parallel“
      RefEl=„Face.34“
      TolEl=„Face.45“
      LowLim=„-0.2“
      UpLim=„0.2“/>
  </ GeometricalSubset >
</Geometry>
</ RPPrototype >
<RPService>
...
</RPService>
</DATA>
</RPDATA>

```

Bild 4-27: Beispielhafte Struktur der Projektdatei

Im ersten Fall ergibt sich die Notwendigkeit, die Referenz als IDREF darzustellen. Vorteile dieser Lösung sind Einfachheit und Kompaktheit. Nachteile dieser Darstellung sind in der schlechten Lesbarkeit und Unübersichtlichkeit der erzeugten Strukturen zu sehen. Dies wirkt sich auf die Fehleranfälligkeit der Schnittstelle aus.

Die zweite Lösungsalternative behandelt die Struktur zunächst unabhängig von den Objektinhalten und definiert zunächst nur die Referenzen durch Platzhalter. Im weiteren Verlauf findet dann die Zuweisung der tatsächlich genutzten Objektdateien zu den Platzhalterinstanzen statt. Dies hat zwar den Nachteil eines etwas umfangreicheren Datenvolumens und etwas längeren Ladezeiten in den

Anwendungen. Doch die gute Lesbarkeit, die Klarheit der Abbildung und die Trennung von Struktur und Objekten schafft einen ausreichenden Vorteil und darüber hinaus die Basis für eine schnelle Implementierung entsprechender Importfunktionen in den Anwendungssystemen. Die definierte Spezifikation erfüllt die gestellten Anforderungen insbesondere hinsichtlich Transparenz, systemneutraler Darstellung und Integrationspotenzial. Mit XML wurde ein Paket gewählt, das bereits international anerkannt ist und anhand der Zugriffskonzepte DOM und SAX über Vorgaben für die Implementierung von Parsern verfügt.

## 4.6 Synthese zum Gesamtkonzept

Eine ganzheitliche Unterstützung soll im Unternehmen den Einsatz des Rapid Prototyping erleichtern, neue Anwendungsbereiche erschließen und sich positiv auf die Faktoren Zeit, Kosten und Qualität der Produkte und der Entwicklungsprozesse auswirken. Die daraus ableitbaren Anforderungen an das Konzept und die systemtechnische Realisierung beziehen sich auf die Flexibilität und Anpassbarkeit, Unabhängigkeit und Einfachheit in der industriellen Anwendung.

Im Rahmen des Gesamtkonzeptes muss zu Beginn eines RP-Projektes eine informationstechnisch verwertbare Struktur der Rahmenbedingungen verfügbar sein, da sie die Grundlage aller nachfolgenden Aktivitäten bildet. Hierzu zählen Anforderungen an den Prototypen, an die Untersuchungen und Tests und an die Ergebnisse. Diese Struktur ist phasenspezifisch mit Werten zu belegen, um die schrittweise Fortentwicklung der Produkteigenschaften dokumentieren zu können. Dies impliziert eine Befähigung der Anwendungssysteme, neben exakten Werten auch Wertebereiche abzubilden. Diese Aufgabe ist in der Regel mit den vorhandenen CAD-Systemfunktionen der assoziativen Vorgabe von Toleranzen für Geometrieelemente realisierbar.

Im Sinne der Integration ist nun die Frage der Verfügbarkeit von im Zuge der Funktionsmodellierung erzeugten Datenstrukturen für die Anwendungen der RP Projektdurchführung zu stellen. Die vorhandenen Formate zur Übertragung geometrischer und technologischer Eigenschaften, beispielsweise STEP AP 214 und AP 203, lassen einen Austausch von Informationen wie Toleranzen nach Typ und Wert zu, die der Geometrie zugeordnet sind. Funktionen, die sich auf Verbände von Geometrieelementen beziehen, wie beispielsweise die Funktion *Kräfte aufnehmen* einer Halterung, sind anhand verfügbarer Übertragungsformate nicht neutral abbildbar. Von der Forderung ausgehend, dass RP-Projekte aufgrund vieler Vorzüge weiterhin mit tesselierten Daten arbeiten, bietet sich die zielgerichtete Strukturierung der ohnehin für den Export der Geometrie zu erzeugenden Dreiecksflächen im CAD-System an. Eine Möglichkeit der neutralen Repräsentation ist in Bild 4-28 dargestellt.

An Stellen, wo die Forderung nach Medienbruchfreiheit von den vorhandenen Systemen nicht erfüllt werden kann, müssen die entsprechenden Daten zu Beginn des RP-Projektes in das Datenbankobjekt *RPPrototype* eingepflegt werden. Durch Konsistenz- und Vollständigkeits-Checks können die importierten Inhalte anschließend überprüft und freigegeben werden.

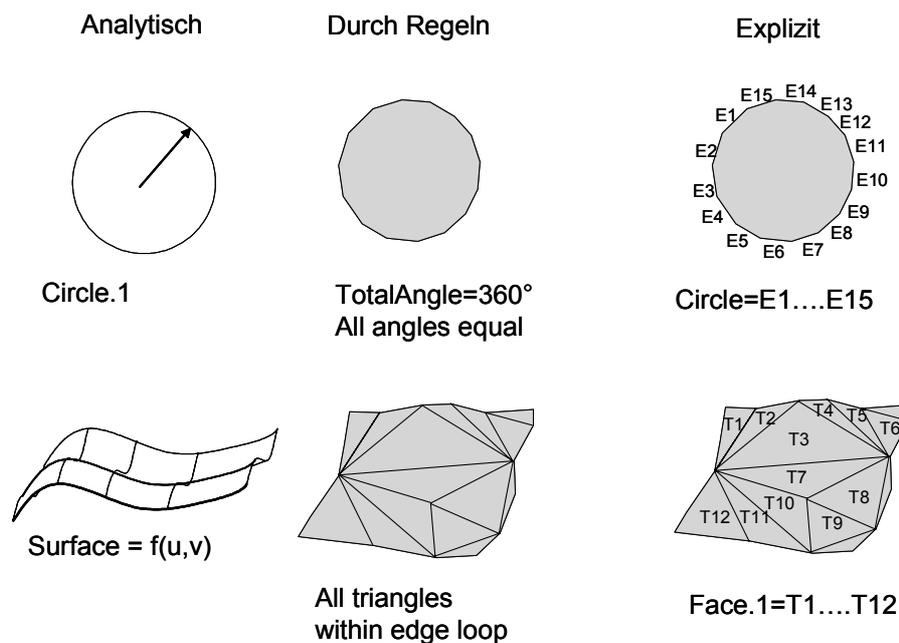


Bild 4-28: Repräsentation von Formelementen

Die Auswahl und Konfiguration der adäquaten RP-Prozessketten wird nach Prüfung durch den Anwender im Datenmodell gespeichert. Parallel dazu schließt sich der Geschäftsprozess der Vermittlung von Dienstleistungen zur Herstellung der physischen Prototypen an. Das entwickelte Schnittstellenformat wird in Form der *RPPProject-Datei* für die Übertragung aller relevanten Informationen verwendet. Dem Dienstleister bleibt es überlassen, ob er die enthaltenen Informationen extrahiert und manuell weiterverarbeitet oder die Daten über einen Parser in die Prozessplanung übernimmt, wie in Bild 4-30 verdeutlicht. Der Geschäftsprozess *Vermittlung* wird informationstechnisch durch das Modul *RPBroker* unterstützt, das im Wesentlichen die Auftragsabwicklung kontrolliert und dokumentiert.

Zur Sicherstellung der Aktualität aller Informationen über verfügbare Dienstleistungen wird ein Konzept vorgeschlagen, welches einen weitgehend automatisierten Ablauf von Updates gewährleistet. Es sieht eine tägliche Abfrageroutine vor, die auf Daten registrierter RP-Dienstleister zugreift und sie mit den Inhalten

der Referenzdatenbank abgleicht. Die Registrierung besteht aus den Schritten Anmeldung, Einrichtung und Veröffentlichung. Die Anmeldung erfolgt beim Datenbankmanager, der die Zugriffsrechte verwaltet. Der Dienstleister verpflichtet sich dazu, die von ihm angebotenen Dienstleistungen entsprechend einer standardisierten Vorgabe zu spezifizieren. Weiterhin richtet er einen passwortgeschützten Bereich in seiner Internetpräsenz ein, der die aktuellen Informationen enthält. Als Datenformat kann XML verwendet werden, eine Implementierung auf Basis von Tabellen ist jedoch ebenso möglich. Zur Veröffentlichung sendet der Dienstleister die Zugangsdaten an den Datenbankmanager. Die Abfrage-routine ruft täglich die angegebenen Dateien ab und vergleicht deren Inhalt mit den bestehenden RP-Service Objekten, wie in Bild 4-29 zu sehen ist.

Die Vorbereitung der Fertigung und die Möglichkeiten der informationstechnischen Unterstützung wurden ausführlich in Kapitel 2.4.5 behandelt und Ansätze vorgestellt, um aus den bauteil- und projektbeschreibenden Daten geeignete Fertigungsstrategien abzuleiten. Im Sinne des Gesamtkonzeptes ist fertigungsbegleitend eine Dokumentation der Fertigungsprozesse zu fordern, mit der Zielstellung, eine Bewertung und stetige Verbesserung der Auswahlalgorithmen zu erreichen. Hierzu liefert der Dienstleister Informationen, die nicht der Geheimhaltung unterliegen und auf einfache Weise zu erheben sind, wie Zeitbedarf einzelner Fertigungsschritte, Vor- und Nachbereitung oder Abweichungen von der vorgesehenen Prozessfolge.

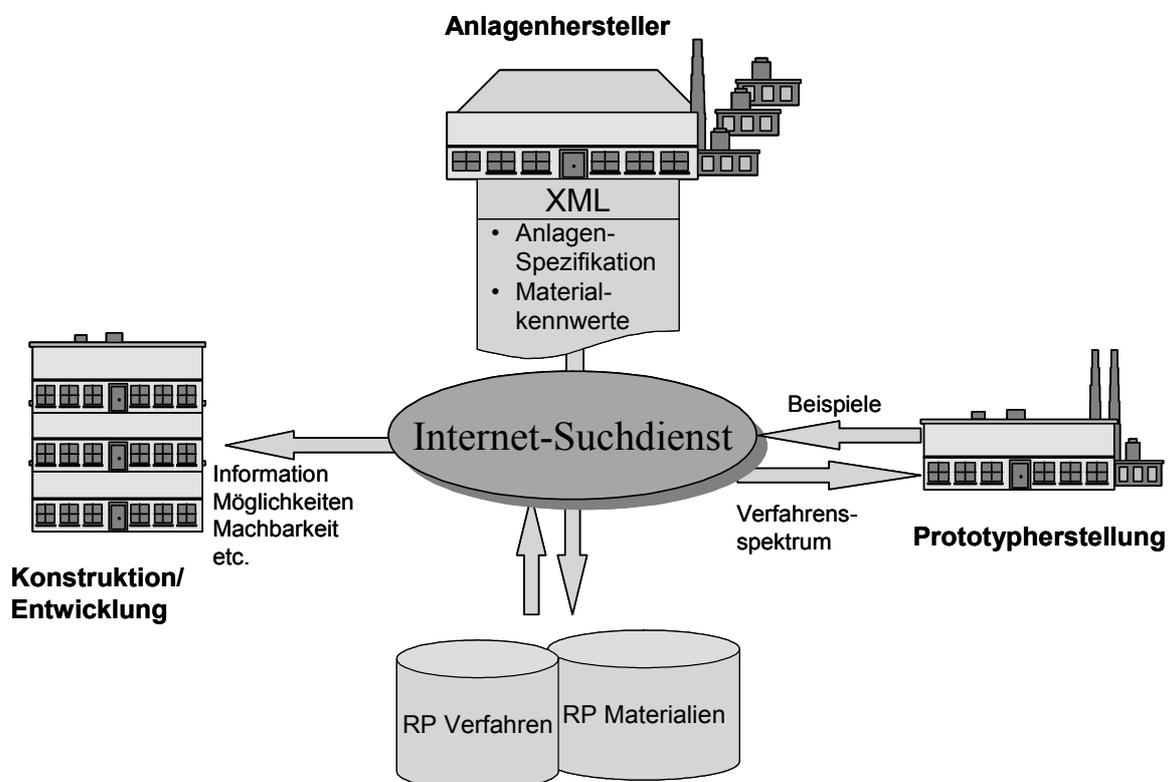


Bild 4-29: Aktualisierungskonzept

Technologische Informationen, die sich auf die Fertigung selbst beziehen, wären für die Integration zwar hilfreich, doch der enge Bezug zum Know How des Dienstleisters verbietet in der Regel die Dokumentation von Prozessparametern, tatsächlichen Kosten oder anderer betriebswirtschaftlicher Fakten. Innerhalb eines abgeschlossenen Referenzprojektes wurden daher Erhebungen und Analysen des Projektablaufes beispielhaft angefertigt und nachfolgend, in abstrahierter Form, für die Verifikation der eingesetzten Systeme verwendet.

Im Anschluss an die Fertigung öffnet der Dienstleister die *RPPProject-Datei* im Formularmodus und vervollständigt die darin enthaltenen Informationen. An die Vermittlung und Fertigung schließt sich der Prozess der Prototypuntersuchung an. Er richtet sich nach den in den Objekten *RPPProduct* und *RPPProject* festgelegten Rahmenbedingungen, die ebenfalls aus der *RPPProject-Datei* zu entnehmen sind.

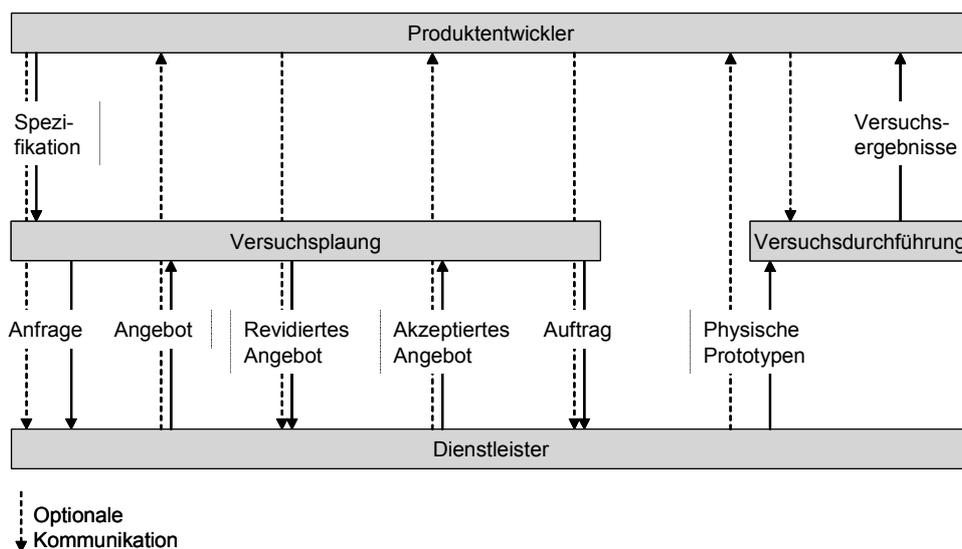


Bild 4-30: Workflow des Geschäftsprozesses ‚Vermittlung‘

Nach der Ausführung der Versuchsreihen sind Erkenntnisse und erforderliche Änderungen und deren Ursachen zu dokumentieren und der Produktentwicklung zur Verfügung zu stellen. Eine Hürde für die verlustfreie Übernahme von Testergebnissen aus realen und virtuellen Testumgebungen liegt in der Heterogenität dieser Daten. Erkenntnisse über die Montierbarkeit oder Wartungsfreundlichkeit sind hier ebenso wichtig, wie Aussagen über das Design oder das Zusammenspiel mehrerer Komponenten. Nicht nur die Geometrie des Prototypen und andere Testergebnisse wie beispielsweise die temporäre Durchbiegung einer Querrippe müssen erfasst werden, sondern auch die in Belastungstests ermittelten Auswirkungen, wie beispielsweise Rissbildungen.

Die Rahmenbedingungen für die physische Verifikation sollten unternehmensspezifisch in einer Richtlinie zur Versuchsdurchführung festgehalten werden. Hierbei sind verschiedenste Quellen zu berücksichtigen. Gesetzliche Vorschriften bezüglich der Sicherheit oder Umweltgerechtigkeit und unternehmenseigene Normen gehören ebenso dazu wie alle Einwirkungen auf das Produkt, die sich aus seiner Nutzung ergeben.

Für die Rückführung dieser Erkenntnisse in die Produktentwicklung stehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung. Die Prozesssicherheit bei der Herstellung physischer Prototypen wirkt sich bei der Planung und Durchführung von Versuchen insbesondere auf die Ergebnisstreuung aus. Weist eine Verfahrenskette beispielsweise hohe Schwankungen in der erzeugten Bauteilfestigkeit auf, ist diese Eigenschaft entweder nur eingeschränkt bewertbar oder durch statistische Auswertung einer großen Anzahl von Prototypen überprüfbar. An dieser Stelle zeigt sich ein weiteres Mal die Notwendigkeit der Abstimmung aller Schritte mit dem Ziel der ganzheitlichen Optimierung. Die Ergebnisse von Versuchen werden durch Gegenüberstellung der erwarteten und der gemessenen Eigenschaften dokumentiert.

Vor dem Hintergrund der Integration der Projektergebnisse ist es notwendig, über die Erfassung der Geometrie hinaus einen Bezug zu den Testergebnissen herzustellen, der dem Produktentwickler in geeigneter Weise präsentiert werden kann. Auf dem Konzept der durchgängigen Verwendung der *RPPProject-Datei* basierend, wird wiederum die angenäherte Repräsentation der Geometrie durch Triangulation genutzt. Sie enthält bereits Flächenverbünde, die funktionale Zusammenhänge widerspiegeln. Erfolgt im Anschluss an die Tests eine Digitalisierung, muss das daraus abgeleitete Geometriemodell mit dem für die Fertigung verwendeten Modell durch eine Transformations- und Rotationsmatrix in Verbindung gebracht werden. Hierfür ist in den meisten Fällen eine manuelle Grobausrichtung anhand dreier Referenzpunkte ausreichend. Um die Durchgängigkeit der Geometrieinformation zu gewährleisten, ist das bauteilbezogene Koordinatensystem immer in der im CAD-System definierten Lage mitzuführen, da sonst eine Rückführung der Erkenntnisse erschwert wird. Die entsprechende Vorgehensweise beim Export der STL-Datei aus dem jeweiligen System heraus muss in unternehmensspezifischen Richtlinien festgelegt sein. Das Referenzkoordinatensystem und die Korrelationsmatrix zwischen konstruierter Sollgeometrie und digitalisierter Istgeometrie wird in der *RPPProject-Datei* abgelegt und ist damit für alle Prozesse verfügbar.

Der Produktentwickler erhält als Ergebnis der physischen Produktverifikation die vervollständigte *RPPProject-Datei* zurück und speichert sie in der unternehmenseigenen Datenbank. Dort werden die entsprechenden Objektinstanzen angelegt und mit den neuen Daten gefüllt. Durch die in der Instanz *RPPPrototype* abgebildete Assoziativität zwischen tessellierter Geometrie und den Ergebnissen und Bewertungen wird der Konstrukteur in die Lage versetzt, Änderungen schnell

und effizient einzuarbeiten. Er kann dazu einzelne Informationsblöcke extrahieren und in die Dokumentation der Änderungen im Rahmen des Änderungsmanagements einpflegen. Im Verlauf der Entwicklung hat er durch die RP-Datenbank jederzeit Zugriff auf alle Ergebnisse der zum Produkt gehörenden virtuellen und physischen Verifikationen, unter der Voraussetzung, dass auch die abgeschlossenen Untersuchungen in VR-Umgebungen durch eine *RPProject-Datei* dokumentiert wurden.

Das Gesamtkonzept erfüllt in der dargestellten Form die eingangs formulierten Anforderungen hinsichtlich projektübergreifender Unterstützung aller Prototyping Aktivitäten. Im Datenmodell wurden sowohl bestehende Strukturen als auch die für eine Integration notwendigen Erweiterungen abgebildet. Die projektübergreifende Abbildung von Funktionen und Eigenschaften und deren Verifikation garantiert einen redundanzfreien und planbaren Ablauf aller Prozessschritte.

## 5 Prototypische Systemimplementierung

### 5.1 Konfigurationsmodul RPSelector als Anwendungssystem<sup>5</sup>

#### 5.1.1 Anwendungsbezogene Anforderungen

Das Softwaremodul zur Auswahl und Konfiguration von RP Prozessketten soll der Entscheidungsunterstützung dienen und muss für Anwender geeignet sein, die über ein geringes bis mittleres Technologiewissen im Bereich Rapid Prototyping verfügen. Es muss daher sowohl über Schnittstellen zu anderen Systemen als auch über ein intuitiv bedienbares Benutzerinterface zur Eingabe der Eingangsinformationen verfügen. Dementsprechende Schnittstellen sind ebenfalls für die Ausgabe von Ergebnissen zu fordern. Von großer Bedeutung ist die Zeitspanne zur Erreichung einer hohen Nutzerakzeptanz. Diese Forderung zieht weitere Teilforderungen nach sich. Entscheidungsprozesse, die in Anwendungssystemen ablaufen, müssen eine hohe Ergebnistransparenz aufweisen. Die angebotenen Informationen müssen interpretierbar und nachvollziehbar sein. Werden von einem System unrichtige Ergebnisse erzeugt, muss durch Darstellung von Ursache-Wirkungsketten eine Analyse der Entscheidungsfindung durch den Nutzer möglich sein.

#### 5.1.2 Systemarchitektur

Die Realisierung des Anwendungssystems erfolgte auf Basis der dargestellten Anforderungen und anhand eines Lastenheftes, das aus Befragungen von Produktentwicklungsteams hervorging. Wesentliche Rahmenbedingungen waren

- Updatefähigkeit der Informationsobjekte
- Erweiterbarkeit der Datenbankstrukturen
- Einfachheit der Bedienung und Handhabung der Informationen und
- Kostengünstige Lösung bei zentraler Datenhaltung

Das Modul besteht aus den Komponenten Datenbank, Anwendungsschnittstelle und Inferenzsystem. Als Datenbankanwendung wurde MS ACCESS<sup>TM</sup> gewählt, da es über einen sehr hohen Verbreitungsgrad verfügt, den Zugriff über SQL-

---

<sup>5</sup> Der Verfasser wurde bei der programmtechnischen Realisierung der Datenbankanwendung durch Herrn cand. ing. Alexander Timm und Herrn cand. ing. Bailiang Zhang unterstützt

und ODBC-Schnittstellen zulässt und die Programmierung einer Funktionalität gewährleistet, die von einer externen Anwendung gestartet werden kann. Es sind sowohl Einzelplatzlösungen als auch Mehrplatzinstallationen realisierbar.

Die Entwicklung der Anwendungsschnittstelle wurde an dem entwickelten Rollenkonzept orientiert, das dem Anwender eine spezifische Sicht auf die Inhalte der Datenbank eröffnet.

Zur Begrenzung des Ergebnisumfanges wurden für die prototypische Implementierung folgende Randbedingungen festgelegt:

- Die Fertigungsvorbereitung besteht aus den Schritten Datenaufbereitung und Prozessplanung
- Die Fertigungsprozesskette setzt sich maximal aus den Elementen *Generative Process*, *Post Processing*, *Copy Process*, *Finishing Process* zusammen. Für jedes Element können beliebig viele alternative Prozesse als potenzielles Glied der Prozesskette in Frage kommen.
- Die Ergebnisse werden lokal aufbereitet, auf maximal fünf alternative Prozessketten beschränkt und präsentiert.

Eine funktionale Trennung von Interface und Datenbank wurde durch die Verwendung von Standard Query Language (SQL) –Befehlen erreicht. Die Datenbankanwendung kann somit innerhalb eines Windows-Netzwerkes als Datenquelle veröffentlicht und von allen angeschlossenen Rechnern angesprochen werden. Der lokal installierte Client übernimmt die Funktion der Benutzungsschnittstelle. Nach Eingabe der Anforderungen an die physischen Prototypen kontrolliert er die Daten auf Plausibilität und Vollständigkeit und schickt die entsprechenden Anfragen an die Datenbankanwendung. Nach Erhalt der Anfragedaten wird die Inferenzmaschine gestartet, die innerhalb der Datenbankanwendung abläuft und somit einen direkten Zugriff auf alle Informationsobjekte hat. Sie ermittelt die alternativen Prozessketten und sendet die Ergebnisse an den Client zurück.

Die Architektur des Gesamtsystems ist in Bild 5-1 dargestellt.

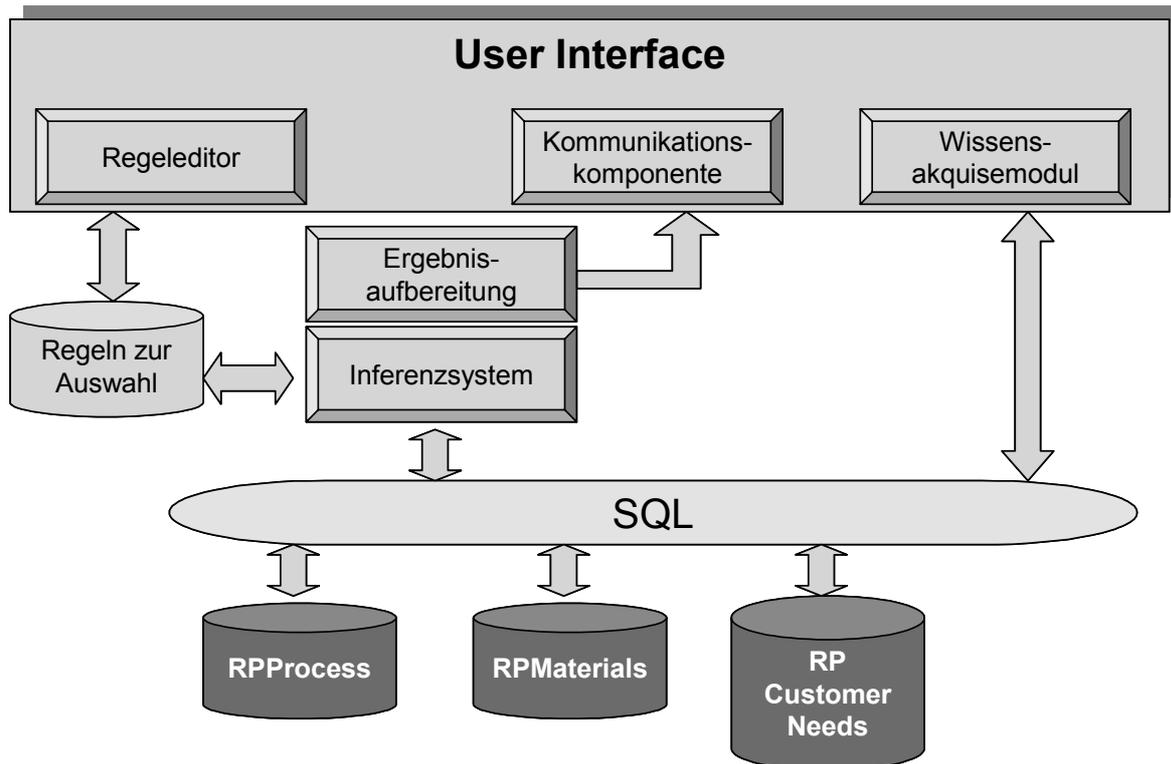


Bild 5-1: Systemarchitektur des Konfigurationsmoduls

Es sind die Rollen ‚Anwender‘, ‚Dienstleister‘ und ‚Experte‘ definiert. Dem Anwender steht das Hauptmenue zur Verfügung, das ihm erlaubt, Informationen über die in der Datenbank abgelegten generativen Verfahren, Folgeprozesse und Materialien abzurufen. Anwender, die die Rolle des Dienstleisters innehaben, können neue Prozesse und Materialien eingeben und bestehende Einträge ändern. Die umfangreichsten Rechte erhält die Rolle des Experten. Der Regeleditor steht nur ihm zur Verfügung, denn durch die Abstimmung der Regeln wird die Arbeitsweise des Inferenzsystems und damit der Weg der Entscheidungsfindung bestimmt.

### 5.1.3 Prozess- und Materialspezifikation

Die aus den Klassen *RPPProcess* und *RPMaterial* gebildeten Instanzen werden vom Experten über die SQL-Schnittstelle mit Inhalten gefüllt. In der Datenbank werden die Instanzen *RPMaterial* und *CPMaterial* unterschieden, in Abhängigkeit der Eignung des Materials für generative oder Folgeprozesse. Neben der physikalischen Materialspezifikation werden weitere Informationen gespeichert, die bei der Auswertung zu berücksichtigen sind, wie beispielsweise das Flag *solvable* für Materialien, die sich zur Urmodellherstellung beim Gießen eignen oder *coating* für die Beschichtungseignung der entstehenden Oberflächen. Die Materialien sind nach den Typen powder, liquid und thermoplastic unterschieden.

Bild 5-2 zeigt das Interface für die Materialzuordnung. Wahlweise können Einzelwerte eingegeben oder vollständige Materialspezifikationen aus allgemein verfügbaren Datenbanken, wie beispielsweise der Kunststoff produzierenden Industrie übernommen werden.

The screenshot shows a software window titled "Edit MaterialsRP" with the subtitle "Rapid Prototyping Material Attributes". The interface is organized into several sections:

- Name:** CIBA SL 1250
- RP Material ID:** 1
- Rapid Prototyping Process:** Stereolithography
- Last Updated:** September 2003
- Material Type:** Polymer transparent
- Material Cost:** 50,00 €/Unit
- Material Producer:** CIBA
- Data Source:** CIBA
- Physical Properties:**
  - Density: 3,00 g/cm<sup>3</sup>
  - Tensile Strength: 35,00 MPa
  - Tensile Modulus: 12000,00 MPa
  - Flexural Modulus: 5000,00 MPa
  - Elongation: 25,00%
  - Heat Deflection: 1000,00 K/mm<sup>3</sup>
  - Temperature Min: -40,0 C
  - Temperature Max: 60,0 C
  - Natural Color: Transparent
  - Colorable:
  - Solvable:
- Comments:** RPMATProp

At the bottom, there are navigation buttons (back, forward, search) and a status bar indicating "Datensatz: 1 von 8".

Bild 5-2: Materialspezifikation

Auch bei der Beschreibung der Prozesseigenschaften werden generative und Folgeprozesse unterschieden. Der Umfang der Eigenschaften richtet sich dabei nach den implementierten Regeln. Auf diese Weise wird die Forderung nach Flexibilität und Erweiterbarkeit erfüllt. Stellt sich im Verlauf des Systemeinsatzes heraus, dass die Entscheidungsfindung durch neue, beispielsweise unternehmensspezifische Regeln verbessert werden kann, die auf bisher nicht beschriebene Eigenschaften zurückgreifen, kann der Experte das Interface entsprechend anpassen.

**Edit ClassRP**

Edit **Rapid Prototyping Process Attributes**

**Name** Selective Laser Sintering

**Description**  
 In the SLS process, a modulated laser beam follows the shape of a slice of a CAD-generated object; it traces the object  
**Typical Applications**  
 Intricate Features, Hollow Parts, Undercuts

**Image**

**Process Parameters:**

Process Cost	200,00 €/Std. Unit
Standard Lead Time	1 - 2 days
Typical Series Size	6 - 10 Units
Application Field	seriennahe Kunststoff-Funktionsm
Surface Structure	stairstep
Standard Accuracy	0.3 - 0.1 mm
Tolerance Of Undercuts	high
Minimal Wall Thickness	0,20mm
Maximal Dimension	400,00mm
Maximal Volume	98.750,00cm <sup>3</sup>
Workspace	280*230*400

**Comments**  
 Scaling of parts is not constant. Depends on material, size and geometry. Refer to manual 5107-B

Add at least one material for every new process

Datensatz: 3 von 6

Bild 5-3: Prozessspezifikation

Nach Abschluss aller Eingaben stehen anschließend für den Nutzer von RP-Technologien neben den Prozessparametern auch bildliche und textuelle Beschreibungsfelder bereit.

#### 5.1.4 Ergebnispräsentation

Die Ergebnispräsentation besteht aus den Komponenten *Prozessketten*, *Total Degree of Fulfillment (TDOF)* und *Begründung*. Das Darstellungsfenster für die ermittelten konfigurierten Prozessketten enthält neben der Beschreibung der einzelnen Prozessschritte den zur Prozesskette zugeordneten TDOF als Sortierkriterium. Den Prozessen *RPPProcess* und *CPPProcess* sind die prozessspezifischen Materialien zugeordnet. Durch Anwählen der Detailfunktion werden sämtliche eingetragenen Materialeigenschaften in übersichtlicher Form dargestellt. Im Fenster *TDOF* werden alle Anforderungen unter Berücksichtigung der Gewichtung den Kriterien gegenübergestellt, wie beispielhaft aus Bild 5-4 ersichtlich.

Besonderer Wert wurde auf die Plausibilitätskontrolle gelegt. Dies äußert sich in der Funktionalität zur Ergebniserklärung. Sie besteht aus zwei Teilen. Im ersten Teil kann der Anwender im Anschluss an die Konfiguration zu jeder geeigneten alternativen Technologiekette eine Übersicht der gewichteten Erfüllungsgrade der geforderten Prototypeigenschaften aufrufen, wie beispielhaft in Bild 5-4 dargestellt. Dieses Fenster steht nur dann zur Verfügung, wenn passende Prozessketten ermittelt wurden.

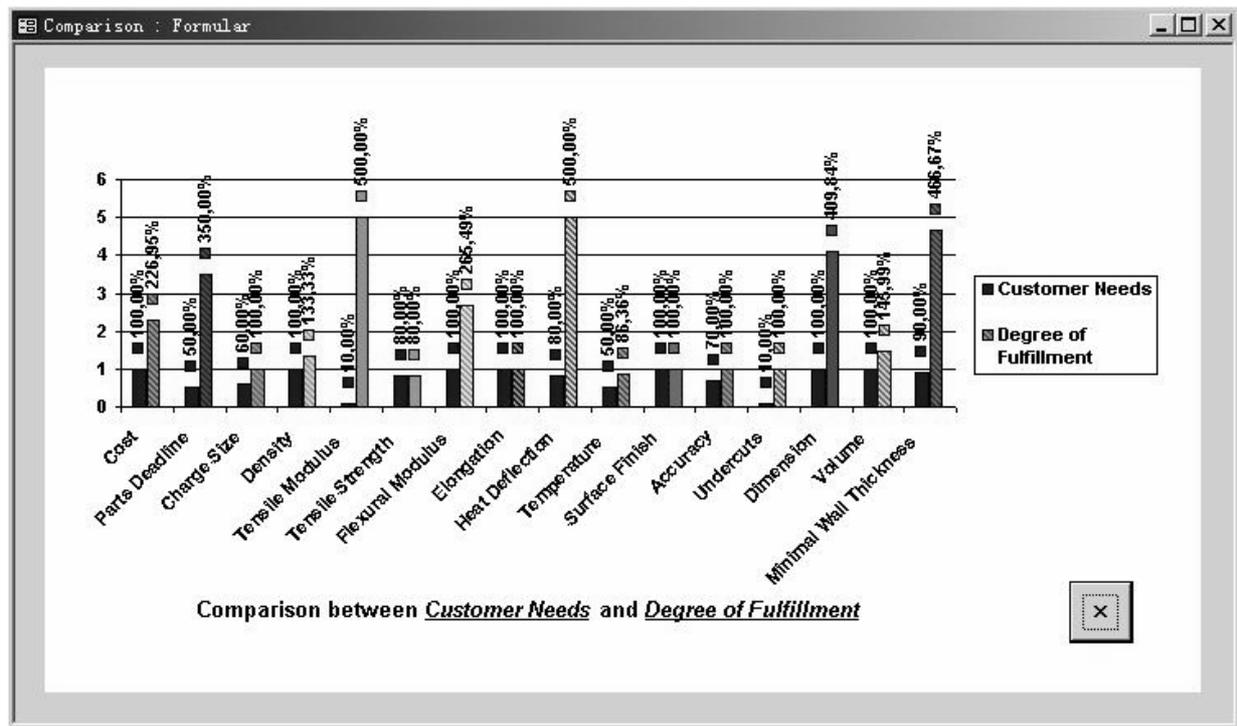


Bild 5-4: Übersicht der Erfüllungsgrade gestellter Anforderungen

Wenn nur sehr wenige oder keine Alternativen gefunden wurden, besteht im zweiten Teil die Möglichkeit, die Komponente *Begründung* aufzurufen, Bild 5-5. Dort werden diejenigen Anforderungen zusammengefasst, die zur Einschränkung oder gar dem Ausschluss von Lösungsalternativen geführt haben, wie beispielsweise die Forderung nach hoher Stückzahl eines Bauteils mit hoher Seriennähe bei gleichzeitiger Einschränkung der Lieferzeit auf wenige Tage.

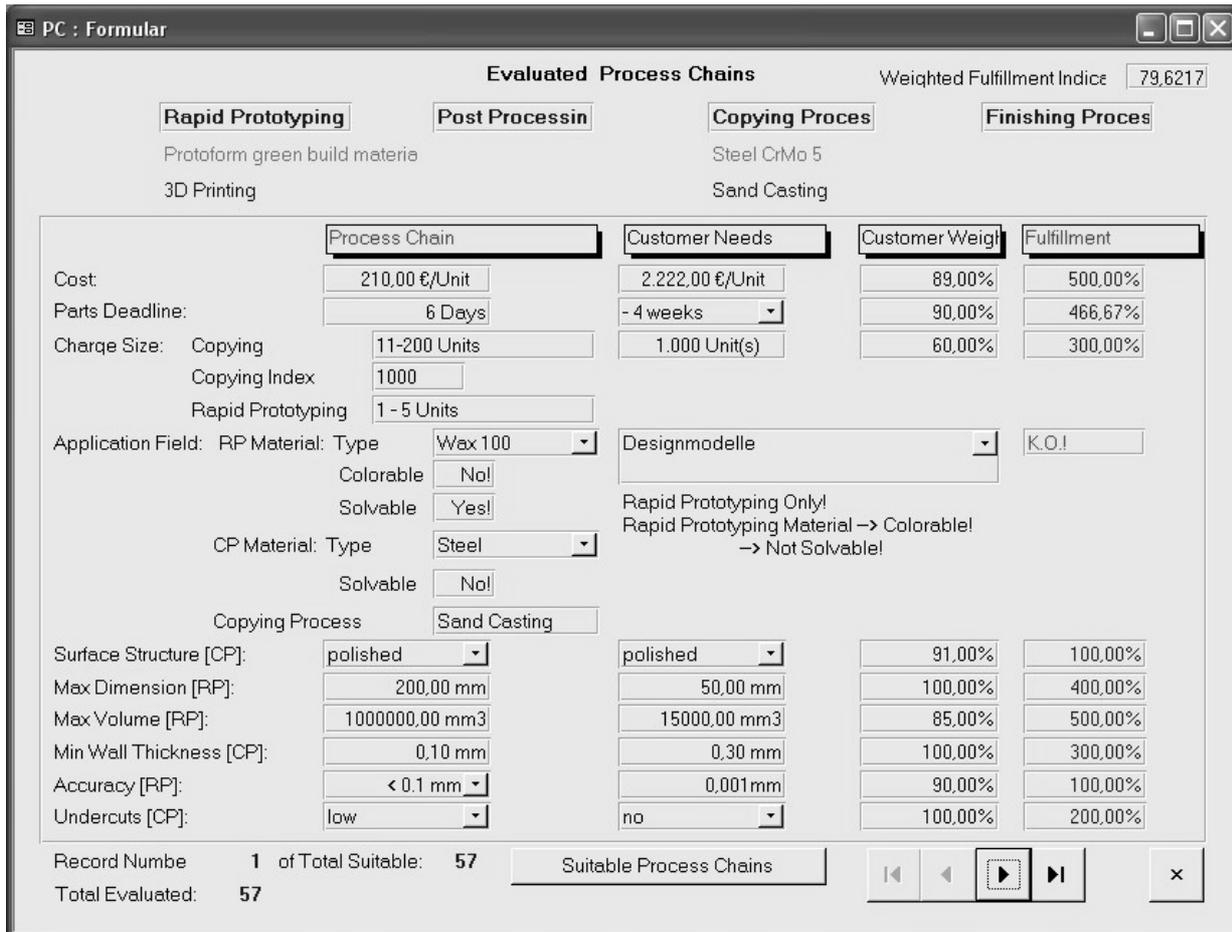


Bild 5-5: Begründung für nicht erfolgte Prozesskonfiguration

## 5.2 RPSelector als iViP-Service<sup>6</sup>

### 5.2.1 Grundlagen der iViP Plattform

Das Softwarekonzept [111] im Projekt iViP basiert auf einer Plattform, die alle zur Verfügung stehenden Dienste bündelt und den Anwendern zur Verfügung stellt. Es wurde besonderer Wert auf die Flexibilität der Interaktion zwischen unterschiedlichen Anwendungen geachtet. Es wird zwischen Diensteanbietern und Nutzern unterschieden. Jeder Dienst informiert bei der Anmeldung dynamisch die Plattform über seine aktuellen Funktionalitäten. Diese sind dann sofort für alle angemeldeten Nutzer verfügbar. Die Architektur mit den im Teilprojekt angebotenen Diensten ist aus Bild 5-6 ersichtlich.

<sup>6</sup> Der Verfasser wurde bei der programmtechnischen Realisierung der Datenbankanwendung durch Herrn cand. ing. Bailiang Zhang unterstützt

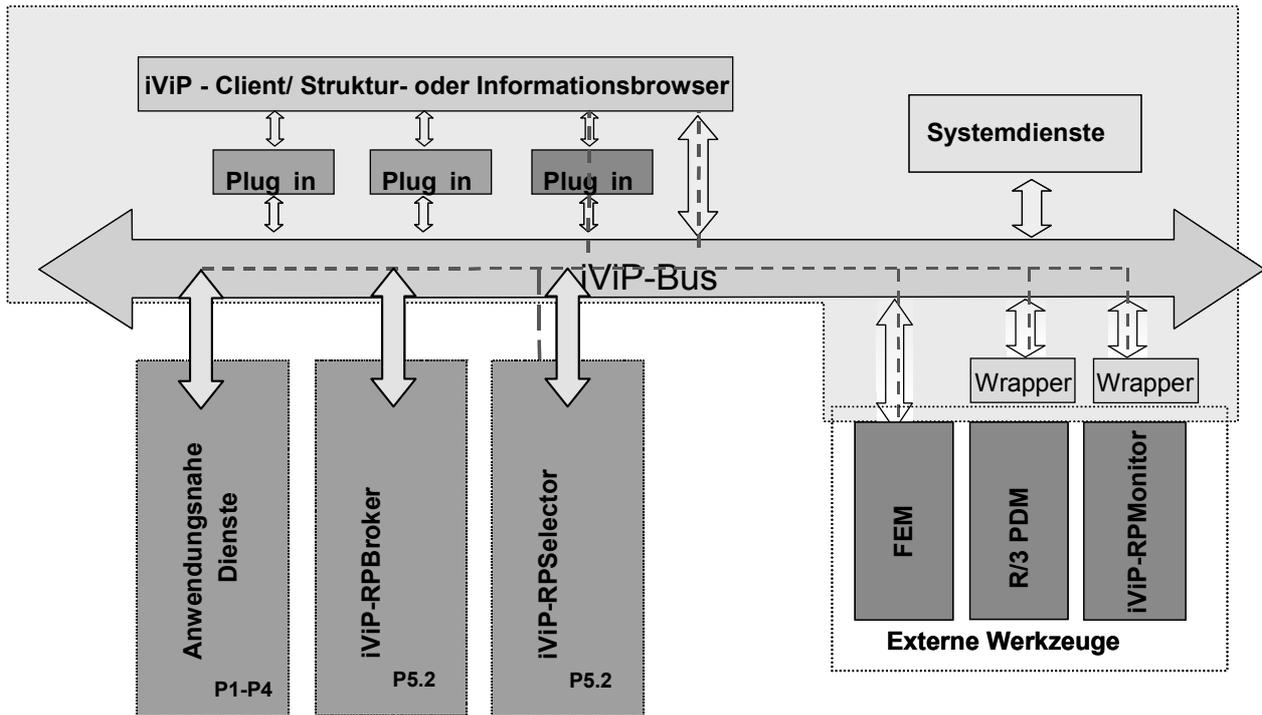


Bild 5-6: iViP-Gesamtarchitektur

Die Integration des RPSelector in die iViP-Plattform beinhaltet zwei wesentliche Aufgaben:

- Entwicklung der *Pure JAVA* Komponente, der *iViP-RPSelector*
- Gestaltung der Kommunikationsschnittstellen des *iViP-RPSelector* mit der iViP-Plattform.

Die zur Entwicklung genutzten Technologien werden im Folgenden kurz umrissen.

**Swing** ist in der Java Foundation Class (JFC) enthalten und dient der Entwicklung kompakter JAVA Anwendungen. Swing wird mit der JAVA™ 2 Entwicklungsumgebung ausgeliefert. Die *iViP-RPSelector* Anwendungsschnittstelle wurde auf diese Weise programmiert.

Das Application Programming Interface (API) **JavaBeans** ermöglicht die Programmierung gekapselter Komponenten. Komponenten stellen eigenständige und wiederverwendbare Programmeinheiten dar, die durch Verwendung grafischer Werkzeuge sehr effizient zu erzeugen sind. JavaBean Komponenten werden als *Beans* bezeichnet. Komponenten veröffentlichen ihre Eigenschaften, z.B. Methoden oder Ereignisse. Spezielle Editoren erlauben die Auswahl und Modifikation des Aussehens und Verhaltens von Beans und die Einbindung in Anwen-

dungen oder Applets. Die Kommunikation unterschiedlicher Beans erfolgt durch *Events*. Der *iViP-RPSelector* wird in ein solches Bean verpackt.

Eine **JDBC-ODBC Brücke** bindet die Standards ODBC und JDBC (Java Database Connectivity) zusammen. Hierfür wird neben der Brücke ein klassischer ODBC Treiber installiert. Ein Datenbank Management sollte auf dem Rechner installiert sein, der die zentrale Datenbank beherbergt. installed to convenience the database management tasks.

Ein **Socket** ist der Endpunkt einer bidirektionalen Kommunikation zwischen zwei in einem Netzwerk laufenden Programmen. Socket Klassen repräsentieren die Verbindung zwischen einem Client und einem Server. Der Server ist auf einem dedizierten Rechner installiert und hat ein Socket, welches über eine bekannte Portnummer kommuniziert.

Das **Component Object Model (COM)** ist ein vom Betriebssystem unabhängiges verteiltes, objektorientiertes System unabhängiger, interagierender Programme. COM erlaubt, ähnlich der Methode der JAVABeans, die Veröffentlichung von Objektmethoden. Die Kommunikation erfolgt durch eindeutige Spezifikation einer Objektschnittstelle, die den einzigen Zugang zu den Objektfunktionen und -eigenschaften darstellt. [112].

MS ACCESS<sup>TM</sup> kann als COM Komponente verstanden werden. Die Nutzung interner Funktionen einer MS ACCESS Anwendung ist durch Zwischenschaltung eines Servers realisierbar, der anhand der Programmiersprache Visual J++ 6.0 von Microsoft<sup>®</sup> erstellt wurde. Visual J++ wurde in der vorliegenden Arbeit zur Entwicklung einer Middleware genutzt, die als *iViPRPSelector Server* bezeichnet wird.

### 5.2.2 Angepasste Systemarchitektur

Bild 5-7 zeigt die geänderte Architektur des an die Spezifikation der *iViP* Plattform angepassten Systems als Komponentendiagramm.

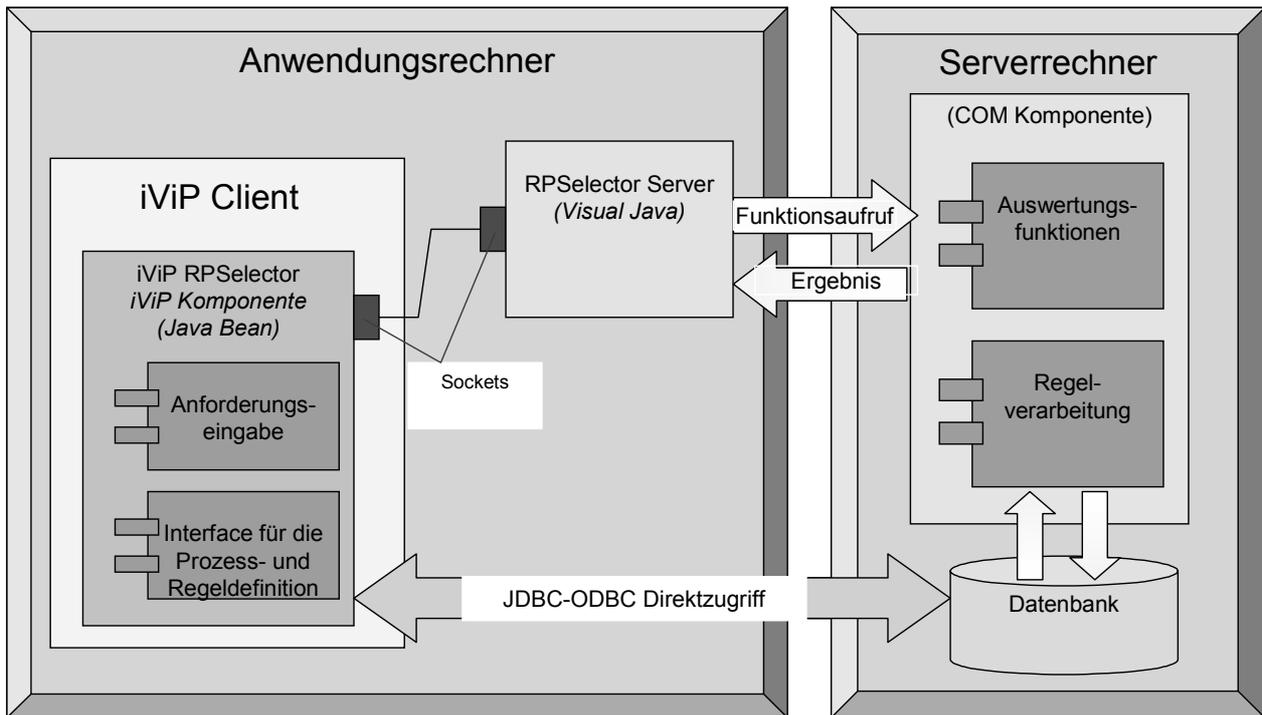


Bild 5-7: Systemarchitektur des iViP-RPSelector

Der iViP RPSelector stellt eine grafische Anwendungsschnittstelle dar, die der Ein- und Ausgabe von Daten über die JDBC-ODBC Brücke dient. Die Kommunikation läuft in folgenden Schritten ab:

- Eingabe der Anforderungsdaten für das aktuelle RP Projekt
- Senden einer Verbindungsanfrage an den iViP\_RPServer über Sockets
- Nach Bestätigung durch den Server erfolgt das Senden der erfassten Daten an die Datenbankanwendung. In einer neuen Instanz der Klasse Customer Needs werden die Daten eingetragen.
- Der RPSelector Server erzeugt ein MS ACCESS™ COM Objekt und ruft die Evaluierungsfunktion auf. Nach Ausführung der Prozesskettenkonfiguration steht das Ergebnis in einer Ausgabetablelle zur Verfügung.
- Die Ergebnistabelle kann an den iViP RPSelector zurückgegeben und dort grafisch angezeigt oder in andere iViP Services exportiert werden.

### 5.2.3 Integration der Anwendungssysteme

Zahlreiche Informationen, die zur Durchführung von RP-Projekten notwendig oder hilfreich sind, können über die iViP-Plattform von anderen Anwendungen bezogen werden. Besonders interessant sind beispielsweise Stammdaten der herzustellenden Bauteile aus PDM-Systemen, Festlegungen und Messgrößen der Quality Gates aus dem Projektmanagement oder Berechnungsergebnisse aus CAE Anwendungen. Für die Extraktion von Geometrie assoziierten Daten wie Toleranzen und Oberflächenangaben wird derzeit von der Object Management Group (OMG) eine Schnittstelle spezifiziert, die CAD Services. Eine Implementierung dieses Konzeptes steht noch aus. Es existieren jedoch proprietäre Anpassungen für ausgewählte CAD-Systeme.

Eine beispielhafte direkte Informationsextraktion wurde mit dem iViP-RPMonitor realisiert, wie in Bild 5-8 zu sehen ist. Der Dienst dieser Komponente stellt für ein gegebenes Bauteil spezifische Informationen wie das umschlossene und exakte Bauteilvolumen, das verwendete Material oder das berechnete Gewicht zur Verfügung. Alternativ kann die Anwendung selbst in den iViP Client geladen und das Bauteil interaktiv analysiert werden.

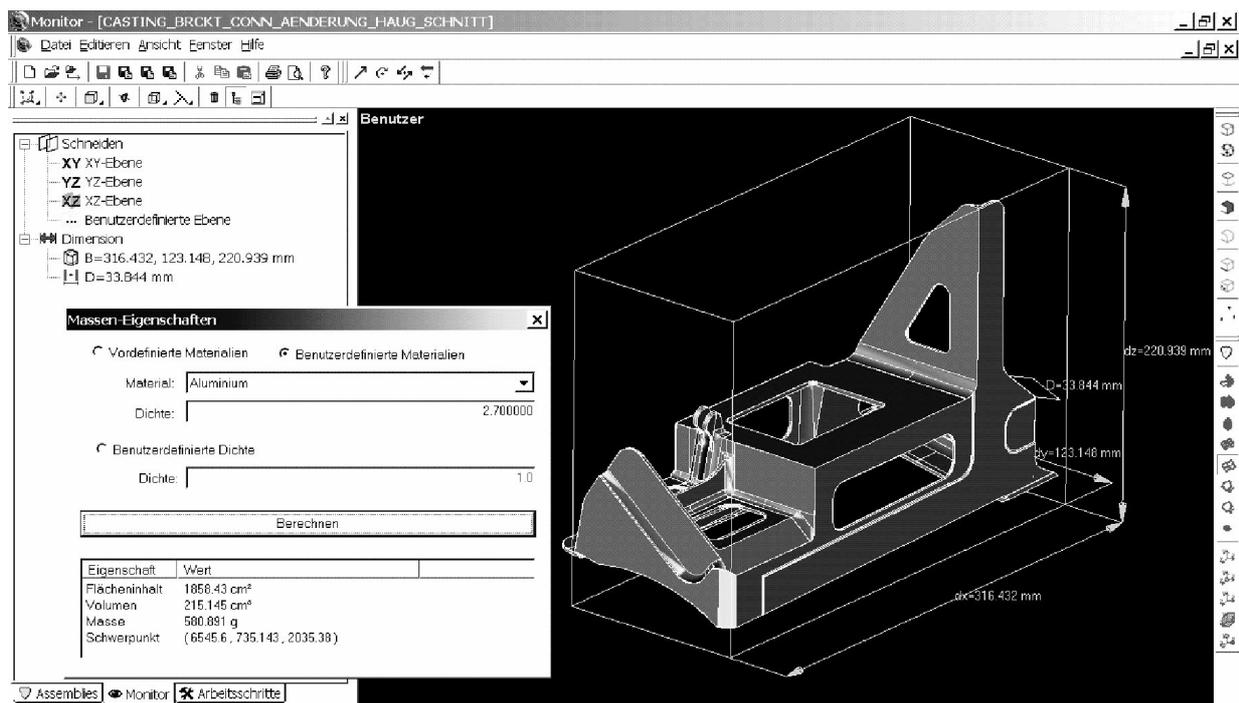


Bild 5-8: iViP-RPMonitor

Für die Übergabe der Auswahlresultate des iViP-RPSelector an das Vermittlungsmodul iViP-RPBroker stehen zwei alternative Wege zur Auswahl. Die erste Lösungsmöglichkeit arbeitet nachfrageorientiert und wird durch einen der beiden Dienste gesteuert. Die Ergebnisse fließen nach Abschluss der Konfiguration wie-

der über die Plattform an den Broker zurück und stehen zur Weiterverarbeitung bereit. Für diese Vorgehensweise ist jedoch die Kapselung aller Informationen in einem Objekt und dessen Versendung notwendig. Auch ein Abgleich der Prozess- und Materialdatenbank gestaltet sich recht aufwendig, ist jedoch ohne Probleme realisierbar. In der prototypischen Softwareversion wurde zur Vereinfachung der direkten Kommunikation der beiden Dienste zusätzlich eine einfache Beschreibungssprache definiert, um standortunabhängig über das Protokoll *http* Daten auszutauschen. Dies erfordert keinen zusätzlichen Aufwand bei der Implementierung der Schnittstellen, da eine internetbasierende Lösung bereits vorlag und deren Komponenten übernommen wurden. Nachdem der Anwender aus den dargestellten alternativen Technologieketten die für ihn bestgeeignete ausgewählt hat, sendet der iViP-RPSelector alle Daten sequenziell an den Vermittlungsdienst. Er beginnt mit dem ersten Prozess der ausgewählten Lösung und sendet dessen Identifikationscode und den des zugehörigen Materials. Alle weiteren dokumentierten Informationsblöcke und die aufbereitete Geometrie des Bauteils werden parallel in der RPPProject Datei übermittelt, die als Anhang mitgeliefert wird.

Der Vermittlungsdienst stellt die für den Anwender wichtigen Informationen übersichtlich dar und startet den Anfrageprozess, wie aus Bild 5-9 ersichtlich.

**RPBroker**  
Rapid Prototyping Broker

Fraunhofer IFAM Institut Fertigungstechnik Materialforschung

Anfrage erstellen  
Benutzer-Profil  
Katalog Suche  
Anfrage erstellen  
Bestellvorgänge  
Anfragen  
Angebote  
Aufträge  
Quit

**RP-Anwender: fr**

Bezeichnung Ihrer Anfrage: Aluminiumguss Motorträger 563/4

Optionen:

Anbieter:

Bezieht sich auf Angebot:

Angebotsbeschreibung des Dienstleisters:

Material:

Verfahren:

geforderte Stückzahl:

Liefertermin:

Länge des Bauteils [mm]:

Höhe des Bauteils [mm]:

Bild 5-9: Übergabe der Auswahlresultate an den iViP-RPBroker

Ist der erste Prozess vermittelt, übernimmt der iViP-RPSelector die Versendung der Informationen für die nächste Bearbeitungstechnologie. Die Vermittlung behandelt bereits ausgewählte RP Dienstleister natürlich vorrangig, um möglichst viele Bearbeitungsschritte ohne logistischen Aufwand abarbeiten zu können. Der Anwender kontrolliert den gesamten Vorgang der Herstellung anschließend bis zur Auslieferung der Prototypen über eine Monitorfunktion.

## 6 Anwendungsszenario

### 6.1 Industrielles Anwendungsbeispiel

Ein komplex geformtes, gewichtsoptimiertes Bauteil, zum Einbau in die Tragflächen eines neu entwickelten Flugzeugtyps wurde als Anwendungsbeispiel im Rahmen des Projektes iViP ausgewählt. Die vielfältigen Anforderungen an derartige Teile sind sehr umfangreich dokumentiert. Neben Forderungen nach Form- und Maßhaltigkeit waren insbesondere hohe Ansprüche an das verwendete Material zu erfüllen. Das Bauteil, ein sogenanntes *Ground Connector Bracket*, ist in Bild 6-1 zu sehen. Die Bauteilabmessungen ließen eine generative Fertigung auf nahezu allen verfügbaren Anlagen zu. Mit einer Losgröße von zwei Stück und einer gewünschten Durchlaufzeit des gesamten Auftrages von zwei Wochen stellten auch die betriebswirtschaftlichen Ziele eine Herausforderung für die Prozesskette und deren Planung dar.

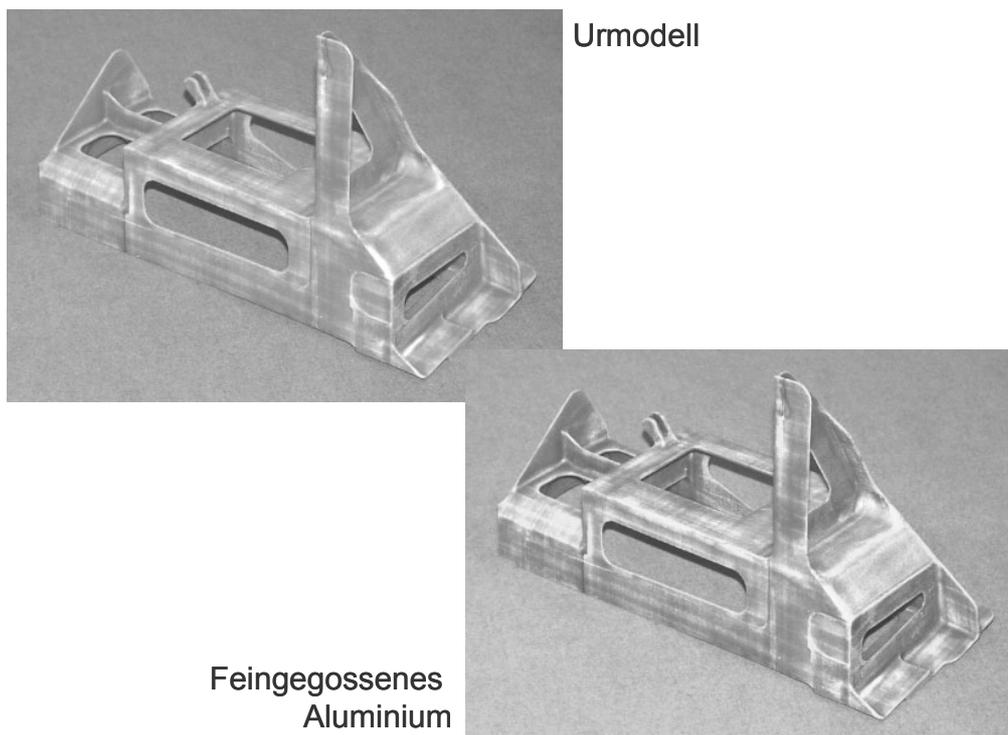


Bild 6-1: Ground Connector Bracket

Als Einsatzzeitpunkt bot sich der Meilenstein „Montageuntersuchung, Funktions- und Belastungstest“ an, dem bereits FEM-Untersuchungen auf Basis der

erwarteten Belastungen und ein DMU Packaging vorausgegangen waren. Ziel der Untersuchungen war es zum einen, durch versuchsweisen Einbau in ein Modell der Tragfläche die Ergebnisse des virtuellen Prototypen zu bestätigen. Zum anderen sollten die Kraftflüsse im eingebauten Zustand verifiziert und anschließend im Bruchversuch die durch das Fertigungsverfahren beeinflussten Materialeigenschaften in kritischen Bauteilbereichen ermittelt werden.

Der Auftrag, das Bauteil prototypisch herzustellen, wurde von der DaimlerChrysler AG erteilt. Die cirp GmbH übernahm die Koordination des Auftrages. Zur Durchführung wurden beim Auftraggeber die iViP Softwarekomponenten verwendet, bei den Auftragnehmern cirp GmbH, Bertrandt AG und TITAL GmbH gelangten die Mitarbeiter durch das Web-Interface an die entsprechenden Dienste. Nach Initialisierung des RP-Projektes ermittelte der Koordinator mit dem *iViP-RPSelector* zunächst die aus technologischer Sicht geeigneten generativen Prozessketten. Die drei bestgeeigneten Alternativen wurden mit dem Auftraggeber abgestimmt und daraus die einzusetzende Lösung abgeleitet. Die gewählten Rahmenbedingungen wurden daraufhin direkt in das Vermittlungsmodul *iViP-RPBroker* übertragen und dienten dort als Grundlage einer Anfrage.

Der Bereich Prototyping der Bertrandt AG übernahm die Planung und generative Fertigung zweier Urmodelle für das anschließende Aluminium Feingießen. Der iViP-RPMonitor unterstützte diesen Vorgang durch Parameterextraktion und Analyse der Schnittebenen. Bei der technologischen Planung waren die Effekte nachfolgender Prozessschritte zu berücksichtigen. Durch Zugriff auf die im Rahmen des RP-Projektes instanziierten Prozessobjekte der ausgewählten Technologiekette konnte die technologische Planung des generativen Verfahrens und der anschließenden Infiltration mit einem speziellen Gießwachs optimiert und dokumentiert werden. Die TITAL AG vervollständigte die Planung der Technologiekette durch die entsprechenden Maßnahmen für das Feingießen, wie beispielsweise die Positionierung von Angüssen und Steigern. Auf diese Weise wurden Vorgaben des Gießprozesses bereits in die Planung der generativen Fertigung einbezogen. Es wurden drei Urmodelle gefertigt, um auch Aussagen über die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse machen zu können. Die Bauteile wurden individuell gekennzeichnet und optisch vermessen.

Die TITAL AG konnte durch den Zugang zum iViP-RPBroker den Fertigungsfortschritt beobachten und die Terminierung der eigenen Fertigungsschritte frühzeitig festlegen. Nach Erhalt der Urmodelle erfolgte das Abgießen mit dem Material FG-ALSi7Mg innerhalb weniger Tage. Die Prüfung von Anforderungskonformität und die röntgenografische Sicherstellung der Fehlerfreiheit der Bauteile zeigte ein insgesamt gutes Ergebnis, doch wurden auch Potenziale für Verbesserungen der Prozessplanung und –ausführung gefunden. Auch die fertiggestellten Prototypen wurden einer optischen Messung unterzogen. Die entsprechenden Informationen wurden in der Datenbank im Objekt *RP-Project* dokumentiert und standen damit nachfolgenden Projekten zur Verfügung.

Die Rollen und Aufgaben der Beteiligten am Anwendungsszenario sind zusammenfassend in Tabelle 6-1 aufgeführt.

Unternehmen	Rolle	Inhalte
DaimlerChrysler AG	Produktentwickler	Anforderungsdefinition, Versuchsdurchführung, Referenzprozesse
CIRP GmbH	RP Dienstleister	Generative Fertigung, Post Processing, Prozessdateneingabe
TITAL GmbH	RP Dienstleister	Formherstellung, Abgießen, Finish, Prozessdateneingabe
Bertrandt AG	RP Dienstleister	Generative Fertigung, Post Processing, Versuchsdurchführung, Prozessdateneingabe
Fraunhofer IPK	Datenbank-administrator	Datenanforderung, Abgleich, Pflege der Datenbank
Fraunhofer IFAM	Vermittler	Auftragsmanagement

Tabelle 6-1: Beteiligte Partner der Evaluierung

## 6.2 Erkenntnisse aus der Anwendung

Die Arbeit mit den iViP Systemkomponenten hat gezeigt, dass das Konzept einer integrierten Planung und Durchführung von Prototyping Projekten einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Produktentstehung liefern kann. Der Zugriff auf die Prozess- und Materialdaten war sowohl mit der browserbasierten Anwendung als auch durch den iViP Client problemlos möglich. Im Rahmen der Auswahl und Konfiguration von RP-Prozessketten wurden zahlreiche Anregungen der beteiligten Anwender aufgegriffen und trugen zu einer vereinfachten Eingabe der Anforderungen sowie verbesserten Auswertungsalgorithmen bei. Aus dem Vergleich der optischen Vermessungen nach jedem Prozessschritt ergab sich für die ausgewählte Prozesskette die Erkenntnis, dass im Anschluss an das Feingießen ein Richten des Prototypen einzuplanen ist. Es handelt sich hierbei um einen manuellen umformenden Nacharbeitsprozess, dessen Effekt in der Verbesserung der Formhaltigkeit des Werkstückes zu sehen ist. Ein- und Ausgangsgrößen sowie die Eigenschaften dieses Prozesses konnten beschrieben und den in der Datenbank abgelegten Prozessen hinzugefügt werden. Eine hohe Wichtigkeit wurde der sofortigen Verfügbarkeit aktueller Projektinformationen beigemessen. Informationen zum aktuellen Projektstand und relevante Erkenntnisse aus vorangegangenen Projekten der Produktverifikation müssen nicht nur strukturiert abgelegt, sondern auch assoziativ erreichbar sein.

Das Konzept der Veröffentlichung von Dienstleistungen wird prinzipiell den Anforderungen gerecht, kann aber nicht in allen Details der Realität einer Auf-

tragsvergabe gerecht werden. Die RP-Dienstleister sehen sich insbesondere in ihrer Verhandlungsflexibilität eingeschränkt, die durch persönliche Kommunikation geprägt ist. Standardisierte Dienstleistungen können daher immer nur eine Grundlage für die Ausgestaltung der Geschäftsbeziehung zwischen produktentwickelndem Unternehmen und den Anbietern physischer Prototypen sein.

Dennoch sind die betriebswirtschaftlichen Auswirkungen bei der Nutzung der Systeme erheblich, insbesondere durch die Verkürzung der Auftragsdurchlaufzeit und dem Wegfall redundanter Tätigkeiten. Sind die Anwender mit den Systemen vertraut, können mehrwöchige Verzögerungen bei der Evaluierung von Prototypversuchen eliminiert werden.

## 7 Zusammenfassung

Zur Sicherung der Innovationsfähigkeit produzierender Unternehmen ist eine optimale Gestaltung der Produktentstehung von entscheidender Bedeutung. Es gilt, im Rahmen der Entwicklung konkurrenzfähiger Produkte die Kosten zu minimieren, Arbeitsabläufe und Abstimmungsprozesse zu verkürzen und gleichermaßen frühzeitig Einfluss auf die Produktqualität auszuüben. Eine Unterstützung bei der Generierung und schnellen Umsetzung von Produkt- und Werkzeugkonzepten erweist sich somit als ein entscheidender Erfolgsfaktor. Hierzu ist künftig vermehrt die integrierte und konsequente Nutzung von Ergebnissen aus virtuellen und physischen Tests in allen Phasen der Produktentstehung erforderlich.

In der vorliegenden Arbeit wurde ein umfangreiches Konzept entwickelt und vorgestellt, das die Planung, Herstellung, Prüfung und Bewertung einer definierten Anzahl physischer Prototypen in einen ganzheitlichen Kontext bringt und alle Aktivitäten in einem *Rapid Prototyping Projekt* (RP-Projekt) zusammenfasst. Derartige Projekte sind durch Interdisziplinarität, hohen Zeitdruck, schnelle Veränderungen in den Rahmenbedingungen der Durchführung und hohe strategische Bedeutung gekennzeichnet. Besonderes Augenmerk wurde auf die Eliminierung informationstechnischer Medienbrüche gelegt, um eine hochwertige Ergebnisrückführung aus dem Prototyping in die virtuelle Produktentstehung zu gewährleisten.

Mit der ergebnisorientierten Klassifizierung der Verfahren und Projekte des Rapid Prototyping wurde der Grundstein für die Entwicklung einer Methode zur Konfiguration generativer Technologieketten, die Spezifikation eines integrierten RP-Datenmodells und der dazugehörigen Schnittstelle gelegt. Strategische Überlegungen bieten dem Produktentwickler zunächst einen Einstieg zur frühzeitigen Vorbereitung der Einsatzfelder physischer Prototypen.

Die entwickelte Methode zur Konfiguration von Rapid Prototyping Prozessketten überführt in einem ersten Schritt die produktgetriebenen Anforderungen in Projekte zur Produktverifikation. Die vorhandenen Anwendungssysteme der virtuellen Produktentwicklung wurden hierfür auf ihr Potenzial für die automatisierte Ableitung phasenspezifischer Informationen untersucht. Die Verwendung von Transformationsvorschriften für die Rückübertragung der Versuchsergebnisse sorgt dabei für eine hohe Aussagesicherheit und vermeidet Redundanzen. Für die Konfiguration werden Prozess-, Material- und Kompatibilitätsdaten ausgewertet und miteinander verknüpft. Über die Anordnung der Prozesskette hinaus findet eine prozessübergreifende Abstimmung der konfigurierten Prozesse statt,

um Interdependenzen aller Prozesse einer Technologiekette berücksichtigen zu können.

Das geschaffene integrierte Datenmodell ist in der Lage, die Besonderheiten generativer Fertigungsverfahren abzubilden. Es verknüpft Anforderungen, Produkt- und Prozessdaten mit organisatorischen Daten und ist damit ein wichtiger Schritt hin zum umfassenden Management des Rapid Prototyping im Sinne einer Integrationslösung. Neben der projektübergreifenden Repräsentation aller im Laufe der Produktverifikation benötigten Informationen bietet es die Möglichkeit der Dokumentation durchgeführter Aufgaben und der Entscheidungen, die in der Folge der Versuchsergebnisse getroffen wurden. Um allen Prozessen und Projektbeteiligten einen vollständigen Zugriff auf die relevanten Daten bieten zu können, wurde ein rollenspezifisch definierbares Schnittstellenformat konzipiert. Auf diese Weise können aufeinander folgende Arbeitsschritte ohne Medienbrüche oder Datenverlust informationstechnisch verbunden werden. Sowohl das Datenmodell als auch das Schnittstellenformat sind durch ihren modularen Aufbau erweiterbar und an Änderungen anpassbar.

In einer prototypischen Systemimplementierung wurde die Integration am Beispiel eines Systems zur Konfiguration generativer Technologieketten gezeigt und für typische Anwendungsbeispiele bewertet. Das System wurde sowohl als Einzelplatzlösung realisiert als auch in eine Plattform zur integrierten virtuellen Produktentstehung eingebunden. Die Anforderungen an physische Prototypen und die Konfigurationsergebnisse des Systems sind direkt mit anderen Anwendungen austauschbar. Damit wurde eine wesentliche Effizienzsteigerung im physischen Prototyping erreicht, der Änderungsaufwand reduziert und die Qualität entwickelter Produkte gesteigert.

## 8 Literaturverzeichnis

- 
- 1 Spur, G.; Krause, F.-L. Das virtuelle Produkt. Hanser Verlag Berlin, 1997
  - 2 Dauderer, A.: Kontinuierliches Prototyping – ein Weg zu erfolgreichen Produkten. VDI-Z 138, Heft 6, 1996, S. 90-92
  - 3 Blessing, L.T.M.; Chakrabarti, A.; Wallace, K.M.: An overview of descriptive studies in relation to a general design research methodology. In: Designers – the Key to Successful Product Development. Frankenberger et. al. (Hrsg.) Springer Verlag, 1998, S. 42-56
  - 4 Sobek, D.K.; Ward, A.C.; Liker, J.K.: Another Look at How Toyota Integrates Product Development, Harvard Business Review, volume 76, July-August 1998, S. 36-49
  - 5 Wohlers, T. Rapid Prototyping: State of the Industry. Wohlers Associates, Colorado USA, 2003
  - 6 Birke, Ch. Der Einsatz von Rapid-Prototyping-Verfahren im Konstruktionsprozess. Dissertation Univ. Magdeburg, Shaker Verlag Aachen, 2001
  - 7 N.N. Advanced Information Technologies. Project documentation of ESPRIT project 20756, AIT project group, Brussels
  - 8 von Praun, S.: Digital Mock-up Process Simulation. In: Prototyping Technology International, International Press, UK, October 1997, S. 97–100
  - 9 Krause, F.-L.; Rothenburg, U.: New application areas of digital mock-up within product development. Proceedings of 2003 CIRP International Design Seminar, Grenoble, France, May 12.-14. 2003
  - 10 Gebhardt, A.: Stand der Verfahrenstechnik. Vortragsband „Physische Prototypen und Kleinserien“, Fraunhofer Demozentrum ViPro, 4.-5. Juni 2003
  - 11 Krause, F.-L.; Rothenburg, U.; Dreher, S.: Virtuelle Realität oder Realisierte Virtualität. In: Automotive Engineering Partners 6/2003
  - 12 Gebhardt, A. Rapid Prototyping. Zweite, völlig überarbeitete Auflage, Hanser Verlag München, Wien, 2000
  - 13 Kochan, D. Solid Freeform Manufacturing: Advanced Rapid Prototyping. Elsevier Amsterdam, 1993
  - 14 Levy, G.; Schindel, R.; Kruth, J.P.: Rapid Manufacturing and Rapid Tooling with Layer Manufacturing Technologies. State of the Art and Future Perspectives. Annals of the CIRP, Vol. 52/2/2003
  - 15 Esser, G.; Niebling, F.; Geiger, M.: Rapid Tooling – Current Status and Future Trends. Proceedings of ICI conference, 2001
  - 16 Chua, C.K.; Leong, K.F.; Lim, C.S.: Rapid Prototyping; Principles and Applications, 2<sup>nd</sup> edition. Singapore: World Scientific, 2003.
  - 17 Jacobs, P. F. Rapid Prototyping & Manufacturing – Fundamentals of Stereolithography. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, USA, 1992

- 
- 18 N.N. DIN 8580, Fertigungsverfahren – Einteilung. Beuth-Verlag Berlin, 1974
- 19 Eversheim, W.; Klocke, F. Werkzeugbau mit Zukunft.: Strategie und Technologie. Springer Verlag, Berlin 1998
- 20 Kruth, J. P. Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques. CIRP Annals 40/2/1991, S. 603-614
- 21 Levy, G. et al. Verfahrensgerechte Werkstoffe und praxisnahe Prozessketten für das Selektive Lasersintern. VDI Zeitschrift Integrierte Produktion, Nov. 1999, S. 28-30
- 22 Childs, T.H.: Selective laser sintering of a crystalline and a glass-filled crystalline polymer: experiments and simulations. Journal of Engineering Manufacture; Vol. 215, S. 1481-1495
- 23 Meiners, W.: Direktes Lasersintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe. Dissertation RWTH Aachen, 1998
- 24 Shellabear, M.: Direct Metal Laser-Sintering (DMLS) with 20 microns layers; Proceedings of SME conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Cincinnati, May 2002
- 25 Zhang, W. et al. Investment Casting with Ice Patterns Made by Rapid Freeze Prototyping. Proceedings of SFF Symposium Austin, Texas, USA, 2000
- 26 Celi, I. Stereolithographie – Analyse der Wirkmechanismen als Basis der Prozessoptimierung. Dissertation RWTH Aachen. Shaker Verlag, Aachen, 1995
- 27 Wiedemann, B. Verzugsursachen stereolithografisch hergestellter photopolymerer Bauteile und die Auswirkungen der Prozessführung auf ihr Eigenschaftsprofil. Dissertation Universität Stuttgart, 1997
- 28 Ippolito, R.; Iuliano L.; Gatto A.: Benchmarking of rapid prototyping techniques in terms of dimensional accuracy and surface finish; CIRP Annals; 44/1/1995; 157
- 29 Fährer J.: Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metal-Lasersinterprozesses. Herbert Utz Verlag; Dissertation Iwb Augsburg, TU München
- 30 Laoui, T.; Froyen, L.; Kruth J.P.: Alternative binders to Co for WC particles for SLS process. Proceedings of 8th European Conf. on Rapid Prototyping and Manufacturing. Nottingham, 6-8 July 1999, S. 299-311
- 31 Syan, Ch.; Menon, U.: Concurrent Engineering: Concepts, Implementation and Practice
- 32 Muth, M. Collaborative Engineering erweckt PLM zum Leben.. CADplus 4, 2003, S. 28-31
- 33 Edler, A. Nutzung von Felddaten in der qualitätsgetriebenen Produktentwicklung und im Service. Dissertation TU Berlin, 2001
- 34 Mizuno, S.; Akao, Y.: QFD: The Customer-Driven Approach to Quality Planning and Deployment
- 35 Pahl, G.; Beitz, W. Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung. 4. überarb. Auflage. Springer Verlag Berlin, 1997
- 36 VDI 2221 Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993.
- 37 Terwiesch, C.; Loch, C.H.; DeMeyer, A.: A Framework for Exchanging Preliminary Information in Concurrent Development Processes. San Diego, California: University of California, 1997
- 38 Döllner, G.; Kellner, P.; Tegel, O.: Digital Mock-Up and Rapid Prototyping in Automotive Product Development. Transactions of the SDPS Journal of Design& Process science, March 2000, Vol. 4, No. 1, S. 55-66

- 
- 39 Sendler, U. : CAD-Einsatz in der Fertigungsindustrie. VDI-Z Special C-Techniken 140 (1998) 3, S. 6-7
- 40 Loose, K.; Dreher, S. et al.: Produktverifikation auf Basis physischer Prototypen. iViP Abschlussbericht, Berlin 2002, S. 150-153
- 41 Krause, F.-L.; Gross, N.; Mezentsev, A.; Wöhler, Th.: Highly Automated CAD Model Preparation for Downstream Applications, Proceedings of CIRP conference on Geometric Design, Israel, May 2000
- 42 Lüddemann, J.: Virtuelle Tonmodellierung zur skizzierenden Formgestaltung im Industriedesign. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum, Berlin, 1996
- 43 Krause, F.-L.; Bock, Y.; Dreher, S.: Design evaluation of virtual clay models using selective laser sintering. In: Proceedings of Conference on Sculptured Surface Machining, Michigan, USA 9.11 - 11.11.1998
- 44 Dutta D.; Shpitalni M.: Heterogeneous solid modelling for layered manufacturing; CIRP Annals; 49/1/2000; 109
- 45 Hanke, R.: Verborgene Fehler aufspüren. QZ Heft 3, 2004, S. 47-49
- 46 Eversheim, W.; Klocke, F.; Albrecht, T.; Noeken, S.; Wirtz, H.: Rapid Prototyping – Unternehmensspezifische Technologiekonzepte. VDI-Z Special Werkzeug- und Formenbau, 11/1995, S. 20 - 23
- 47 Pfeifer, Th.; Schmidt, R.: Das Quality Gate Konzept. Industrie Management 19 (2003) 5, S.21-24
- 48 N.N.: DIN-Taschenbuch 223 Qualitätsmanagement und Statistik – Begriffe. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag 2001
- 49 Eisenhardt, K.; Tabrizi, B.N.: Accelerating Adaptive Processes: Product Innovation in the Global Computer Industry, Administrative Science Quarterly, 1995
- 50 Geuer, A. Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung. Dissertation TU München, Springer-Verlag, 1996
- 51 Noeken, S. Technologie des Selektiven Lasersinterns von Thermoplasten. Shaker Verlag Aachen, 1997
- 52 N.N. Abschlussbericht WISA RP Fraunhofer Verbund 1994
- 53 N.N. Materialise Magics Software, User Manual 2002
- 54 Hendel, Th. Entwicklung eines Softwaremoduls zur technologischen Planung generativer Verfahren. Diplomarbeit, TU Berlin, 1997
- 55 Müller, H.; Schimmel, A.: The Decision Dilemma - Assessment and Selection of Rapid Prototyping Process Chains. Proceedings of the 8th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Nottingham 1999, S. 177-192.
- 56 Selk, A.: Nur nicht den Überblick verlieren. Werkzeug und Formenbau, (2002) 4, S. 54–55
- 57 N.N. RPD Report der NC-Gesellschaft, Heft 8, 1998
- 58 Klocke, F.; Fallbömer, M.; Trommer, G.: Generierung und Bewertung von Prozessketten. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb Zwf, 10, 1998, S. 461-464
- 59 N.N. Zwischenbericht des Sonderforschungsbereiches 374 „Entwicklung und Erprobung innovativer Produkte – Rapid Prototyping“ Teilprojekt D3, Universität Stuttgart 1997
- 60 Kaschka, U. Methodik zur Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl und Bewertung von konventionellen und Rapid Tooling Prozessketten. Dissertation Universität Chemnitz. Shaker Verlag, Aachen 1999

- 
- 61 Dürr, H.; Kaschka, U. An Approach for Selection and Comparative Evaluation of Conventional and Rapid Tooling Process Chains. Proceedings of the 7<sup>th</sup> European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Aachen, Germany, 7.-9. Juli 1998, S. 93-107
- 62 Loose, K.; Nakagawa, T. Harmonising Technical Characteristics of Rapid Prototyping Techniques with User Needs. Tagungsband "Intelligente Produktionssysteme – Solid Freeform Manufacturing, Dresden 1997, S. 162-171
- 63 Krause, F.-L.; Ciesla, M.; Stiel, Ch.; Ulbrich, A.: Enhanced Rapid Prototyping for Faster Product Development Processes. Annals of CIRP Vol. 46, 1997
- 64 Krause, F.-L.; Uhlmann, E.; Dreher, S.; Elsner, P.; Frost, T.: Development of a Process Control Strategy for Selective Laser Sintering Production Engineering, WGP-Bericht Vol. VI/1 (1999)
- 65 Joppe, M.: VisCAM RP – Vom CAD direkt zur RP Maschine ohne STL. Proceedings of uRapid Conference, Berlin, Mai 2000
- 66 Kumar, V.; Kulkarni, P.; Dutta, D. Adaptive Slicing of Heterogenous Solid Models for Layered Manufacturing. Technical Report UM-MEAM-98-02, University of Michigan, 1998
- 67 Unnanon, K.; Cormier, D.; Taylor, J.; Sani, E. Adaptive Slicing with the Sanders Prototype Inkjet Modeling System. Proceedings of SFF Conference, University of Texas, USA 2000, S. 259 - 266
- 68 Shen, J. ; Steinberger, J.; et al.: Inhomogenous Shrinkage of Polymer Materials in Selective Laser Sintering. Proceedings of SFF Conference, University of Texas, USA 1998
- 69 Weiyin Ma; Peiren He: An adaptive slicing and selective hatching strategy for layered manufacturing. Journal of Materials Processing Technology 89:90 (1999) 191 - 197
- 70 Krause, F.-L.; Ulbrich, A.; Ciesla, M.; Klocke, F.; Wirtz, H.: Improving Rapid Prototyping Processing Speeds by Adaptive Slicing. Proceedings of the 6th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing. Nottingham, UK, July 1 - 3, 1997, S. 31-36.
- 71 Stollnitz, E; DeRose, T; Salesin, D.: Wavelets for computer graphics. IEEE Computer Graphics and Applications 1995, S. 76 – 84
- 72 Fischer, A. Multi-level models for reverse engineering and rapid prototyping in remote CAD systems. Computer-Aided Design 32 (2000) 27–38
- 73 Varady, T. Reverse Engineering: Segmenting Point Clouds of Free-form and Regular Objects. Proceedings of Israel-Korea Geometrical Modeling Conference, Tel Aviv, Israel 1998.
- 74 Krause, F.-L.; Fischer, A.; Gross, N.; Barhak, J.: Reconstruction of Freeform Objects with Arbitrary Topology Using Neural Networks and Subdivision Techniques. Annals of CIRP Vol. 52/1/2003. S. 125-128
- 75 N.N. ISO 10303 Standard for the Exchange of Product Model Data
- 76 N.N. DIN 66301: Spezifikation des Schnittstellenformates VDA-FS
- 77 Schwenk-Ferrero, A. Erfahrungen mit der Konformitätsprüfung von VDAFS-Prozessoren. CAD-CAM Report 11 (1992) 10, S.112-124

- 
- 78 Zeppenfeld, K.: Lehrbuch der Grafikprogrammierung. Grundlagen, Programmierung, Anwendung. Spektrum Verlag, 2003
- 79 Geiger, M. Prozessplanung und Prozessführung bei Generativen Fertigungsverfahren. Dissertation TU Stuttgart, Jost-Jetter Verlag, 2000
- 80 Jacob, G.; Kai, C.; Mei, T. Development of a new rapid prototyping interface. Computers in Industry 39 (1999), S. 61 - 70
- 81 Macht, M. Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping. Dissertation TU München, Herbert Utz Verlag, 1999
- 82 Loose, K.; Dreher, S.; Fricke, H. Produktverifikation auf Basis physischer Prototypen. Fortschrittsbericht Leitprojekt iViP, IRB Verlag 2001
- 83 Dreher, S.: Prototypen-Management. In FUTUR 01/2003, S. 10-11
- 84 Patzak, G. Systemtechnik – Planung komplexer innovativer Systeme. Grundlagen, Methoden, Techniken. Berlin, Springer Verlag, 1982
- 85 N.N. DIN 8580 ff. Einteilung der Fertigungsverfahren. Beuth-Verlag, 1981
- 86 Bertch, A.; Bernhard, P.; Vogt, Ch.; Renaud, Ph.: Rapid prototyping of small size objects. Rapid Prototyping Journal 2000; vol.6; 259 - 266
- 87 Abe F., Yoshidome A.; Osakada K.; Matsumoto, M.: Manufacturing of Titanium Parts for Medical Purposes by Selective Laser Melting; Proc. of 8th Int. Conference on Rapid Prototyping, June, 12-13, 2000, Tokyo, Japan, S. 288-293
- 88 Bullinger, H.-J. et al. Entwicklung und Erprobung innovativer Produkte – Rapid Prototyping – Ergebnisbericht des SFB 374 der Förderperiode 2001-2003. Universität Stuttgart 2003, S. XV-1-XV-6
- 89 Steger, W.; Conrad, T. Rapid Prototyping: Operative und strategische Bewertung von generativen und konventionellen Fertigungsverfahren. VDI-Z Special: Werkzeug und Formenbau 1995 Heft 5, S. 12-18
- 90 Nitzsch, R.: AHP und multiattributive Werttheorie im Vergleich. WiSt, 1993, Heft 3, S. 111-116
- 91 Wheelwright, S.C.; Clark, K.B.: Revolutionizing Product Development. The Free Press – Macmillan, 1992
- 92 Jäger, H.; Levy, G.; Schindel, R.: New Technologies to Shorten Time to Market: The Impact of Actual and Future Rapid Prototyping Technologies. Proceedings of IE&EM 2001, Tianjin. China
- 93 Ryder, G.; Ion, B.; Green, G.; Harrison, D.; Wood, B.: Rapid Design and Manufacture Tools in Architecture. Automation in Construction 11 (2002) 279 - 290
- 94 Krause, F.-L.; Schlingheider, J.: Entwickeln und Konstruieren mit wissensbasierten Softwarewerkzeugen. In: Erfolgreiche Anwendung wissensbasierter Systeme in Entwicklung und Konstruktion. Tagung Heidelberg, VDI-Berichte 903, VDI Verlag Düsseldorf, 1991
- 95 Tank, W. Modellierung von Expertise über Konfigurierungsaufgaben. Dissertation TU Berlin 1991, infix Verlag 1992
- 96 Klocke, F.; Wegner, H.; Willms, H.: Strategien der integrierten Technologieplanung. Industrieanzeiger 124 (2002) Sonderausgabe zum AWK`02

- 
- 97 Ulbrich, A.: Featureintegrierte Fertigungsplanung. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum, D83, 1996
- 98 Haufe, A.: Konfiguration von Arbeitsplanungssystemen. Berichte aus der Produktionstechnik, Band 18/99, Shaker Verlag Aachen, 1999
- 99 Mesarovic, M.D.; Takahara, Y.: Abstract Systems Theory. Berlin, Tokyo: Springer Verlag 1989
- 100 Leemhuis, H.; Baumann, R.; Kaufmann, U.; Swoboda, F.; Kühn, T.; Ragan, Z.: Function Oriented Product Modelling Based on Feature Technology and Integrated Constraint Management. In: Proceedings PDT Europe 2002 Executive Summary, Turin, Italy 7th–9th May 2002, S. 173–180
- 101 Sommerville, I.; Sawyer, P.: Requirements Engineering: A Good Practice Guide. Wiley & Sons, 1997
- 102 Katz Z.; Smith P.E.S.: On process modelling for selective laser sintering of stainless steel; Journal of Engineering Manufacture; Vol. 215, S. 1497- 1504
- 103 Wang, X.; Kruth, J.P.: Finite Element Analysis of Thermal Process in Direct Selective Laser Sintering of metal powders. Computational Techniques for Materials, Composites and Composite Structures. Edinburgh: Civil Comp Press, 2001, S. 51-57
- 104 Ziebeil, P.: Ein Ansatz zum Konstruieren mit Lösungsräumen, Dissertation TU Berlin 2000
- 105 Shiomi, M.; Yoshidome, A.; Abe, F.; Osakada, K.: Finite Element Analysis of Melting and Solidifying Processes in Laser Rapid Prototyping of Metallic Powders. International Journal of Machine Tools & Manufacture 39 (1999) 237–252
- 106 Walter, Th.: Einsatz von Methoden der Digitalen Fabrik bei der Planung von Produktionssystemen für die Automobilindustrie. Dissertation TU Clausthal. Aachen: Shaker Verlag 2002
- 107 Gadatsch, A.: Modellierung von Geschäftsprozessen. 2. Aufl. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg Verlag 2002
- 108 Balzert, H.: UML kompakt. Spektrum Akademischer Verlag 2001
- 109 Anderson, R. et al: XML professionell. Bonn: MITP Verlag, 2000
- 110 N.N. <http://www.w3.org/XML>
- 111 Mühl, G.; Treitz, M.: Whitepaper Komponentenentwicklung – Philosophie Papier zur Entwicklung von iViP-Komponenten (*Philosophie-Papier iViP-Client und Integrationsplattform*), Version 1.0, 2001.
- 112 N.N. MSDN – Microsoft Developer Network for Visual Studio 6.0 <http://www.microsoft.com/msdn/>