

Entwicklung von Simulationsmethoden und Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität zur Unterstützung der Produktentstehung in der Gießtechnik

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Michael Rost
aus Weimar

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Michael M. Resch
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult.
Engelbert Westkämper

Tag der Einreichung: 21. Mai 2008
Tag der mündlichen Prüfung: 27. März 2009

Institut für Höchstleistungsrechnen der Universität Stuttgart

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als externer wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Höchstleistungsrechnen der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael M. Resch, Leiter des Instituts für Höchstleistungsrechnen (IHR) und Leiter des Höchstleistungsrechenzentrums Stuttgart (HLRS), für die exzellente Betreuung meiner Promotion als Hauptberichter mit sehr hohem Engagement.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper danke ich recht herzlich für die Übernahme des Mitberichts.

Herrn Dr.-Ing. Andreas Wierse, Geschäftsführer der Firma VISENSO GmbH, und Herrn Dipl.-Ing. Peter Baumgartner, Teamleiter für Simulation und Prozessoptimierung der Firma Daimler AG, und Ihren Mitarbeitern sowie den Mitarbeitern von Prof. Dr.-Ing. Michael M. Resch danke ich im außerordentlichen Maß für die äußerst aktive und wohlwollende Unterstützung meiner Promotionstätigkeit.

Hervorheben möchte ich dabei Herrn Dipl.-Ing. Peter Baumgartner, der durch das Setzen der Rahmenbedingungen und durch unzählige fachliche Impulse einen wesentlichen Anteil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Mein außerordentlicher Dank gilt darüber hinaus meinen Eltern und meiner Familie.

i Inhaltsverzeichnis

i	Inhaltsverzeichnis	3
ii	Abbildungsverzeichnis.....	5
iii	Tabellenverzeichnis.....	7
iv	Kurzfassung	8
v	Abstract.....	11
Kapitel 1	Einleitung	14
1.1	Zielsetzung.....	17
1.2	Lösungsweg	18
Kapitel 2	Stand der Technik in der Produktentstehung	20
2.1	Konstruktion und Entwicklung von Produkten.....	21
2.1.1	Vorgehensweise	21
2.1.2	Technische Systeme	26
2.1.3	Lösungsmethoden	29
2.2	Fertigungsverfahren	37
2.2.1	Arbeitsvorbereitung	40
2.2.2	Urformen.....	45
2.2.3	Trennen	52
2.2.4	Fertigungssysteme	56
2.2.5	Qualitätsmanagement.....	59
2.3	Informationstechnik	60
2.3.1	Hardware und Software	62
2.3.2	Virtuelle Produktentstehung	66
Kapitel 3	Produktentstehung in der Gießtechnik.....	74
3.1	Arbeitsbereiche	74
3.1.1	Produkte.....	74
3.1.2	Konstruktions- und Entwicklungsmethoden	76
3.1.3	Fertigung	79
3.1.4	Qualitätsprüfung und Qualitätsverbesserung	81
3.2	Produktentstehungsprozesse	82
3.2.1	Prozesse der Arbeitsbereiche	82

3.2.2	Verknüpfung der Prozesse	84
Kapitel 4	Analyse der Produktentstehungsprozesse.....	88
4.1	Potentiale.....	88
4.2	Produktentstehungssysteme	90
4.2.1	Systemeinteilung.....	92
4.2.2	Systembildung und Prozessableitung.....	93
4.3	Analyse und Erweiterung	96
4.3.1	Simulation	98
4.3.2	Visualisierung	99
Kapitel 5	Entwicklung von Methoden und Verfahren.....	102
5.1	Simulationsmethoden.....	102
5.1.1	Kinematiksimulation von Fertigungssystemen.....	102
5.2	Ergebnisvisualisierung in der virtuellen Realität	108
5.2.1	Geometriemodellierung	110
5.2.2	Wandstärkeanalyse.....	111
5.2.3	Gießsimulation.....	112
5.2.4	Kinematiksimulation und NC-Simulation	118
5.2.5	Analyse der Maßhaltigkeit.....	120
5.2.6	Analyse der Temperaturverteilung.....	122
5.2.7	Analyse der Werkstoffdichte	123
Kapitel 6	Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung.....	126
6.1	Analyse	127
6.1.1	Anforderungen.....	128
6.2	Systemerweiterung	136
6.3	Verallgemeinerung der Funktionen	138
6.4	Funktionskategorien.....	141
6.5	Gesamtsystem Visualisierung.....	144
Kapitel 7	Zusammenfassung.....	147
7.1	Nutzen	150
7.2	Ausblick	151
vi	Quellen	154

ii Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Produktentstehung im Produktlebenszyklus [DUB-05]	14
Abbildung 2: Entwicklung der Arbeitsorganisation zum Simultaneous Engineering [SIM-07].	16
Abbildung 3: Lebensphasen eines technischen Produkts [PAH-07]	20
Abbildung 4: Konstruktions- und Entwicklungsphasen im Maschinenbau [HUE-96]	22
Abbildung 5: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach [VDI-2]	23
Abbildung 6: Iteratives Entwickeln eines Serienprodukts nach [VDI-2]	24
Abbildung 7: Entwicklung von Software-Produkten in Anlehnung an [PAH-07].....	26
Abbildung 8: Funktionsstruktur [PAH-07]	29
Abbildung 9: Methoden zur Lösungssuche in Anlehnung an [PAH-07]	31
Abbildung 10: Funktionen und Bereiche der Produktion [DUB-05].....	37
Abbildung 11: Informationsfluss in einem NC-Steuerungssystem [HUE-96].....	44
Abbildung 12: Weiterverarbeitungsaufwand beim Urformen nach [DUB-05]	46
Abbildung 13: Verfahrensprinzip beim Urformen nach [DUB-05]	47
Abbildung 14: Einteilung der Form- und Gießverfahren [FRI-06]	48
Abbildung 15: Verfahren des Spanens mit geometrisch bestimmter Schneide (DIN 8589) ...	52
Abbildung 16: Systemstruktur einer integrierten Teilefertigung [EVE-97].....	56
Abbildung 17: Methoden und Werkzeuge des Qualitätsmanagements [DUB-05].....	59
Abbildung 18: Methoden zur Unterstützung der Produktentstehung nach [DUB-05]	61
Abbildung 19: Aufbau von Druckgießmaschinen [FRI-06]	75
Abbildung 20: Schematische Darstellung der Produktentstehungsprozesse	86
Abbildung 21: Verknüpfung der Produktentstehungsprozesse.....	87
Abbildung 22: Potentiale zur Unterstützung der Produktentstehung.....	89
Abbildung 23: Begriffsklärung zur Beschreibung von Systemen auf Basis von [VDI-2]	90
Abbildung 24: Prozessbeschreibung in technischen Systemen.....	91
Abbildung 25: Systemeinteilung.....	92
Abbildung 26: Anwendungssoftwaresysteme	93
Abbildung 27: Produktentstehungssysteme Teil 1	94
Abbildung 28: Produktentstehungssysteme Teil 2	95
Abbildung 29: Produktentstehungssysteme Teil 3.....	95
Abbildung 30: Produktentstehungssysteme Teil 4	96
Abbildung 31: Erweiterung des Aufgabenspektrums der Produktentstehung.....	98
Abbildung 32: Erweiterung der Kommunikationsfähigkeit der Produktentstehung.....	100

Abbildung 33: Detaillierung der Funktion Kinematiksimulation.....	105
Abbildung 34: Produktentstehungssystem Visualisierung.....	109
Abbildung 35: Visualisierung Geometriemodellierung.....	110
Abbildung 36: Visualisierung Wandstärkeanalyse.....	112
Abbildung 37: Ergebnisse der Gießsimulation	113
Abbildung 38: Visualisierung Füll- und Erstarrungsfronten.....	114
Abbildung 39: Visualisierung Füllspuren.....	116
Abbildung 40: Visualisierung Erstarrungskriterien	117
Abbildung 41: Visualisierung Kinematiksimulation und NC-Simulation	119
Abbildung 42: Visualisierung Maßhaltigkeit.....	121
Abbildung 43: Visualisierung Analyse der Temperaturverteilung.....	122
Abbildung 44: Visualisierung Analyse der Werkstoffdichte	123
Abbildung 45: Erhöhung der Simulations- und Visualisierungskompetenz	126
Abbildung 46: Produktentstehungssystem Informationsmanagement	137
Abbildung 47: Funktionskategorien Interaktion und Vernetzung.....	142
Abbildung 48: Funktionskategorien Konvertierung, Datenimport, Benutzungsschnittstellen und Datenexport	143
Abbildung 49: Funktionskategorien Darstellungsgüte und Datengröße.....	143
Abbildung 50: Funktionskategorie Berechnungen	143
Abbildung 51: Funktionskategorien Kommunikation und VR-Projekte	144
Abbildung 52: Gesamtsystem Visualisierung.....	145
Abbildung 53: Nutzen der Methoden und Verfahren.....	150
Abbildung 54: Wirtschaftlicher Erwartungsnutzen	151
Abbildung 55: Technischer Ausblick.....	152
Abbildung 56: Ausblick für die Arbeitsabläufe	153

iii Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Hauptgruppen der Fertigungsverfahren nach DIN 8580	39
Tabelle 2: Produktentstehungsprozesse in der Gießtechnik.....	85
Tabelle 3: CAE-Systeme zur Kinematiksimulation.....	104

iv Kurzfassung

Die Arbeit ist aus dem Gebiet der Produktentstehung der Gießtechnik und der virtuellen Produktentstehung. Die Unterstützung der simultanen Arbeitsabläufe in der Produktentstehung der Gießtechnik kann durch die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von Methoden, Verfahren und Werkzeugen der virtuellen Produktentstehung verbessert werden. Daher ist die Zielsetzung dieser Arbeit die Entwicklung von Simulationsmethoden und Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität zur Unterstützung der Produktentstehung in der Gießtechnik.

Um die Zielsetzung dieser Arbeit zu erreichen, wird zuerst der Stand der Technik in der Produktentstehung und in der virtuellen Produktentstehung ausführlich im **Kapitel 2** herausgearbeitet.

In **Kapitel 3** werden die Arbeitsverfahren, -methoden und -werkzeuge der Produktentstehung der Gießtechnik zur Vorbereitung der Analyse in Kapitel 4 erarbeitet. Das Ergebnis ist die Darstellung der Verknüpfungen der Produktentstehungsprozesse, die durch die gegenseitigen Auswirkungen hervorgerufen werden. Die Produktentstehungsprozesse beschreiben die Tätigkeiten in der Produktentstehung der Gießtechnik.

Im **Kapitel 4** werden für die Vorbereitung der Entwicklung von Simulationsmethoden und Visualisierungsverfahren in Kapitel 5 die Produktentstehungsprozesse aus Kapitel 3 analysiert. Dazu werden die beiden Kriterien Aufgabenspektrum und Kommunikationsfähigkeit eingeführt. Hinsichtlich dieser beiden Kriterien erfolgt die Herleitung von Verbesserungspotentialen für einige Produktentstehungsprozesse aus Kapitel 3 auf Basis der gegenseitigen Verknüpfungen.

Parallel dazu werden aus den Produktentstehungsprozessen und den Verknüpfungen technische Produktentstehungssysteme gebildet. Kernpunkt bei der Systembildung ist die Zuordnung der Anwendungssoftwaresysteme sowie der Ein- und Ausgangsgrößen. In den Produktentstehungssystemen geschieht die Ableitung der Prozesse.

Die Prozesse bilden die Grundlage für die Analyse der Potentialerfüllung zu den beiden Kriterien Aufgabenspektrum und Kommunikationsfähigkeit in den Produktentstehungssystemen. Die Analyse ergibt in einigen Prozessen Verbesserungspotentiale für die Visualisierung der Ergebnisgrößen sowie die Erkenntnis, dass Aufgaben zur Kinematiksimulation in dem bestehenden Tätigkeitsspektrum der Gießtechnik nicht erarbeitet werden können.

Zur Prüfung der Realisierbarkeit der Verbesserungspotentiale werden die Analyseergebnisse der verknüpften Produktentstehungsprozesse mit denen der Prozesse der Produkt-

entstehungssysteme verglichen, die sich auf dieselben Tätigkeiten stützen. Der Vergleich zeigt Übereinstimmung beim Kriterium Aufgabenspektrum und Unterschiede beim Kriterium Kommunikationsfähigkeit. Die Unterschiede beim Kriterium Kommunikationsfähigkeit betreffen Verbesserungspotentiale für zwei weitere Tätigkeiten, basierend auf der Analyse der Produktentstehungsprozesse und deren Verknüpfungen. Da durch diese beiden Tätigkeiten keine nennenswerte Umsetzung von digitalen Ergebnissen erfolgt, werden sie zur Verbesserung des Kriteriums Kommunikationsfähigkeit in Kapitel 5 an diesem Punkt der Arbeit nicht berücksichtigt.

Aufgrund der Analyse ist ein Ergebnis des Kapitels 4 die Entscheidung zur Erhöhung des Erfüllungsgrads des Kriteriums Aufgabenspektrum durch die Entwicklung von Simulationsmethoden für die Tätigkeit Kinematiksimulation von Fertigungssystemen. Ein weiteres Ergebnis ist die Entscheidung zur Erhöhung des Erfüllungsgrads des Kriteriums Kommunikationsfähigkeit durch die Entwicklung von Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität für diese Tätigkeiten der Produktentstehung der Gießtechnik, die in Kapitel 3 herausgearbeitet wurden:

- Geometriemodellierung,
- Wandstärkeanalyse,
- Gießsimulation,
- Kinematiksimulation,
- NC-Simulation,
- Analyse der Maßhaltigkeit,
- Analyse der Temperaturverteilung und
- Analyse der Werkstoffdichte.

Ziel dieser Entwicklungen ist die Erweiterung der Simulations- und Visualisierungskompetenz in der Produktentstehung der Gießtechnik. Im Rahmen der Aufgabenabgrenzung wird sich in dieser Arbeit gegen die Entwicklung von Visualisierungsverfahren für die Tätigkeit Simulation Betriebsverhalten entschieden, obwohl dieser Tätigkeit in der Analyse ein Potential zugewiesen wird.

In **Kapitel 5** werden für die aufgrund der Analyse in Kapitel 4 ermittelten Tätigkeiten der Produktentstehung der Gießtechnik Simulationsmethoden und Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität entwickelt. Die Entwicklung geschieht in Produktentstehungssystemen zur Visualisierung, die zu diesem Zweck gebildet werden. Das Ergebnis ist die Beschreibung der

Simulationsmethoden und Visualisierungsverfahren auf Grundlage der Prozesse in diesen Produktentstehungssystemen.

Den Abschluss dieser Arbeit bildet im **Kapitel 6** die Formulierung eines Anforderungsprofils an die Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik. Die Erarbeitung des Anforderungsprofils basiert auf den Ergebnissen der Kapitel 3, 4 und 5.

Zuerst werden durch die Analyse der Ergebnisse aus den vorherigen Kapiteln konkretisierte Anforderungen in Form von Funktionen in den Produktentstehungssystemen zur Visualisierung abgeleitet. Aus den Funktionen geht hervor, dass die Notwendigkeit zur Verwendung und Visualisierung von Informationen für die Erhöhung der Analysefähigkeit in der virtuellen Realität besteht. Zur Festlegung der Informationsquellen kommen die Tätigkeiten in Betracht, von denen durch die Analyse in Kapitel 4 potentialbehaftete Verknüpfungen ausgehen. Aus diesem Grund werden die beiden Tätigkeiten, für die auf Basis der Analyse in Kapitel 4 keine Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität entwickelt worden sind, als Informationsquellen definiert. Für diese beiden sowie für die oben aufgezählten Tätigkeiten wird darauf ein Informationsmanagement-System entwickelt.

Im weiteren Verlauf des Kapitels 6 werden die abgeleiteten bzw. entwickelten Funktionen größtenteils tätigkeitsneutral verallgemeinert und anschließend in übergeordneten Funktionskategorien zusammengefasst. Das Ergebnis des Kapitels 6 ist die Beschreibung der Visualisierung von Daten und Informationen aus der Produktentstehung der Gießtechnik in der virtuellen Realität im Gesamtsystem Visualisierung. Die Beschreibung der Visualisierung begründet sich auf die Funktionskategorien, die in den Produktentstehungssystemen dieser Arbeit verankert sind. Die Funktionskategorien stellen die Verbindungen zu den zuvor erarbeiteten Ergebnissen dieser Arbeit her.

Die Ergebnisse dieser Arbeit, die im Kapitel 6 in einer konzentrierten Form gebündelt werden, bilden die Grundlage für die Realisierung des Gesamtsystems Visualisierung. Die erfolgreiche Realisierung des Gesamtsystems Visualisierung befähigt zur Durchführung eines VR-basierten Projektmanagements in der Produktentstehung der Gießtechnik. Die Durchführung des VR-basierten Projektmanagements wird eine verbesserte Unterstützung der Produktentstehung der Gießtechnik durch die in dieser Arbeit entwickelten Methoden und Verfahren aus dem Gebiet der virtuellen Produktentstehung erzielen.

v Abstract

This thesis is from the field of product creation of casting technology and virtual product creation. The assistance of simultaneous procedures during product creation processes can be improved by developing methods, procedures and tools from the field of virtual product creation. Thus the aim of this thesis is the development of simulation-based methods and visualisation procedures of virtual reality for providing assistance to product creation of casting technology.

To attain this goal the state of the art in product creation and in virtual product creation is extensively worked out in **chapter 2**. In **chapter 3** the currently used procedures, operating techniques and working methods in product creation of casting technology are gathered in preparation of chapter 4. The result of chapter 3 is the description of the product creation processes of casting technology and the links between the processes. The product creation processes describe the activities which are carried out during product creation of casting technology.

The aim of **chapter 4** is the analysis of the product creation processes from chapter 3 for the purpose of developing simulation-based methods and visualisation procedures in chapter 5. Besides the two criteria task range and ability to communicate are established. In account to these two criteria the derivation of the potentials for improvement for the links of the product creation processes is done.

Simultaneously to that the product creation processes and their links are used to generate technical product creation systems. The main focus during system generation is the allocation of the software application systems and of the input and output variables. Finally the processes are derived in the product creation systems.

These processes represent the basis for analysing the degree of fulfilment of the two criteria task range and ability to communicate in the product creation systems. The analysis yields in some processes potentials for improvement for visualisation of result values and furthermore the cognition that there is no process that enables to accomplish kinematics simulation of manufacturing systems.

The results of the analysis of the product creation processes and the processes in the product creation systems are relating to the same activities. Therefore the analysed potentials for improvement are compared to each other concerning the correlation of the activities. The comparison offers a correlation of some activities and no correlation of two activities. By reason of that there is no significant digital data processing of results values

these two activities are not considered in chapter 5 for the improvement of the criteria ability to communicate.

On the basis of the analysis one result of chapter 4 is the decision to increase the degree of fulfilment of the criteria task range by the development of simulation-based methods for the activity kinematics simulation of manufacturing systems. Another result is the decision to increase the degree of fulfilment of the criteria ability to communicate by the development of visualisation procedures in virtual reality systems for these activities of product creation of casting technology as listed below that are carried out in chapter 3:

- geometry modelling,
- analysis of wall thickness,
- casting simulation,
- kinematics simulation of manufacturing systems,
- programming of numerical controlled machine tools,
- analysis of dimensional accuracy,
- analysis of temperature distribution as well as
- analysis of material density.

The goal of these developments is the extension of the expertise in simulation and visualisation in product creation of casting technology. Within the scope of task limitation it is decided that there will not be developed visualisation procedures for the activity simulation operating behaviour in this thesis, although this activity is allocated with a potential for improvement.

In **chapter 5** the development of simulation-based methods and visualisation procedures in virtual reality systems for the above listed activities occurs based on the analysis results and the product creation systems of chapter 4. To achieve this product creation systems for visualisation are generated. The result of chapter 5 is the description of the simulation-based methods and the visualisation procedures in terms of processes in the product creation systems for visualisation. The developed methods and procedures can be established an applied.

The final part of this thesis represents in **chapter 6** the formulation of demands for the involvement of virtual reality in product creation of casting technology. The formulation of the demands is predicated on the results of the chapters 3, 4 and 5.

Primarily the results of the former chapters are analysed and in this regard the demands are derived in the form of activity-related operations. From the operations the exigency for application and visualisation of information from the activities emanates to increase the ability to analyse in the virtual reality environment. Hence an information management system that transmits information between the activities and the virtual reality system is developed.

In the broader course of chapter 6 the derived and developed operations, respectively are generalized in most instances. The generalisation is characterized by the dissociation of the operations from the activities. Afterwards the generalized operations are captured in superior operation-related categories.

The result of chapter 6 is the description of the state of visualisation of result values and information of the product creation processes of casting technology in virtual reality systems on basis of the complete visualisation system. The description of the visualisation process refers to the operation-related categories which are allocated to the results of this thesis.

The results of this thesis that are bundled in chapter 6 are the fundamentals to realise the involvement of virtual reality in product creation of casting technology. The successful realisation of the complete visualisation system capacitates to execute virtual reality-based project management in product creation processes of casting technology. The execution of virtual reality-based project management will achieve an improved assistance of product creation of casting technology regarding to the developed methods and procedures from the field of virtual product creation.

Kapitel 1 Einleitung

Unternehmen erfahren durch ständig wachsenden Wettbewerb immer schwerere Bedingungen am Markt. Höhere Kundenanforderungen an die Produkte der Unternehmen, steigende Komplexität und Variantenvielfalt der Produkte sowie eine Zunahme der Globalisierung schlagen sich in einem steigenden Konkurrenzdruck zwischen den Unternehmen nieder [BUL-05]. Kosten, Qualität und Zeit sind bestimmende Größen, die in den Lebenszyklen der Produkte, deren Erfolg charakterisieren. Ein ausgewogenes Verhältnis dieser drei Größen erhöht den Erfolg von Produkten. Der Konkurrenzdruck führt dazu, dass die Unternehmen ihre Arbeitsabläufe ständig verbessern müssen, um am Markt bestehen zu können.

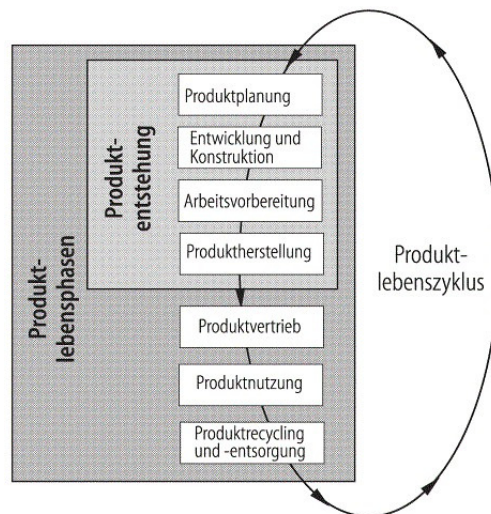


Abbildung 1: Produktentstehung im Produktlebenszyklus [DUB-05]

Der Produktentstehungsprozess ist, wie in *Abbildung 1* gezeigt, ein Bestandteil im Produktlebenszyklus und beinhaltet die Produktlebensphasen Planung, Konstruktion und Entwicklung, Arbeitsvorbereitung und Herstellung [DUB-05]. Die Arbeitsabläufe und die daraus resultierenden Ergebnisse in der Produktentstehung haben einen wesentlichen Einfluss auf die erfolgsbestimmenden Größen Kosten, Qualität und Zeit im Produktlebenszyklus. Aus diesem Grund können Unternehmen durch permanente Verbesserung der Produktentstehungsprozesse und Erhöhung ihrer Effizienz und Effektivität die Wettbewerbsfähigkeit steigern. Ziele von Unternehmen sind es daher, in kürzeren Zyklen, zu weniger Kosten, qualitativ höherwertige Produkte zu entwickeln. Auf der anderen Seite

bewirken eine steigende Variantenvielfalt bei gleichzeitig abnehmenden Losgrößen für Unternehmen höhere Aufwendungen zur Erreichung dieser Ziele. Zur Reduzierung dieser hohen Aufwendungen werden insbesondere in der Produktentstehungsphase immer effektivere Arbeitsorganisationsformen eingesetzt. Die Arbeitsorganisationsformen werden durch Technologien, Methoden und Verfahren unterstützt. Um eine bestmögliche Unterstützung zu gewährleisten, werden die Technologien, Methoden und Verfahren ständig weiterentwickelt.

Der Produktentwicklungsprozess umfasst den Planungs-, Konstruktions- und Entwicklungsprozess. In der Vergangenheit erfolgten die Produktentwicklungsphasen sequenziell. Das hatte beispielsweise zur Folge, dass die Planung der Produktionsmittel erst nach vollständig abgeschlossener Produktentwicklung begann [SIM-07]. Um Zykluszeiten zu reduzieren, wird der Prozess des Planens, Konstruierens und Entwickelns heute als ein integrierter und interdisziplinärer Produktentwicklungsprozess verstanden [PAH-97] [EHR-95]. Zur effektiveren Gestaltung der Arbeitsorganisation hat sich das Simultaneous Engineering bzw. Concurrent Engineering als Vorgehensweise bei der Produktentwicklung etabliert. Unter Simultaneous Engineering wird eine interdisziplinäre Zusammen- und Parallelarbeit in der gesamten Produkt-, Produktions- und Vertriebsentwicklung verstanden. Ziele sind kürzere Entwicklungszeiten, schnellere Produktfertigung, Kostenreduktion am Produkt und in der Produktentwicklung sowie eine Qualitätsverbesserung [DUB-05]. Die Veränderung der Arbeitsorganisation von sequentiellen Arbeitsabläufen zum Simultaneous Engineering und die daraus resultierende Verkürzung der Entwicklungszeit wird in *Abbildung 2* veranschaulicht.

Um Simultaneous Engineering effektiv und effizient in den beteiligten Bereichen anzuwenden und die Produktentstehungsprozesse zu unterstützen, werden verschiedene Technologien und Methoden verwendet. Die Rechnerunterstützung ist für den Produktentstehungsprozess Stand der Technik. Besonders in den Teilgebieten Konstruktion und Entwicklung ist die Rechnerunterstützung in Form von 3D-CAD-Systemen und Simulationssystemen fester Bestandteil der Produktentstehungsprozesse. Um die großen Datenmengen, die in diesen Arbeitsbereichen erzeugt werden, effektiv zu verwalten und zu nutzen, werden Datenmanagementsysteme eingesetzt. Zur Verkürzung der Entwicklungszeiten beginnt parallel zum Konstruktions- und Entwicklungsprozess die schnelle Herstellung von Modellen zur Anschauung und Variation [DUB-05].

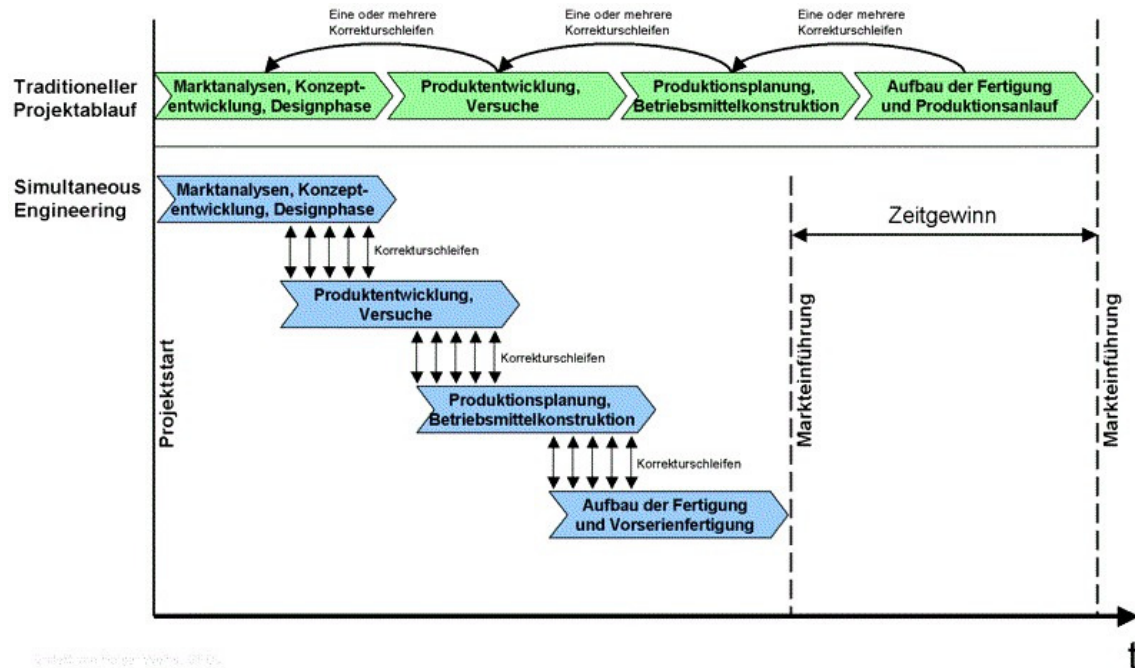


Abbildung 2: Entwicklung der Arbeitsorganisation zum Simultaneous Engineering [SIM-07]

Die bei der Produktentstehung anfallenden Ergebnisse führen zu Entscheidungen, die sich auf den Produktentstehungsprozess und insbesondere auf das Produkt auswirken. In der globalisierten Produktionswirtschaft kommt es zunehmend darauf an, Entscheidungen über Produkte schnell, sicher und über Ländergrenzen hinweg zu treffen [GRI-07]. Daher ist es wichtig, die Ergebnisdaten, interdisziplinär, zu präsentieren. Dazu wurden in den letzten Jahren Visualisierungssysteme entwickelt, die Fachleuten und Entscheidungsträgern aus den beteiligten Bereichen ein besseres Verständnis für Planungs-, Konstruktions- und Entwicklungsergebnisse vermitteln sollen. Zu diesen Visualisierungssystemen zählen Systeme, mit denen Ergebnisdaten in der virtuellen Realität (VR) abgebildet werden. Die virtuelle Produktentwicklung und die damit verbundene Visualisierung von Entscheidungsprozessen wird in Zukunft ein Erfolgskriterium global produzierender Unternehmen [GRI-07]. Aus dieser Situation heraus kann die erfolgreiche Weiterentwicklung der zugrunde liegenden Technologien letztendlich den Produkterfolg am Markt verbessern.

In Forschung und Industrie existieren vielfältige Anwendungsgebiete für Simulation und virtuelle Realität. Das hat zur Folge, dass Simulationsmodelle, Simulationsmethoden und Verfahren zur Nutzung von Ergebnisdaten aus der Produktentstehung, in der virtuellen Realität, abhängig vom Anwendungsgebiet, individuellen Anforderungen genügen müssen.

Diese Anforderungen sind noch nicht für alle Anwendungsgebiete ermittelt und umgesetzt. Das gilt auch für das Anwendungsgebiet Produktentstehung in der Gießtechnik.

Die Produktentstehung der Gießtechnik ist, so wie viele andere Fachgebiete des Maschinenbaus, durch den zunehmenden Einsatz von informationstechnischen Methoden und Verfahren mit dem Ziel geprägt, Produkte immer schneller, kostengünstiger sowie mit nachhaltig hoher Qualität auf den Markt zu bringen. Gerade die Entwicklung dieser Methoden und Verfahren sowie ihre Einführung in die bestehenden Vorgehensweisen und Strukturen der Produktentstehung der Gießtechnik und die nutzbringende Anwendung sind mit hohen Aufwendungen verbunden. Im derzeitigen Zustand können nicht alle Einflussgrößen, die im Rahmen der Produktentstehungsprozesse der Gießtechnik wesentlich sind, hinreichend in Simulationsmodellen abgebildet und in der virtuellen Realität dargestellt werden. Aus diesem Grund können die Vorgehensweisen und Ergebnisse der Produktentstehung der Gießtechnik durch die Entwicklung und Einführung von Methoden und Verfahren zur Simulation und Visualisierung verbessert werden.

1.1 Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist es, Methoden, Verfahren und Vorgehensweisen auf dem Gebiet der Simulation und Visualisierung in der virtuellen Realität zur Unterstützung der Produktentstehung in der Gießtechnik zu entwickeln und in die bestehenden Arbeitsabläufe einzubringen.

Um diese Zielsetzung zu erreichen, ist die Technologiekompetenz in der Gießtechnik zu erweitern. Dazu sind auf Grundlage der bestehenden Technologiekompetenz Ansatzpunkte für die Erweiterung herauszuarbeiten, die bei einer Umsetzung, eine Verbesserung der Vorgehensweisen und Ergebnisse bei der Produktentstehung erwarten lassen. Die Ansatzpunkte sind daraufhin in Anforderungen an die informationstechnische Systemgestalt der Produktentstehung der Gießtechnik umzuwandeln. Auf Basis der Anforderungen und der vorliegenden Systemgestalt sind informationstechnische Methoden und Verfahren zu entwickeln, die zur Unterstützung der Produktentstehung in der Gießtechnik geeignet sind.

Das Ziel der Methoden- und Verfahrensentwicklung ist die Erweiterung der Simulationsmöglichkeiten sowie die Darstellung und Zusammenführung der Ergebnisse aus der Produktentstehung der Gießtechnik in der virtuellen Realität. Zur Anwendung der entwickelten Methoden und Verfahren in der Produktentstehung sind Vorgehensweisen herzuleiten. Abschließend sind die Vorgehensweisen in die bestehenden Arbeitsabläufe einzubringen.

1.2 Lösungsweg

Um die Zielsetzung dieser Arbeit zu erreichen, wird folgendermaßen vorgegangen. Als erstes wird der Stand der Technik in der Produktentstehung ausführlich erarbeitet. Dazu werden in Kapitel 2 der Begriff Produktentstehung zuerst eingeordnet und daraufhin anhand der Schwerpunkte Konstruktion und Entwicklung, Fertigungsverfahren und Informationstechnik ausführlich erläutert. Der Fokus des Schwerpunkts Informationstechnik liegt auf dem Gebiet der virtuellen Produktentstehung. Das Ziel in Kapitel 2 ist die Schaffung von umfangreichen Grundlagen, die im Zusammenhang mit der Produktentstehung der Gießtechnik stehen. Die Erreichung dieses Ziels ist für die Erarbeitung der Zielsetzung dieser Arbeit wesentlich. Die umfangreichen Grundlagen bilden die Basis für die Bearbeitung der weiteren Kapitel.

Im Kapitel 3 wird die Produktentstehung in der Gießtechnik erörtert. Dafür werden die einzelnen Arbeitsbereiche vorgestellt, die an der Produktentstehung beteiligt sind. Eingegangen werden dabei auf die Technologien, Methoden und Vorgehensweisen, die in den Arbeitsbereichen der Produktentstehung zur Anwendung kommen. Am Ende des Kapitels werden die Abläufe in den Arbeitsbereichen im Zusammenhang dargestellt. Ziel dieses Kapitels ist es, die Prozesse, die zur Produktentstehung beitragen, in den beteiligten Arbeitsbereichen, mit den verwendeten Technologien, Methoden und Vorgehensweisen, zu erfassen.

Das Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Analyse der Produktentstehungsprozesse der Gießtechnik, die im Kapitel 3 erarbeitet wurden. Zur Vorbereitung werden die für die Analyse signifikanten Abläufe der Produktentstehung in Form von Systemen, Funktionen und Lösungen ermittelt. Aus diesen Produktentstehungssystemen werden Prozesse abgeleitet, die in Hinblick auf die Erweiterung der Produktentstehung der Gießtechnik um Simulationsmethoden und Visualisierungsverfahren, entscheidend sind. Auf Basis der abgeleiteten Prozesse erfolgt die Analyse und Erweiterung der Produktentstehungssysteme um Simulationsmethoden und Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität.

Im Kapitel 5 werden die Lösungen zur Erweiterung der Produktentstehungssysteme um Simulationsmethoden und Verfahren zur Visualisierung in der virtuellen Realität erarbeitet. Dazu werden Lösungsansätze identifiziert und in den Produktentstehungssystemen umgesetzt.

Das Kapitel 6 zielt auf die Entwicklung einer Systemgestalt hin, die zur Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehungsprozesse der Gießtechnik geeignet ist. Um das zu erreichen, werden auf Grundlage der Produktentstehungsprozesse aus Kapitel 3, der Analyseergebnisse aus Kapitel 4 und der umgesetzten Erweiterungen der Produktentste-

nungssysteme in Kapitel 5 eine erneute Analyse sowie eine Systemerweiterung durchgeführt. Aus den Analyseergebnissen und der Systemerweiterung werden anschließend informationstechnisch ähnliche Funktionen verallgemeinert und in übergreifenden Kategorien zusammengefasst. Durch diese übergreifenden Kategorien, die durch die verallgemeinerten Funktionen mit den Produktentstehungssystemen verknüpft sind, wird ein Gesamtsystem gestaltet. Dieses Gesamtsystem beschreibt, basierend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit, die verallgemeinerten informationstechnischen Funktionen in der virtuellen Realität, die zur Unterstützung der Produktentstehung der Gießtechnik beitragen können. Die funktionale Beschreibung des Gesamtsystems ist das Ergebnis des Kapitels 6.

Im letzten Kapitel werden zuerst die Inhalte dieser Arbeit erläutert. Gegenstand der Erläuterung sind die Ziele dieser Arbeit sowie die Vorgehensweise zur Erreichung der Ziele. In diesem Kontext werden die wesentlichen Zwischenergebnisse und deren Auswirkungen auf die Vorgehensweise auf dem Weg zu den Zielen dargestellt. Im Anschluss werden die Ergebnisse dieser Arbeit diskutiert. Dazu wird der Nutzen bewertet und die Eignung für eine weitere Verwendung im Ausblick beurteilt. In diesem Rahmen werden Ansätze für die Weiterentwicklung von informationstechnischen Methoden, Verfahren und Vorgehensweisen auf dem Gebiet der Simulation und Visualisierung in der virtuellen Realität zur Unterstützung der Produktentstehung in der Gießtechnik und deren Einbindung in die Arbeitsabläufe vorgeschlagen.

Kapitel 2 Stand der Technik in der Produktentstehung

Ein technisches Produkt durchläuft einen Lebenszyklus. Der Lebenszyklus bildet die Grundlage für Aktivitäten beim Produkthersteller und Produkthanwender und kann in Lebensphasen gegliedert werden. Die wesentlichen Lebensphasen eines Produkts sind in der *Abbildung 3* in der Reihenfolge des Herstellungsfortschritts und der Anwendung des Produktes dargestellt.

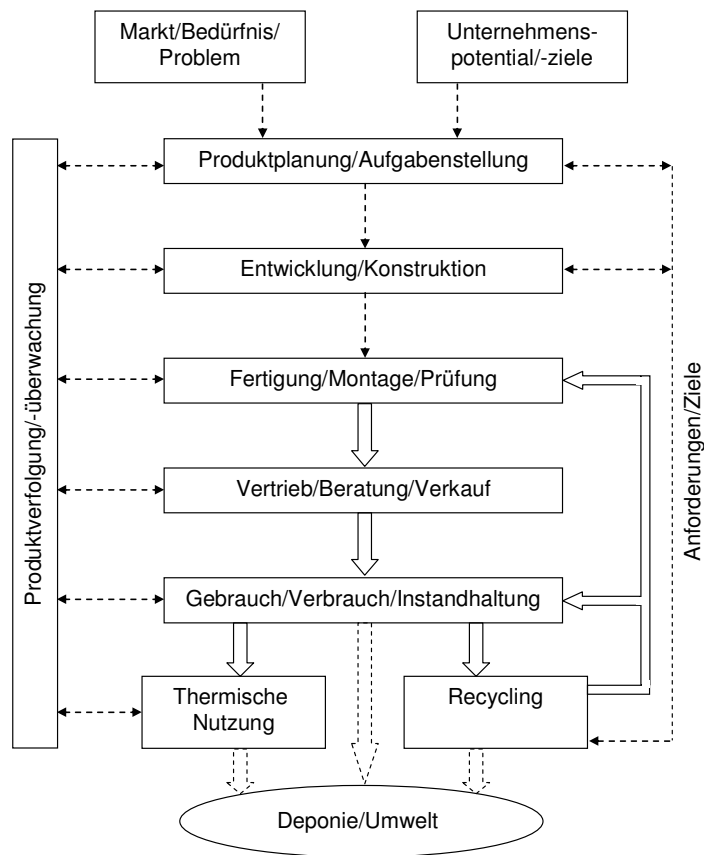


Abbildung 3: Lebensphasen eines technischen Produkts [PAH-07]

Der Lebenszyklus startet mit einer durch Markt- oder Kundenbedürfnisse initiierten Produktidee. Die Produktidee wird im Laufe der Produktplanung konkretisiert und im Rahmen der Konstruktion und Entwicklung ausgearbeitet. Daraufhin wird das entworfene Produkt durch Fertigung und Montage realisiert. An dieser Stelle ist die Produktentstehung abgeschlossen und das Produkt wird an die Anwender vertrieben. Der Gebrauch des Produktes kann durch Instandhaltungsmaßnahmen verlängert werden. Am Ende des

Gebrauchs werden das Material bzw. Teile des Materials entweder weiter verwendet oder entsorgt.

Der Produktenstehung kommt eine besondere Bedeutung im Lebenszyklus zu, da alle wichtigen Produktmerkmale in dieser Lebensphase erdacht und festgelegt werden. Somit leistet die Produktentstehung einen wichtigen Beitrag zum Produkterfolg. In diesem Kapitel wird der Stand der Technik in der Produktentstehung herausgearbeitet.

2.1 Konstruktion und Entwicklung von Produkten

Die Planung und Entwicklung marktfähiger Produkte gehören zu den wichtigsten Aufgaben der Industrie [HUE-96]. Aufgrund der unvermeidbaren Abstiegsphasen der vorhandenen Produkte muss eine systematische Planung neuer Produkte erfolgen [KRA-87]. Grundlage der Produktplanung sind die Verhältnisse am Absatzmarkt, im Umfeld des Unternehmens und innerhalb des Unternehmens. Diese Verhältnisse können nach [KEH-72] als externe und interne Einflüsse auf ein Unternehmen angesehen werden. Die Vorgehensweise bei der Produktplanung wird in [PAH-07] erläutert.

In der Produktentwicklung kommen genauso wie in der Produktplanung Ablaufpläne mit aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten zur Anwendung. Die Ablaufpläne basieren auf allgemeinen Lösungsmethoden, arbeitsmethodischen Ansätzen sowie den generellen Zusammenhängen beim Aufbau technischer Produkte. Im Folgenden werden Vorgehensweisen, Methoden und Verfahren der Konstruktion und Entwicklung beschrieben.

2.1.1 Vorgehensweise

Die Konstruktion und Entwicklung von Produkten erfolgt vom Groben zum Feinen. Am Beginn werden Produktvorschläge aus der Planungsphase zu Konzepten weiterverarbeitet. Die Konzepte werden schrittweise in Entwürfe umgesetzt. Die Ausarbeitung der Entwürfe resultiert in der technischen Produktbeschreibung, die Grundlage für die Produktfertigung ist. In *Abbildung 4* sind die Hauptphasen des Konstruktions- und Entwicklungsprozesses im Maschinenbau dargestellt.

An dieser Stelle werden die Hauptphasen des Konstruktions- und Entwicklungsprozesses von Produkten nach [VDI-2] erläutert. Das Vorgehen bei der Produktentwicklung beginnt mit dem Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung. In dieser Phase sind die wesentlichen Anforderungen zu erkennen und in der technischen Sprache in Form einer Anforderungsliste zu formulieren. Auf Basis der Anforderungsliste erfolgt die lösungsneutrale Definition von

Aufgaben in der Gestalt von Funktionen. Die Verknüpfung der Funktionen ergibt die Funktionsstruktur, die schrittweise zu realisieren ist.

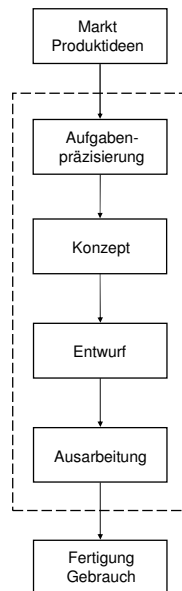


Abbildung 4: Konstruktions- und Entwicklungsphasen im Maschinenbau [HUE-96]

Die Suche nach Lösungsprinzipien für die Funktionen dient der Ermittlung einer Wirkstruktur, bestehend aus prinzipiellen Lösungen bzw. Lösungskonzepten. Bei mechanischen Produkten beruht die Wirkstruktur auf physikalischen Effekten und deren Realisierung durch geometrische und stoffliche Merkmale. Bei softwaretechnischen Produkten besteht die Wirkstruktur aus Algorithmen und Datenstrukturen. Die Aufgliederung der prinzipiellen Lösungen in realisierbare Module soll zu einer modularen Baustruktur führen, in der Entwurfs- bzw. Gestaltungsschwerpunkte aus der Aufgabendefinition und generelle Gestaltungsmethoden, in Hinblick auf die aufwendige Ausarbeitung, berücksichtigt sind.

Das Gestalten der maßgebenden Module der Baustruktur, gekennzeichnet durch Berechnungen, Strukturanalysen, Anordnungs- und Gestaltüberlegungen sowie Fertigungs- und Montagebetrachtungen dienen der Festlegung der wesentlichen Merkmale der Baustruktur in Form von Vorentwürfen, um diese nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimieren zu können. Nach dem Gestalten der Hauptfunktionsträger als Vorentwürfe folgt das Gestalten der im Allgemeinen von ihnen abhängigen Nebenfunktionsträger, das Feingestalten der Haupt- und Nebenfunktionsträger sowie deren Kombination zum Gesamtentwurf. In der Phase des Feingestaltens werden vielfältige

Berechnungs- und Auswahlmethoden für Werkstoffe, Maschinenelemente, Normteile sowie Kalkulationsverfahren für Kosten verwendet.

Den Abschluss des Konstruktions- und Entwicklungsprozesses bildet das Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben in einer Produktdokumentation. Zur Produktdokumentation zählen Werkstattzeichnungen, Stücklisten zur Fertigung und Montage sowie Bedienungsanleitungen und Wartungsvorschriften. Das Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren wird anhand der Arbeitsschritte und ihrer Ergebnisse in *Abbildung 5* verdeutlicht.

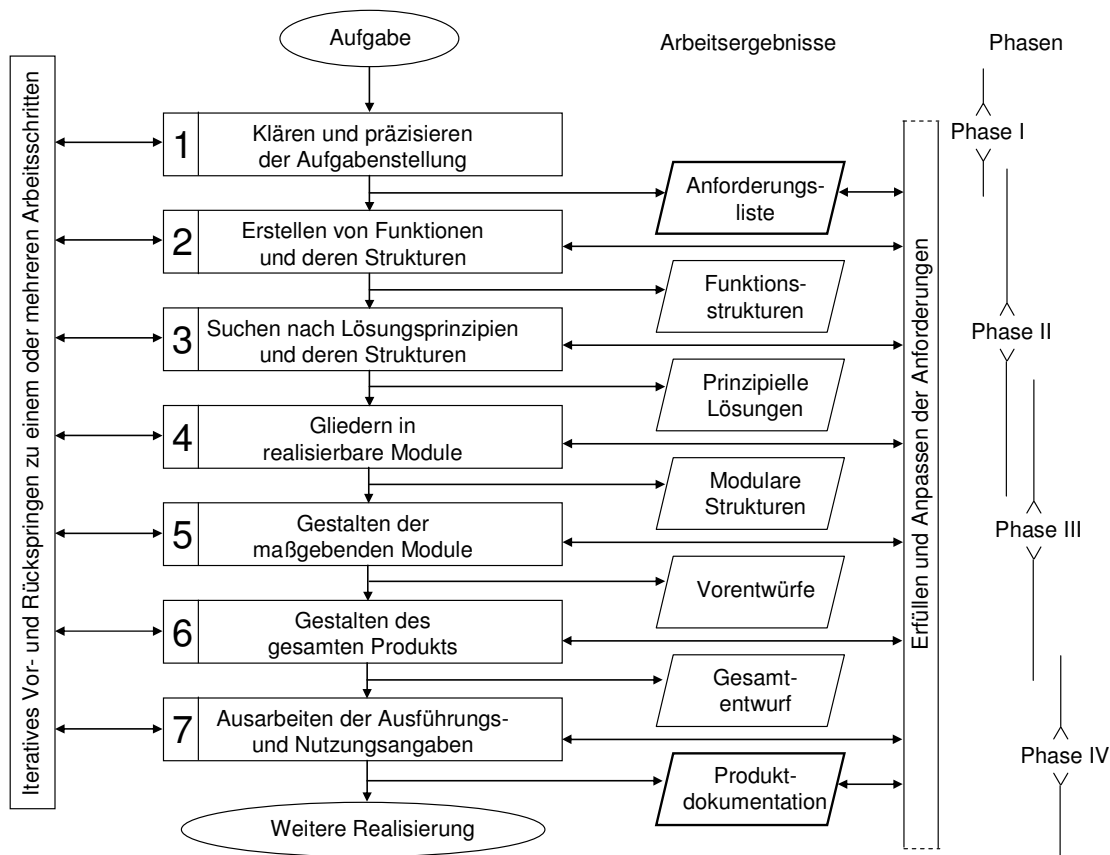


Abbildung 5: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach [VDI-2]

Das generelle Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren ändert sich bei Aufgabenstellungen, an denen mehrere Fachgebiete beteiligt sind, zu einer weitgehend unabhängigen, aber koordinierten Durchführungsweise der Arbeitsschritte. Bei Neuentwicklungen werden alle in *Abbildung 5* gezeigten Arbeitsschritte durchlaufen. Bei Weiterentwicklungen fallen dagegen oft die Arbeitsschritte zwei und drei weg. Im Fall von Anpassungskonstruktionen entfallen zusätzlich die Schritte vier und fünf, obwohl oft das Nachvollziehen dieser Schritte zum Vergleich des aktuellen Wissensstands sinnvoll ist.

Der in *Abbildung 5* dargestellte Konstruktions- und Entwicklungsablauf erfolgt bei Produkten in Einzelfertigung normalerweise nur einmal, ggf. iterativ. Bei Produkten in Serienfertigung, z.B. Kraftfahrzeugen, wäre eine direkte Realisierung als Endprodukt zu risikoreich. Bei solchen Produkten ist es daher üblich, den Entwicklungs- und Fertigungsdurchlauf mehrmals durchzuführen, um nach der Fertigung von Funktions- bzw. Labormustern und, falls notwendig, von zusätzlichen Prototypen bzw. Nullserien in zwischengeschalteten Versuchs- und Erprobungsphasen Schwachstellen am Produkt erkennen zu können, die in erneuten Konstruktions- und Fertigungsvorgängen neutralisiert werden [HUE-96]. In *Abbildung 6* werden die Vorgänge der Produktoptimierung bei der Produktentstehung, angefangen bei Einzelprodukten bis hin zur Serienprodukten, veranschaulicht.

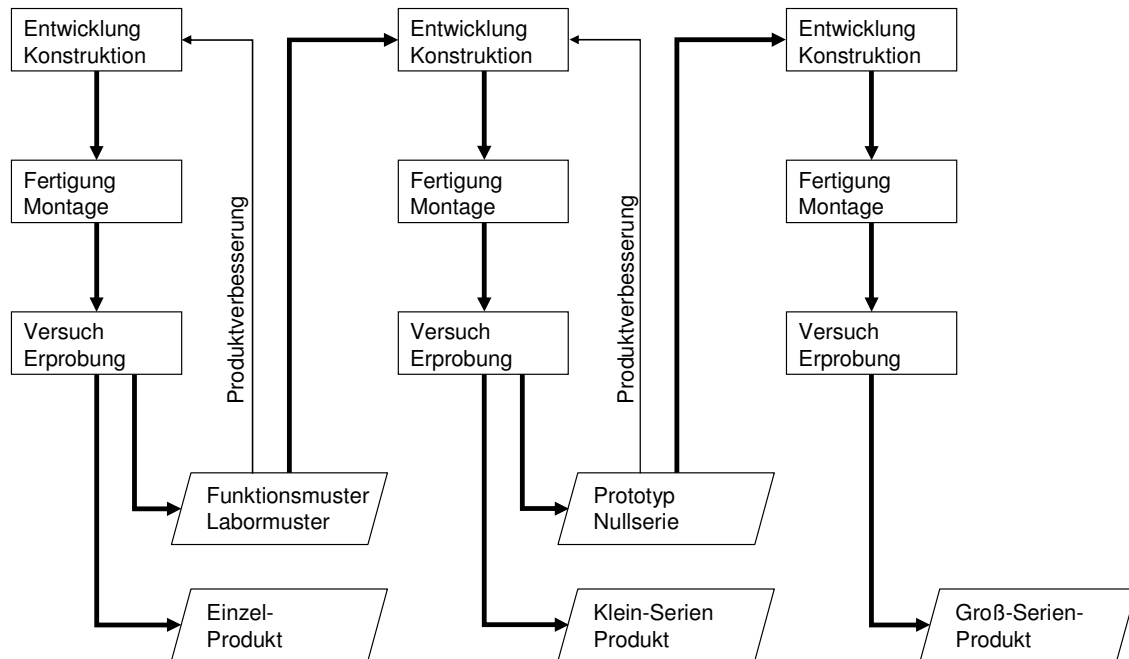


Abbildung 6: Iteratives Entwickeln eines Serienprodukts nach [VDI-2]

Bei der Entwicklung von Software-Produkten kann im wesentlichen der gleiche, in *Abbildung 5* enthaltene, Vorgehensplan wie bei mechanischen Produkten eingesetzt werden, naturgemäß jedoch mit veränderten Arbeitsinhalten [PAH-07], [BRU-86].

Beim Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung, die stärker als bei mechanischen Produkten gemeinsam mit dem Programmanwender erarbeitet wird, erfolgt die Aufstellung der Funktionsstruktur des Anwenders. In der Funktionsstruktur werden die gewünschten Funktionen des Anwenders mit den erkennbaren Informationsflüssen verknüpft.

Im Arbeitsschritt 2 wird aus der Funktionsstruktur des Anwenders eine grobe Programm-Funktionsstruktur abgeleitet. Parallel dazu werden Datenstrukturen aufgebaut, die analog zu den Teilfunktionen einer Funktionsstruktur aus Teildatenbereichen bestehen. Die Programm-Funktionsstruktur und die Datenstrukturen bilden zusammen den Gesamtdatenbestand des Programms. Teilfunktionen werden im Programm durch Funktionsmodule, Teildatenbereiche durch Datenmodelle realisiert.

Im Arbeitsschritt 3 werden drei Arten von Wirkprinzipien das Organisationsprinzip, das Operationsprinzip und das Kommunikationsprinzip in Form von Algorithmen gesucht. Beim Organisationsprinzip werden Datenmodule aus der Datenbasis geholt und wieder abgelegt. Der Algorithmus des Operationsprinzips erzeugt aus Eingangsdaten einer Teilfunktion, durch arithmetische bzw. logische Operationen, Ausgangsdaten. Das Kommunikationsprinzip ermöglicht den Datendialog vom und zum Benutzer. Die Kombination der Wirkprinzipien, das Systemkonzept, erfolgt gemäß den Funktionsstrukturen unter Beachtung der Datenstrukturen.

Im Arbeitsschritt 4 wird das Systemkonzept in gestaltungsbestimmende Hauptmodule, weitere Hauptmodule und Nebenmodule jeweils als Funktions- und Datenmodule aufgegliedert. Die gestaltungsbestimmenden Hauptmodule sind zur Realisierung der wesentlichen Anwenderfunktionen. Die weiteren Hauptmodule und die Nebenmodule sind zur Realisierung der weniger wichtigen Anwenderfunktionen. Im Arbeitsschritt 5 erfolgt die Grobgestaltung der gestaltungsbestimmenden Hauptdatenmodule und anschließend der Hauptfunktionsmodule bei Berücksichtigung der Datenmodule. Die Grobgestaltung besteht im Allgemeinen aus einer nichtformalen Funktionsbeschreibung. Im Arbeitsschritt 6 werden die weiteren Hauptmodule grobgestaltet. Insofern noch keine Lösungen für die Nebenmodule aus der Konzeptphase vorliegen, so werden diese gesucht. Ansonsten wird ebenfalls die Grobgestaltung der Nebenmodule durchgeführt.

Im Arbeitsschritt 7 erfolgt, anders als bei materiellen Produkten, erst das Feingestalten der Haupt- und Nebenmodule. Das erfordert eine Reihe von Detailarbeitsschritten [BRU-86]. Neben Konkretisierungen der Funktionsmodule in Form von Struktogrammen und der Datenmodule in Form von Modulbeschreibungen erfolgt an dieser Stelle die Umsetzung der Module in die gewählte Programmiersprache. Zum Abschluss des Entwicklungsprozesses von Software-Produkten wird das lauffähige Programmsystem durch Integration der gestalteten und zunächst einzeln getesteten Module entwickelt und in einer vollständigen Programmdokumentation festgehalten. In *Abbildung 7* ist die Vorgehensweise bei der Entwicklung von Software-Produkten in Anlehnung an [PAH-07] skizziert.

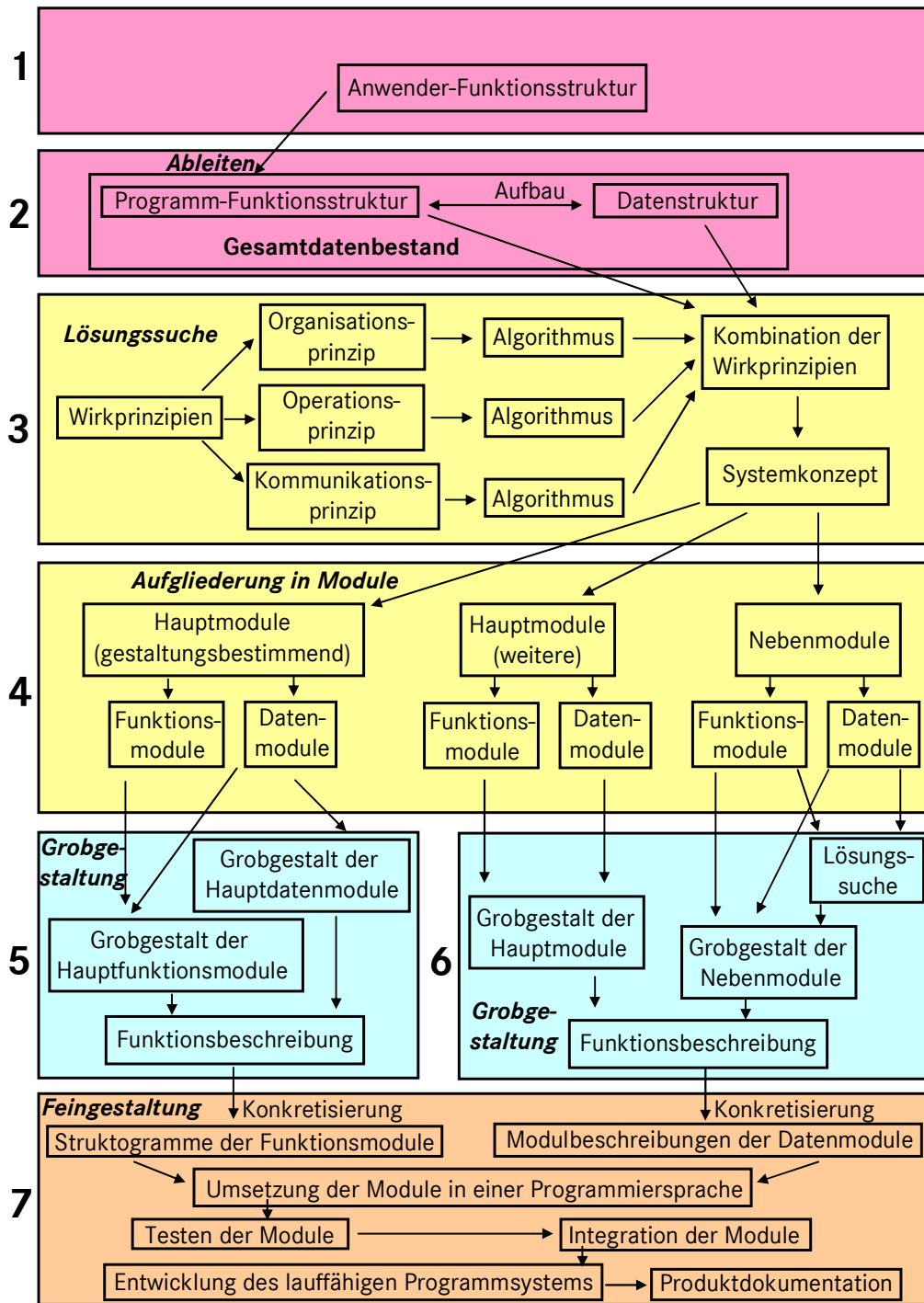


Abbildung 7: Entwicklung von Software-Produkten in Anlehnung an [PAH-07]

2.1.2 Technische Systeme

Die Lösung technischer Aufgaben wird mit Hilfe technischer Gebilde erfüllt. Technische Gebilde können als Anlage, Apparat, Maschine, Gerät, Baugruppe, Maschinenelement oder

Einzelteil bezeichnet werden. Diese gängigen Bezeichnungen sind grob nach dem Grad ihrer Komplexität geordnet. In Abhängigkeit vom Fachgebiet und der Betrachtungsstufe kann die Verwendung dieser Bezeichnungen unterschiedlich sein. Die Benennungen der technischen Gebilde sind aus der geschichtlichen Entwicklung und dem spezifischen Verwendungsbereich erklärbar. Es gibt Normungsbestrebungen, energieumsetzende technische Gebilde als Maschinen, stoffumsetzende als Apparate und informationsumsetzende als Geräte zu bezeichnen. Eine strenge Einteilung nach diesen Merkmalen ist jedoch nicht immer möglich oder in Hinblick auf bereits eingeführte Begriffe nicht immer zweckmäßig [PAH-07].

Bei soziologischen, ökonomischen und technischen Prozessen haben Vorgehensweisen und Methoden der Systemtechnik eine grundlegende Bedeutung erlangt. Die Systemtechnik ist mindestens implizit Grundlage des methodischen Vorgehens. Die Systemtechnik als interdisziplinäre Wissenschaft will Methoden, Verfahren und Hilfsmittel zur Analyse, Planung und optimalen Gestaltung komplexer Systeme bereitstellen [BEI-70], [BEI-71], [BEI-94], [BLA-81], [BÜC-69], [CHE-65], [PAT-82], [ZAN-69].

Vorteilhaft ist es nach [HUB-84], [HUB-88], [HUB-92] in Übereinstimmung mit der systemtechnischen Betrachtung, technische Gebilde als Systeme aufzufassen. Technische Gebilde, also auch Erzeugnisse des Maschinen-, Geräte- und Apparatebaus, sind nach [PAH-07] künstliche, konkrete und meistens dynamische Systeme, die aus einer Gesamtheit geordneter Elemente bestehen und aufgrund ihrer Eigenschaften durch Relationen miteinander verknüpft sind. Technische Produkte sind Bestandteile übergeordneter Systeme, die von Menschen, anderen technischen Systemen und der Umgebung gebildet sein können [DUB-05].

Ein System ist dadurch gekennzeichnet, dass es von seiner Umgebung abgegrenzt ist. Die Verbindungen zur Umgebung sind Eingangsgrößen (Inputs) und Ausgangsgrößen (Outputs) eines Systems. Die Ein- und Ausgangsgrößen werden durch die Systemgrenze geschnitten und überschreiten diese. Ein System kann in Teilsysteme untergliedert werden. Was zum betrachteten System gehört, wird durch die Systemgrenze festgelegt. Mit dieser Vorstellung ist es möglich, auf jeder Stufe der Abstraktion, der Einordnung oder der Aufgliederung für den jeweiligen Betrachtungszweck, geeignete Systeme zu definieren. In der Regel sind die definierten Systeme Teile eines übergeordneten Systems [PAH-07], [DUB-05].

Nach [MAS-07] ist jedes System ein reales Geflecht von wechselseitig abhängigen dynamischen Elementen (Entitäten) und von untereinander in Wechselwirkung stehenden dynamischen Teilen (Relationen) sowie eine Abgrenzung nach Außen (Boundary). Was ein System ist, bleibt der Wahl des Beobachters und des Betrachtungsgegenstandes überlassen. Der jeweilige Beobachter definiert das System und seine Grenzen. Insofern ist die

Systembildung auch immer eine Modellbildung, mit der Folge einer Komplexitätsreduktion für den Betrachter. Die Wahl des Systems wird durch das Ziel, das durch das System zu erreichen ist, stets beeinflusst.

Durch technische Systeme können Prozesse beschrieben werden, in denen Energien, Stoffe und Informationen geleitet bzw. verändert werden. Dabei handelt es sich um einen Energie-, Stoff- und/oder Informationsumsatz. In technischen Prozessen ist von der Aufgabe oder der Art der Lösung her entweder der Energie-, Stoff- oder Informationsfluss vorherrschend. Es ist zweckmäßig, den vorherrschenden Fluss als Hauptfluss zu betrachten. Meistens ist ein weiterer Fluss beteiligt, häufig sind alle drei beteiligt. Bei jedem Umsatz sind die Quantität und die Qualität der beteiligten Größen zu beachten, damit die Kriterien für die Präzisierung der Aufgabe sowie die Auswahl und Bewertung einer Lösung eindeutig sind.

In einem technischen System mit Energie-, Stoff- und Informationsumsatz müssen sowohl eindeutige als auch reproduzierbare Zusammenhänge zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen des Gesamtsystems, der Teilsysteme und zwischen den Teilsystemen selbst bestehen. Die Zusammenhänge sind im Sinne der Aufgabenstellung stets gewollt. Zusammenhänge, die zwischen Eingang und Ausgang zur Erfüllung einer Aufgabe bestehen, nennt man Funktion. Die Funktion ist eine Formulierung der Aufgabe auf einer abstrakten und lösungsneutralen Ebene. Bezieht sie sich auf die Gesamtaufgabe, so spricht man von der Gesamtfunktion. Die Gesamtfunktion lässt sich oft in Teilfunktionen gliedern, die den Teilaufgaben innerhalb der Gesamtaufgabe entsprechen. Die Art und Weise, wie die Teilfunktionen zur Gesamtfunktion verknüpft sind, führt zur Funktionsstruktur. Zur Darstellung der Funktionsstruktur (*Abbildung 8*) wird vornehmlich eine Blockstruktur verwendet. In der Blockstruktur werden die Funktionen, die sich auf Systeme mit Systemgrenzen beziehen, in Blöcken dargestellt und die Energie-, Stoff- und Informationsflüsse in Form von Pfeilen. Die Verknüpfung der Teilfunktionen sollte sinnvoll und verträglich sein. Durch die Verknüpfung besteht fast immer die Möglichkeit zur Variantenbildung und somit der Ansatz für verschiedene Lösungen.

Theoretisch lassen sich Funktionen so aufgliedern, dass die unterste Ebene der Funktionsstruktur nur aus Funktionen besteht, die sich hinsichtlich allgemeiner Anwendbarkeit praktisch nicht weiter unterteilen lassen. Diese Funktionen liegen somit auf einem hohen Abstraktionsniveau.

In *Abbildung 8* ist die Komplexität der Funktionen in Abhängigkeit von der Aufgliederung dargestellt. Je stärker die Gesamtfunktion in Teilfunktionen aufgegliedert ist, desto niedriger ist die Komplexität der resultierenden Teilfunktionen. Das Aufstellen einer Funktionsstruktur erleichtert das Finden von Lösungen, da durch die Strukturierung die Bearbeitung weniger

komplex wird und Lösungen für die Teilfunktionen zunächst gesondert erarbeitet werden können [DUB-05].

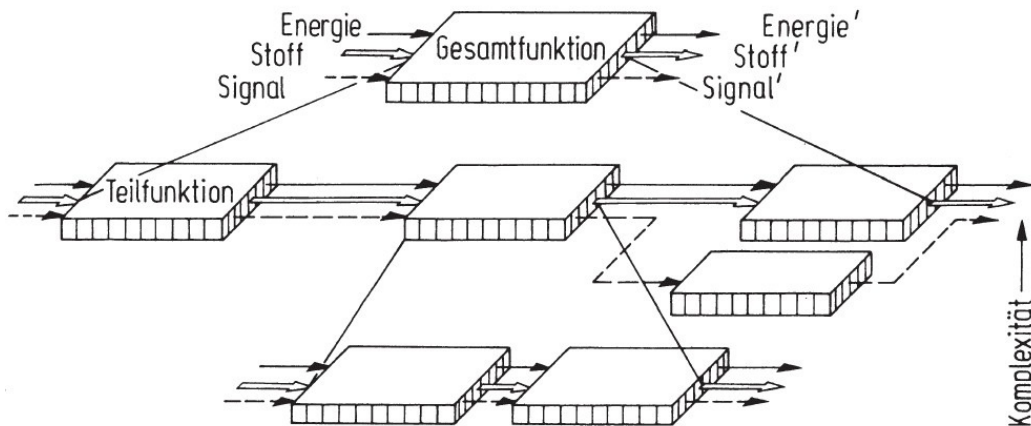


Abbildung 8: Funktionsstruktur [PAH-07]

2.1.3 Lösungsmethoden

Die Lösung technischer Aufgaben wird durch zu erreichende Ziele und durch einschränkende Bedingungen bestimmt. Die Erfüllung der technischen Funktion, ihre wirtschaftliche Realisierung und die Einhaltung der Sicherheit für Mensch und Umgebung können als generelle Zielsetzungen beim Lösen technischer Aufgaben angesehen werden. Die einschränkenden Bedingungen können durch die konkrete Aufgabe, den Stand der Technik, die wirtschaftliche sowie die allgemeine Situation gegeben sein. Die rechtzeitige Entwicklung marktfähiger Produkte ist ein Vorgehen zur Entwicklung guter Lösungen. Das ist nur realisierbar, wenn Konstrukteure über das notwendige Fachwissen hinaus methodisch-systematisch arbeiten können [PAH-07]. Eine Methode ist eine Vorgehensweise zur planmäßigen Lösung von Problemen [FEV-07].

Neue und komplexe Aufgabenstellungen werden im Allgemeinen leichter lösbar, wenn das zu lösende Gesamtproblem in Teil- und Einzelprobleme aufgegliedert wird, um für diese nach Teil- und Einzellösungen zu suchen. Die methodische Grundlage für dieses Vorgehen ist eine Strukturierung von Systemen in Teilsysteme und Systemelemente zum besseren Erkennen von Zusammenhängen und Wirkungen innerhalb des Systems und nach außen zur Umgebung. Der Aufgliederungsgrad des Systems richtet sich einerseits nach Zweckmäßigkeitserüberlegungen. Andererseits hängt der Aufgliederungsgrad vom Neuigkeitsgrad des Problems

und dem Kenntnisstand des Bearbeiters ab. Eine solche Aufgabenstrukturierung fördert auch die Übernahme bekannter und bewährter Teillösungen, das Erarbeiten alternativer Lösungen, eine Systematisierung zur Nutzung von Lösungskatalogen und Datenbanken, das Erkennen ganzheitlicher Zusammenhänge sowie das Einführen rationeller Arbeitsteilungen.

Während das Aufgliedern von Gesamtproblemen in Einzelprobleme das Finden von Teillösungen erleichtert, kann der anschließende Kombinationsprozess, bei dem die Teillösungen zur Gesamtlösung verknüpft werden, Probleme hinsichtlich der Verträglichkeit der Teillösungen untereinander mit sich bringen. Das Kombinationsschema Morphologischer Kasten nach [ZWI-69] hat sich als wichtiges Hilfsmittel für die Lösungszuordnung erwiesen. Der Morphologische Kasten ist ein zweidimensionales Ordnungsschema, in dem Teillösungen den zu erfüllenden Teilfunktionen zugeordnet werden.

Das Vorgehensprinzip der Problemaufgliederung und Lösungskombination kann auf den Ablauf bei der Produktentwicklung übertragen werden. Dieses Vorgehen ist auch Grundlage für den Rechnereinsatz beim Entwicklungsprozess, bei dem aus Datenbanken Einzel- bzw. Teillösungen abgerufen, bewertet und anschließend nach Verträglichkeitsregeln verknüpft werden.

Aufgabenstellungen, bei denen eine Problemaufgliederung zu Beginn des Lösungsprozesses nicht hilfreich wäre, sind beispielsweise aus den Produktbereichen Kraftfahrzeuge und Haushaltsgeräte. Bei diesen Produkten spielen das Gesamterscheinungsbild und die Ergonomie eine größere Rolle als konstruktive Details [SEE-83]. Aus diesem Grund ist es sinnvoller, zunächst ein ganzheitliches Lösungskonzept zu erarbeiten und daran die methodische Problemaufgliederung und die Lösungssuche anzuschließen.

Das Lösen von Aufgaben besteht im Grundsätzlichen in einer Analyse und einer Synthese. Analyse ist Informationsgewinnung und Zerlegen, Gliedern und Untersuchen von Eigenschaften einzelner Elemente und der Zusammenhänge zwischen ihnen. Dabei geht es um Erkennen, Definieren, Strukturieren und Einordnen. Synthese ist Informationsverarbeitung durch Bilden von Verbindungen zwischen Elementen mit neuen Wirkungen und Darstellen einer zusammenfassenden Ordnung. Synthese ist ein Vorgang des Suchens und Findens, der Kreation, sowie des Zusammensetzens und Kombinierens.

Beim methodischen Vorgehen müssen folgende Voraussetzungen erfüllt werden, die Motivation für die Lösung der Aufgabe sicherstellen, das Klarstellen von Rand- und Anfangsbedingungen, das Auflösen von Vorurteilen, das Suchen von Varianten und das Treffen von Entscheidungen. Die Lösungssuche wird durch Methoden unterstützt, die im weiteren Verlauf des Kapitels vorgestellt werden [DUB-05].

Der Lösungsprozess läuft in Arbeits- und Entscheidungsschritten vom Qualitativen immer konkreter werdend zum Quantitativen ab. Die Aufgabenstellung bewirkt eine Konfrontation mit Problemen und noch unbekanntem Realisierungsmöglichkeiten. Weitere allgemeingültige Stufen eines Lösungsprozesses sind die Informationsbeschaffung über die Aufgabenstellung, die Definition der wesentlichen Probleme, die Kreation der Lösungsideen, die Beurteilung der Lösungen in Hinblick auf die Ziele der Aufgabenstellung und die Entscheidung über das weitere Vorgehen [PAH-07]. Im Folgenden werden Methoden zur Lösungssuche für die Konstruktion und Entwicklung von Produkten vorgestellt. Die Methoden liegen den Kategorien in *Abbildung 9* zugrunde.

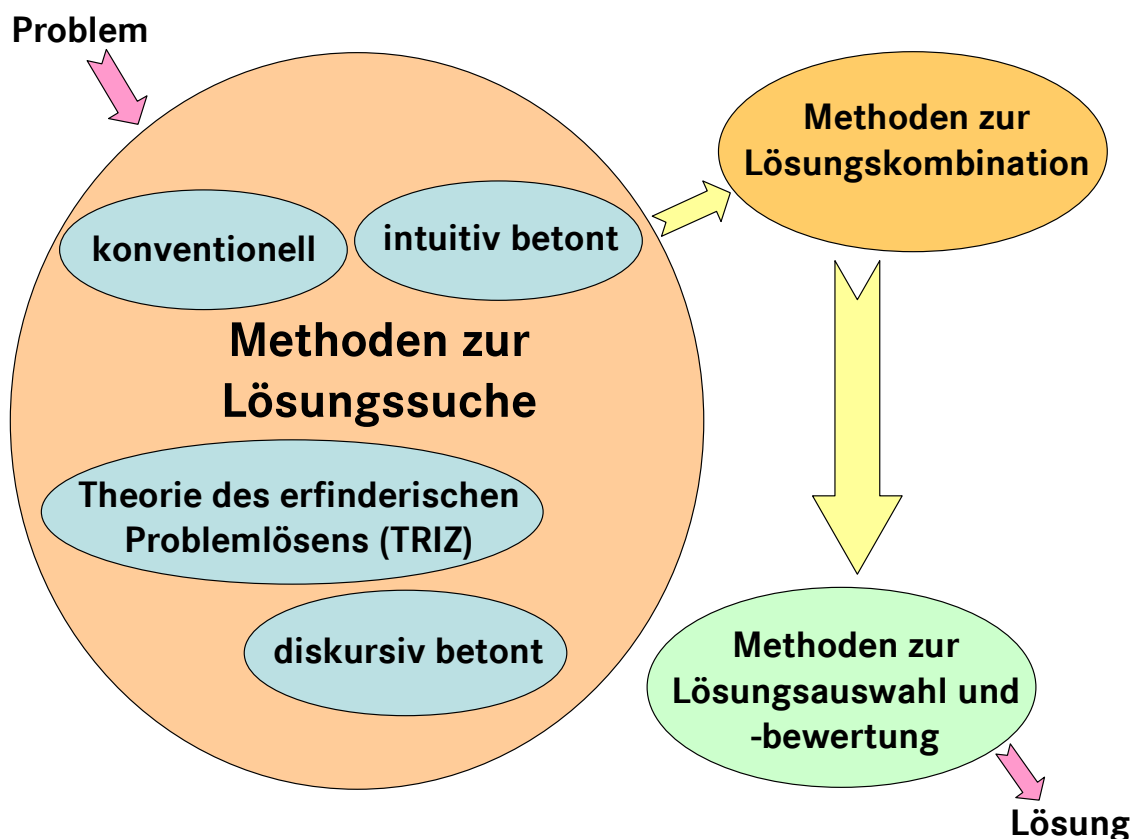


Abbildung 9: Methoden zur Lösungssuche in Anlehnung an [PAH-07]

Konventionelle Methoden: Eine wichtige Methode bei der Lösungssuche sind Grundlagen über den Stand der Technik. Diese Grundlagen können in der Kategorie konventionelle Methoden durch das Kollektionsverfahren in Form von Literatur- und Patentrecherchen geschaffen werden [KRA-87]. Ein weiteres Hilfsmittel ist die Analyse von natürlichen Systemen aus den Bereichen Bionik und Biomechanik, die zu übertragbaren Lösungsideen führen kann

[COI-89], [HER-63], [HIL-93], [KER-87]. Die Analyse bekannter technischer Systeme zählt zu den wichtigsten Hilfsmitteln, mit denen man schrittweise und nachvollziehbar zu neuen bzw. verbesserten Varianten bekannter Lösungen kommt [PAH-07]. Zur Lösungssuche ist auch die Übertragung eines vorliegenden Problems oder Systems auf ein analoges nützlich, beispielsweise durch Änderung der Energieart [BEN-70], [SCH-61], durch Erkennen des Systemverhaltens als Grundlage für die Modellierungs- und Simulationstechnik sowie durch Berücksichtigung von Ähnlichkeitsbetrachtungen. Messungen an bestehenden Systemen, Modellversuche unter Ausnutzung der Ähnlichkeitsmechanik und experimentelle Untersuchungen zählen dabei zu den wichtigsten Hilfsmitteln [ROD-91]. In ähnlicher Art stellt auch das Testen und daraus folgende Ändern von Software-Lösungen ein notwendiges Vorgehen bei der Lösungsentwicklung in dieser Methodenkategorie dar.

Intuitiv betonte Methoden: Die Lösungssuche durch intuitiv betonte Methoden stützt sich auf Ideenassoziation als Folge unbefangener Äußerungen von Partnern, Analogievorstellungen und gruppendynamische Effekte. Bei der Methode Brainstorming (engl.: Ideenfindung) wird beabsichtigt, die Voraussetzungen dafür zu schaffen, dass eine aufgeschlossene, vielseitig gebildete Gruppe von gedanklich flexibel orientierten Menschen unvoreingenommen Lösungsideen generiert, die ihrerseits Anregungsbasis zu weiteren Vorschlägen sind [OSB-57], [WIT-58]. Eine Weiterentwicklung der Methode Brainstorming ist die Methode 635 von [ROH-69], bei der nach der Aufgabenanalyse sechs Teilnehmer jeweils drei Lösungsansätze erzeugen, die im Anschluss von allen Gruppenmitgliedern einzeln weiterentwickelt werden. Die Galeriemethode nach [HEL-78] basiert auf dem Brainstorming, verbindet Einzelarbeit mit Gruppenarbeit und beinhaltet die Phasen Einführung, Ideenbildung I, Assoziation, Ideenbildung II und Selektion, in denen skizzenförmig dokumentierte Ideen weiterentwickelt und nach Erfolgsaussicht ausgewählt werden. Bei der Delphi-Methode werden Fachleute schriftlich nach Lösungsansätzen in Ideenerfragerunden befragt und um schriftliche Äußerungen ihrer Einfälle gebeten [DAL-63]. Synektik ist ein verwandtes Verfahren des Brainstorming mit dem Ziel, durch Analogien aus dem nichttechnischen bzw. dem halbtechnischen Bereich, die Lösungssuche zu unterstützen [GOR-61]. Die kombinierte Anwendung dieser Intuitiv betonten Methoden stellt einen größeren Erfolg als die einzelne Anwendung in Aussicht [PAH-07].

TRIZ: Die Theorie des erfinderischen Problemlösens TRIZ wurde von Genrich Altshuller entwickelt und befasst sich mit der methodischen Entwicklung innovativer Ideen und Produkte [KLE-02]. Der Schwerpunkt der TRIZ liegt in der frühen Produktentwicklungsphase, dem Planen, dem Klären der Aufgabenstellung und dem Konzipieren, in der die Methode für die Entwicklung allgemeiner technischer Systeme angewendet wird, insbesondere für die

Entwicklung von Produkten und verfahrenstechnischen Prozessen. Hauptmerkmal der Problemlösung mit TRIZ für eine gezielte Suche nach Problemlösungen, ist das Formulieren, Verstärken und Überwinden technischer und physikalischer Widersprüche in technischen Systemen unter Berücksichtigung von empirisch ermittelten Entwicklungsgesetzen aus Patentanalysen.

Die Methoden und Werkzeuge der TRIZ werden in die Kategorien Systematik, Wissen, Analogie und Vision unterteilt [HER-00]. Im Feld Systematik werden Methoden zur umfassenden Beschreibung der Aufgabenstellung und Werkzeuge zur Analyse und Synthese von Problemen und deren Lösungen zur Verfügung gestellt. Der Bereich Wissen enthält Effektkataloge für physikalische, chemische und geometrische Effekte sowie die Möglichkeiten der Internet- und Patentrecherche aufgrund des Standpunkts der TRIZ, dass für viele Probleme bereits Lösungswege erarbeitet wurden.

In der Kategorie Analogie werden mit Hilfe von 40 Innovativen Grundprinzipien, die den Kern der TRIZ darstellen, technische Widersprüche überwunden. Nach Altschuller können diese Widersprüche eines technischen Systems durch 39 Parameter eindeutig beschrieben werden. Die Überwindung dieser Widersprüche bzw. Probleme mit Unterstützung der Widerspruchsmatrix resultieren in einer innovativen Lösung. Der Visionsbereich betrachtet die Entwicklung einer Technologie, um beispielsweise Marktpotentiale für Produkte aufzudecken. Auf Grundlage von Evolutionsgesetzen für technische Systeme, die in acht Grundmustern der technischen Evolution gefasst sind, können die allgemeine technische Entwicklung und die Weiterentwicklung spezifischer Produkte charakterisiert werden. Um die Anwendung der TRIZ zu erleichtern, wurde der Algorithmus des erfinderischen Problemlösens ARIZ geschaffen [ORL-05], [ALT-98], [KLE-02], [HER-00].

Diskursiv betonte Methoden: Diskursiv betonte Methoden der Lösungssuche sind durch ein schrittweises, beeinflussbares sowie mitteilbares Vorgehen gekennzeichnet, das Intuition beinhalten kann, insbesondere zur Lösung von Einzelproblemen. Die systematische Untersuchung eines bekannten physikalischen Effekts mit mehreren zueinander in Beziehung stehenden Größen kann durch Verändern einer unabhängigen Veränderlichen bei gleichzeitigem konstant Halten der übrigen unabhängigen Veränderlichen zu verschiedenen Lösungen der abhängigen Veränderlichen führen. Durch dieses systematische Vorgehen kann ein Lösungsfeld auf Basis der unabhängigen Veränderlichen erschlossen werden, das zur Ermittlung einer optimalen Lösung der abhängigen hinsichtlich der betrachteten unabhängigen Veränderlichen genutzt werden kann. Das Zerlegen und Analysieren von bekannten physikalischen Wirkungen in Einzeleffekte und Beziehungen kann nach [ROD-91]

als zusätzliche Option zum Erlangen von neuen bzw. verbesserten Lösungen eingesetzt werden.

Eine weitere Möglichkeit des diskursiv betonten Vorgehens ist die systematische Lösungssuche durch Ordnungsschemata. Die Systematisierung und geordnete Darstellung von Informationen bzw. Daten erleichtert das Suchen nach weiteren Lösungen in bestimmten Richtungen und das Erkennen wesentlicher Lösungsmerkmale und Verknüpfungsmöglichkeiten. Der prinzipielle Aufbau von tabellenförmigen Ordnungsschemata besteht aus Zeilen und Spalten, in denen Lösungsparameter einander zugeordnet werden, die unter kategorischen Merkmalen zusammengefasst sind. Ein generelles Vorgehen zur Erstellung von Ordnungsschemata stammt von [DRE-75]. Bei vorheriger Analyse bekannter Lösungen oder Auswertung von Lösungsideen nach intuitiv betonten Methoden, lassen sich ebenfalls Lösungsmerkmale für ein Ordnungsschema ableiten, das dann sowohl zum Erkennen von Verträglichkeiten bei Lösungskombinationen und zur Erarbeitung eines breiten Lösungsfeldes hilfreich ist.

Desweiteren ist die Verwendung bekannter und bewährter Lösungen für spezielle konstruktive Aufgaben und Teilfunktionen in Form von Katalogen zur Lösungssuche geeignet. Kataloge können Informationen verschiedenen Inhalts und Lösungen unterschiedlichen Konkretisierungsgrades enthalten wie beispielsweise physikalische Effekte, Wirkprinzipien, prinzipielle Lösungen für komplexe Aufgabenstellungen, Maschinenelemente, Normteile oder Werkstoffe. Grundforderungen an Konstruktionskataloge sind nach [ROT-00] der systematische Aufbau, die ordnenden Gesichtspunkte und die Weiterentwicklung.

Methoden zur Lösungskombination: Gesamtfunktionen komplexer Aufgabenstellungen werden in Teilfunktionen gegliedert, um zu deren Erfüllung leichter Lösungen zu finden. Nach Vorliegen von Teillösungen müssen diese im Anschluss zur Gesamtlösung für das Gesamtproblem kombiniert werden. Aus der Verwendung der vorgestellten Methoden zur Lösungssuche ergeben sich in der Regel Lösungskombinationen. Darüber hinaus gibt es spezielle Methoden zur Lösungskombination, die eine anschauliche und eindeutige Kombination von Teillösungen unter Berücksichtigung der beteiligten Effekte, Größen und geometrischen sowie stofflichen Merkmale gestatten. Bei der Kombination von informationstechnischen Lösungen sind die zutreffenden Merkmale zu finden und einzusetzen. Das Hauptproblem dieser Kombinationsschritte ist das Erkennen von Verträglichkeiten zwischen den zu verbindenden Teillösungen zum Erreichen eines störungsfreien Energie-, Stoff- bzw. Signalflusses sowie von Kollisionsfreiheit in geometrischer Hinsicht bei mechanischen Systemen. Bei Systemen der Informationstechnik sind die Verträglichkeitsbedingungen des Informationsflusses zu gewährleisten. Ein weiteres

Problem liegt bei der Auswahl technisch und wirtschaftlich günstiger Kombinationen aus dem Feld der theoretisch möglichen.

Zur systematischen Kombination eignet sich das als morphologischer Kasten bezeichnete Ordnungsschema nach [ZWI-71], in dem die Teilfunktionen und die dazugehörigen Lösungen in Zeilen eingetragen sind. Durch Auswahl einer Teillösung für jede Teilfunktion ergibt sich eine Kombination von Teillösungen, die die Gesamtlösung bildet. Das Problem dieser Kombinationsmethode ist die Entscheidung, welche Lösungen untereinander verträglich und kollisionsfrei sind. Das theoretisch mögliche Lösungsfeld muss folglich auf ein realisierbares reduziert werden.

Der Einsatz von numerischen Methoden ist eine weitere Möglichkeit zur Lösungskombination, der nur angestrebt werden sollte, wenn wirklich Vorteile daraus entstehen. Grundsätzlich müssen dazu die Merkmale bzw. Eigenschaften der Teillösungen bekannt sein, die mit den entsprechenden Eigenschaften der zu verknüpfenden Nachbarlösung korrespondieren sollen. Um das zu erreichen, ist es notwendig, dass die Eigenschaften eindeutig und in quantifizierbaren Größen vorliegen. Mathematische Elementverknüpfungen können bei Vorliegen rein logischer Funktionen durch Boolesche Algebra durchgeführt werden [FÖL-67], [ROD-91].

Besonders in der Konzeptphase, bei niedrigem Konkretisierungsgrad, sind oft nur unvollständige quantitative Angaben von Eigenschaften und Wirkprinzipien bekannt, so dass eine mathematische Kombination mit gleichzeitiger Optimierung nicht durchführbar ist oder sogar zu falschen Ergebnissen führt. Mit steigendem Konkretisierungsgrad lassen sich die Angaben über physikalische Beziehungen und geometrische Strukturen in geeigneten mathematischen Modellen zur Verträglichkeitsprüfung verwirklichen. Für physikalische Vorgänge höherer Komplexität werden solche Zuordnungen jedoch oft mehrdeutig, so dass der Konstrukteur zwischen den Varianten entscheiden muss. Aus diesem Grund bietet sich ein kombinierter Prozess aus mathematischen und kreativen Teilschritten an. Es wird mit steigendem Konkretisierungsgrad einfacher, quantitative Verknüpfungsregeln aufzustellen, andererseits steigt die Anzahl der sich gegenseitig beeinflussenden Eigenschaften und mit ihnen die Anzahl der Verträglichkeitsbedingungen sowie die der Optimierungskriterien, so dass der numerische Aufwand zur Lösungskombination bei gleichzeitiger Durchführung von Verträglichkeitsbetrachtungen sehr hoch wird.

Beim methodischen Vorgehen ist ein möglichst breites Lösungsfeld erwünscht, in dem die denkbaren ordnenden Gesichtspunkte und Merkmale berücksichtigt sind. Die daraus hohe, aber praktisch nicht verarbeitbare Anzahl von Lösungen muss so früh wie möglich im Verlauf des Konstruktionsprozesses durch die Tätigkeiten Ausscheiden und Bevorzugen

eingeschränkt werden, ohne geeignete Wirkprinzipien zu verwerfen [PAH-74]. Dazu können Auswahl- und Bewertungsmethoden verwendet werden.

Prinzipiell sollte ein Auswahlvorgang nach jedem Arbeitsschritt, bei dem Varianten auftreten, beispielsweise mit Hilfe einer Auswahlliste, durchgeführt werden. Weiterverfolgt werden, sollten die Varianten, die mit der Aufgabe bzw. untereinander verträglich sind, die die Forderungen der Anforderungsliste erfüllen und eine Realisierungsmöglichkeit hinsichtlich technischer Gesichtspunkte mit zulässigem Aufwand erwarten lassen. Die als verfolgungswürdig eingestuften Lösungsvarianten werden für eine abschließende Beurteilung ihres technischen, sicherheitlichen, ökologischen und wirtschaftlichen Wertes weiter konkretisiert.

Methoden zur Lösungsauswahl und –bewertung: Die abschließende Beurteilung geschieht durch Bewertungsverfahren zur Vorbereitung grundsätzlicher Entscheidungen für eine bestimmte Lösungsrichtung in der Konzept- bzw. Entwurfsphase [ROO-90]. Eine Bewertung soll den „Wert“ bzw. den „Nutzen“ einer Lösung in Bezug auf vorher gestellte Ziele ermitteln. Als Bewertungsmethoden haben sich die Nutzwertanalyse der Systemtechnik nach [ZAN-70] und die technisch-wirtschaftliche Bewertung nach der Richtlinie [VDI-3], die auf [KES-51] zurückgeht, durchgesetzt.

Die Vorgehensweise beider Methoden ist folgendermaßen. Zuerst erfolgt das Erkennen der voneinander unabhängigen Bewertungskriterien auf Basis der Zielvorstellung und bei Negation von Mindestforderungen und Wünschen. Daraufhin ist die Bedeutung (Gewichtung) der erkannten Bewertungskriterien für den Gesamtwert zu untersuchen. Nach [ROT-96] und [BIR-75] können diese Gewichtungen bereits den Forderungen der Anforderungsliste zugeordnet werden, was jedoch aufgrund mangelnder Konkretisierung nicht immer zweckmäßig ist. Nach diesen Schritten sind die Eigenschaftsgrößen den Bewertungskriterien zuzuordnen. Bei der Nutzwertanalyse werden diese Eigenschaftsgrößen als Zielgrößen bezeichnet und mit den Bewertungskriterien (Zielkriterien) in einer Zielgrößenmatrix abgebildet. In der VDI-Richtlinie 2225 wird eine solche tabellarische Zusammenstellung der objektiven Eigenschaftsgrößen nicht vorgesehen. Die Bewertung wird unmittelbar nach Aufstellung der Bewertungskriterien durchgeführt.

Im nächsten Schritt erfolgt die eigentliche Bewertung durch das Zuordnen von Wertvorstellungen zu den Eigenschaftsgrößen. Um subjektive Einflüsse gering zu halten, sollte die Bewertung durch eine Gruppe Kriterium nach Kriterium für alle Varianten durchgeführt werden. Das Ergebnis sind Teilwerte hinsichtlich jedes Kriteriums für alle Lösungsvarianten, aus denen die Gesamtwerte für alle Varianten gebildet werden. Nach Vorliegen der Gesamtwerte und deren Bezug auf ihren maximal möglichen Gesamtwert kann

der Variantenvergleich, getrennt nach technischer und wirtschaftlicher Wertigkeit, durchgeführt werden. Vor der Entscheidung für eine bzw. mehrere Varianten sind Beurteilungsunsicherheiten abzuschätzen, Schwachstellen zu lokalisieren und gegebenenfalls Kostenbetrachtungen durchzuführen.

2.2 Fertigungsverfahren

Produktion ist die Erzeugung von Sachgütern und nutzbarer Energie sowie die Erbringung von Dienstleistungen durch Kombination von Produktionsfaktoren. Produktionsfaktoren sind alle zur Erzeugung verwendeten Güter und Dienste. Aus volkswirtschaftlicher Sicht besteht der Zweck der Produktion im Überwinden der Knappheit von Gütern und Diensten zur Befriedigung menschlicher Bedürfnisse [GUT-83].

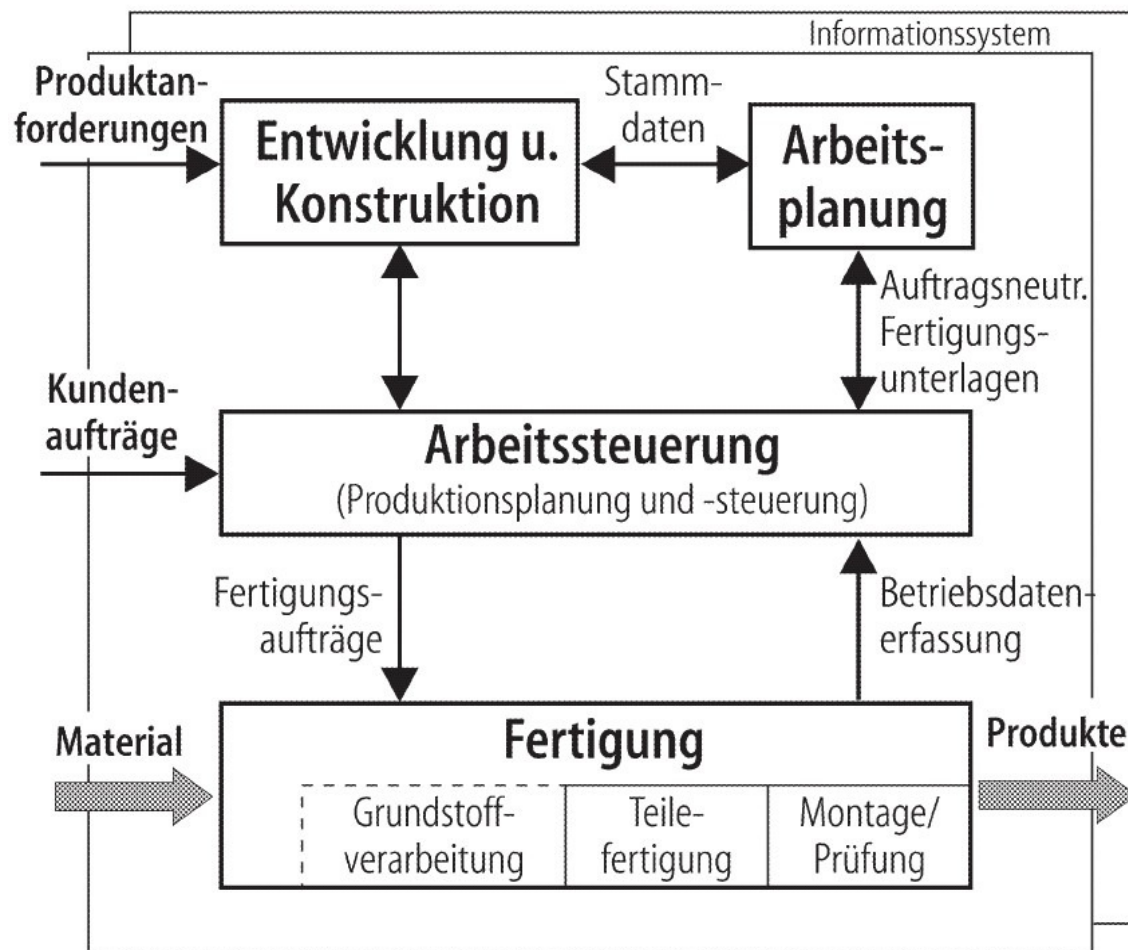


Abbildung 10: Funktionen und Bereiche der Produktion [DUB-05]

Unter einem Prozess versteht man eine definierte oder wahrscheinliche Aufeinanderfolge von Zuständen eines Systems in Abhängigkeit von den Vorbedingungen und den äußeren Einflüssen [PRO-07]. Produktionsprozesse sind aus ökonomischer Sicht materielle Transformationsprozesse mit Wertschöpfung, aus technischer Sicht geplante Materialverarbeitung, aus wirtschaftlicher Sicht geplante Wertschöpfung und aus informationstechnischer Sicht geplante Datenverarbeitung. Von Bedeutung sind nicht nur material- und energieorientierte Fragestellungen zum Produktionsprozess, sondern auch die informationsorientierten Phasen Produktentwicklung, Produktionsplanung, Produktionssteuerung und Qualitätssicherung. Die Aufgaben der Produktion können in Funktionen und Bereiche untergliedert werden wie sie in *Abbildung 10* dargestellt sind.

Durch eine organisatorische Gliederung können die Produktionsprozesse in die Strukturen Produktionsorganisation, Produktionstechnik und Produktionsinformatik gegliedert werden. Die Produktionsorganisation leistet die Analyse, Planung und Bewertung der Produktionsprozesse. Die Aufgaben der Produktionsinformatik ergeben sich aus den Erfordernissen rechnerunterstützter Produktionssysteme. Aufgabe der Produktionstechnik ist die Anwendung geeigneter Produktionsverfahren und Produktionsmittel zur Durchführung von Produktionsprozessen bei möglichst hoher Produktivität.

Die Produktionstechnik gliedert sich in die Bereiche Produktionstechnologie, Produktionsmittel und Produktionslogistik. Die Produktionstechnologie ist als Verfahrenskunde der Gütererzeugung die Lehre von der Umwandlung und Kombination von Produktionsfaktoren in Produktionsprozessen unter Nutzung materieller, energetischer und informationstechnischer Wirkflüsse. Produktionsmittel sind beispielsweise Anlagen, Maschinen, Vorrichtungen und Werkzeuge. Zur Produktionsmittelentwicklung gehören eine spezielle, zweckbezogene Konstruktionslehre und die Erarbeitung geeigneter Programmiersysteme. Die Produktionslogistik wird in die Bereiche Beschaffung, Produktion und Absatz gegliedert und beinhaltet den Transport und die Lagerung von Gütern.

Die Produktionstechnik umfasst den gesamten stofflichen Prozess der Gütererzeugung. Sie beginnt als Teil des Materialkreislaufs im Bereich der Urproduktion durch Gewinnungs- und Aufbereitungstechnik mit der Erzeugung von Rohstoffen. Die Rohstoffe werden durch die Verfahrenstechnik zu Gebrauchsstoffen oder Werkstoffen umgewandelt. Durch Fertigungs- und Montagetechnik erfolgen die Formgebung der Werkstoffe zu Bauteilen und ihre Kombination zu gebrauchsfertigen Gütern.

Fertigung ist die Herstellung von Bauteilen mit vorgegebenen Werkstoffeigenschaften und Abmessungen sowie das Fügen solcher Bauteile zu Erzeugnissen. Die Fertigungslehre beschäftigt sich mit der Formgebung und den stofflichen Zusammenhalten. [HUE-96]. Die

Fertigungstechnik ist wie die Verfahrenstechnik und die Energietechnik in die Produktionstechnik einzuordnen [DUB-05].

Als ein Gebiet der Produktionstechnik ist die Fertigungstechnik die Lehre der wirtschaftlichen Herstellung geformter Werkstücke aus gegebenen Ausgangsmaterialien nach vorgegebenen geometrischen Größen und deren Zusammenbau zu funktionsfähigen Erzeugnissen. Arbeitsfeld der Fertigungstechnik ist das Entwickeln, Weiterentwickeln und Anwenden der Fertigungsverfahren [FET-07]. Die Fertigungstechnik bewirkt Formgebung sowie Eigenschaftsänderungen von Stoffen. Es können abbildende, kinematische, fügende und beschichtende Formgebung unterschieden werden [HUE-96].

Verfahren sind geregelte, in Verfahrensschritte zerlegbare, für Beobachter transparente und wiederholbare Abläufe [FEV-07]. Als Fertigungsverfahren bezeichnet man alle Prozesse der Produktionstechnik, bei denen Produkte aus Gütern geschaffen werden. Die Fertigungstechnik definiert Fertigungsverfahren als Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern. Diese Körper können Halbzeuge oder Bestandteile von technischen Gebilden sein [FFV-07].

Schaffen der Form	Ändern der Form				Ändern der Stoffeigenschaften
Zusammenhalt schaffen	Zusammenhalt beibehalten	Zusammenhalt vermindern	Zusammenhalt vermehren		Stoffeigenschaft ändern
Urformen	Umformen	Trennen	Fügen	Beschichten	

Tabelle 1: Hauptgruppen der Fertigungsverfahren nach DIN 8580

Der Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 liegt als leitendes Merkmal der Begriff des Zusammenhalts zugrunde, der sowohl den Zusammenhalt von Teilchen eines festen Körpers als auch den Zusammenhalt der Teile eines zusammengesetzten Körpers bezeichnet. Unter diesen Gesichtspunkten lassen sich die Fertigungsverfahren wie in *Tabelle 1* gezeigt unterteilen.

2.2.1 Arbeitsvorbereitung

Die Arbeitsvorbereitung umfasst die Gesamtheit aller Maßnahmen einschließlich der Erstellung aller erforderlichen Unterlagen und Betriebsmittel, die durch Planung, Steuerung und Überwachung die Fertigung von Erzeugnissen entsprechend der Produktionsstrategie gewährleisten [HAN-68]. Die Arbeitsvorbereitung wird unterteilt in Arbeitsplanung und Arbeitssteuerung.

Die Arbeitsplanung beinhaltet alle einmalig zu treffenden Maßnahmen der Gestaltung des Erzeugnisses, die Fertigungsvorbereitung, die Planung sowie die Bereitstellung der Betriebsmittel und schließt mit der Freigabe der Fertigung ab. Die Arbeitsplanung kann nach [REF-85] weiter in die Arbeitsablaufplanung und die Arbeitssystemplanung unterteilt werden. Aufgabe der Arbeitsablaufplanung ist unter anderem das Erzeugen und Verwalten von Steuerungsprogrammen für numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen, die NC-Programmierung.

Werkzeugmaschinen sind in Anlehnung an DIN 8590 Teilsysteme von Fertigungsanlagen. Nach DIN 69651 werden Werkzeugmaschinen als mechanisierte und mehr oder weniger automatisierte Fertigungseinrichtungen definiert, die durch Relativbewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück eine vorgegebene Form oder Veränderung am Werkstück erzeugen. Einzelmaschinen und Mehrmaschinensysteme bestehen aus einem bzw. mehreren Maschinengrundsystemen sowie weiteren Funktions- und Hilfssystemen. Die für die Realisierung der Grundfunktionen notwendigen Baugruppen Antriebe, Gestellbauteile, Werkzeugträger und Werkstückträger bilden das Maschinengrundsystem der Werkzeugmaschinen.

Um Relativbewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück zu ermöglichen, haben Werkzeugmaschinen bewegliche Achsen mit translatorischen bzw. rotatorischen Freiheitsgraden. Zur Koordination der Relativbewegungen der Achsen werden Steuerungen eingesetzt. Steuerungen können somit als Komponenten von Werkzeugmaschinen angesehen werden.

Steuerung ist ein Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen die Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen (DIN 19226). Die Steuerung bildet den unverzichtbaren Bestandteil einer Maschine, um einen Arbeitsprozess nach vorgegebenem Programm selbständig ablaufen zu lassen.

Werden Maschinenfunktionen wie Bewegungen oder Schaltvorgänge über einzelne Schritte eines gespeicherten Programms aufgerufen, handelt es sich um eine Programmsteuerung

[STU-81]. Programmsteuerungen verarbeiten Programmanweisungen zu einzelnen Funktionsaufrufen und koordinieren den Ablauf der Funktionen selbständig. Ist der Steuerungszustand eine Funktion der Zeit, dann liegt eine zeitgeführte Steuerung vor. Alle anderen Programmsteuerungen sind prozessgeführt. Bei diesem Steuerungstyp sind die Weiterschaltbedingungen zum nächsten Programmschritt vom Erreichen definierter Werte der Prozessgrößen wie Weg, Temperatur oder Kraft abhängig. Für die Steuerung von Werkzeugmaschinen kommen häufig Wegplansteuerungen zur Anwendung, deren bekannteste Variante die numerische Steuerung ist [WEC-89], [HEN-89]. Die Umsetzung der per Programm aufgerufenen Funktionen einer Werkzeugmaschine erfolgt über eine Funktionssteuerung.

Das Programm einer Steuerung beinhaltet sämtliche Anweisungen und Vereinbarungen für die Signalverarbeitung, durch die eine zu steuernde Werkzeugmaschine aufgabengemäß beeinflusst wird. Programme können in unveränderbarer ggf. austauschbarer Form oder in veränderbarer, austauschbarer und freiprogrammierbarer Form vorliegen. Zur technischen Realisierung dieser Programmformen werden in der DIN 19237 Verbindungsprogrammierte Steuerungen (VPS) und Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) unterschieden. Große Bedeutung kommt für industrielle Anwendungen dem hierarchisch organisierten prozessgeführten Steuerungssystem zu, das Einzel-, Gruppen-, Leitsteuerung und Steuerungsebenen in Fertigungsanlagen beinhaltet.

Unter NC-Programmierung wird die Erstellung von werkstückabhängigen Steuerdaten für numerische Steuerungen verstanden. Die Eingabe der Steuerinformationen erfolgt in Form von Zahlen in einem Binärcode. Die Zahlen können direkt von der Steuerung verarbeitet werden. Als Ausgangsdaten für die Programmerstellung dienen Konstruktionszeichnungen oder CAD-Daten [SPU-84]. Das Ergebnis ist das NC-Programm nach [DIN-2]. Charakteristische Eingabegrößen bei der NC-Programmierung sind Zahlen für die Beschreibung der Werkstückgeometrie, die Weginformation, und zahlenförmige Angaben über Werkzeuge und Arbeitsgeschwindigkeiten, die Schaltinformationen. Die Bedeutung der Zahlen wird durch einen vorangestellten Adressbuchstaben definiert [DIN-2]. Jede Steuerung, bei der die Weginformationen durch Zahlen eingegeben werden, ist eine numerische Steuerung, unabhängig vom Eingabegerät und Datenspeicher [BIN-79], [SCH-79], [WAL-87], [SPU-83].

NC-Programme können on line, direkt an der Maschine durch manuelles Programmieren und off line in der Phase Arbeitsvorbereitung erstellt werden [STO-84]. Nach einem Arbeitsplan wird das NC-Programm als Reihenfolge von Sätzen aufgestellt, wobei jeder Satz eine Arbeitsanweisung enthalten muss und eine variable Länge haben kann. Diese Informationen

werden durch Worte beschrieben, wobei jedes Wort aus einem Adressbuchstaben und einer Ziffernfolge besteht.

Trotz weitgehender Normung sind Programme nach [DIN-2] im Allgemeinen auf gleichartigen NC-Maschinen unterschiedlicher Hersteller nicht lauffähig, da zwar die Bedeutung der Adressbuchstaben eindeutig ist, jedoch die Bedeutung der Ziffern nicht in jedem Fall. Man nennt die Zuordnung der physikalischen Größen zu den Adressbuchstaben „Maschinencode“. Bei Verwendung einer höherwertigen fertigungstechnischen Programmiersprache wie beispielsweise EXAPT wird die Bearbeitungsaufgabe zuerst durch ein Teileprogramm strukturiert und anschließend mit Hilfe eines Processors (Übersetzungsprogramm) in CLDATA-Code (cutter location data) übersetzt [DIN-1]. Dabei verarbeitet der Processor die geometrischen Informationen und ergänzt unter Zuhilfenahme von Werkstoff- und Werkstückdateien die technologischen Bearbeitungsvorschriften. Ein Postprocessor passt den maschinenunabhängigen CLDATA-Code an eine spezielle NC-Maschine an, indem Verfahr- und Schaltbefehle in der festgelegten Reihenfolge und Codierung erzeugt werden. Es handelt sich bei diesem Verfahren um rechnerunterstützte NC-Programmierung.

Die NC-Programmierschnittstelle nach [DIN-2] ist für die Abbildung besonderer Entwicklungen wie beispielsweise Hochgeschwindigkeitsbearbeitung oder Splineverarbeitung, in ihrer Struktur bzw. ihrem Informationsgehalt nicht mehr ausreichend [PRI-97]. Das führte zu herstellerspezifischen Erweiterungen und zur Entwicklung neuer Schnittstellen, wie beispielsweise den Spline-Schnittstellen. Unter [ISO-3] befindet sich derzeit eine STEP-basierte NC-Programmierschnittstelle in der Vorbereitung, die in Zukunft die DIN 66025 ablösen soll. Diese Schnittstelle ist nicht nur eine Datenschnittstelle, sondern ein Informationsmodell zur hierarchisch strukturierten, Feature-orientierten Beschreibung der Bearbeitungsaufgabe. Den Features werden ausführbare Bearbeitungsschritte zugeordnet. Mit der ISO 14649 sollen vorhandene Anforderungen erfüllt werden, wie z.B. eine bessere Strukturierbarkeit der NC-Programme durch eine direkte Verknüpfung von Geometrie und Technologie, eine durchgängige Feature-Verarbeitung von der Konstruktion bis zur Fertigung sowie die Möglichkeit zur Rückübertragung von modifizierten Steuer- oder ermittelten Prozessdaten in vorgelagerte Werkstattbereiche.

Die programmierten und in einem Datenspeicher eingegebenen Steuerdaten werden in der numerischen Steuerung zu Lagesollwerten für die einzelnen Achsen verarbeitet oder als Schaltbefehle ausgegeben. Die kontinuierliche Bewegung in mehreren Achsen wird durch fortwährende, mit dem Prozess schritthaltende, taktsynchrone Ausgabe getrennter Lagesollwerte erreicht. Die Lagesollwerte jeder Achse werden mit dem jeweiligen Lageistwert verglichen. Aus der Lageregelabweichung wird durch Multiplikation mit einem in allen Achsen

gleichen Faktor eine Sollgeschwindigkeit gebildet. Unterschiedliche Lagesollwerte der einzelnen Achsen führen zu unterschiedlichen Lageregelabweichungen, die als Schleppabstand bezeichnet werden, und damit zu unterschiedlichen Geschwindigkeiten, wie sie zum Fahren verschiedener Kurswinkel erforderlich sind.

Die Relativbewegung zwischen Werkzeug bzw. Messzeug und Werkstück erfolgt bei bahngesteuerten NC-Maschinen durch die überlagerte Bewegung von mindestens zwei Achsen [PRI-86]. Der regelungstechnische Aufbau einer lagegeregelten Achse besteht aus dem Antrieb als System 1. Ordnung, dem Lageregler mit proportionalem Anteil (P-Regler) und einem Geschwindigkeitsverstärkungsfaktor [STU-81]. Die Antriebszeitkonstante gibt die mögliche Geschwindigkeitsverstärkung vor und wirkt sich erst bei Beschleunigungsvorgängen direkt auf den Schleppabstand aus. Konturverzerrungen bei der Geradenfahrt können vermieden werden, wenn die Geschwindigkeitsverstärkungsfaktoren und die Antriebskonstanten in beiden Achsen gleich sind oder wenn schleppabstandsfrei gefahren wird. Unter diesem Aspekt wird in neueren Steuerungen der Schleppabstand durch Vorsteuerungsverfahren kompensiert [PRI-89].

Bei Verwendung von Schrittmotorantrieben werden aus Lagesollwerten Impulse für Schrittmotoren generiert. Die Errechnung der Lagesollwerte aus den programmierten Steuerdaten erfolgt nach festen Rechenregeln und wird als Interpolation bezeichnet. Sinn der Interpolation ist die Reduzierung der Steuerdatenmenge auf ein hinreichendes Maß, um beliebige Werkstückkonturen aus einfachen Geraden-, Kreis- oder Parabelschnitten zusammensetzen.

Für die meisten Beschreibungen von Bahnkurven genügen Geraden- und Kreisinterpolationen. Die eingegebenen Steuerdaten sind Stützpunkte, zwischen denen vom Interpolator Zwischenwerte auf diesen Kurven so errechnet werden, dass etwa alle 1 bis 5 ms ein Lagesollwert in jeder Achse ausgegeben wird. Bei der Parabel- oder Splineinterpolation wird durch die angegebenen Punkte eine Ausgleichskurve gelegt. Die durch die Lageführungsgrößen erzeugte Bahn ist zum Grossteil von dem Interpolationsverfahren, dem Interpolationsraster und dem Interpolationsberechnungsverfahren abhängig. Die direkte oder rekursive Funktionsberechnung sind heute übliche Interpolationsberechnungsverfahren mit konstanten Zeitrastern. Vor der Interpolation sind in der Regel noch Korrekturrechnungen wie Koordinatentransformation sowie Werkzeuglängen- und Werkzeugradiuskorrektur durchzuführen. Schaltinformationen werden in der numerischen Steuerung gespeichert und zeitgerecht an die Speicherprogrammierte Steuerung als Funktionssteuerung ausgegeben.

Zerlegt man die Funktionen einer numerischen Steuerung in funktionsorientierte Einheiten, so stellen die folgenden vier grundlegenden Aufgabenstellungen den

Mindestumfang dar. Zum Mindestumfang zählen die Mensch-Maschine Kommunikation, die Verwaltung, Aufbereitung und Verteilung der NC-Daten, die Technologiedatenverarbeitung sowie die Geometriedatenverarbeitung. In *Abbildung 11* werden die vier grundlegenden Aufgabenstellungen exemplarisch am Informationsfluss des numerischen Steuerungssystems einer Drehmaschine gezeigt.

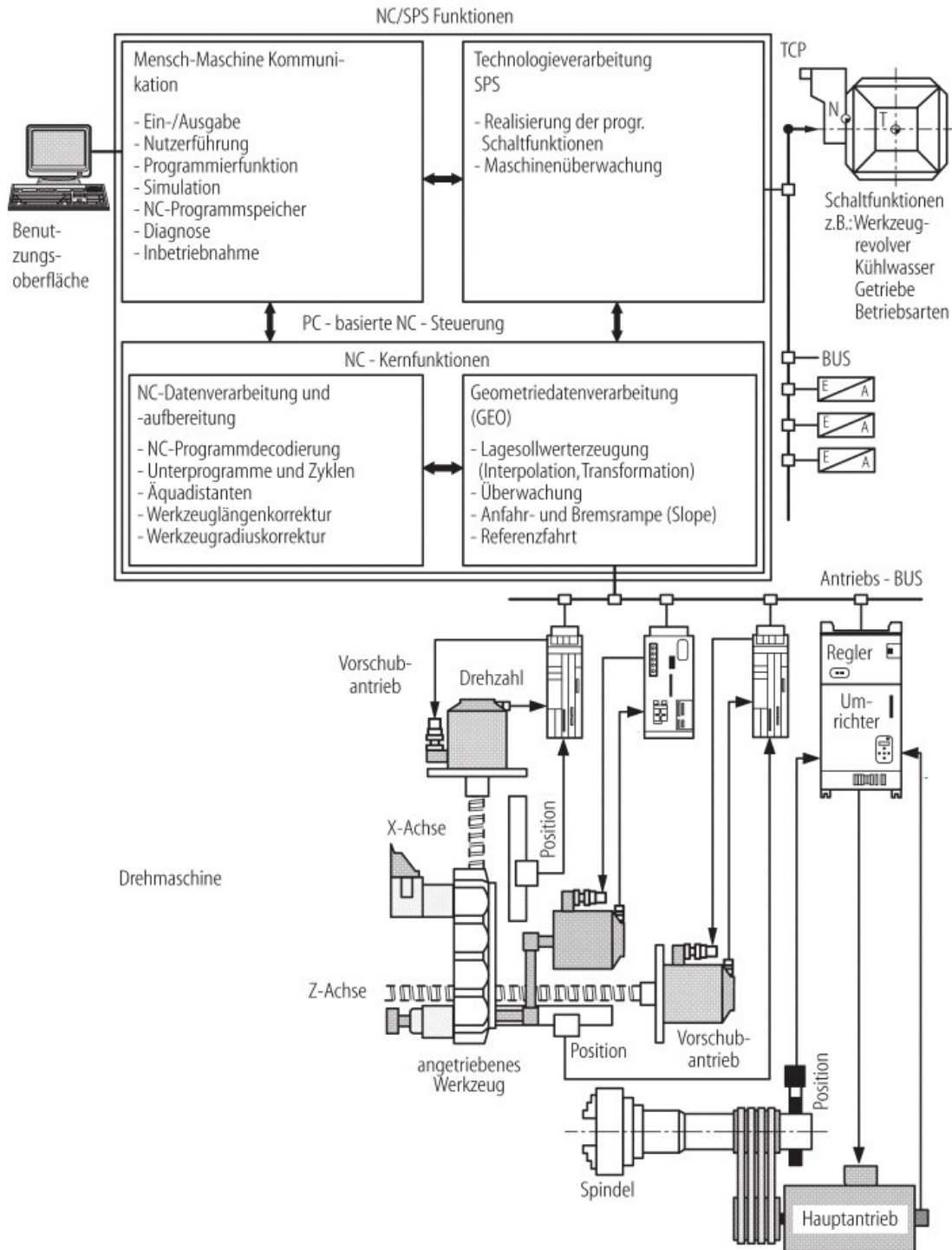


Abbildung 11: Informationsfluss in einem NC-Steuerungssystem [HUE-96]

Aus geometrischen Eingabeinformationen werden in der numerischen Steuerung Lagesollwerte für die einzelnen Achsen der gesteuerten Anlage gebildet. Anhand der kinematischen Abläufe werden die drei Steuerungsarten Punktsteuerung, Streckensteuerung und Bahnsteuerung unterschieden [SPU-83]. Bei der Punktsteuerung kann der durch den Sollwert definierte Punkt auf beliebigen Wegen angelaufen werden, da das Werkzeug während des Einfahrens nicht im Eingriff ist. Bei der Streckensteuerung kann dagegen das Werkzeug beim Verfahren im Eingriff sein. Bahnsteuerungen als typische Steuerungen von Werkzeugmaschinen sind bei der Bearbeitung beliebiger zwei- oder mehrdimensionaler Kurven notwendig, wobei die Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug stetig nach Größe und Richtung veränderlich ist.

Die Programmierung der Geometrie erfolgt üblicherweise in den Koordinaten x , y , z des kartesischen Koordinatensystems. Sind die Achskoordinaten mit diesen Hauptkoordinaten nicht identisch, so ist vom Steuerungsrechner eine entsprechende Transformation vom Raum- zum Achskoordinatensystem durchzuführen, die im Allgemeinen einer Matrizenoperation entspricht, im Interpolationstakt erfolgen sollte und für mehrachsige Maschinen sehr rechenintensiv ist.

Positionsmesssysteme bei NC-Maschinen dienen dem Erfassen einer Strecke in Form von analogen geometrischen Größen und dem Vorhalten dieser Größen als digitalen Positionswert für den Lageregelkreis. Durch die Genauigkeit der Positionsmesssysteme wird die Fertigungsqualität einer Maschine bestimmt. Von besonderer Bedeutung sind bei Positionsmesssystemen das Auflösungsvermögen, die Genauigkeit, die Empfindlichkeit gegen äußere Einflüsse und die Integrierbarkeit in die Systeme von Werkzeugmaschinen. Regelungssysteme lage geregelter Achsen sind prinzipiell kaskadenförmig mit den Bestandteilen Stromregler, Geschwindigkeitsregler und Lageregler von innen nach außen aufgebaut.

2.2.2 Urformen

Urformen ist das Fertigen eines festen Körpers aus formlosem Stoff durch Schaffen des Zusammenhalts (DIN 8580). Das Urformen dient also dazu, aus einem zu verarbeitenden Werkstoff in formlosen Zustand einem Teil erstmals eine Gestalt zu geben. Formlose Stoffe sind unter anderem Gase, Flüssigkeiten, Pulver, Fasern, Späne, Granulate, Lösungen,

Schmelzen. Urformen kann in drei Kategorien der Ähnlichkeit bezüglich der Weiterverarbeitung zur endgültigen Gestalt eingeteilt werden (*Abbildung 12*).

Die Fertigung von Formteilen aus metallischen Werkstoffen kann in der Gießereiindustrie der mittleren Kategorie und in der Pulvermetallurgie der rechten Kategorie in *Abbildung 12* zugeordnet werden. Die wirtschaftlichen Vorteile durch die Anwendung dieser Urformverfahren begründen sich in geringen Weiterverarbeitungsauwendungen, großen Gestaltungsfreiheitsräumen, hohen Werkstoffbandbreiten, in einer günstige Material- und Energiebilanz [KET-98] sowie in einer kontinuierlichen Verbesserung der Erzeugnismerkmale auf Basis kontinuierlicher Weiterentwicklung dieser Urformverfahren.

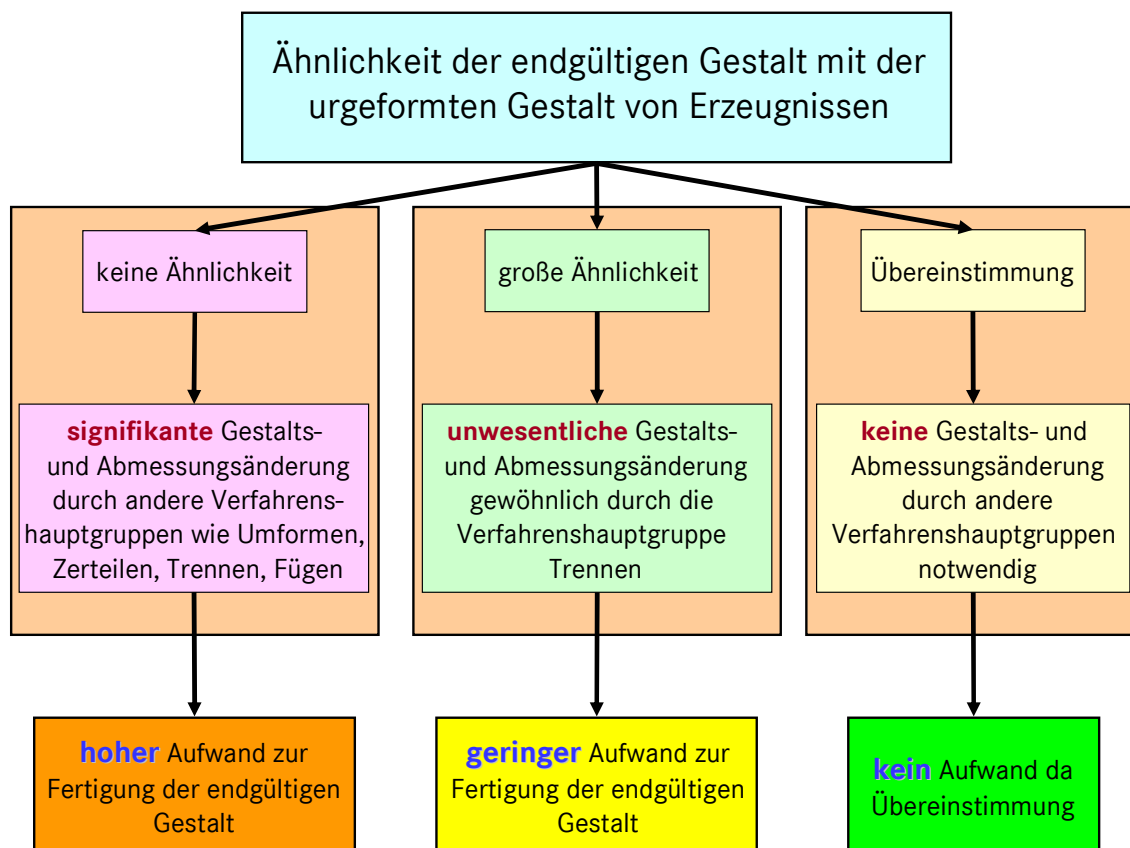


Abbildung 12: Weiterverarbeitungsauwand beim Urformen nach [DUB-05]

In *Abbildung 13* wird das Verfahrensprinzip des Urformens gezeigt. Beim Urformen von metallischen Werkstoffen aus dem flüssigen Zustand werden die Ausgangsmaterialien wie Roheisen, Schrott, Ferrolegierungen, Primär- und Sekundärmetalle in einem metallurgischen Schmelzofen durch Wärmezufuhr geschmolzen. Aufgrund der häufig örtlichen Trennung von

Schmelzöfen und Urformwerkzeugen wird die Schmelze durch Transportgefäße zu den Urformwerkzeugen, den Formen, transportiert und vergossen.

Das Urformwerkzeug enthält einen Hohlraum, die Kavität, der unter Berücksichtigung des Schwindmaßes in den meisten Fällen der Gestalt des zu fertigenden Produkts, dem Rohteil, entspricht. Desweiteren enthalten die Urformwerkzeuge oft Kanalsysteme für die Zufuhr des Werkstoffs. Das Schwindmaß entspricht den maßlichen Änderungen, die am zu verarbeitenden Werkstoff vom Zeitpunkt des Festwerdens bis zu seiner Abkühlung auf Raumtemperatur auftreten. Es werden bei der Herstellung von Formteilen Urformwerkzeuge für einmaligen oder mehrmaligen Gebrauch unterschieden. Mit Urformwerkzeugen für einmaligen Gebrauch, den verlorenen Formen, die mit Hilfe von Modellen angefertigt werden, können nur jeweils ein Gussstück gefertigt werden, da die Form zerstört wird. Urformwerkzeuge für mehrmaligen Gebrauch, die Dauerformen, können eine größere Anzahl von Formteilen herstellen und bestehen meist aus metallischen Werkstoffen.



Abbildung 13: Verfahrensprinzip beim Urformen nach [DUB-05]

Die Füllung der Urformwerkzeuge kann unter Einfluss der Schwerkraft, durch erhöhten Druck bzw. Schleuderkraft sowie durch Verdrängung bewirkt werden. Der zu verarbeitende Stoff kann in fester, schüttfähiger Form, als Schmelze bei metallischen Werkstoffen, im plastifizierten Zustand, als Lösung oder in Form von Pasten bei hochpolymeren Werkstoffen in das Urformwerkzeug gegeben werden. Flüssige metallische Werkstoffe wie Schmelzen gehen bei der Abkühlung infolge von Wärmeentzug durch Kristallisation in den festen Aggregatzustand über.

Bei der Formgebung metallischer Werkstoffe durch Gießen kann die Herstellung von Halbzeugen und die Herstellung von Formteilen (Gussteilen) unterschieden werden. Halbzeuge sind Vor- und Zwischenprodukte, deren Gestalt keine Ähnlichkeit mit der endgültigen Produktgestalt hat. Aus diesem Grund müssen diese Erzeugnisse meist durch andere Verfahrenshauptgruppen, zum Beispiel durch plastische Verformung beim Umformen, zur Erlangung der endgültigen Produktgestalt weiterverarbeitet werden [SCH-91], [STA-99].

Bei der Herstellung von Formteilen können Bauteile gefertigt werden, die eine große Ähnlichkeit mit der endgültigen Produktgestalt haben und somit im Allgemeinen nur durch die Verfahrenshauptgruppe Trennen weiterverarbeitet werden müssen, was zu wesentlich geringeren Aufwendungen führt. Darüber hinaus werden durch Verbesserungen der Urformtechnik immer endabmessungsnähere Bauteile und zur Verringerung der Montageaufwendungen Integralteile gefertigt [KET-98], [KET-99]. Form- und Gießverfahren können nach [FRI-06] wie in *Abbildung 14* eingeteilt werden.

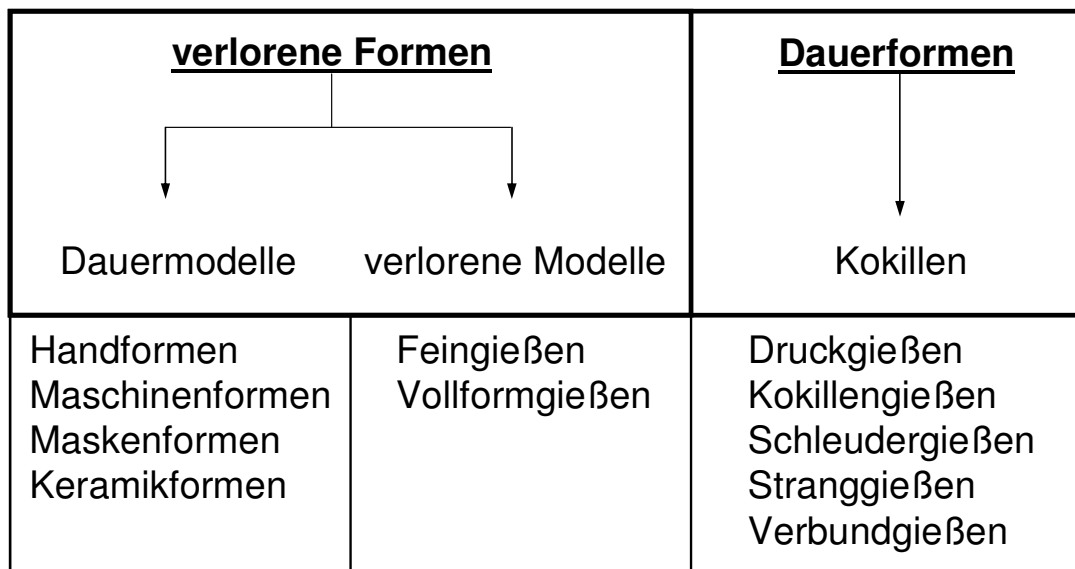


Abbildung 14: Einteilung der Form- und Gießverfahren [FRI-06]

Zur Verwendung von verlorenen Urformwerkzeugen werden Dauermodelle oder verlorene Modelle eingesetzt, die unter Berücksichtigung des Schwindmaßes, der Bearbeitungszugaben und der Formschrägen als Konizität zur Gussteilentnahme eine ähnliche Gestalt wie das herzustellende Formteil haben. Die Modelle sind in den meisten Fällen geteilt und haben zur Aufnahme der Kerne bei Gussstücken mit Hohlräumen Kernmarken.

Das Maschinenformen ist durch automatisierte Fertigungsvorgänge zur Herstellung gießfertiger verlorder Sandformen gekennzeichnet, wobei das Abgießen oft in die Fertigungsstrasse mit einbezogen wird. Zu den wesentlichen Stationen gehören die Formstation sowie die Kerneinlege-, Gieß- und Kühlstrecke und die Entleerstation.

Beim Kokillengießen wird unter Wirkung der Schwerkraft in metallische zwei- oder mehrteilige Dauerformen gegossen. Zur Abbildung von Hohlräumen bzw. komplexen Konturen werden durch Kernschießen gefertigte Kerne aus Gießsand eingesetzt und nach dem Gießen entfernt [KOK-07]. In der Kernschießmaschine wird dazu mit Bindemittel versetzter Formsand unter Druck und Temperatur in eine Kernform gepresst [KER-07]. Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit der Kokille gegenüber Formsand erfolgt eine beschleunigte Abkühlung der erstarrenden Schmelze. Daraus resultiert ein vergleichsweise feinkörniges, dichtes Gefüge mit besseren Festigkeitseigenschaften als der im Sandguss hergestellten Gussteile. Hohe Maßgenauigkeit, ausgezeichnete Oberflächengüte sowie geringe Bearbeitungszugaben kennzeichnen das Kokillengießen.

Wesensmerkmal des Druckgießens ist, dass die Schmelze in Druckgussmaschinen unter hohem Druck mit relativ großer Geschwindigkeit in eine zweiteilige Dauerform, die meist aus hochfesten Warmarbeitsstählen besteht, gedrückt wird und unter Druck erstarrt. Der Gießdruck ist beim Druckgießen so hoch, dass nur Kernschieber oder Kerne aus Metallen zur Abbildung von Hohlräumen oder Hinterschneidungen verwendbar sind [FRI-06].

Es werden das Warmkammer- und das Kaltkammerverfahren unterschieden. Kennzeichnung des Warmkammerverfahrens ist die Ausbildung der Druckgussmaschine und des Warmhalteofens als Einheit. Für das Warmkammerverfahren sind die Gusslegierungsbestandteile Blei, Magnesium, Zink und Zinn geeignet. Im Kaltkammerverfahren ist die Druckgussmaschine vom Warmhalteofen getrennt angeordnet. Die Schmelze wird nach Entnahme aus dem Ofen in die kalte Druckkammer, die direkt mit der eingussseitigen Formhälfte verbunden ist, gefüllt und in die Form eingedrückt. Das Kaltkammerverfahren eignet sich besonders für Gusslegierungen auf Aluminium- und Kupferbasis. Diese Legierungen würden beim Warmkammerverfahren im flüssigen Zustand das Gießaggregat aus

Stahl angreifen. Kaltkammer-Druckgießmaschinen erreichen verfahrensbedingt, geringere Stückleistungen als Warmkammer-Maschinen.

Das Druckgießen auf automatisierten Maschinen ist heutzutage eines der rationellsten Gießverfahren. Druckgussteile haben glatte, saubere Flächen und Kanten, sind sehr maßgenau und müssen höchstens an Pass- und Lagerflächen bearbeitet werden, was zu geringen Bearbeitungszeiten führt.

Ein weiteres Urformverfahren ist, aus dem Gebiet der Pulvermetallurgie, die Formgebung von metallischen und keramischen Werkstoffen durch Sintern. Die Pulvermetallurgie befasst sich mit der Gewinnung von Pulvern aus Metallen, Metalllegierungen und Metallverbindungen und deren Verarbeitung zu Halbzeugen und Fertigteilen. Bei diesem Urformverfahren werden Pulver mit Korngrößen unter 500 µm in Formwerkzeugen mechanisch verdichtet und bei hohen Temperaturen durch Sintern zu Fertigteilen verfestigt.

Den Vorteilen des Sinterns wie weitestgehende Nachbearbeitungsfreiheit, nahezu hundertprozentige Werkstoffmengennutzung sowie Erzeugung von Verbundwerkstoffen stehen auch Nachteile wie beispielsweise hohe Werkstoff- und Werkzeugkosten, Gestaltungsbeschränkung auf einfache geometrische Grundkörper und begrenzte Anwendbarkeit von Pulvermischungen gegenüber [FRI-06].

In Konkurrenz zu den konventionellen Urformverfahren hat das Rapid-Prototyping insbesondere in der Produktentwicklung zur Verkürzung der Produktentwicklungszeiten und zur Unterstützung des Simultaneous Engineering in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Die Vorteile von Rapid-Prototyping-Systemen liegen in der schnellen und kostengünstigen Herstellung von Prototypen. Darüber hinaus haben diese Verfahren das Potential zur direkten Herstellung von Werkzeugen und Formen für den Prototypenbau sowie für die Vor- und Kleinserienfertigung. Die schnelle und direkte Herstellung von Werkzeugen und Formen wird als Rapid Tooling bezeichnet.

Als Werkstoffe für das Rapid Prototyping können derzeit Kunststoffe, Wachse, Papier, Sande, und Metalle verwendet werden. Die industrielle Fertigung von Prototypen zur Visualisierung und Prüfung von Produkten, von Modellen für den Feinguss sowie von Funktionsmodellen erfolgt zur Zeit aus organischen Werkstoffen, wie Kunststoffen und Wachsen. In den letzten Jahren konnte darüber hinaus ein Trend zum Rapid Tooling festgestellt werden. Hierunter wird das Herstellen von Werkzeugen und Formen mit Hilfe von Rapid-Prototyping-Verfahren unter Verwendung einer Kombination von metallischen Werkstoffen und niedrigschmelzenden Bestandteilen wie beispielsweise polymerbeschichtetem Metallpulver verstanden.

Die Anwendungsbereiche metallischer Rapid-Prototyping-Produkte liegen derzeit im Bereich Pulverspritzguss und Druckguss. Desweiteren werden metallische Bauteile über die

Schmelzphase durch das Lasergenerieren erzeugt [KÖN-94]. Darüber hinaus existiert eine Vielzahl von Forschungsansätzen, die sich mit keramischen Werkstoffsystemen für Rapid-Prototyping-Verfahren befassen [STI-98].

Geimesames Merkmal aller Rapid-Prototyping-Systeme ist der schichtweise Aufbau des Werkstücks. Hierfür werden 3D-CAD-Daten zunächst in Querschnitte zerlegt, um daraus im eigentlichen Herstellungsprozess das Werkstück aufzubauen. Die Rapid-Prototyping-Verfahren lassen sich nach dem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials und den physikalischen Prinzipien der Verfestigung in Verfestigung flüssiger Materialien durch Polymerisationsverfahren, Generieren aus der festen Phase und Abscheiden aus der Gasphase klassifizieren [GEB-96]. Zum Generieren aus der festen Phase zählen das Ausschneiden aus Folien oder Platten, das An- oder Aufschmelzen von festen Materialien oder Pulvern sowie das Verkleben von Granulaten oder Pulvern durch zusätzliche Binder.

Basierend auf diesen physikalischen Wirkprinzipien haben sich die Stereolithographie, das Selektive Lasersintern, das Fused Deposition Modelling und das Laminated Object Manufacturing als die vier bis jetzt bedeutendsten Rapid-Prototyping-Verfahren entwickelt. Bei der Stereolithographie werden Querschnitte durch lokales Aushärten eines flüssigen Photopolymers durch einen UV-Laser entsprechend der geforderten Konturen geformt [NAB-95]. Unter dem Selektiven Lasersintern wird das lokale konturkonforme Erhitzen von pulverförmigem Ausgangsmaterial auf Sinter- bzw. Schmelztemperatur durch einen CO₂-Laser verstanden [UHL-99]. Das Fused-Deposition-Modelling-Verfahren erzeugt Werkstücke mittels Querschnittschichten über einen dreidimensionalen Plotter, der den auf Schmelztemperatur erhitzten Werkstoff aufbringt. Das Verfahren Layer Lamine Manufacturing generiert Werkstücke auf Papierbasis aus vielen zweidimensional konturierten Schichten, die anschließend durch Kleben und konturkonformes Ausschneiden mit einem CO₂-Laser zu einem dreidimensionalen Modell zusammengefügt werden.

Beim 3D-Printing werden Pulverteilchen durch definiertes Einspritzen eines externen Binders miteinander verklebt und darauffolgend entbindert und nachgesintert [GEB-96]. Das Lasergenerieren, zur Verarbeitung metallischer Pulver, schmilzt das auf einer Substratoberfläche dosierte Pulver durch einen Laserstrahl auf [KÖN-94]. 3D-Auftragsschweißen bildet Bauteilprototypen unter WIG- oder Plasma-MIG-Schweißen von draht- bzw. pulverförmigen Werkstoffen [HAF-94]. Das Laser Chemical Vapor Deposition-Verfahren kann Aluminiumoxidteile für die Mikrosystemtechnik (Bauteilgröße von 5 bis 20µm) durch Auslösung einer chemischen Reaktion von sich kreuzenden Laserstrahlen in aluminium- und sauerstoffhaltigen Gasen herstellen [LEH-94].

2.2.3 Trennen

Nach DIN 8580 ist Trennen das Fertigen durch Änderung der Form eines festen Körpers unter örtlicher Aufhebung des Stoffzusammenhalts sowie das Zerlegen gefügter Körper. Die Hauptgruppe Trennen, in *Tabelle 1* den Fertigungsverfahren zugeordnet, kann in die sechs Teilgruppen Zerteilen, Spanen mit geometrisch bestimmten bzw. unbestimmten Schneiden, Abtragen, Zerlegen und Reinigen gegliedert werden. Trennen durch Zerteilen und Spanen findet unter mechanischer Einwirkung eines Werkzeugs auf ein Werkstück statt. Der Teilgruppe Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide sind nach DIN 8589 folgende Verfahren zugehörig (*Abbildung 15*).

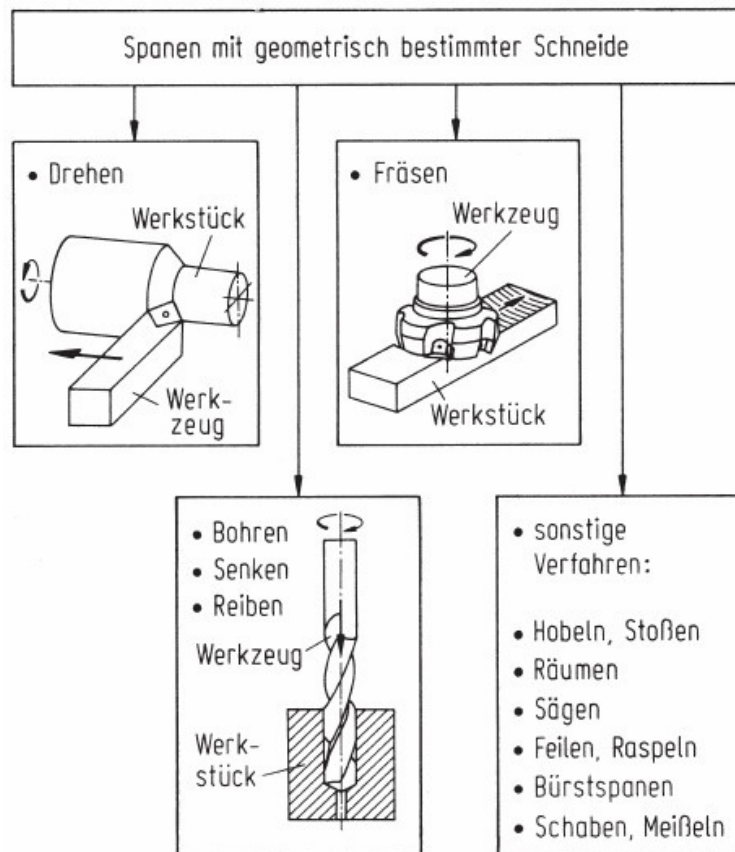


Abbildung 15: Verfahren des Spanens mit geometrisch bestimmter Schneide (DIN 8589)

Beim Spanen werden von einem Rohteil durch Schneiden eines Werkzeugs Stoffteile in Form von Spänen mechanisch getrennt. Die genaue Kenntnis und Beschreibbarkeit der Schneidenanzahl, Form der Schneidkeile und Lage der Schneide zum Werkstück ist kennzeichnend für das Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide.

Die Spanbildung, der mechanische Vorgang des Trennens von Stoffteilen vom Werkstück, kann am besten am Orthogonalprozess (ebene Formänderung) dargestellt werden. Der Schneidkeil wird durch den Spanwinkel, den Freiwinkel und den Kantenradius beschrieben. Die plastische Verformung des Werkstoffs durch das Eindringen des Schneidkeils kann in die fünf Wirkzonen primäre und sekundäre Scherzone, Verformungsvorlaufzone sowie Stau- und Trennzone unterschieden werden. Die Spanbildung lässt sich nach der Art des Materialabtrags in Fließspanbildung [PAT-87], Scherspanbildung und Reißspanbildung [WAR-74] aufteilen. Das energetische Verhalten in der Spanbildungszone und die Zusammenhänge zwischen Oberflächenkräften und Hauptspannungen sind in [DEN-92] dargestellt.

Die Beanspruchung und damit der Verschleiß des Schneidkeils ist von den Einstellungen Schnittgeschwindigkeit, Vorschub und Schnitttiefe sowie den Umgebungseinflüssen (z.B. Kühlschmiermittel) abhängig. Verschleißarten können nach [TÖN-82] in Form von Brüchen und Rissen, Abrasion, plastischer Verformung, Adhäsion, Diffusion und Oxidation auftreten. Die Zerspanbarkeit eines Werkstoffs ergibt sich aus seiner Zusammensetzung, dem Gefügebau im zerspannten Bereich, aus der vorhergehenden Um- bzw. Urformung und aus der Wärmebehandlung. Die Zerspanbarkeit wird an den Kriterien Werkzeugverschleiß, Oberflächengüte des Werkstücks, Zerspankräfte und Spanform gemessen.

Drehen: Drehen, Bohren und Fräsen nach *Abbildung 15* sind häufig verwendete Trennverfahren der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen und werden nachfolgend kurz vorgestellt. Nach DIN 8589 E T 1 ist das Drehen als Spanen mit geschlossener (meist kreisförmiger) Schnittbewegung und beliebiger Vorschubbewegung in einer zur Schnittrichtung senkrechten Achse definiert. Zur Bestimmung von Lage und Form des Werkzeugs im Raum dienen der Einstell-, Ecken-, Neigungs-, Frei-, Keil- und Spanwinkel. Diese Winkel beeinflussen die Spanform und somit auch die aufzuwendende Zerspanungsleistung.

Der über die Spanfläche ablaufende Span besitzt formabhängig ein unterschiedliches Volumen mit der Spanraumzahl als kennzeichnende Größe für die Sperrigkeit der Späne zur Bemessung von Arbeitsräumen der Werkzeugmaschinen, von Transporteinrichtungen und Spanräumen der Werkzeuge. Die Spanraumzahl ist unter anderem von der Kurzbrüchigkeit des Werkstoffs [KNO-77] und von der Spanform abhängig. Die Spanformen und somit die Oberflächengüte des Werkstücks lassen sich auch durch Maschineneinstelldaten wie Vorschub und Schnitttiefe beeinflussen.

Der Widerstand des Werkstoffs gegen das Eindringen des Werkzeugs muss durch das Aufbringen der Zerspankraft überwunden werden, die zur analytischen Betrachtung in die Komponenten Schnitt-, Vorschub- und Passivkraft zerlegt werden kann. Die auf den Spanungsquerschnitt bezogene Schnittkraft, die spezifische Schnittkraft, ist von

geometrischen Größen wie der Spannungsdicke, vom Werkstoff, von Einflussfaktoren für Schnittgeschwindigkeit, Spanwinkel, Schneidstoff, Schärfezustand der Schneide, Kühlschmierstoff und Werkstückform abhängig. Die Passivkraft ist für die Maß- und Formgenauigkeit von Bedeutung.

Die Rauhtiefe ist abhängig von dem Schneidenprofil, dem Vorschub, den Schwingungen, Aufbauschneiden und dem Verschleissfortschritt der Schneide. Aufgrund mechanischer, thermischer und chemischer Beanspruchung treten die Verschleißformen Freiflächen-, Korb-, Kolkverschleiß sowie Schneidkantenversatz, -rundung und Riefenverschleiß anwendungsbezogen auf, die als Standzeitkriterien genutzt werden. Für eine Schneidstoff-Werkstoff-Kombination und bei gegebenem Standzeitkriterium hängt die Standzeit hauptsächlich von der Schnittgeschwindigkeit ab. Die optimale Schnittgeschwindigkeit kann nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten festgelegt werden. Die Optimierung der Schnittgeschwindigkeit nach minimalen Stückkosten berücksichtigt neben der Werkzeugwechselzeit auch Werkzeugkosten je Schneide und den Maschinenstundensatz.

Bohren: Bohren ist ein spanendes Verfahren mit drehender Schnittbewegung, bei dem das Werkzeug, der Bohrer, eine Vorschubbewegung in Richtung der Drehachse ausführt. Die wesentlichen Bohrverfahren nach DIN 8589 sind Ein-, Auf-, Zentrier-, Kern-, Gewindebohren, Senken und Reiben. Das am häufigsten verwendete Bohrwerkzeug ist der Spiralbohrer für das Einbohren.

Entlang von Haupt- und Nebenschneide ist der von außen nach innen abnehmende Spanwinkel die wichtigste Einflussgröße auf den Bohrprozess. Die bedeutendste Verschleissform am Spiralbohrer ist der Freiflächenverschleiß durch Abrasion an der Schneidenecke, der eine Steigerung der Torsionsbelastung und somit einen Bohrerbruch bewirken kann.

Zur Berechnung der Kräfte und Momente beim Bohren wird der Ansatz von Kienzle [KIE-52], [SPU-61] verwendet. Die Vorschubkräfte sind stark abhängig von der Ausbildung der Querschneide und vom Verschleiß. Die Oberflächengüte entspricht beim Bohren mit Spiralbohrern einer Schruppbearbeitung und kann durch Reiben verbessert werden.

Das Kurzlochbohren umfasst Schraubenloch-, Durchgangs- und Gewindebohrungen und wird mit wendepplattenbestückten Kurzlochbohrern unter hoher Schnittgeschwindigkeit und Vorschub durchgeführt. Voraussetzung dafür sind, unter Anderem für das Anbohren schräger oder gekrümmter Flächen, steife Werkzeugspindeln, wie sie an Bearbeitungszentren und Fräsmaschinen üblich sind [TUF-80].

Fräsen: Beim Fräsen wird die notwendige Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück durch eine kreisförmige Schnittbewegung des Werkzeugs und eine senkrecht oder

schräg zur Drehachse des Werkzeugs verlaufende Vorschubbewegung erzielt, wobei nahezu beliebige Konturen erzeugt werden können. Die Einteilung der Fräsverfahren erfolgt nach DIN 8589 anhand der Merkmale Art der erzeugten Werkstückoberfläche, Kinematik des Zerspanvorgangs und Profil des Fräswerkzeugs und ist in [VIC-85] beschrieben.

Zur Beschreibung der Zerspanungskinematik sind die Eingriffsgrößen Fräserdurchmesser, Zähneanzahl, Werkzeugüberstand sowie die Schneidengeometrie Größen Seitenspanwinkel, Rückspanwinkel, Seitenfreiwinkel, Rückfreiwinkel, Einstellwinkel, Neigungswinkel, Schneidenradius und Fase erforderlich. Aus den Eingriffsgrößen lassen sich die Spanungsgrößen Spannungsdicke, -breite, querschnitt und Zeitspanvolumen. Zur Beurteilung des Fräsprozesses wird die mittlere Spannungsdicke herangezogen.

Die Zerspankraft kann in eine eingriffswinkelabhängige Aktivkraft, parallel zur Arbeitsebene, und eine Passivkraft, senkrecht zur Arbeitsebene, zerlegt werden. Die Aktivkraft kann einerseits in Bezug auf die Richtung der Schnittgeschwindigkeit, in einem mitrotierenden, werkzeugfesten Koordinatensystem durch die Komponenten Schnittkraft und Schnittnormalkraft und andererseits in Bezug auf die Richtung der Vorschubgeschwindigkeit, in einem feststehenden, werkstückfesten Koordinatensystem durch die Komponenten Vorschubkraft und Vorschubnormalkraft beschrieben werden. Zur Umrechnung kann eine Koordinatentransformation durchgeführt werden, beispielsweise zum Zweck der Kraftmessung. Die Zerspankraftgleichung von Kienzle [KIE-52] ist, gegliedert in Spannungsdickenbereiche, auch für die Berechnung der mittleren Zerspankraft beim Fräsen zur Auslegung der Fräsmaschinenleistung anwendbar. Die Korrekturfaktoren beziehen sich, unter Berücksichtigung des Fertigungsverfahrens Fräsen, auf gewonnene Erkenntnisse von Drehversuchen.

Aufgrund der Zerspankräfte treten Schwingungen auf, die die Oberflächengüte und die Werkzeugstandzeit beeinflussen können. Nach ihrer Entstehung werden sie in fremderregte und selbsterregte Schwingungen unterschieden. Bei Fremderregung schwingt das Gesamtsystem mit der Frequenz der Anregungskräfte. Durch den dynamischen Kraftanteil aufgrund des unterbrochenen Schnittvorgangs, der die mittlere Schnittkraft überlagert, kommt es zwischen Werkstück und Fräswerkzeug zu fremderregten Schwingungen. Selbsterregte Schwingungen treten bei einer oder mehreren Eigenfrequenzen ohne Einfluss von außen auf. Bedeutend sind selbsterregte Schwingungen aufgrund von Schnittkraftschwankungen infolge der Spannungsdickenänderung. Dieser sogenannte Regenerativeneffekt, auch „regeneratives Rattern“ genannt, kann durch die Variation von Schnittgeschwindigkeit, Schnitttiefe, Vorschub und Schneidengeometrie beeinflusst werden.

Formfehler beim Fräsen durch Werkzeugverschleiß können nach [TÖN-88] auf Umgebungsbedingungen, Betriebsverhalten der Fräsmaschine, Härteinhomogenitäten des Werkstücks, Werkstückerwärmung als Folge der Zerspanung und Eigenspannungsänderung in der Werkstückrandzone zurückgeführt werden.

Zur Herstellung von Formwerkzeugen werden spanende und abtragende Verfahren eingesetzt, wobei das Fräsen als Formgebungsverfahren auf numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen eine zentrale Rolle einnimmt. Wesentliches Merkmal beim Formfräsen sind die Anzahl der aktiv gesteuerten Achsen, wobei Drei-Achsenfräsen und Fünf-Achsenfräsen unterschieden werden. Beim Fünf-Achsenfräsen wird nicht nur die Fräsespitze, sondern auch die Rotationsachse des Fräserkopfes relativ zum Werkstückkoordinatensystem gesteuert. Das Fräsrillenprofil, das durch die zeilenweise Bearbeitung einer gekrümmten Fläche entsteht, bestimmt aufgrund der Nacharbeit in Abhängigkeit von der Profilhöhe, Produktivität und Qualität des Fräsprozesses [DUB-05].

2.2.4 Fertigungssysteme

Verschiedene, aufeinander abgestimmte Vorgänge sind zum Erfüllen von Fertigungsaufgaben notwendig, die von Fertigungsteilsystemen ausgeführt werden. In *Abbildung 16* ist die Systemstruktur einer integrierten Teilefertigung und die Kopplung der Teilsysteme in Anlehnung an [EVE-97] dargestellt.

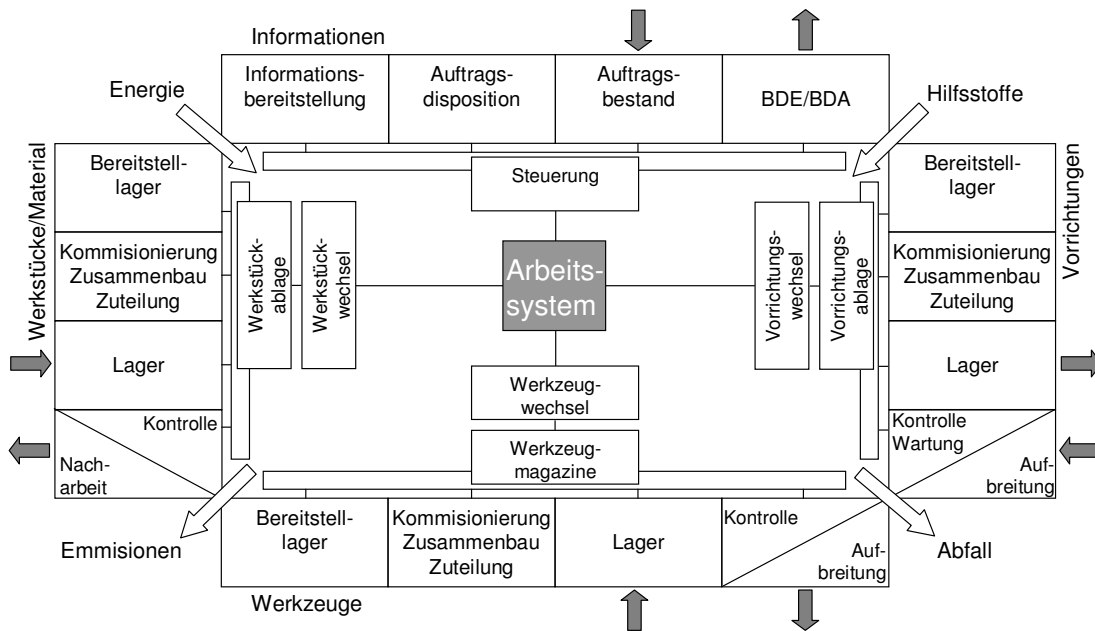


Abbildung 16: Systemstruktur einer integrierten Teilefertigung [EVE-97]

Nach [EVE-97] besteht ein Fertigungssystem aus den Teilsystemen Arbeits-, Informations-, Werkstückversorgungs-, Werkzeugversorgungs-, Vorrichtungversorgungs-, Energieversorgungs-, Hilfsstoffversorgungs- sowie Abfallentsorgungs- und Hilfsstoffentsorgungssystem. Kern eines jeden Fertigungssystems ist das Arbeitssystem, bei dem es sich in der Regel um eine numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine handelt.

Die Klassifikation von Fertigungssystemen kann nach der Anzahl der integrierten Teilsysteme und dem Automatisierungsgrad vorgenommen werden. In Bearbeitungszentren werden Werkstücke automatisch zugeführt sowie mehrere Fertigungsverfahren und zusätzliche Funktionen zur Komplettbearbeitung in einer Aufspannung integriert. Bei flexiblen Fertigungssystemen und bei Transfersystemen sind neben den Bearbeitungsfunktionen auch alle Handhabungsfunktionen automatisiert, so dass über eine zentrale Steuerung Werkzeuge, Werkstücke und Vorrichtungen automatisch gelagert und transportiert werden können.

Flexible Fertigungssysteme und Transfersysteme werden mit dem Ziel einer hohen Produktivität vor allem in der Serienproduktion eingesetzt. Die Produktivität gibt das Verhältnis von Output zu Input an. Output ist der mengenmäßige Ertrag in Form von Stückzahl bzw. Masse. Input ist der mengenmäßige Einsatz von Produktionsfaktoren wie Arbeitsstunden, Betriebsmittel und Kapital. Zur Einordnung von Fertigungssystemen können noch weitere, nachfolgend kurz vorgestellte Messgrößen, herangezogen werden. Die Wirtschaftlichkeit ist ein Maß für den wertmäßigen Erfolg eines Systems, beispielsweise Rentabilität und Wertschöpfung. Durch Flexibilität wird der Aufwand zur Umstellung der Produktion auf wechselnde Aufgaben quantifiziert. Qualität erfasst die Erfüllung vorgegebener Qualitätsmerkmale. Als Durchlaufzeit wird die Summe der Ausführungs-, Rüst-, Übergangs-, Puffer-, und Einlagerungszeiten verstanden.

Bei der automatisierten Fertigung ist in Transferstraßen das Prinzip der Arbeitsteilung besonders ausgeprägt. Es handelt sich dabei um Fertigungslinien, in denen Werkstücke zwischen verketteten Bearbeitungsstationen für den automatischen Werkstückdurchlauf getaktet werden. Transferstraßen werden als Sondermaschinen für die Bearbeitung von fertigungstechnisch ähnlichen Werkstücken in großen Stückzahlen ausgelegt wie beispielsweise in der Automobilindustrie. Diese Sondermaschinen werden nach dem Baukastenprinzip weitgehend aus Baueinheiten zusammengesetzt. Baueinheiten, bestehend aus Grund- und Haupteinheiten, sind in sich geschlossene, austauschbare Baugruppen, die jeweils einen oder mehrere Teilfunktionen einer Werkzeugmaschine verkörpern [SCH-87]. Die Stationen von Transferstraßen sind starr miteinander verkettet. Kennzeichen der starren Verkettung sind gemeinsame Steuerung der Verkettungseinrichtung und der

Bearbeitungsstationen. Demgegenüber sind unabhängige Arbeitszyklen der Bearbeitungsstationen Kennzeichen einer losen Verkettung. Durch lose Verkettung werden häufig Serienmaschinen verbunden sowie manuelle Bearbeitungsstationen in Fertigungslinien von automatischen Bearbeitungsstationen entkoppelt.

Ein flexibles Fertigungssystem besteht aus mehreren, meist numerisch gesteuerten, miteinander lose verketteten Einzelmaschinen und ist aufgrund der materialfluss- und informationstechnischen Verknüpfung imstande, automatisch Werkstücke in mittleren und kleinen Losen bis zur Grenzlosgröße eins zu bearbeiten. Dabei befinden sich gleichzeitig verschiedene Werkstücke in Bearbeitung, die das System auf verschiedenen Pfaden durchlaufen.

Die Bearbeitungsstationen innerhalb des flexiblen Fertigungssystems können hinsichtlich der installierten Fertigungsfunktionen sich ersetzend oder sich ergänzend sein. Sich ersetzende Stationen haben den Vorteil eines hohen Auslastungsgrads, eines wahlfreien Werkstückdurchlaufs und einer hohen Flexibilität des Gesamtsystems durch Redundanz. Systeme mit sich ergänzenden Stationen haben einen hohen technischen Nutzungsgrad, realisieren das Linienprinzip und verfügen über eine hohe Produktivität.

Verkettungen können nach [WAR-89] mittels Einzeltransportfahrzeug über mehrere Transportfahrzeuge und über Umlaufförderstrecke ausgeführt sein. Flexible Fertigungssysteme enthalten ausbauabhängig die Funktionseinheiten Werkstück- und Werkzeugwechsel, Hilfsstoffver- und -entsorgung, NC-Datenverteilung, Puffer- und Lagereinrichtungen, Rechnersteuerung des Gesamtsystems, rechnergestützte Kapazitäts- und Terminierungsrechnung, Betriebsdatenerfassung sowie automatische Fehlererkennung.

Veränderungen in den Randbedingungen industrieller Produktion wie schnelle Modellwechsel, stark schwankende Stückzahlen, Technologiesprünge führen zu der Notwendigkeit, Fertigungssysteme so auszulegen, dass sie sich mit geringem Zeit- und Kostenaufwand umgestalten lassen. In technischer Hinsicht erlaubt eine Modularisierung von Maschinen- und Anlagenkomponenten die schnelle Anpassung an veränderte Anforderungen [VET-76]. Organisatorische Maßnahmen zielen auf die Beherrschung der Komplexität des Systems ab. Die Fabrik wird dabei in Form einer fraktalen Fabrik als ein Netzwerk teilautonomer Strukturelemente konzipiert, deren Aufgaben und Leistungen eindeutig beschreibbar sind, die sich selbst organisieren und optimieren und die über ein leistungsfähiges Informations- und Kommunikationssystem miteinander verknüpft sind. Der Automatisierungsgrad solcher Systeme ist gegenüber flexiblen Fertigungssystemen reduziert und den manuellen Tätigkeiten kommt eine stärkere Bedeutung zu [BUL-96].

2.2.5 Qualitätsmanagement

Nach DIN EN ISO 9000 wird Qualität als „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt“, definiert. Qualitätsmanagement umfasst alle Tätigkeiten und Zielsetzungen zur Sicherung der Prozess- und Produktqualität. Zu berücksichtigen sind hierbei Aspekte der Wirtschaftlichkeit, Gesetzgebung, Umwelt und Forderungen des Kunden [WES-02]. Das Qualitätsmanagement beinhaltet laut [KAM-95] die Aufgabengebiete Qualitätsplanung, Qualitätsprüfung, Qualitätslenkung und Qualitätsverbesserung.

Ein Qualitätsmanagement-System umfasst die Aufbau- und Ablauforganisation, Verfahren, Prozesse und Mittel zur Umsetzung des Qualitätsmanagements. Umfassendes Qualitätsmanagement (Total Quality Management) ist eine Managementmethode, die ausgehend von der obersten Leitung für alle Hierarchieebenen, die Qualität in den Mittelpunkt jeglicher Geschäftstätigkeit stellt. Eine Orientierung zur Umsetzung ist das EFQM (European Foundation for Quality Management) Excellence Modell [DGQ-95].

Zur systematischen Unterstützung des Qualitätsmanagements werden Werkzeuge und Methoden eingesetzt. Während die Anwendung der Werkzeuge nahezu über alle Phasen des Produktlebenszyklus möglich ist, lassen sich die Methoden oft nur bestimmten Phasen des Produktlebenszyklus zuordnen. In *Abbildung 17* sind Methoden und Werkzeuge bezogen auf die Produktlebensphasen dargestellt.

	Definition	Entwicklung Konstruktion	Produktions- planung	Produktions- prüfung	Nutzung
Methoden	Quality Function Deployment (QFD)				
	System-FMEA-Produkt				
		Konstruktions-FMEA			
		Design-Review			
	Fehlerbaumanalyse/Ereignisablaufanalyse				
			System-FMEA-Prozess		
	Design of Experiments (Taguchi/Shanin)				
			Lieferantenbewertung	Stichproben/100% Prüfung	Reklamationsbearbeitung
			Fähigkeitsuntersuchungen	Statistical-Process-Control	Felddatenauswertung
	Werkzeuge	Elementare Werkzeuge der Qualität (seven tools/new seven tools)			

Abbildung 17: Methoden und Werkzeuge des Qualitätsmanagements [DUB-05]

Zu den sieben elementaren Werkzeugen zur Problemlösung, die in *Abbildung 17* den Produktlebensphasen zugeordnet sind, zählen die Fehlersammelliste, das Histogramm, das Flussdiagramm, die Pareto-Analyse, das Ursache-Wirkung-Diagramm, das Korrelationsdiagramm und die Qualitätsregelkarte.

Methoden sind Arbeitstechniken, mit deren Hilfe durch planmäßiges, nachvollziehbares Vorgehen, die im Rahmen des Qualitätsmanagements vorgegebenen Ziele, erreicht werden sollen. FMEA ist die Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse, Design of Experiments bezeichnet die statistische Versuchsplanung.

Six Sigma ist eine weitere, nachfolgend beschriebene Methode des Qualitätsmanagements, bei der durch statistische Analysen Fehler in Prozessen minimiert werden sollen. Dazu werden auf Basis einer in der Regel normalverteilten Prozessbeschreibung Mittelwerte, Varianz und Standardabweichung ermittelt. Ziel von Six Sigma ist es, ein Prozessfenster zu erzeugen, das sich, ausgehend vom Mittelwert, jeweils um den sechsfachen Wert der Standardabweichung (Six Sigma) erstreckt, was einer Fehlerwahrscheinlichkeit von 3,4 zu einer Million entspricht. Als langzeitfähig werden Prozesse mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von dem 4,5-fachen Wert der Standardabweichung, unter Berücksichtigung der Verschiebung der Prozesswerte, bezeichnet. Eine häufig eingesetzte Methode des Six Sigma ist der DMAIC-Zyklus, der aus den Schritten Definieren, Messen, Analysieren, Verbessern, Kontrollieren besteht. Dem DMAIC-Zyklus stehen unter Anderem Werkzeuge und Methoden des Qualitätsmanagements nach *Abbildung 17* zur Verfügung [SIX-07].

Zur informationstechnischen Unterstützung der qualitätssichernden Tätigkeiten aus den Bereichen Qualitätslenkung und -steuerung sowie der Qualitätsprüfung werden CAQ-Systeme (Computer Aided Quality Assurance Systems) beispielsweise für Wareneingangskontrollen, losbezogene bzw. fertigungsbegleitende Prüfungen, statistische Prozessreglung sowie für präventive Qualitätsplanungsmethoden wie QFD und FMEA eingesetzt.

2.3 Informationstechnik

Der Einsatz leistungsfähiger Informations- und Kommunikationstechniken ist zu einem integralen Bestandteil und zu einer Einflussgröße moderner Unternehmensstrategien geworden, die das Innovations- und Leistungsprofil des Produktentstehungsprozesses nachhaltig prägen. Damit geht auch ein Wandel in den Geschäfts- und Arbeitsabläufen sowie der Arbeitskultur einher. Unterstützt von modernen Informations- und Kommunikationstechniken können neue Arbeits- und Kooperationsmethoden bereitgestellt

werden, die es erlauben, neue Produktinnovationen sowie neue Prozessinnovationen zu erschließen.

Diese Innovationen resultieren aus der beschleunigten Informationsgewinnung, der Verfügbarkeit von neuen, rechnerbasierten Methoden zur Konstruktion und Entwicklung von Produkten sowie der Abbildung von aufbau- und ablauforganisatorischen Strukturen in Produktdatenmanagementsystemen (PDM) zur schnellen und gezielten Bereitstellung der Produktentwicklungs- und Konstruktionsergebnisse. Zu den neuen, rechnerbasierten Methoden der Produktentstehung zählen die in *Abbildung 18* enthaltenen.

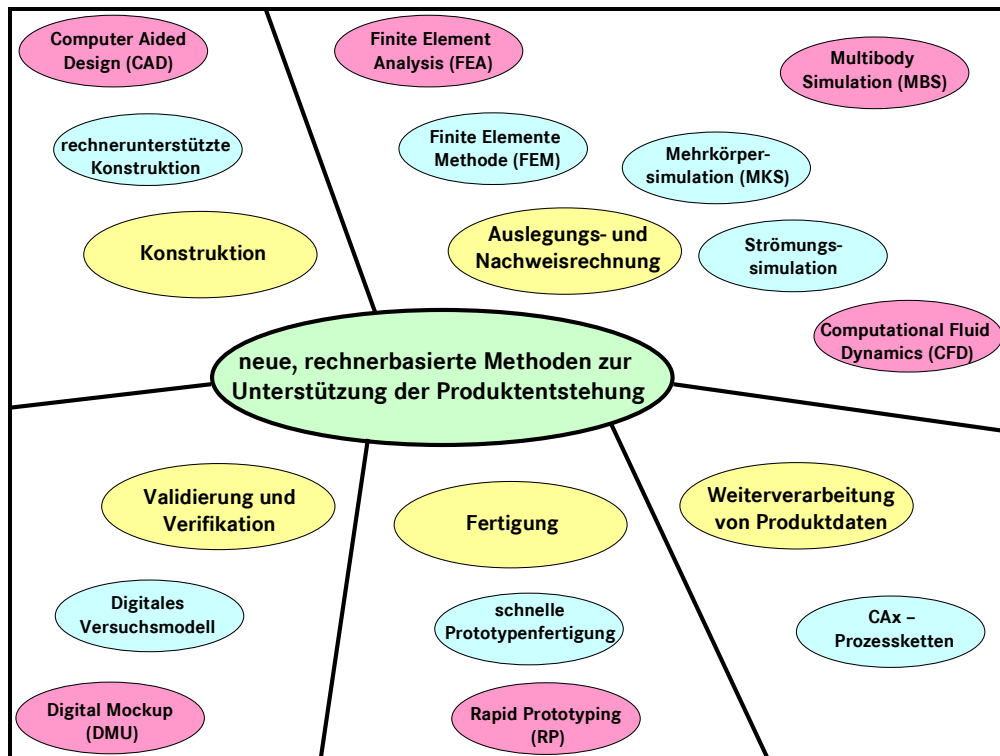


Abbildung 18: Methoden zur Unterstützung der Produktentstehung nach [DUB-05]

Der Einsatz neuer, rechnerunterstützter Methoden geschieht auch in der Gießtechnik. Hochwertige Gussteilkonstruktionen entstehen in zunehmenden Maß unter Einbeziehung von Simulationsprogrammen für die Formfüllung, die Erstarrung, die Eigenspannungsverteilung, die Mikrogefügeausbildung und die Eigenschaftsverteilung von Simultaneous Engineering und von Rapid Prototyping in enger Zusammenarbeit zwischen Gießereifachleuten und Konstrukteuren [DUB-05].

Arbeitsmethoden und -abläufe basieren im Produktentstehungsprozess sehr stark auf Dokumenten wie technischen Zeichnungen, Schemaplänen oder Stücklisten zur eindeutigen,

genormten grafischen bzw. textuellen Darstellung technischer Sachverhalte, zur Dokumentation technischer Lösungen, deren Weitergabe, Weiterverwendung und Archivierung.

Mit zunehmendem Einsatz der Informations- und Kommunikationstechnik werden jedoch modellbasierte Arbeitsmethoden immer wichtiger. Dies bedeutet, dass zunehmend mehr digitale Daten, sogenannte digitale Modelle, erstellt, gespeichert, archiviert und ausgetauscht werden. Darüber hinaus werden über Algorithmen grafische oder textuelle Darstellungen nach den Regeln bzw. Normen für die Erstellung der jeweiligen Dokumente berechnet und ausgegeben. Dieser Ansatz ermöglicht die vollständig virtuelle Produktentstehung.

Grundlage der Methoden zur virtuellen Produktentstehung bilden die Methoden der Informatik und ihre Anwendung im Rahmen der Informations- und Kommunikationstechnik für die virtuelle Produktentstehung [DUB-05]. In der Informatik verbindet sich das axiomatische, logisch-strukturtheoretische Denken der Mathematik mit dem konstruktiven und ökonomischen, praktisch-ingenieurmäßigen Handeln der Technik. Die Informatik ist daher sowohl eine Strukturwissenschaft, die abstrakt und immateriell betrieben wird, als auch eine Ingenieurwissenschaft, die sich konkret und materiell mit der Entwicklung, dem Bau und dem Betrieb technischer Produkte befasst. Technische Produkte der Informatik sind Hardware und Software, die in Abhängigkeit von ihrer Anwendung eine Einheit bilden [HUE-96].

2.3.1 Hardware und Software

Datenverarbeitungssysteme werden als Computer bezeichnet [ETE-07]. Der Begriff Hardware umfasst alle materiellen Komponenten eines Computers, einschließlich der angeschlossenen Geräte [ZEI-07]. Hardware ist die maschinentechnische Ausrüstung eines Computersystems [HAR-07].

Den Aufbau von Digitalrechnern unterscheidet man nach den zentralen Komponenten, der Rechereinheit und den peripheren Geräten. Die Rechereinheit enthält die datenverarbeitenden Komponenten des Rechners. Die zentrale Komponente eines Digitalrechners ist der Prozessor. Aufgabe des Prozessors ist es, Maschineninstruktionen von Programmen auszuführen, die in Programmen festgelegten Daten zu verarbeiten und in Interaktion mit anderen Rechnerkomponenten zu treten. Funktionell gliedert sich der Prozessor in Steuerwerk und Rechenwerk. Bei den Prozessorausführungen unterscheidet man die RISC-Architektur (Reduced Instruction Set Computer), bei der der Befehlssatz stark reduziert ist, und die CISC-Architektur (Complex Instruction Set Computer), bei der der

Befehlssatz umfangreicher und mit höherem Komplexitätsgrad ist. Leistungsparameter von Prozessoren sind die Anzahl pro Zeiteinheit ausführbaren Instruktionen oder spezielle Rechenoperationen. Die Verbindung zu Hardwarekomponenten außerhalb der Rechnereinheit erhält der Prozessor über Peripheriebausteine, die einerseits an den Prozessorbus angeschlossen sind und andererseits eine Anschlussmöglichkeit für Peripheriegeräte in Form von Schnittstellen besitzen.

Speicher haben die Aufgabe der Aufbewahrung von Daten und Befehlen. Aufgrund der Anforderungen einer schnellen Verarbeitung der Befehle und Daten bei minimalen Kosten ergibt sich eine Aufteilung der Speicher in Hierarchien. Unterschieden werden der Registerspeicher zur Aufnahme der aktuell in einem Verarbeitungsschritt benötigten Daten, der prozessornahe vergleichsweise schnelle Pufferspeicher (Cache memory) und der Hauptspeicher (RAM) zur Bereithaltung der Befehle und Daten für das Rechenwerk. Diese Speichertypen können noch weiter, unter anderem in Nur-Lese-Speicher und Schreib-Lese-Speicher, untergliedert werden [STC-74].

Die nicht in der Zentraleinheit enthaltenen Funktionseinheiten zur Erfassung, Übertragung, Speicherung sowie Ein- und Ausgabe von Daten lassen sich in periphere Geräte zusammenfassen. Die Daten müssen dazu in einer verarbeitbaren Form vorliegen, zum Beispiel im ASCII-Code. Periphere Speicher haben die Aufgabe der Lagerung der nicht im Hauptspeicher unterzubringenden Daten und Programme. Sie unterscheiden sich hinsichtlich des Speicherverfahrens und damit des Datenträgers, der Geräte, des Zugriffs sowie der Transport- und Übertragungseinheiten [BAU-93], [STC-74].

Eingabe- und Ausgabegeräte bilden eine Benutzungsschnittstelle zur Ein- und Ausgabe von Daten in eine Rechanlage. Die Einteilung erfolgt nach unterschiedlichen Gesichtspunkten, beispielsweise nach Datenform oder Datenart. Zu den Eingabegeräten gehören unter anderem Tastatur, Klarschrift- oder Barcodeleser, Scanner, Maus, Grafiktablett sowie Spacemouse und Spaceball als 3D-Eingabegeräte. Die wichtigsten Ausgabegeräte für alphanumerische und grafische Daten sind Bildschirmgeräte (Monitore, Display), Drucker, Laser- oder Tintenstrahlplotter sowie 3D-Drucker. Zu den Ein-/Ausgabegeräten, Peripheriegeräte mit Eingabe- und Ausgabegerät als Einheit konzipiert, zählen der Touchscreen oder auch Bestrebungen der Virtual Reality (VR)-Systeme. In diesen Anlagen wird eine generierte, fiktive Welt erzeugt, die drei dimensionale visuelle Reize an die Sinne des VR-Nutzers, beispielsweise über Projektoren, vermittelt und über ein 3-D Eingabegerät, wie einen Datenhandschuh, gesteuert werden kann.

Aus den eben vorgestellten Hardwarekomponenten können Hardwarearchitekturen gebildet werden. Digitalrechner werden in verschiedenen Größen- und Leistungsklassen hergestellt.

Sie unterscheiden sich in den Gehäuseabmessungen, dem Aufbau, der Leistungsfähigkeit des Prozessors, der Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit von Zusatzprozessoren, der Größe und Zusammensetzung des Hauptspeichers, der Anzahl und Art der eingebauten Schnittstellen, der Verfügbarkeit und Größe von Massenspeichern, der Verfügbarkeit von Peripheriegeräten und in ihrer elektrischen Leistungsaufnahme. Digitalrechnerklassen sind beispielsweise Palmtops bzw. Notebooks, Körpercomputer, Personal Computer (PCs), Arbeitsplatzrechner (Workstations), Server, Großrechner, Supercomputer, Prozessrechner und Hybridrechner.

Als Rechnernetz werden räumlich verteilte Systeme von Rechnern, Steuereinheiten und peripheren Geräten bezeichnet, die durch Datenübertragungseinrichtungen miteinander verbunden sind [HAN-92]. Die Datenübertragungseinrichtung sorgt für die Kommunikation durch Kommunikationsprotokolle zwischen Sender, Empfänger und Übertragungsmedium [LOC-93] in verschiedenen Netzstrukturen. Bei Client-Server-Systemen wird die Verarbeitung von Prozessen über Anforderungen von Dienstleistungsprozessen auf funktionale Einheiten verteilt, wobei die Kommunikation über ein Netzwerk erfolgt.

Programmieren im Sinne der Informatik heißt, ein Lösungsverfahren, den Algorithmus, für eine Aufgabe unter Einbeziehung der Datenstrukturen so zu formulieren, dass es von einem Computer ausgeführt werden kann. Abgeleitet vom Namen des Mathematikers Al-Charismi wird Algorithmus folgendermaßen definiert: „Ein Algorithmus ist ein endliches schrittweises Verfahren zur Berechnung gesuchter Größen, in dem jeder Schritt aus einer Anzahl eindeutig ausführbarer Operationen und gegebenenfalls einer Angabe über den nächsten Schritt besteht.“ Ein Algorithmus hat einen Namen, die gegebenen Größen heißen Eingangsparameter, die gesuchten Ausgangsparameter. Wenn ein Algorithmus in einer Programmiersprache abgefasst ist, so dass er nach Übersetzung von einer Maschine ausgeführt werden kann, nennt man ihn Programm.

Das Zusammenspiel der Funktionseinheiten eines Digitalrechners während des Ablaufs von Rechenprozessen wird durch das Betriebssystem realisiert. Das Betriebssystem besteht aus Programmen (Software). Software bezeichnet alle nichtphysischen Funktionsbestandteile eines Computers [SOF-07]. Die allgemeine Aufgabe eines Betriebssystems besteht in der wirtschaftlichen Nutzung der Betriebsmittel und der Bereitstellung einer zugänglichen Umgebung für die Anwenderprogramme [SIE-89], [CAS-74]. Ein Betriebssystem kann schematisch in Hardwareressourcen, Kernel als Betriebssystemkern und Benutzerschicht eingeteilt werden.

Zur höheren Rechnerausnutzung ist heutzutage der Mehrprozessbetrieb üblich, bei dem mehrere Anwenderprogramme gleichzeitig im Hauptspeicher sind und zeitabhängig die freien Betriebsmittel, insbesondere den Prozessor, benutzen. Beim Stapelbetrieb (batch processing)

stehen die Anwenderprogramme in einer Warteschlange und werden nacheinander bearbeitet.

Software lässt sich nach der Funktion, der Art der Einbettung, dem Nutzungsrecht, der Veränderbarkeit, dem Quellcode und der Verfügbarkeit einteilen [SOF-07]. Herstellung, Qualitätssicherung, Wartung, Dokumentation und Management großer Programmsysteme, die von mehreren Entwicklern für viele Benutzer geschrieben werden, erfordern besondere Techniken, Methoden und Werkzeuge, die man unter dem Namen Softwaretechnik (engl.: software engineering) zusammenfasst [HUE-96]. Das Ziel der Softwaretechnik ist die wirtschaftliche Herstellung zuverlässiger und effizienter Software [BAU-75]. Softwaretechnik ist die praktische Anwendung wissenschaftlicher Erkenntnisse auf den Entwurf und die Konstruktion von Computerprogrammen, verbunden mit der Dokumentation, die zur Entwicklung, Benutzung und Wartung der Programme erforderlich ist [BOE-62].

Der Software-Lebenszyklus beinhaltet nach [HUE-96,] 126] die Phasen Problemanalyse, Entwurf, Implementierung, Test und Wartung. Die Vorgehensweise bei der Entwicklung von Softwareprodukten wird in Kapitel 2.1.1 beschrieben. Zur frühzeitigen Funktionsprüfung lassen sich Prototyping, das Prüfen von Vorabversionen, und Software-Lebenszyklus zu einer Vorgehensweise vereinen, bei der einige Phasen des Lebenszyklus, abhängig von den Ergebnissen des Prototyping, mehrfach durchlaufen werden können. Zur Herstellung von Softwareprodukten werden Methoden und Werkzeuge benötigt. Methoden sind systematische Vorgehensweisen für die Phasen des Software-Lebenszyklus. Softwarewerkzeuge sind Programme, die Entwicklung, Test, Analyse oder Wartung von Programmen oder ihre Dokumentation unterstützen. Methoden und Werkzeuge entfalten ihre volle Kraft erst dann, wenn sie in einer sogenannten Software-Entwicklungs-Umgebung aufeinander abgestimmt sind.

Eine Methode für die Problemanalyse und Anforderungsdefinition ist SADT (structured analysis and design technique) [BAL-82], [ROS-77], [SCH-77]. Für die Phasen Entwurf und Implementierung stehen die Methoden Schrittweise Verfeinerung [HEN-72], [WIR-71], [WIR-74], Jackson [HUG-79], [JAC-86] und Composite/structured design [MYE-78], [STC-74], [YOU-79] zur Verfügung. Zur Qualitätsprüfung eignen sich die Methoden Schreibtischtest [MYE-79] und statische Programmanalyse [BLA-85]. Werkzeuge für Entwurf und Implementierung sind beispielsweise Editoren und Struktogrammgeneratoren sowie für Test und Qualitätsprüfung Debugger, Testfall- und Kreuzreferenzlistengeneratoren [BAL-82], [BAL-85], [HES-81], [KER-81], [REC-85].

Testen ist das Prüfen eines Programms, ob es die vorgeschriebenen Anforderungen erfüllt und ob es noch Fehler enthält. Verbreitete Testverfahren sind der Modultest zur Einzelprüfung

der Module, der Integrationstest zur Prüfung der Zusammenarbeit der Module im gesamten Programmsystem, der Leistungstest zur Geschwindigkeitsprüfung sowie der Abnahmetest, der unter realen Betriebsbedingungen mit dem Ziel der Programmabnahme durch den Auftraggeber durchgeführt wird [MYE-79]. Reale Betriebsbedingungen unterscheiden sich von den vorliegenden Testverfahren durch erheblich größere Datenmengen zur Prüfung der Robustheit gegenüber Eingabefehlern, von Antwortzeiten, der Belastbarkeit in Extremsituationen und von weiteren Sachverhalten.

2.3.2 Virtuelle Produktentstehung

Im Produktentstehungsprozess werden rechnerunterstützte Systeme eingesetzt, um sowohl das Produkt wie auch dessen Herstellung mit ingenieurwissenschaftlichen Methoden zu entwickeln. Dabei steht das methodische Erarbeiten, Berechnen und Optimieren der Produkt- und Herstellungsmerkmale sowie das Absichern dieser Eigenschaften durch Analyse und Simulationsverfahren im Vordergrund. Erfolgt eine durchgängig digitale Informationsverarbeitung im Produktentstehungsprozess, so wird dieser auch als virtuelle Produktentstehung bezeichnet [SPU-97], [KRA-02].

Zur digitalen Informationsverarbeitung im Produktentstehungsprozess werden verschiedene Anwendungssoftwaresysteme eingesetzt. Zu diesen Systemen zählen hauptsächlich CAD- (Computer Aided Design), CAS- (Computer Aided Styling), CAE- (Computer Aided Engineering), DMU- (Digital Mockup), CAM- (Computer Aided Manufacturing), CAQ- (Computer Aided Quality Assurance) und CAT-Systeme (Computer Aided Testing). Darüber hinaus werden zur Datenverwaltung und zur Steuerung von Informationsflüssen durch den Produktentstehungsprozess, PDM- (Produktdatenmanagement) bzw. PLM-(Produktlebenszyklusmanagement) Systeme verwendet [VDI-1], [EIG-01].

Den Anwendungssoftwaresystemen liegt der prinzipielle Architekturansatz zugrunde, Daten digital als Produktdatenmodell zu speichern, Methoden zur Verarbeitung der Daten bereitzustellen und über eine Benutzungsoberfläche sowohl die Methoden einfach und effizient zu nutzen wie auch auf die Daten zuzugreifen. Die Benutzungsoberflächen bauen auf interaktiven Funktionen der Computergrafik auf. Gemeinsam ist den Anwendungssoftwaresystemen, dass sie aufgrund von Modellierungs- oder Programmierverfahren eine digitale Repräsentation aufbauen, mit deren Hilfe Visualisierungen, Analysen, Simulationen, Optimierungen oder Steuerdaten berechnet werden. Die wichtigsten Systeme der rechnerunterstützten Produktentwicklung werden nachfolgend vorgestellt.

CAD steht für computer aided design und bedeutet rechnerunterstütztes Konstruieren. Darunter werden CAD-Systeme für die rechnerunterstützte Zeichnungserstellung und für die dreidimensionale Produktmodellierung verstanden. CAD-Systeme zur dreidimensionalen Produktmodellierung beinhalten Funktionen zur Modellierung mit Zwangsbedingungen, zur parametrischen Modellierung, zur Baugruppenmodellierung und zum Aufbau von CAx-Ketten. Die Methoden der Geometrischen Modellierung dienen dazu, die Gestalt von Bauteilen über die Geometrie zu beschreiben und werden in 2D- und 3D-Methoden unterschieden [LEE-99]. 2D-Methoden umfassen planare geometrische Beschreibungen durch Linien und Flächen. 3D-Methoden, die in Linien-, Flächen- und Volumenmodellierung unterschieden werden, umfassen die räumliche geometrische Beschreibung einer Bauteilgestalt. Eine bedeutende Methode der Geometrischen Modellierung ist die Transformation geometrischer Objekte, durch die sowohl die Positionierung wie auch die Orientierung geometrischer Objekte beschrieben wird [NEW-73].

Der Linienmodellierung (engl.: wireframe modelling) liegen Linienelemente wie analytische Linien und Freiformkurven zur Beschreibung der Bauteilgestalt zugrunde. Linienmodelle sind zwar einfach modellierbar, bieten jedoch keine ausreichenden Geometriedaten für nachfolgende Berechnungen.

Basis der Flächenmodellierung ist die mathematische Flächenbeschreibung und die Verknüpfung der Flächen zu einem topologischen Zusammenhang mit dem Ziel der Weiterverwendung in nachfolgenden Prozessen wie beispielsweise zur Fertigung der Flächen durch numerisch gesteuerte Fertigungsverfahren. Bei der Flächenmodellierung spielt die Vereinfachung der Flächendarstellung zur Facettendarstellung durch Approximation eine wichtige Rolle. Die Annäherung wird durch das Verfahren der Tessellierung bestimmt. Tessellierung bedeutet die Annäherung einer beliebigen Fläche durch ein Netz von geometrisch einfachen Elementen wie Polygonen. Häufig werden als Polygone Dreiecke verwendet. Das Verfahren wird dann Triangulation genannt.

Die Volumenmodellierung (engl.: solid modelling) begründet sich auf der Abbildung des Volumens eines Körpers. Die Repräsentation der Daten zur geometrischen Beschreibung von Volumina werden in die drei Kategorien generative, akkumulative und hybride Repräsentation unterschieden. Der generativen Repräsentation liegt die Beschreibung einer Erzeugungslogik unter Einteilung in Verknüpfungsmodelle (engl.: constructive solid geometry), Produktionsmodelle (engl.: sweep representation) und Elementfamilienmodelle (engl.: feature representation), zugrunde. Der akkumulativen Repräsentation, basierend auf der Abbildung des Volumens durch eine Datenstruktur, werden die topologisch-geometrischen Strukturmodelle (engl.: boundary representation), die Binären Zellmodelle (engl.: binary cell

decomposition) und die Finiten Elemente Modelle (engl.: finite element representation) zugeordnet. Die hybride Repräsentation stellt eine Kombination aus den generativen und akkumulativen Repräsentationsverfahren dar, meist unter Hinzunahme des Verknüpfungs-, Produktions-, Elementfamilien- und topologisch-geometrischen Strukturmodells. Auf der hybriden Repräsentation bauen die meisten Implementierungen der Volumenmodellierungsfunktionen auf.

Ein weiteres Gebiet der geometrischen Modellierung ist die Baugruppenmodellierung zur Anordnung der Bauteile zueinander durch Funktionen zur Positionierung und Orientierung und durch geometrisch-technische Anordnungsfunktionen. Für schnelle und konsistente Geometrieänderungen und einfache Variantenbildung dienen die Modellierungsverfahren mit Zwangsbedingungen. Dabei werden zwischen den Parametern der geometrischen Elemente Beziehungsnetze mit integrierten Berechnungsvorschriften aufgebaut. Die Formulierung der Zwangsbedingungen erfolgt über den Zusammenhang zwischen der digitalen Repräsentation der Parameter und ihrer Darstellung als Maßzahl, wobei zwischen beiden Formulierungen eine bi-direktionale Assoziativität herrscht. Die wichtigsten Verfahren zur parametrischen Modellierung sind Skizzeninterpretation, Featureverarbeitung und Verarbeitung von Zwangsbedingungen.

Die Skizzeninterpretation ist die Grundlage von Skizziersystemen, die der schnellen, skizzenhaften Eingabe von Geometrien dienen und im Anschluss durch die Skizzeninterpretation in Analyse- und Modifikationsschritten unter Auswertung von Regeln sowie Verwendung von Zwangsbedingungen zu exakten Geometriebeschreibungen führen.

Die Methoden der Featureverarbeitung erlauben anwendungsbezogene Modellierungs- und Verarbeitungsverfahren. Der Begriff Feature bedeutet dabei, dass komplexe, geometrische Objekte definiert werden können, die als anwendungsbezogene Featurebibliotheken bereitgestellt werden. Features können beliebig komplexe Strukturinformationen in sich tragen. Eine Klassifizierung von Features umfasst Formelemente, Volumenprimitive, Bearbeitungselemente und Musterelemente. Die Gestaltrepräsentation eines Features kann durch Geometrielemente oder durch eine parametrische Darstellung in Hinblick auf Variantenbildung erfolgen.

Die parametrische Beschreibung von Bauteilen basiert auf Parametern und Zwangsbedingungen, um die geometrische Bauteilbeschreibung in Abhängigkeit von Einflussgrößen variieren zu können. Die geometrische Bauteilrepräsentation basiert dabei meist auf einer hybriden Repräsentation, um die Verarbeitung von Zwangsbedingungen konsistent durchführen zu können. Die Zwangsbedingungen wirken sich dabei sowohl auf die

boundary representation der einzelnen Features wie auch auf die Anordnung der Features zu Bauteilen und Bauruppen aus.

Die wissensbasierte Modellierung baut auf der Verarbeitung von Zwangsbedingungen und insbesondere auch der Parametrik auf und nutzt deren Funktionalität, um Konstruktionswissen und -logiken in die digitale Repräsentation von Bauteilen abzubilden. Macros sind Zusammenfassungen von Gestaltkomplexen, die über parametrische Beziehungen und Zwangsbedingungen die Bestimmung von Varianten zulassen. Skripte enthalten programmierte Erzeugungslogiken mit der Möglichkeit, Aufbau-logiken zu formulieren. Regeln dienen zur Formulierung von materialen Implikationen (hinreichende Bedingungen). Das ist bedeutend, um in einer Konstruktionslogik alternative Konstruktionswege aufgrund von Klassifikationen auszuwählen. User Defined Features sind Kopien von Erzeugungslogiken, die bei der interaktiven Beschreibung von Konstruktionen mitprotokolliert werden zum Zweck der einfachen Beschreibung von komplexen und umfangreichen Konstruktionsabläufen. Tabellen und Tabellenkalkulationen erlauben es, Methoden der Auslegungs- und Dimensionierungsrechnung mit der parametrischen Modellierung der Bauteilgeometrie zu verbinden.

Neben der Geometrischen Modellierung hat sich die Strukturmodellierung zu einer wichtigen Basismethode herausgebildet, die darauf abzielt, beliebige Strukturen, wie die Produktstruktur, die Featurestruktur und die Modellstruktur, in hierarchischen Strukturen abzubilden, sowie diese digital zu repräsentieren. Eine Strukturmodellierung bietet den Vorteil, dass damit der Aufbau der digitalen Repräsentation schnell erfasst werden kann und eine Navigation durch den Aufbau der digitalen Repräsentation möglich ist. Darüber hinaus können Modellierungsschritte gezielt selektiert und manipuliert werden.

Die mit Hilfe von CAD-Systemen entworfenen geometrischen Strukturen werden im Produktentstehungsprozess durch weitere rechnerunterstützte Anwendungssysteme verwendet. Dazu gehören CAE-Systeme (computer aided engineering) zur rechnerunterstützten Entwicklung, die zur Berechnung, Analyse, Simulation und Optimierung eingesetzt werden wie beispielsweise FEA- (finite element analysis) und MKS- (Mehrkörpersimulation) Systeme. FEA bezeichnet die Rechnerunterstützung für Festigkeits-, Spannungs- und Verformungs-, Wärme- und Akustikberechnungen auf Basis der Finiten Elemente Methode (FEM). Die Finite Elemente Methode ist ein numerisches Verfahren zur näherungsweisen Lösung partieller Differentialgleichungen. [FIN-07]. Numerische Berechnungsverfahren nutzen Algorithmen zur Lösung mathematischer Probleme unter vorwiegender Verwendung der Grundrechenarten mit den zur Verfügung stehenden mathematischen Funktionen. Weitere numerische Verfahren zur Lösung partieller

Differentialgleichungen, die in der Praxis oft bei der Modellierung von technischen Systemen entstehen, sind das Differenzenverfahren, die Linienmethode und das Finite Volumen Verfahren. Durch MKS-Systeme können das kinematische und das dynamische Verhalten von Produkten analysiert und simuliert werden.

Ein weiteres Anwendungsfeld für Rechnerunterstützung im Produktentstehungsprozess sind CAP-Systeme (computer aided planning) in der Arbeitsplanung zur Fertigungs-, Montage- und Prüfplanung. CAR bedeutet computer aided robotics und umfasst die Planung von automatisierten Montagevorgängen für Roboter- und Handhabungssysteme sowie das Generieren von Steuerdaten. CAM-Systeme (computer aided manufacturing) bieten Rechnerunterstützung in der Produktion, insbesondere bei der Erstellung von Steuerdaten für numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen (engl.: numerically controlled machine tools). CAT-Systeme unterstützen die Qualitätssicherung, besonders beim Prüfen von elektrischen und elektronischen Produkten. Der Begriff CAI bedeutet computer aided inspection und bezeichnet den Einsatz rechnerunterstützter Systeme in Wartung, Instandhaltung und Service.

DMU-Systeme (digital mockup, digitale Attrappe) unterstützen die Berechnung von Zusammenbauten (engl.: packaging) sowie die Analyse und Simulation von Ein- und Ausbautvorgängen und die Kollisionsuntersuchung. Die digitale Repräsentation von Bauteilen in DMU-Systemen erfolgt hauptsächlich durch die Produktstruktur sowie eine vereinfachte Geometrie der Einzelteile und Baugruppen auf der Basis von tesselierten bzw. triangulierten Volumen- und Flächengeometrien. Sofern dem Volumen Materialeigenschaften zugewiesen sind, können Gewicht, Schwerpunktlagen sowie Trägheitsmomente und -tensoren berechnet werden.

VR bedeutet virtuelle Realität (engl.: Virtual Reality) und beschreibt eine vom Computer generierte virtuelle Umgebung, die als Benutzerschnittstelle dient und durch Immersion, Interaktion und Imagination gekennzeichnet ist [BUR-96]. Mit VR wird die Darstellung und gleichzeitige Wahrnehmung der Wirklichkeit und ihrer physikalischen Eigenschaften in einer in Echtzeit computergenerierten, interaktiven, virtuellen Umgebung bezeichnet [VIR-07]. Die Immersion ist das Einbezogenensein des Benutzers in die virtuelle Umgebung bzw. das Eintauchen in eine künstliche Welt [IMM-07]. Je größer der Immersionsgrad ist, desto stärker ist für den Benutzer das Gefühl des „Eintauchens in die VR-Welt“. Interaktion bezeichnet das wechselseitige aufeinander Einwirken von Akteuren oder Systemen [INT-07]. Durch Interaktion bietet sich für den Benutzer die Möglichkeit mit der virtuellen Umgebung, dem VR-System, in Echtzeit zu interagieren. Imagination, ein weiteres Merkmal von Umgebungen der virtuellen Realität, suggeriert dem Benutzer die Illusion des Vorhandenseins manipulierbarer

Objekte. Imagination ist nach [IMA-07] die Fähigkeit, unter Einbeziehung der Vorstellungskraft Konzepte, Ideen oder Bilder zu entwickeln, die materiell nicht vorhanden sind.

VR-Systeme sind durch spezielle Hardware und Software gekennzeichnet. Um ein Gefühl der Immersion zu erzeugen, werden Ausgabegeräte wie Großbildleinwände oder CAVEs eingesetzt. Für einen räumlichen, dreidimensionalen Eindruck werden zwei Bilder aus unterschiedlichen Perspektiven erzeugt und in einer Stereoprojektion dargestellt. Um das jeweilige Bild dem richtigen Auge zuzuführen, können entweder ein aktives Stereosignal, das durch Shutterbrillen betrachtet wird, oder ein passives Stereosignal, das durch 3D-Brillen basierend auf Polarisationsfiltern oder Interferenzfiltern betrachtet wird, erzeugt werden. Für die Interaktion mit Objekten der virtuellen Welt werden unter anderem Spacemouse, Datenhandschuh und Flystick verwendet. Zur Erfassung der Positionierung und Orientierung der Eingabegeräte in Echtzeit dienen Trackingsysteme, die beispielsweise auf Basis optischer oder elektromagnetischer Verfahren arbeiten.

Zur Generierung der virtuellen Realität werden speziell ausgelegte Programme benötigt, die dreidimensionale Welten mit mindestens 25 Bildern pro Sekunde, stereoskopisch getrennt für linkes und rechtes Auge, berechnen können [VIR-07]. Der Einsatz dieser Programme setzt die Verwendung von leistungsfähigen Rechensystemen voraus, deren Leistungsfähigkeit insbesondere in der grafischen Berechnung liegt.

Ein wissenschaftliches Visualisierungsprogramm zur grafischen Darstellung von Daten, Wissen oder Ergebnissen in der virtuellen Realität ist die Software Covise. Covise steht für Collaborative Visualization and Simulation Environment und ist eine modular aufgebaute Softwareumgebung zur Visualisierung von Daten insbesondere aus dem Produktentstehungsprozess [HLR-07], [VIS-07].

Ein weiteres Werkzeug zur Datenvisualisierung ist AR (Augmented Reality) und bezeichnet die erweiterte Realität. Bei dieser Technik wird eine reale Szene, die durch ein halb-transparentes Display eines Datenhelms weiterhin sichtbar bleibt, mit computer-generierter Information angereichert. Anwendungen von AR sind heute vor allem im Bereich Training und Wartung zu finden [AZU-97]. Ein typisches Ausgabegerät von AR-Systemen ist das Head-Mounted-Display.

Das Produktdatenmanagement stellt Methoden bereit, um Produktdaten im Produktentwicklungsprozess zu verwalten und Produktdatenflüsse durch die Prozessketten der Produktentwicklung zu steuern [GRA-02], [ISO-2]. Die Methoden zielen dabei auf die Repräsentation von strukturellen Produktmerkmalen und bilden diese auf ablauf- und aufbauorganisatorische Strukturen ab. Zu den Methoden des Produktdatenmanagements

zählen die Produktstrukturierung, die Produktkonfiguration, die Produktidentifikation und -klassifikation, das Freigabe- und Änderungswesen sowie das Metamodell zur Abbildung von Produktdaten.

Schnittstellen sind für den Rechnereinsatz im Produktentwicklungsprozess von zentraler Bedeutung. Sie zielen einerseits auf die Softwareintegration in Form von systeminternen Schnittstellen wie auch auf die Kopplung von Anwendungssoftwaresystemen durch Schnittstellen zum Produktdatenaustausch [AND-00], [RUD-99], [POL-93].

Systeminterne Schnittstellen werden zur Ergänzung der Anwendungssoftware durch zusätzliche Programme angeboten und aus diesem Grund auch als Application Programming Interface (API) bezeichnet. Neben dem Zugriff auf Datenbanken und Hardware wie Festplatte oder Grafikkarte kann eine API auch das Erstellen von Komponenten der grafischen Benutzungsschnittstelle (GUI) ermöglichen bzw. vereinfachen [API-07].

Schnittstellen zum Produktdatenaustausch definieren unter anderem folgende Datenformate und Datenstrukturen zum Austausch von Produktdaten. IGES (Initial Graphics Exchange Specification) dient dem Austausch von zweidimensionalen technischen Zeichnungen und dreidimensionalen Geometriemodellen [IGE-95]. Die VDA-FS (Verband der Automobilindustrie - Flächenschnittstelle) ermöglicht als vereinfachte Untermenge des IGES-Standards den Austausch von Freiformkurven- und Freiformflächendaten [VDA-87].

Darüber hinaus wird die internationale Norm ISO 10303 „Product Data Representation and Exchange“, die auch unter ihrem Arbeitstitel STEP „Standard for the Exchange of Product Model Data“ bekannt wurde, eingesetzt [ISO-1]. STEP deckt neben dem Produktdatenaustausch auch die Systemintegration über Datenbanken ab. Innerhalb von STEP können Produktdateninformationen des gesamten Lebenszyklus abgebildet werden. Somit eignet sich STEP für den Datenaustausch zwischen CAD-, CAE-, DMU-, CAM- und PDM-Systemen. Die Vorgehensweise beim Datenaustausch zwischen diesen Systemen wird im Rahmen von STEP in Anwendungsprotokollen (AP) definiert, die aus diesem Grund industrielle Bedeutung erlangt haben. Damit stellt STEP für Prozessketten die Plattform für die Integration von Anwendungssystemen dar und deckt unter anderem den Austausch von Geometriemodellen, technischen Zeichnungen, Featuremodellen und Produktstrukturen ab. Produktmodelle können jedoch noch nicht parametrisch ausgetauscht werden.

Eine weitere Standarddatenschnittstelle vieler CAD-Systeme ist die STL-Schnittstelle. STL steht unter anderem für Standard Triangulation Language. Die STL-Schnittstelle wird in der Regel für den Export von dreidimensionalen Geometriemodellen aus CAD-Systemen heraus zur Fertigung durch Fertigungsverfahren des Rapid Prototypings verwendet. Das STL-Format beinhaltet die Beschreibung der Oberfläche von dreidimensionalen Körpern durch

Dreiecksfacetten. Jede Dreiecksfacette wird dabei durch drei Eckpunkte und die zugehörige Flächennormale des Dreiecks charakterisiert [STL-08].

Die Virtual Reality Modeling Language (VRML) ist eine Beschreibungssprache für die Geometrien, Ausleuchtungen, Animationen und Interaktionsmöglichkeiten von dreidimensionalen Szenen, die beispielsweise in der virtuellen Realität betrachtet werden können. Dazu wird die VRML-Darstellung durch die Rechnerhardware in Echtzeit aus den Geometriedaten berechnet. VRML-Dateien sind durch die Dateierweiterung wrl gekennzeichnet. Die wesentlichen Bestandteile der Beschreibungssprache sind Knoten, durch die Ereignisse verarbeitet werden können. Das VRML-Format bietet über das STL-Format hinaus die Möglichkeit, die Oberflächen mit Farben oder Texturen zu versehen. Desweiteren können im VRML-Format zeitliche Veränderungen von Geometrieelementen dargestellt werden [VRM-08].

Neben diesen systemübergreifenden Schnittstellen gibt es auch native Schnittstellen. Native, systemspezifische Schnittstellen sind jeweils bezogen auf ein bestimmtes Anwendungssoftwaresystem. Sie sind also abhängig vom Hersteller bzw. dem Systemanbieter [DUB-05].

Kapitel 3 Produktentstehung in der Gießtechnik

Nachdem im Kapitel 2 der technologische Stand bei der Entstehung von Erzeugnissen erarbeitet worden ist, wird in diesem Kapitel die Entstehung von Gießereierzeugnissen der Automobilindustrie herausgearbeitet. Dazu werden, ausgehend von der Einordnung dieser Erzeugnisse, Arbeitsverfahren, Methoden und Werkzeuge vorgestellt, die zur ihrer Entstehung beitragen. Darauf aufbauend werden die Produktentstehungsprozesse abgeleitet, die die zuvor vorgestellten Arbeitsverfahren, Methoden und Werkzeuge beinhalten.

3.1 Arbeitsbereiche

Im Folgenden wird die Produktentstehung in der Gießtechnik anhand der Verfahren, Methoden und Werkzeuge beschrieben, die in den Produktlebensphasen Konstruktion und Entwicklung sowie Fertigung eingesetzt werden.

3.1.1 Produkte

Die Produkte der Gießtechnik, deren Entstehungsprozesse in dieser Arbeit betrachtet werden, können den beiden Kategorien Gießereierzeugnisse und Gießwerkzeuge zugeordnet werden. Die Gießereierzeugnisse kommen aus dem Bereich der Automobilindustrie und können aus fertigungstechnischer Sicht als Gussteile bezeichnet werden. Zu ihnen zählen Motoren-, Karosserie- und Fahrwerksbauteile von Kraftfahrzeugen. Zu den Motorenbauteilen zählen beispielsweise Zylinderkurbelgehäuse, Zylinderköpfe, Steuergehäusedeckel, Getriebegehäuse, Abgasturbolader und Ölwannen. Zu den Karosseriebauteilen zählen beispielsweise Integralträger, Querträger und Heckklappen. Zu den Fahrwerksbauteilen zählen beispielsweise Bremscheiben.

Die Gießwerkzeuge sind die Fertigungssysteme zur Fertigung der Gussteile. Aus diesem Grund erfolgt die Produktentstehung der Gießwerkzeuge auf Basis der Gussteile. Durch die Gussteile werden die Form- und Gießverfahren festgelegt, die zur Gussteilfertigung eingesetzt werden. Die festgelegten Form- und Gießverfahren sowie die Gussteile bestimmen die Gestalt der Fertigungssysteme zur Fertigung der Gussteile.

Zur Fertigung der oben genannten Produkte werden die Fertigungsverfahren Druckgießen, Kokillengießen und Gießen in Sandformen aus der Hauptgruppe Urformen eingesetzt. Aus den Produkten und den Gießverfahren ergeben sich die Gießwerkzeuge. In Abhängigkeit vom Gießverfahren besteht das Produkt Gießwerkzeug aus unterschiedlichen Bauteilen. Im

Folgenden werden die wesentlichen Bauteile der Gießwerkzeuge vorgestellt. Dabei wird exemplarisch auf die Bauteile von Druckgießwerkzeugen in einer größeren Detailtiefe eingegangen.

Beim Druckgießen, das im Warmkammer- und Kaltkammerverfahren betrieben werden kann, kommen Druckgießmaschinen verschiedener Leistungsklassen zum Einsatz. Druckgießmaschinen bestehen aus den beiden Formhälften Einlass- und Auswerferseite. In *Abbildung 19* werden die wichtigsten Bestandteile von Druckgießmaschinen im Warmkammerverfahren gezeigt. Die feste Formhälfte entspricht in dieser Abbildung der Einlassseite der Form, die bewegliche Formhälfte entspricht der Auswerferseite der Form. Die Auswerferseite der Form kann, im Gegensatz zu dieser Abbildung, geteilt sein. Die Formteilung wird in diesem Fall durch Schieber realisiert. Des Weiteren enthält die Auswerferseite von Druckgussformen eine Auswerfereinheit, bestehend aus Auswerferplatte und Auswerferstiften.

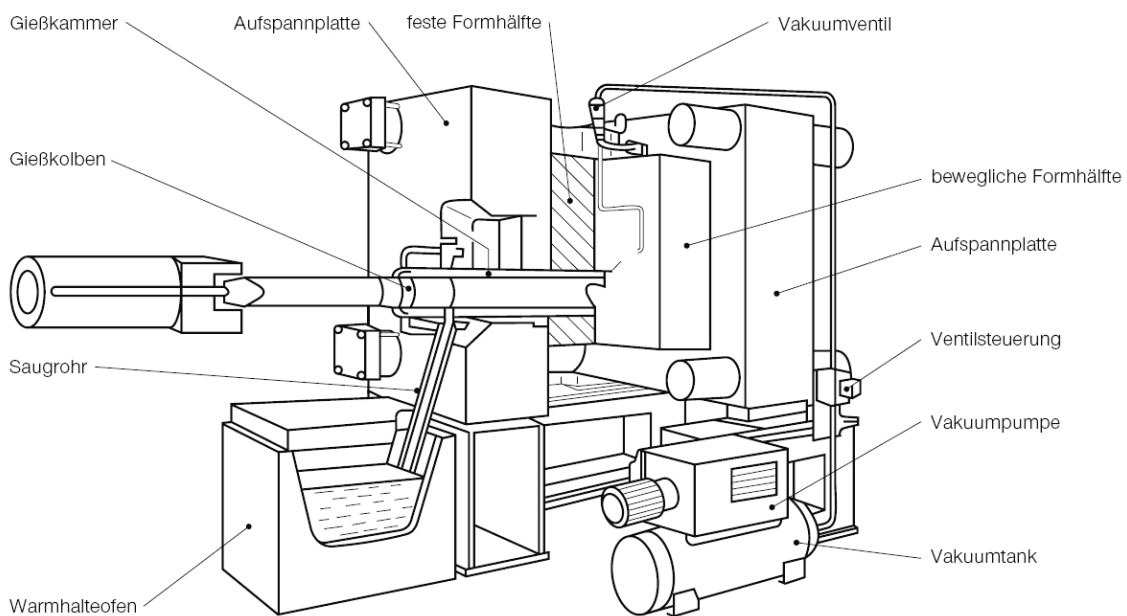


Abbildung 19: Aufbau von Druckgießmaschinen [FRI-06]

Die Gießwerkzeuge des Kokillengießens sind Kokillen, Seitenschieber und Kernschießmaschinen. Beim Gießen in verlorenen Sandformen, die durch Maschinenformen gefertigt werden, sind die Gießwerkzeuge Fomschießmaschinen und Kernschießmaschinen.

3.1.2 Konstruktions- und Entwicklungsmethoden

An dieser Stelle werden die Vorgehensweise bei der Konstruktion und Entwicklung von Produkten der Gießtechnik in der Automobilindustrie sowie die zugrunde liegenden Methoden erläutert.

Das Ziel der Konstruktion und Entwicklung von Produkten der Automobilindustrie ist die Erfüllung der Marktanforderungen an die Produkte. Wie in *Abbildung 4* gezeigt, entstehen durch Marktanalysen Produktideen. Die Produktideen werden zu Produktkonzepten verarbeitet. Bei weiterer Präzisierung der Produktkonzepte in Produktentwürfen und deren Ausarbeitungen werden die technischen Produkthanforderungen definiert. Der Detaillierungsgrad der Produkthanforderungen steigt mit wachsendem Produktreifegrad innerhalb dieser Produktentwicklungsphasen. Die Anforderungen, die im Rahmen der Entwicklungsphase formuliert und an die Produkte der Automobilindustrie gestellt werden, haben direkten Einfluss auf die Anforderungen an die Produkte zur Fertigung der Produkte der Automobilindustrie. Die Entwicklung der Produkte zur Fertigung der Produkte der Automobilindustrie wird zeitparallel in einer frühen Entwicklungsphase durchgeführt und erfolgt somit, in Anlehnung an *Abbildung 2*, simultan.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die Produkte der Automobilindustrie als Gussteile und die Produkte zur Fertigung der Produkte der Automobilindustrie als Gießwerkzeuge bezeichnet. Des Weiteren wird in dieser Arbeit der Begriff Rohteil dem Begriff Gussteil gleichgesetzt. Die Gestaltung der Gussteile hat einen sehr großen Einfluss auf die Gestaltung der Gießwerkzeuge. Umgekehrt wirkt sich die Gestaltung der Gießwerkzeuge im Sinne des fertigungsgerechten und montagegerechten Konstruierens nach [PAH-07] auch auf die Gestaltung der Gussteile aus. In der Praxis kann fertigungsgerechtes und montagegerechtes Konstruieren, aus Sicht der Arbeitsorganisation, insbesondere durch Simultaneous Engineering unterstützt werden.

Durch Simultaneous Engineering werden zum einen rechtzeitig Fehler bei der Gestaltung erkannt und vermieden, zum anderen wird die Gesamtentwicklungszeit für Gussteile und Gießwerkzeuge verringert. Daraus resultiert auch eine Reduzierung der Entwicklungskosten. Aus informationstechnischer Sicht werden die Konstruktion und Entwicklung von Gussteilen und Gießwerkzeugen sowie die Arbeitsorganisation Simultaneous Engineering durch computergestützte Anwendungssysteme unterstützt. Die computergestützten Anwendungssysteme erhöhen den virtuellen Grad der Produktentstehung und ermöglichen folglich die Bewertung und Änderung der Produkte zu einem immer früheren Zeitpunkt der Lebensphase.

Basierend auf den technischen Produkthanforderungen wird die Konstruktion und Entwicklung von Gussteilen durchgeführt. Die Geometriemodellierung findet im CAD-System CATIA V5 statt. Die geometrische Beschreibung bei der Volumenmodellierung erfolgt in diesem CAD-System als hybride Repräsentation. Zur Geometriemodellierung werden Skizziersysteme, parametrische Bauteilbeschreibungen, Featuretechnologien und Baugruppenmodellierung verwendet. Parallel dazu resultiert die Strukturmodellierung.

Die Geometriemodelle von Gussteilen setzen sich aus Teilmodellen zusammen, die klar voneinander abgegrenzt sind. Die Teilmodelle können unabhängig voneinander aufgerufen, bearbeitet und gespeichert werden. Der Aufbau der Geometriemodelle beruht innerhalb der Teilmodelle auf geometrischen Referenzobjekten. Die geometrischen Referenzobjekte der Teilmodelle beruhen ihrerseits auf geometrischen Referenzobjekten des gesamten Geometriemodells.

Zur Gussteilkonstruktion wird eine Konstruktionsmethode, die an dieser Stelle kurz vorgestellt wird, angewendet. Die Realisierung dieser Konstruktionsmethode wird durch die Werkzeuge zur Geometriemodellierung unterstützt. Inhalt dieser Konstruktionsmethode ist die simultane, verteilte, assoziative und funktionsorientierte Geometriemodellierung auf Basis von skelettförmigen Grundmodellen und allgemeinen geometrischen Grundkörpern, die in ihrer Gesamtheit das Rohteil des Gussteils geometrisch repräsentieren und durch boolesche Operationen zum Fertigteil, dem Gussteil, gewandelt werden. Bei der Gussteilgestaltung werden einige der in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Methoden zur Lösungssuche eingesetzt. Zu den vorrangig eingesetzten Lösungsmethoden zählen die konventionellen und die intuitiv betonten. Zum Teil werden auch die diskursiv betonten Lösungsmethoden verwendet. Die Geometriemodelle beinhalten sämtliche konstruktionsrelevanten Informationen wie beispielsweise Stücklisten, Toleranzangaben, Werkstoffzuordnungen und Oberflächenrauigkeitswerte.

Die auf diese Weise generierten Geometriemodelle der Gussteile bilden die geometrische Grundlage für die Geometriemodellierung der Gießwerkzeuge. Zur Geometriemodellierung der Gießwerkzeuge wird dieselbe Konstruktionsmethode wie zur Geometriemodellierung der Gussteile eingesetzt. Dabei stützt sich die Anwendung derselben Konstruktionsmethode auf dieselben Werkzeuge zur Geometriemodellierung. Als Bestandteil der Geometriemodellierung ist bei der Konstruktion von Gießwerkzeugen die Baugruppenmodellierung von Bedeutung. Darüber hinaus wird zur Geometriemodellierung bestimmter Gießwerkzeugbestandteile das CAD-System Tebis eingesetzt. Die Geometriemodelle der Gussteile und Gießwerkzeuge werden in einem zentralen PDM-System abgelegt und stehen von diesem aus zur weiteren Verwendung bereit.

Die Geometriemodelle der Gussteile und Gießwerkzeuge bilden die Grundlage für die weitere Konstruktion und Entwicklung sowie für die Fertigung der Gießwerkzeuge und der Gussteile. Zur Entwicklung der Gussteile und Gießwerkzeuge werden unter anderem Methoden und Werkzeuge aus dem Berechnungs- und Simulationsbereich eingesetzt. Zu den eingesetzten Methoden und Werkzeugen zählen Wandstärkeanalyse und Gießsimulation, die im Folgenden vorgestellt werden. Die eingesetzten Methoden zur Lösungssuche entsprechen denen der Phase Konstruktion von Gussteilen.

Die Analyse der Wandstärke in Geometriemodellen von Gussteilen ermöglicht die Berücksichtigung der Wandstärke in Hinsicht auf die Produkthanforderungen. Die Ermittlung der Wandstärkewerte geschieht in digitalen Geometriemodellen von Gussteilen. Dazu werden aus der exakten geometrischen Repräsentation von Gussteilen in dem CAD-System CATIA V5 tesselierte Datenmodelle zur Weiterverwendung abgeleitet. Die Wandstärkewerte von tesselierten Datenmodellen der Gussteile werden in dem CAE-System Magics berechnet. Nach der Berechnung werden die Wandstärkewerte auf der Oberfläche der tesselierten Datenmodelle innerhalb einer Farbskala dargestellt.

Unter Berücksichtigung der Produkthanforderungen werden die berechneten Wandstärkewerte analysiert und interpretiert. Zu den Produkthanforderungen, die im Rahmen von Wandstärkeanalysen bewertet werden, zählen Anforderungen an die Produktfestigkeit, die beispielsweise als Ergebnis von Struktursimulationen in der Gussteillebensphase Entwicklung durch Ergebnisse von FEM-Simulationen vorliegen. Durch die Darstellung der Wandstärkewerte werden die geometrischen Bereiche mit zu geringen Wandstärken im Gussteil erkannt. Die Erkenntnisse fließen in die Geometriemodellierung des Gussteils im 3D-CAD-System ein.

Ein Werkzeug zur Entwicklung von Gussteilen und Gießwerkzeugen ist die Gießsimulation. Mit Hilfe von Gießsimulationen werden die Abläufe zur Fertigung von Gussteilen innerhalb der Gießwerkzeuge berechnet. Gießsimulationen zählen zu den numerischen Berechnungsverfahren. Bei Gießsimulationen werden die metallurgischen Fertigungsabläufe beim Gießen berechnet. Gegenstand von Gießsimulationen sind die Formfüllung und die Erstarrung unter Berücksichtigung der eingesetzten Fertigungsverfahren der Hauptgruppe Urformen.

Gießsimulationen werden in dem CAE-System MAGMASOFT durchgeführt. Dazu gibt es zwei Möglichkeiten. In einer frühen Phase der Produktentstehung, in der bereits Geometriemodelle von Gussteilen, jedoch nicht von Gießwerkzeugen im CAD-System vorliegen, werden beispielsweise zur Bewertung der fertigungsgerechten Gestaltung der Gussteile sowie zur Auslegung der Gießwerkzeuge und der Gießparameter, Gießsimulationen durchgeführt. Dabei

werden auf Basis der Gussteile, die als Ergebnis der Geometriemodellierung im CAD-System CATIA zur Verfügung stehen, die berechnungsrelevanten geometrischen Bestandteile der Gießwerkzeuge, im CAE-System Magics bzw. in MAGMASOFT, modelliert. Die andere Möglichkeit wird in einer späteren Phase der Produktentstehung angewendet, in der die Geometriemodelle der Gießwerkzeuge im CAD-System CATIA als Ergebnis der Konstruktion vorliegen. Untersuchungshintergrund sind dabei Erkenntnisse aus den Lebensphasen Konstruktion, Entwicklung, Fertigung und Gebrauch von Gussteilen und Gießwerkzeugen. Bei diesen beiden Möglichkeiten zur Durchführung von Gießsimulationen werden zur Bildung von Simulationsmodellen die Geometriemodelle der Gießsysteme, Fertigungsparameter sowie Betriebsdaten angewendet.

Die Geometriemodelle der Gießsysteme bilden die Grundlage zum Aufbau von Simulationsmodellen. Zur numerischen Berechnung werden die Geometriemodelle von Gießsystemen zur Netzgenerierung verwendet. In den Elementen des Berechnungsnetzes werden nach dem Finite Differenzenverfahren physikalische Größen berechnet. Zu diesen physikalischen Größen zählen der Druck, die Temperatur und die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit. Diese physikalischen Größen sind die Grundlage für die Berechnung von weiteren, abhängigen Ergebnisgrößen in dem Berechnungsnetz, die zur Unterstützung der Analyse und Interpretation der Gießsimulationsergebnisse beitragen. Die gesamten Ergebnisse liegen in dem Berechnungsnetz vor und werden zur Auswertung durch Verfahren der Computergraphik aufbereitet.

Den Abschluss von Gießsimulationen bildet die Auswertung der Berechnungsergebnisse. Dabei werden zuerst Rückschlüsse und als Folge Entscheidungen zu den Geometriemodellen der Gussteile und Gießwerkzeuge sowie zu der Einstellung der Parameter beim Fertigen getroffen. Im Zuge der Produktentstehung bestimmen die Entscheidungen in der Phase Konstruktion und Entwicklung sowie in der Phase Fertigung die geometrische Gestalt von Gussteilen und Gießwerkzeugen und die Parameter der Gießwerkzeuge.

3.1.3 Fertigung

Die Produktlebensphase Fertigung von Gießwerkzeugen und Gussteilen startet im Verlauf der Lebensphase Konstruktion und Entwicklung. Im Folgenden werden die zur Gießwerkzeug- und Gussteilfertigung eingesetzten Verfahren vorgestellt. Die Anforderungen an die Fertigung von Gießwerkzeugen und Gussteilen sind Ergebnisse aus der Phase Konstruktion und Entwicklung. Eine wesentliche Voraussetzung zur Fertigung von Gießwerkzeugen und

Gussteilen ist die Verfügbarkeit von Geometriemodellen, die in der Phase Konstruktion im CAD-System erstellt werden. Sobald diese Geometriemodelle vorhanden sind, können Prototypen gefertigt werden. Die Fertigung von Prototypen innerhalb einer vergleichsweise kurzen Zeit zur Unterstützung der Produktkonstruktion und -entwicklung wird durch Technologien des Rapid Prototyping bewerkstelligt.

Zur schnellen Prototypenfertigung von Gussteilen und Gießwerkzeugen kommen verschiedene Verfahren des Rapid Prototyping zum Einsatz. Zu den eingesetzten Verfahren zählen unter anderem das 3D-Printing und das Selektive Lasersintern. Beim 3D-Printing werden pulverförmiger Gips und Sand als Ausgangswerkstoffe eingesetzt. Dabei werden durch die Verwendung von Gips, Bindemittel und Farbe mechanisch nicht belastbare Prototypen von Gussteilen und Gießwerkzeugen generiert. Dagegen werden durch die Verwendung von Sand und Bindemittel mechanisch belastbare Prototypen beim 3D-Printing erzeugt. Beim Selektiven Lasersintern werden durch den Ausgangswerkstoff Sand mechanisch belastbare Prototypen generiert.

Als Weiterentwicklung des Laser Sintering wird das Laser Cusing zur Fertigung von Bauteilen von Gießwerkzeugen eingesetzt. Beim Laser Cusing werden Bauteile schichtweise aus Metallpulver durch Aufschmelzen aufgebaut [BAY-08]. Im Gegensatz zu den anderen Rapid Prototyping Verfahren wird das Laser Cusing auch zur Fertigung von Bauteilen von Gießwerkzeugen eingesetzt, die den Anforderungen von Serienwerkzeugen genügen.

Die Fertigung von Gießwerkzeugen bzw. von Gießwerkzeugbestandteilen erfolgt unter anderem durch Verfahren aus der Teilgruppe Spanen der Hauptgruppe Trennen. Zu den eingesetzten Fertigungsverfahren der Hauptgruppe Trennen zählen Bohren, Drehen und Fräsen. Diese Fertigungsverfahren werden durch numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen realisiert. Die numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen sind als Teilsysteme von Fertigungssystemen ausgebildet.

Zur Fertigung von Gießwerkzeugbestandteilen werden auf Grundlage der Geometriemodelle der CAD-Systeme CATIA V5 und Tebis NC-Programme in einem CAM-Modul des CAD-Systems Tebis erstellt. Zur besseren Vorbereitung der Fertigung werden in einem CAE-Modul des CAD-Systems Tebis Bewegungssimulationen zur Kollisionsuntersuchung auf Basis der Geometriemodelle der Werkzeugmaschinen, der Werkstücke sowie der NC-Programme erstellt, durchgeführt und ausgewertet. Die auf diese Weise geprüften NC-Programme, die somit die Bewegungsgrundlagen für die Geometriemodelle der Werkzeugmaschinen und Werkstücke sind, werden daraufhin an das Steuerungssystem der Werkzeugmaschinen zur Fertigung der Gießwerkzeugbestandteile übermittelt. Nach erfolgter Fertigung der Gießwerkzeuge bzw. Gießwerkzeugbestandteile kommen folgende Verfahren zur

Gussteilfertigung zur Anwendung. Zu den eingesetzten Fertigungsverfahren der Hauptgruppe Urformen für die Rohteilfertigung zählen das Druckgießen, das Kokillengießen und das Gießen in verlorenen Sandformen. Abschließend wird die weitere Fertigung der Rohteile zu Fertigteilen durch Verfahren der Hauptgruppe Trennen erreicht.

3.1.4 Qualitätsprüfung und Qualitätsverbesserung

Zur Prüfung von Qualitätsmerkmalen im Verlauf der Fertigung von Gießwerkzeugen und Gussteilen kommen verschiedene Analyseverfahren zur Anwendung. Ein wesentliches Qualitätsmerkmal von Gießwerkzeugen ist die geometrische Form. Je geringer die tatsächliche geometrische Form von der vorgegebenen Form abweicht, desto höher ist der Erfüllungsgrad der Anforderungen für dieses Qualitätsmerkmal. Die geometrische Form von Gießwerkzeugbestandteilen wird durch ein optisches Messsystem ermittelt. Die Messwerte werden in dem CAQ-System ATOS weiterverarbeitet, das direkt mit dem Messsystem gekoppelt ist. Durch Importieren der Geometriemodelle aus dem CAD-System CATIA bzw. Tebis in das CAQ-System ATOS werden die Berechnungen der geometrischen Formabweichung durchgeführt und auf den Geometriemodellen zur Auswertung dargestellt.

Ein wesentliches Qualitätsmerkmal von gefertigten Gussteilen ist die Werkstoffdichte in den Gussteilen. Zu geringe Werte der Werkstoffdichte deuten auf Hohlräume hin, die als Fehler in Gussteilen angesehen werden. Je häufiger geringe Werte der Werkstoffdichte vorliegen, desto niedriger ist der Erfüllungsgrad für dieses Qualitätsmerkmal. Zur Ermittlung des Erfüllungsgrads wird die Werkstoffdichte mit dem Verfahren Computertomographie gemessen. Durch die Anwendung der Computertomographie werden die Werte der Werkstoffdichte in Gussteilen gemessen und in dem CAQ-System VGStudio Max dargestellt und ausgewertet. Die Röntgen-Computer-Tomographie zählt zu den Verfahren der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung.

Beim Druckgießen ist eine angewendete Methode zur Erfassung von Betriebsdaten, die Messung der Temperaturverteilung in den Formeinsätzen der Schieber durch Fotografieren mit einer Kamera zur Aufnahme der Intensität der Wärmestrahlung. Als Bestandteil des Qualitätsmanagements ist die Analyse der Temperaturverteilung an Gießwerkzeugbestandteilen eine Tätigkeit zur Qualitätsverbesserung.

3.2 Produktentstehungsprozesse

Im ersten Teil dieses Kapitels wurden die Verfahren, Methoden und Werkzeuge beschrieben, die in den Lebensphasen Konstruktion und Entwicklung sowie Fertigung in der Produktentstehung der Gießtechnik eingesetzt werden. Aus diesen Grundlagen werden in diesem Teil des Kapitels die Prozesse abgeleitet, die mit den beschriebenen Verfahren, Methoden und Werkzeugen die Entstehung von Gießereierzeugnissen bewirken. Zur Vorbereitung der Analyse in Kapitel 4 werden die abgeleiteten Prozesse in ihren Zusammenhängen dargestellt.

3.2.1 Prozesse der Arbeitsbereiche

Der Ableitung der Prozesse zur Entstehung von Gießereierzeugnissen, die an dieser Stelle durchgeführt wird, liegen die beschriebenen Verfahren, Methoden und Werkzeuge aus dem vorherigen Abschnitt dieses Kapitels zugrunde.

Ausgangszustand der Prozessableitung sollen die Ergebnisse der Gussteilgestaltung in der Phase Konstruktion sein. Die Ergebnisse dieser Phase, die durch die zuvor beschriebene Konstruktionsmethodik erzeugt werden, sind die Geometriemodelle der Gussteile. Die Geometriemodelle der Gussteile aus der Phase Konstruktion werden in der Phase Entwicklung, bezogen auf definierbare Einflussgrößen, verbessert. Eine Möglichkeit zur Durchführung von Verbesserungen der Konstruktionsergebnisse ist die Simulation des Betriebsverhaltens der Gussteile. Zur Simulation werden unter anderem numerische Berechnungsverfahren von FEA-Systemen zur Durchführung von Festigkeits-, Spannungs- und Verformungs-, Wärme- und Akustikberechnungen angewendet. Aus der Analyse der Simulationsergebnisse können Änderungen für die Geometriemodelle bzw. die Betriebsparameter der Gussteile abgeleitet werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Konstruktionsergebnisse von Gussteilen ist in der Phase Entwicklung die schnelle Fertigung von Prototypen mit Verfahren des Rapid Prototypings zur Analyse. Die Geometriemodelle der Gussteile werden des Weiteren nach dem Kriterium Wandstärke untersucht. Dazu wird die Wandstärkeverteilung in den Geometriemodellen zuerst berechnet und auf den Geometriemodellen dargestellt. Die Ergebnisse der Wandstärkeanalyse sind Änderungen der Geometriemodelle. Zur Entwicklung von Gussteilen und Gießwerkzeugen werden Gießsimulationen eingesetzt. Die Ergebnisse von Gießsimulationen sind Änderungen der Geometriemodelle von Gussteilen bzw. Gießwerkzeugen sowie Änderungen der Fertigungsparameter. Auf Basis der Geometrie-

modelle der Gussteile werden Geometriemodelle der Gießwerkzeuge in der Phase Konstruktion generiert. Die Geometriemodelle aus der Phase Konstruktion von Gießwerkzeugen bilden die Grundlage für die schnelle Fertigung von Gießwerkzeugen. Das wird durch das Rapid Tooling mit generativen Fertigungsverfahren des Rapid Prototypings realisiert. Die Funktionsanalysen der Prototypen fließen in die Geometriemodellierung der Gießwerkzeuge ein.

Nachfolgend werden die Prozesse in der Lebensphase Fertigung von Gießwerkzeugen beschrieben. Als Bestandteil der Arbeitsvorbereitung erfolgt die Programmierung der Abläufe zur Steuerung der Werkzeugmaschinen. Die Programmierung der Abläufe wird in NC-Programmen hinterlegt. Die Anwendung der NC-Programme auf den Werkzeugmaschinen wird vor der realen Fertigung simuliert. Die Bewegungssimulation kann Änderungen in den NC-Programmen bzw. Änderungen der Geometriemodelle der Gießwerkzeuge nach sich ziehen. Die Fertigung der Gießwerkzeuge geschieht, indem die NC-Programme durch die Steuerungen der Werkzeugmaschinen an den Werkstücken umgesetzt werden. Bei der Fertigung von Gießwerkzeugen kommen hauptsächlich die Verfahren Bohren und Fräsen aus der Hauptgruppe Trennen zum Einsatz. Die gefertigten Teile sind Gießwerkzeuge bzw. Gießwerkzeugbestandteile. Die Maßhaltigkeit bestimmter Gießwerkzeugbestandteile wird durch optische Messverfahren im Rahmen der Qualitätsprüfung analysiert. Aus den Analyseergebnissen können Änderungen der Fertigungsparameter abgeleitet werden.

Die abschließende Lebensphase bei der Produktentstehung von Gießereierzeugnissen ist die Fertigung der Gussteile. Aus der Hauptgruppe Urformen werden die Gießverfahren Druckgießen, Kokillengießen und Gießen in verlorenen Sandformen zur Fertigung der Gussteile eingesetzt. Die Gussteile liegen nach dem Gießen als Rohteile vor. Bei dem Betrieb der Gießwerkzeuge wird die Intensität der Wärmestrahlung von Gießwerkzeugbestandteilen zur Analyse der Temperaturverteilung gemessen. Die Analyseergebnisse bewirken eine Änderung der Fertigungsparameter und werden zur Validierung von Gießsimulationen eingesetzt. Nach dem Urformen wird die Analyse der Werkstoffdichte im Rohteil zur Qualitätsprüfung durchgeführt. Die Analyseergebnisse wirken sich auf die Geometriemodelle der Gussteile sowie auf die Fertigungsparameter beim Urformen in Form von Änderungen aus. Darüber hinaus werden die Analyseergebnisse mit den Ergebnissen der Gießsimulation verglichen. Die durch Urformen entstandenen Rohteile werden vorwiegend durch die Fertigungsverfahren Bohren und Fräsen aus der Verfahrenshauptgruppe Trennen zu Fertigteilen verarbeitet.

3.2.2 Verknüpfung der Prozesse

In diesem Teil der Arbeit werden die zuvor abgeleiteten Prozesse in ihren Zusammenhängen dargestellt. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit sowie zur Betonung der wesentlichen Merkmale der Prozesse für diese Arbeit werden die Prozesse tabellarisch nach den Kriterien Lebensphase, Produkt, Tätigkeit sowie Ergebnis und Auswirkung der Tätigkeit geordnet. Aus der tabellarischen Prozessbeschreibung wird darauf folgend ein Schema erstellt, das die Zusammenhänge zwischen den Prozessen verdeutlicht. Dieses Schema soll die Ausgangsbasis für die Durchführung der Analyse der Produktentstehungsprozesse im nächsten Kapitel sein. In *Tabelle 2* sind die Produktentstehungsprozesse in der Gießtechnik, die in diesem Kapitel erarbeitet wurden, enthalten.

Die Arbeitsabläufe der Produktentstehung der Gießtechnik sollen durch die in *Tabelle 2* benannten Prozesse hinreichend genau beschrieben sein, um im weiteren Verlauf dieser Arbeit eine Analyse dieser Prozesse durchzuführen zu können, mit der das Ziel dieser Arbeit, die Entwicklung und Einbindung von Simulationsmethoden und Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik, erreicht wird.

Lebensphase	Produkt	Tätigkeit/Prozessbezeichnung	Ergebnis der Tätigkeit	Auswirkung der Tätigkeit	Prozessnummer	
Konstruktion	Gussteil	Geometrie-modellierung	Geometriemodell	Geometriemodellierung Gießwerkzeug, Auswirkung auf alle Prozesse	1	
Entwicklung		Simulation Betriebsverhalten	Analyse und Interpretation der Simulationsergebnisse	Änderung Geometriemodellierung, Änderung Simulation Betriebsverhalten	2	
		Rapid Prototyping	Analyse des Prototyps	Änderung Geometriemodellierung	3	
		Wandstärkeanalyse	Analyse und Interpretation der Berechnungsergebnisse	Änderung Geometriemodellierung	4	
		Gussteil und Gießwerkzeug	Gießsimulation	Analyse und Interpretation der Simulationsergebnisse	Änderung Geometriemodellierung, Änderung Gießsimulation, Änderung Fertigung durch Urformen	5
Konstruktion	Gießwerkzeug	Geometrie-modellierung	Geometriemodell	Geometriemodellierung Gussteil, Auswirkung auf alle Prozesse	6	
Entwicklung		Rapid Tooling	Analyse des Prototyps	Änderung Geometriemodellierung	7	
Fertigung		Programmierung der Werkzeugsteuerung	NC-Programm	Grundlage zur Fertigung durch Trennen	8	
		NC-Simulation	Analyse und Interpretation der Simulationsergebnisse	Änderung Geometriemodellierung, Änderung Programmierung der Werkzeugsteuerung	9	
		Fertigung durch Trennen	Gießwerkzeug / Gießwerkzeugbestandteile	Änderung Geometriemodellierung, Änderung Fertigung durch Trennen	10	
		Analyse der Maßhaltigkeit	Analyse und Interpretation der Messergebnisse	Änderung Fertigung durch Trennen	11	
		Gussteil	Fertigung durch Urformen	Rohteil	Änderung Geometriemodellierung, Änderung Gießsimulation, Änderung Fertigung durch Urformen	12
		Gießwerkzeug	Analyse der Temperaturverteilung	Analyse und Interpretation der Messergebnisse	Vergleich/Änderung Gießsimulation, Änderung Fertigung Gussteil durch Urformen	13
		Gussteil	Analyse der Werkstoffdichte	Analyse und Interpretation der Messergebnisse	Änderung Geometriemodellierung, Vergleich/Änderung Gießsimulation, Änderung Fertigung durch Urformen	14
		Gussteil	Fertigung durch Trennen	Fertigteil	Änderung Geometriemodellierung, Änderung Fertigung durch Trennen	15

Tabelle 2: Produktentstehungsprozesse in der Gießtechnik

Zur Vorbereitung der Analyse in Kapitel 4 wird die geordnete Beschreibung der Produktentstehungsprozesse aus *Tabelle 2* in eine schematische Darstellung (*Abbildung 20*) gewandelt.

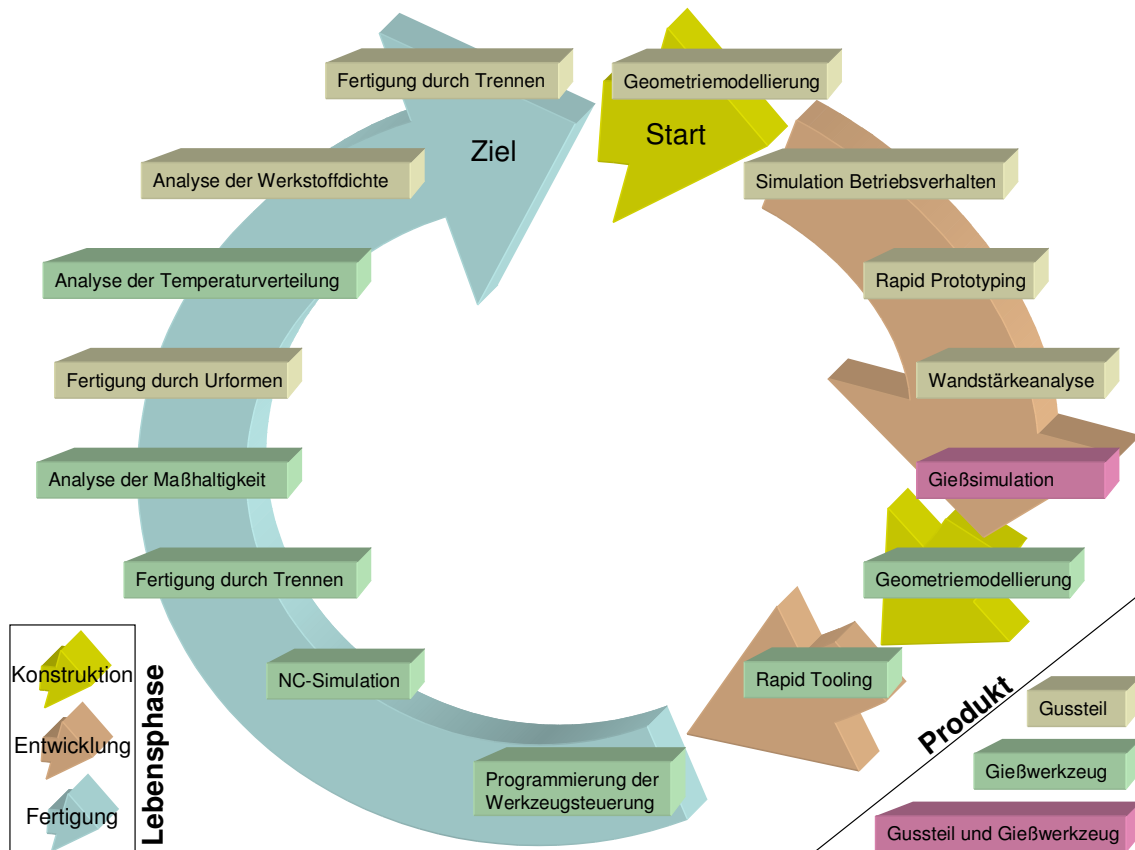


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Produktentstehungsprozesse

In *Abbildung 20* sind die charakteristischen Tätigkeiten der Produktentstehung der Gießtechnik, aufgegliedert nach Lebensphasen und Produkten, im Zusammenhang dargestellt. Den Startpunkt bildet die Geometriemodellierung der Gussteile in der Lebensphase Konstruktion. Das Ziel ist die Fertigung der Gussteile durch Verfahren der Hauptgruppe Trennen in der Lebensphase Fertigung. Es wird in diesem Schema als zweckmäßig angesehen, die Differenzierung zwischen Rohteil und Fertigteil zu vernachlässigen, da sich diese nicht auf die Analyseergebnisse in Kapitel 4 auswirken würde.

Bis hierhin wurden die Produktentstehungsprozesse der Gießtechnik herausgearbeitet. Das Zwischenergebnis ist ihre schematische Darstellung in *Abbildung 20*. Durch die Verwendung der Ergebnisse aus *Tabelle 2* und *Abbildung 20* werden die Verknüpfungen

zwischen den Produktentstehungsprozessen erarbeitet. Basis für die Erarbeitung der Verknüpfungen sind die Wechselwirkungen der Tätigkeiten bei der Produktentstehung. Die Wechselwirkungen sind in *Tabelle 2* als Auswirkungen formuliert. Die Verknüpfung der Produktentstehungsprozesse der Gießtechnik ist das Ergebnis dieses Kapitels (*Abbildung 21*).

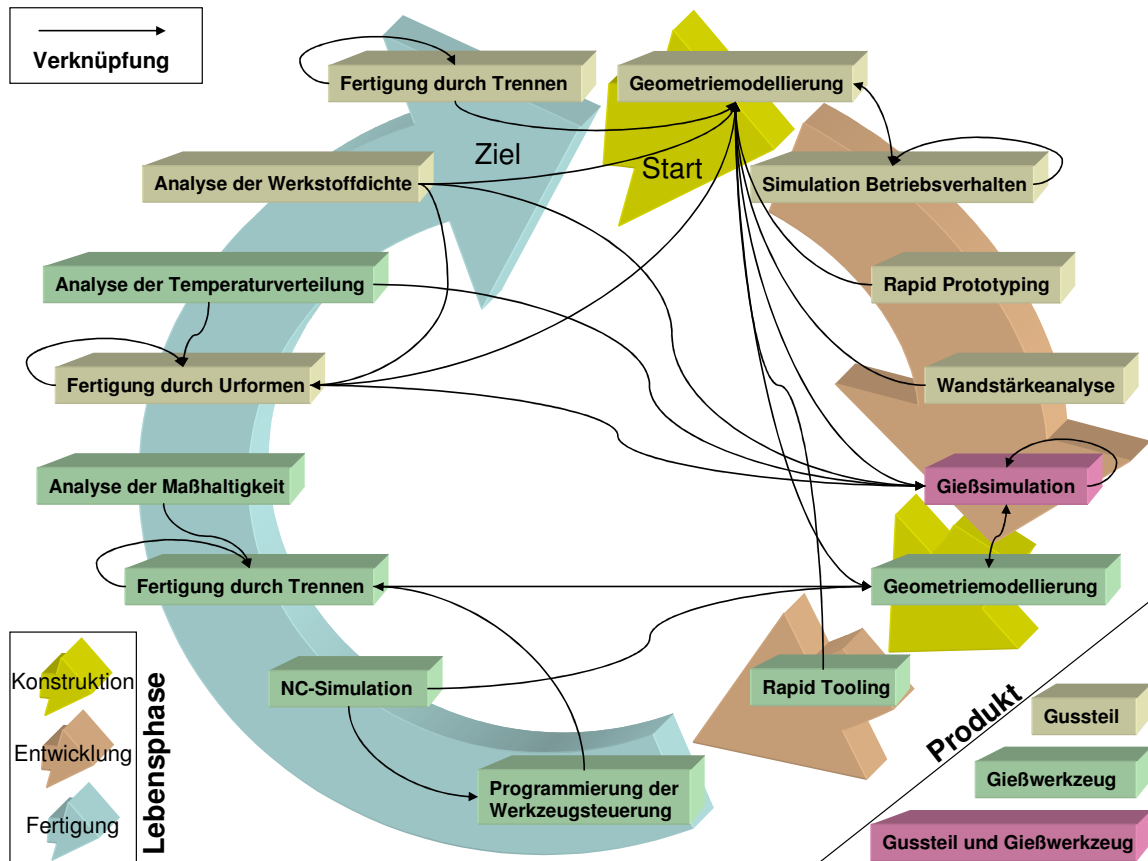


Abbildung 21: Verknüpfung der Produktentstehungsprozesse

Die Verknüpfung der Produktentstehungsprozesse charakterisiert die Beziehungen zwischen den Prozessen und spiegelt sich in den Arbeitsabläufen und Arbeitsergebnissen während der Produktentstehung wieder. Aus diesem Grund sind die Verknüpfungen die Grundlage zur Analyse der Produktentstehungsprozesse im nächsten Kapitel.

Kapitel 4 Analyse der Produktentstehungsprozesse

Nachdem in Kapitel 3 die Produktentstehungsprozesse der Gießtechnik erarbeitet worden sind, erfolgt in diesem Kapitel die Prozessanalyse. Ziel der Prozessanalyse ist die Erweiterung der Simulations- und Visualisierungskompetenz zur Verbesserung der Produktentstehung in der Gießtechnik.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird das Ergebnis des Kapitels 3, die Verknüpfung der Produktentstehungsprozesse, hinsichtlich der Potentiale zur Verbesserung der Simulations- und Visualisierungskompetenz untersucht. Dazu werden zwei Kriterien eingeführt. In Abhängigkeit von den beiden Kriterien werden den Produktentstehungsprozessen Potentiale zugewiesen. Zur Untersuchung der Umsetzungsmöglichkeiten dieser Potentiale in der Produktentstehung der Gießtechnik werden die Produktentstehungsprozesse auf systemtechnischer Ebene beschrieben.

Den Abschluss dieses Kapitels bildet die Analyse der systemtechnisch beschriebenen Prozesse der Produktentstehung hinsichtlich der Eignung zur Realisierung der ermittelten Potentiale. Die Ergebnisse dieser Analyse werden für die Erweiterung der Produktentstehungsprozesse verwendet. Die Erweiterung der Produktentstehungsprozesse wird in Anlehnung an *Abbildung 21* schematisch dargestellt und ist das Ergebnis dieses Kapitels.

4.1 Potentiale

Zur Herleitung der Potentiale, die zu einer Verbesserung der Simulations- und Visualisierungskompetenz in der virtuellen Realität verwendet werden können, ist die Definition von Kriterien hilfreich. Die Kriterien zur Herleitung der Potentiale sollen das Aufgabenspektrum sowie die Kommunikationsfähigkeit der Tätigkeiten und Verknüpfungen sein. Das Aufgabenspektrum bezeichnet die Vielfalt der Aufgaben, die bezogen auf die Produkthanforderungen, wie in Kapitel 3.1.1 erläutert, im Rahmen der Produktentstehungsprozesse der Gießtechnik, die in Kapitel 3.2.2 beschrieben sind, bearbeitet werden können. Die Kommunikationsfähigkeit bezeichnet die Möglichkeit zur Darstellung der Ergebnisse der Tätigkeiten, die während der Produktentstehung von Erzeugnissen der Gießtechnik signifikant sind. Die signifikanten Ergebnisse sind in *Tabelle 2* enthalten.

Auf Grundlage der beiden Kriterien Aufgabenspektrum und Kommunikationsfähigkeit werden die Potentiale hergeleitet. Als Lösungsmethode für die Herleitung der Potentiale dient die

Ideenfindung aus dem Gebiet der intuitiv betonten Lösungsmethoden. Die Potentiale zu dem Kriterium Kommunikationsfähigkeit sind in *Abbildung 22* dargestellt.

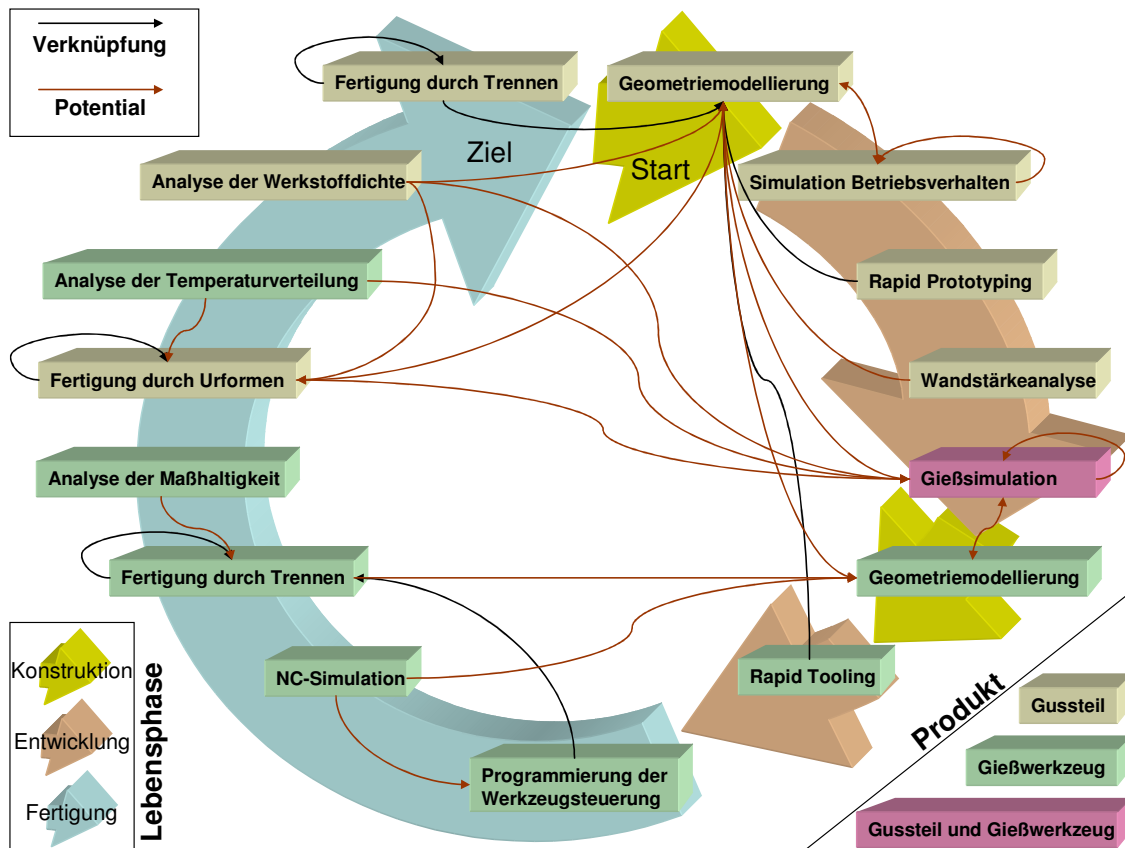


Abbildung 22: Potentiale zur Unterstützung der Produktentstehung

Aus *Abbildung 22* geht hervor, dass die Verknüpfung der Tätigkeiten mit den Prozessnummern 1, 2, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13 und 14 aus *Tabelle 2*, Potentiale zur Verbesserung der Kommunikationsfähigkeit bieten. Die Kommunikationsfähigkeit kann durch die Entwicklung und Anwendung von Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität verbessert werden.

Die Potentiale zu dem Kriterium Aufgabenspektrum werden durch die Lösungsmethode Ideenfindung hergeleitet. Das Resultat bei der Betrachtung der Produktentstehungsprozesse in Zusammenhang mit den Produkthanforderungen ist die Empfehlung zur Erweiterung der Tätigkeiten in der Lebensphase Entwicklung von Gießwerkzeugen und Gussteilen durch die Tätigkeit Kinematiksimulation von Fertigungssystemen. Da die kinematischen Verhältnisse der Fertigungssysteme im Vordergrund stehen, wird diese Tätigkeit dem Produkt Gießwerkzeug zugeordnet. Das Aufgabenspektrum kann durch die Entwicklung von Methoden zur Kinematiksimulation von Fertigungssystemen erweitert werden. Im Rahmen der

Produktentstehung der Gießtechnik bietet die Entwicklung von Methoden zur Kinematiksimulation von Fertigungssystemen ein Potential zur Verbesserung des Kriteriums Aufgabenspektrum.

4.2 Produktentstehungssysteme

Zur Untersuchung der Umsetzungsmöglichkeiten der Potentiale, die zuvor aus den beiden Kriterien hergeleitet wurden, ist die Beschreibung der Produktentstehungsprozesse in Form von technischen Systemen sinnvoll. Aus diesem Grund wird in diesem Teil des Kapitels die Produktentstehung der Gießtechnik, die in Kapitel 3 erarbeitet worden ist, in technischen Systemen beschrieben.

Begriffe: Aufgabe, Anforderung, Funktion, System, Lösung, Prozess

- ⇒ Funktionen geben die durch Anforderungen konkretisierten Aufgaben wieder.
 - ⇒ Funktionen bilden die Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsgrößen in Systemen.
 - ⇒ Der Zusammenhang in einer Funktion wird durch den Umsatz von Energie-, Stoff- und Informationsgrößen ausgedrückt.
 - ⇒ Ein System ist von seiner Umgebung abgegrenzt.
 - ⇒ Ein System kann in Teilsysteme gegliedert werden, die durch Zusammenhänge / Beziehungen miteinander verknüpft sind.
 - ⇒ Die Zusammenhänge / Beziehungen zwischen Systemen werden durch den Umsatz von Energie-, Stoff- und Informationsgrößen ausgedrückt.
-
- ⇒ **Ein Prozess beschreibt mit welchen Lösungen die Energie-, Stoff- und Informationsgrößen in technischen Systemen umgesetzt werden.**

Abbildung 23: Begriffsklärung zur Beschreibung von Systemen auf Basis von [VDI-2]

Die technischen Systeme sollen dabei im Besonderen die Produktenstehungsprozesse durch Systemgrenzen und Funktionen voneinander differenzieren sowie die Verbindungen zwischen den Produktenstehungsprozessen durch Ein- und Ausgangsgrößen wiedergeben. Die Art der Lösung soll sich dabei auf die eingesetzten Anwendungssoftwaresysteme beziehen. Zur

Beschreibung der Produktentstehungsprozesse aus Kapitel 3 in technischen Produktentstehungssystemen werden in dieser Arbeit Grundlagen angewendet. Die Grundlagen orientieren sich an der VDI-Richtlinie 2221 zum Vorgehen beim Konstruieren und Entwickeln und sind in *Abbildung 23* als Begriffsklärung zusammengefasst.

In *Abbildung 23* werden die Zusammenhänge zwischen den Begriffen Aufgabe, Anforderung, Funktion, System, Lösung und Prozess erklärt, so wie sie im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendet werden. Basierend auf den Zusammenhängen zwischen diesen Begriffen werden Prozesse in technischen Systemen, wie in *Abbildung 24* gezeigt, beschrieben.

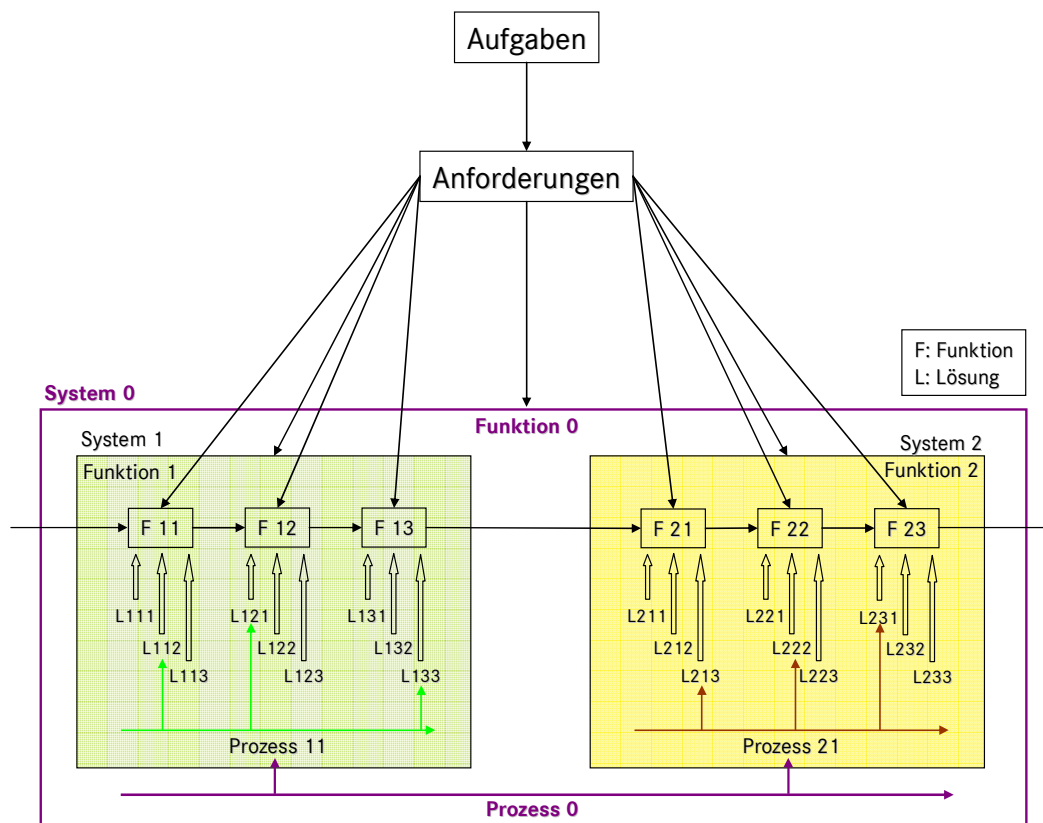


Abbildung 24: Prozessbeschreibung in technischen Systemen

4.2.1 Systemeinteilung

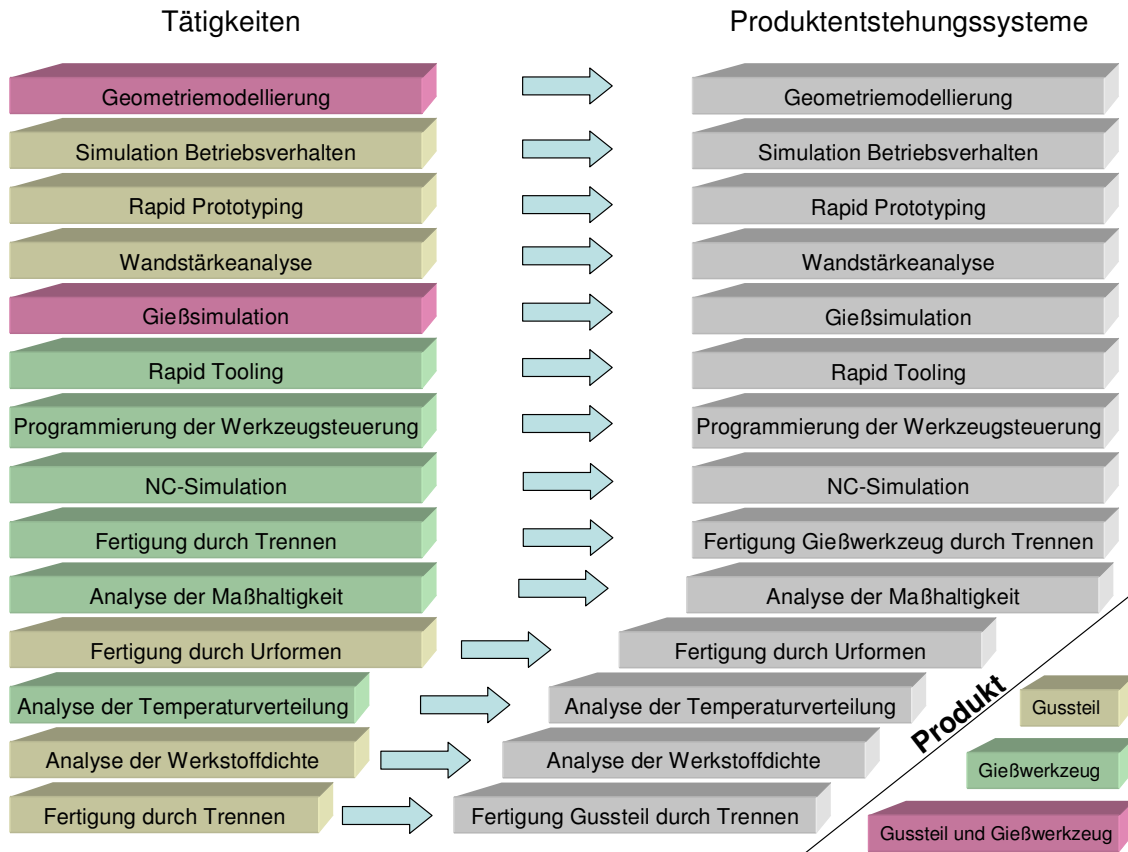


Abbildung 25: Systemeinteilung

In *Abbildung 25* ist die Einteilung der Produktentstehungssysteme enthalten. Die Einteilung der Produktentstehungssysteme orientiert sich an den Tätigkeiten aus *Tabelle 2*. Die Tätigkeit Geometriemodellierung wird für Gussteile und Gießwerkzeuge in einem System berücksichtigt. Den übrigen Tätigkeiten werden separate Produktentstehungssysteme zugeordnet.

Die eingesetzten Anwendungssysteme zur Erfüllung der Tätigkeiten bei der Produktentstehung der Gießtechnik sind in *Abbildung 26* aufgelistet. Die Anwendungssysteme wurden im Wesentlichen in Kapitel 3 vorgestellt.

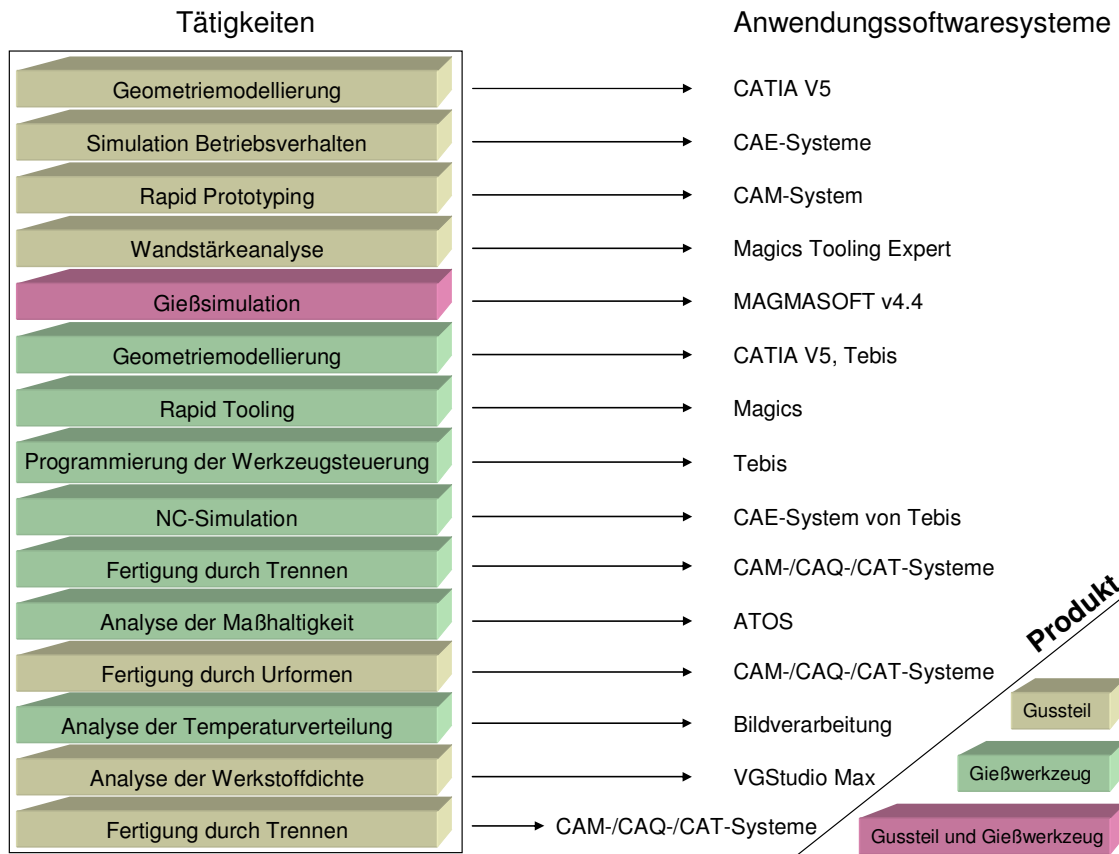


Abbildung 26: Anwendungssoftwaresysteme

4.2.2 Systembildung und Prozessableitung

Auf Basis der Grundlagen zur Beschreibung von technischen Systemen, der Systemeinteilung sowie der Produktentstehungsprozesse werden die Produktentstehungssysteme gebildet. Die ausgebildeten Produktentstehungssysteme sind in *Abbildung 27* bis *Abbildung 30* dargestellt. Die Bildung der Produktentstehungssysteme, die zuvor eingeteilt wurden, stützt sich auf Eingangsgrößen, Funktionen, Ausgangsgrößen und Lösungen. Bei der Systembildung wird nicht zwischen Energie-, Stoff- und Informationsflüssen unterschieden. In Anbetracht des Kriteriums Kommunikationsfähigkeit wird die Funktion Visualisierung als wesentlich angesehen und immer dann bei der Systembildung berücksichtigt, wenn die Visualisierung von digitalen Daten einen entscheidenden Einfluss auf das Systemverhalten hat.

Aus der Beschreibung der Produktentstehung der Gießtechnik in technischen Systemen werden Prozesse abgeleitet. Diese Prozesse geben in der ausgebildeten Systemwelt wieder, mit welchen Eingangsgrößen, welche Funktionslösungen zur Generierung welcher Ausgangsgrößen angewendet werden.

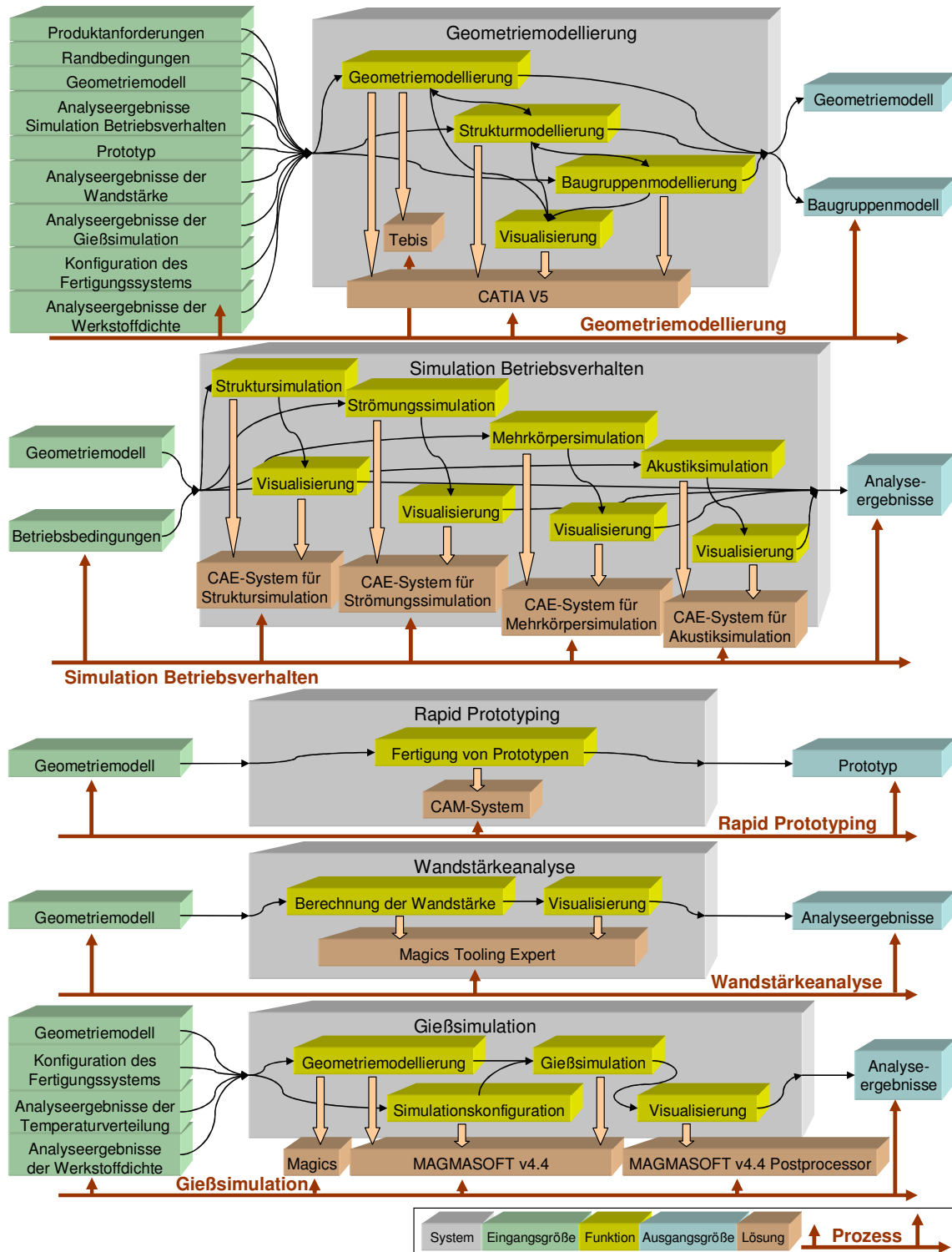


Abbildung 27: Produktentstehungssysteme Teil 1

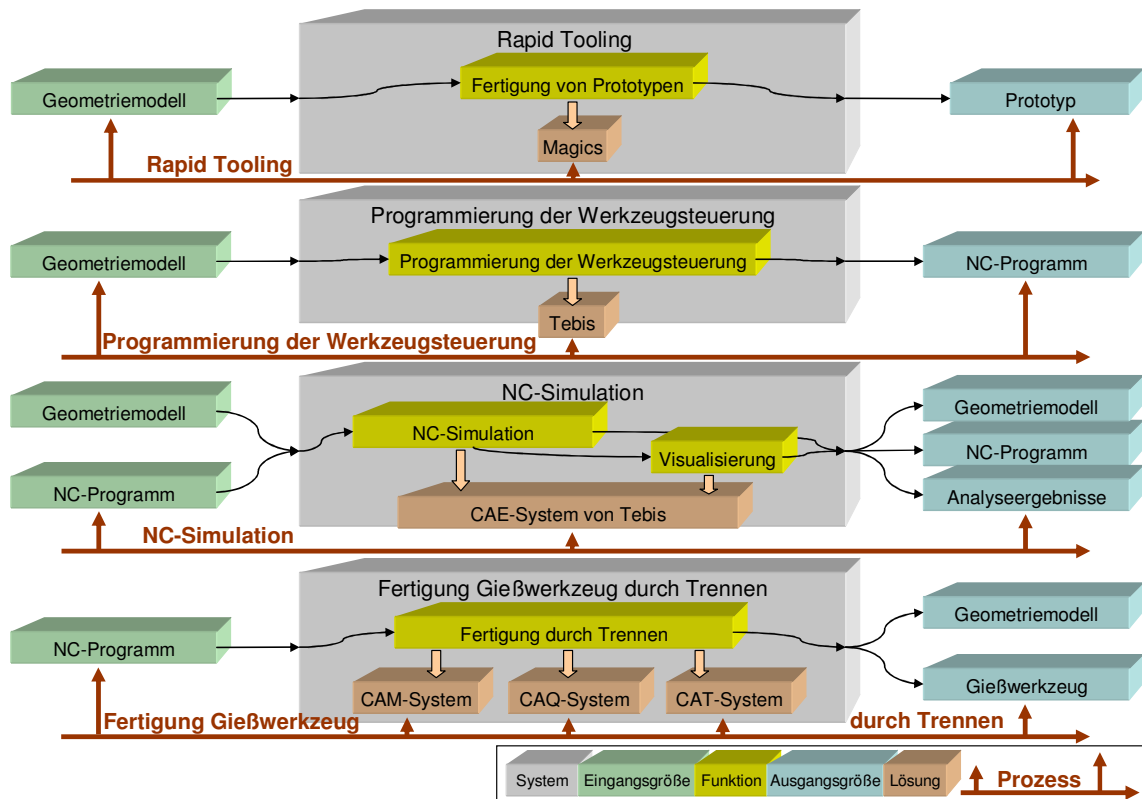


Abbildung 28: Produktentstehungssysteme Teil 2

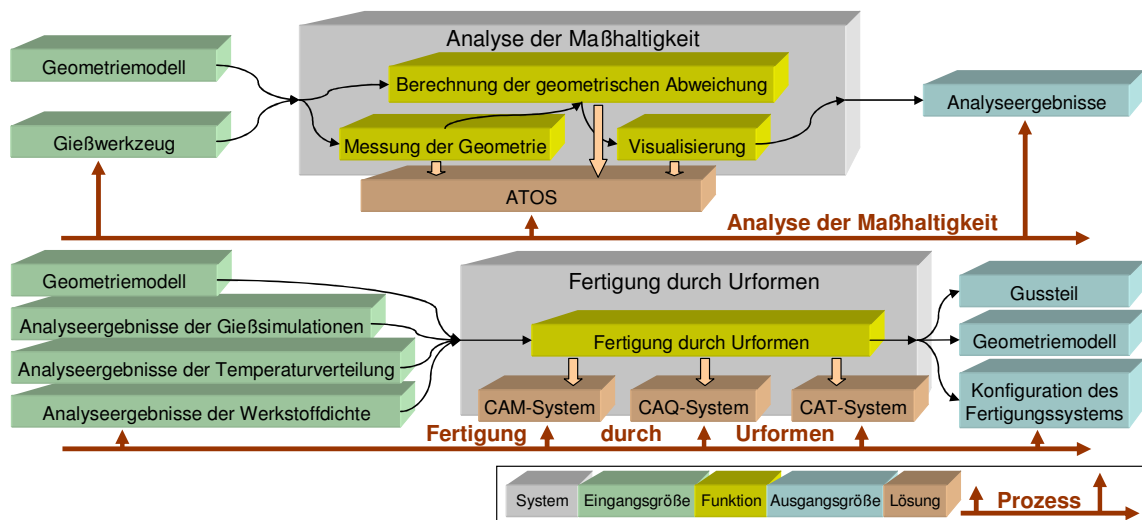


Abbildung 29: Produktentstehungssysteme Teil 3

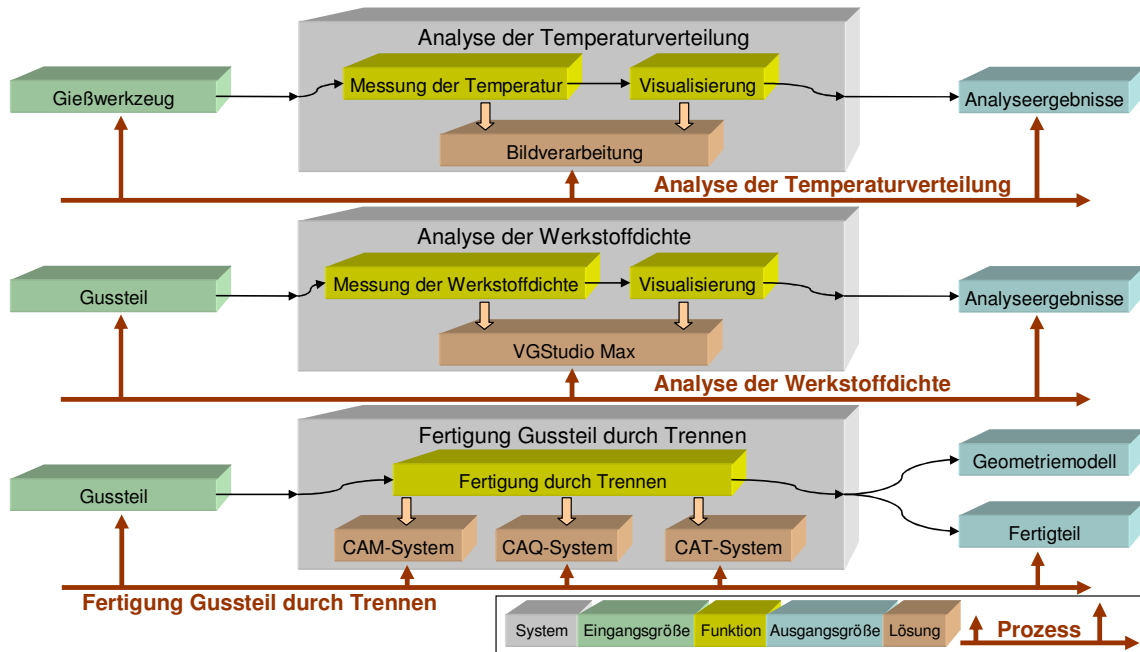


Abbildung 30: Produktentstehungssysteme Teil 4

4.3 Analyse und Erweiterung

Nach der Herleitung der Potentiale zu den beiden Kriterien Aufgabenspektrum und Kommunikationsfähigkeit für die Verknüpfungen der Produktentstehungsprozesse sowie der Bildung der Produktentstehungssysteme und der Prozessableitung erfolgt im letzten Teil des Kapitels 4 die Analyse der Potentialerfüllung für die Prozesse der Produktentstehungssysteme und die Systemerweiterung.

Als erstes werden die Prozesse in den Produktentstehungssystemen in Hinsicht auf die Potentialerfüllung zu dem Kriterium Kommunikationsfähigkeit durch Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität untersucht. Da sich die Funktion Visualisierung auf digitale Daten bezieht, die sowohl für das Verhalten der einzelnen Produktentstehungssysteme, als auch für das Verhalten der Produktentstehungssysteme in ihrer Gesamtheit entscheidend sind, wird bei der Analyse, jedem Prozess, ein Potential zur Erhöhung der Kommunikationsfähigkeit zugewiesen, dessen System die Funktion Visualisierung ohne die Lösung VR-System enthält. Die Lösung VR-System bezeichnet im systemtechnischen Zusammenhang ein Anwendungsoftwaresystem, das auf Visualisierungsverfahren der virtuellen Realität basiert.

Als Ergebnis der Analyse werden unter den genannten Voraussetzungen folgenden Prozessen aus Kapitel 4.2.2 Potentiale zur Erhöhung der Kommunikationsfähigkeit zugewiesen:

- Geometriemodellierung,
- Simulation Betriebsverhalten,
- Wandstärkeanalyse,
- Gießsimulation,
- NC-Simulation,
- Analyse der Maßhaltigkeit,
- Analyse der Temperaturverteilung und
- Analyse der Werkstoffdichte.

Als Folge der Potentialzuweisung zu diesen Prozessen ergibt sich die Anforderung, die bestehende Systemlandschaft mit dem Ziel umzugestalten, das Kriterium Kommunikationsfähigkeit mit einem höheren Grad zu erfüllen. Um dieses Ziel zu erreichen, soll die Visualisierung innerhalb der Produktentstehung der Gießtechnik um die virtuelle Realität ergänzt werden.

Es kann folgendes festgestellt werden. Die hergeleiteten Potentiale der Verknüpfungen der Produktentstehungsprozesse aus Kapitel 4.1 für die beiden Tätigkeiten Fertigung Gießwerkzeug durch Trennen und Fertigung durch Urformen sind nicht als potentialträchtige, gleichnamige Prozesse der Produktenstehungssysteme zu finden, wie möglicherweise erwartet wurde. Der Grund dafür ist, dass die Auswirkungen dieser Tätigkeiten zwar äußerst entscheidend für einige andere Tätigkeiten der Produktentstehung sind (siehe *Abbildung 22*), durch sie jedoch keine digitalen Ergebnisdaten generiert werden, die das Systemverhalten beeinflussen. Daher werden, wie oben beschrieben, nur für die Prozesse der Produktentstehungssysteme mit Potentialzuweisungen, Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität entwickelt. Die dazu nötige Umgestaltung der Systemlandschaft erfolgt am Ende dieses Kapitels als Erweiterung.

Als zweites werden die Prozesse in den Produktentstehungssystemen in Hinsicht auf die Potentialerfüllung zu dem Kriterium Aufgabenspektrum analysiert. Das Analyse-kriterium ist dabei die Existenz eines Prozesses innerhalb der Produktentstehungssysteme, der zur Durchführung und Analyse von Kinematiksimulationen von Fertigungssystemen befähigt. Das Ergebnis dieser Analyse ist die Feststellung, dass kein Prozess innerhalb der Produktentstehungssysteme existiert, der zur Durchführung und Analyse von Kinematiksimulationen von Fertigungssystemen befähigt. Daraus lässt sich direkt schlussfolgern, dass im Rahmen der Produktentstehung der Gießtechnik, so wie sie in Kapitel 3 erarbeitet worden ist, keine Möglichkeit zur Durchführung und Analyse von

Kinematiksimulationen von Fertigungssystemen gegeben ist. Aus diesem Grund soll die bestehende Systemlandschaft mit dem Ziel umgestaltet werden, das Kriterium Aufgabenspektrum mit einem höheren Grad erfüllen zu können.

4.3.1 Simulation

Aus der Analyse der Prozesse in den Produktentstehungssystemen in Hinsicht auf die Potentialerfüllung zu dem Kriterium Aufgabenspektrum resultiert die Anforderung zur Erweiterung der Produktentstehung um die Möglichkeit zur Durchführung und Analyse von Kinematiksimulationen von Fertigungssystemen.

Deshalb wird ein weiteres, gleichnamiges Produktentstehungssystem gebildet. Dieses Produktentstehungssystem wird durch Ein- und Ausgangsgrößen mit der gesamten Systemlandschaft in Beziehung gestellt. Des Weiteren werden Funktionen zur Erfüllung der oben genannten Anforderung definiert. Der Abschluss dieser Systembildung ist die Ableitung des unbestimmten Produktentstehungsprozesses. Das gebildete Produktentstehungssystem ist in *Abbildung 31* dargestellt.

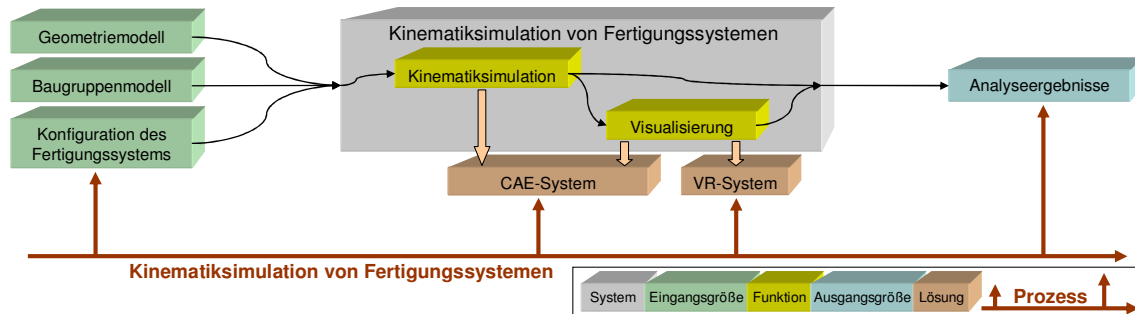


Abbildung 31: Erweiterung des Aufgabenspektrums der Produktentstehung

Die Erweiterung des Aufgabenspektrums der Produktentstehung in der Gießtechnik durch die Kinematiksimulation von Fertigungssystemen, wie in *Abbildung 31* gezeigt, ist durch die Eingangsgrößen Geometriemodell, Baugruppenmodell und Konfiguration des Fertigungssystems gekennzeichnet. Diese Eingangsgrößen aus den Prozessen Geometriemodellierung sowie Fertigung durch Urformen sollen durch die Funktionen Kinematiksimulation und Visualisierung in Analyseergebnisse gewandelt werden, die als Ausgangsgrößen dieses Systems den Prozessen Geometriemodellierung sowie Fertigung durch Urformen als Eingangsgrößen wiederum zur Verfügung stehen. Die Funktionen Kinematiksimulation und

Visualisierung sollen in einem CAE-System gelöst werden. Dazu soll im nächsten Kapitel ein geeignetes CAE-System ausgewählt werden. Im Anschluss sollen in dem ausgewählten CAE-System Simulationsmethoden zur Durchführung von Kinematiksimulationen entwickelt werden.

Eine weitere Lösung der Funktion Visualisierung in dem Produktentstehungssystem aus *Abbildung 31* ist das Anwendungssoftwaresystem VR-System. Aus diesem Grund sollen, basierend auf den entwickelten Simulationsmethoden in dem ausgewählten CAE-System, Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität zur höheren Erfüllung des Kriteriums Kommunikationsfähigkeit entwickelt werden. Die Kinematiksimulation von Fertigungssystemen wird als Tätigkeit der Produktentstehung der Gießtechnik der Lebensphase Gießwerkzeugentwicklung zugeordnet. Diese Zuordnung wird im letzten Teil dieses Kapitels im Zusammenhang mit der Erweiterung der Produktentstehungsprozesse aus Kapitel 3 schematisch dargestellt.

4.3.2 Visualisierung

Aus der Analyse der Prozesse in den Produktentstehungssystemen in Hinsicht auf die Potentialerfüllung zu dem Kriterium Kommunikationsfähigkeit resultiert die Anforderung zur Erweiterung der Produktentstehung um die Visualisierung von Ergebnissen in der virtuellen Realität. Das hat einerseits Auswirkungen auf die Produktentstehungssysteme, die in diesem Kapitel gebildet worden sind, und andererseits auf die Produktentstehungsprozesse aus Kapitel 3.

Die Auswirkung auf die Produktentstehungssysteme ist die Erweiterung der Funktionen Visualisierung um die allgemeine Lösung VR-System. Die Erweiterung betrifft die Funktion Visualisierung in den Prozessen, die als Analyseergebnis in Kapitel 4.3 aufgelistet sind. Auf eine Abbildung zur Erweiterung der Produktentstehungssysteme um diese allgemeine Lösung wird an dieser Stelle verzichtet.

Die Auswirkung auf die Produktentstehungsprozesse aus Kapitel 3 ist die Erweiterung der Produktentstehungsprozesse um die zentrale Tätigkeit Visualisierung. Die Tätigkeit Visualisierung ist, in Anlehnung an *Tabelle 2*, Bestandteil der Lebensphasen Konstruktion, Entwicklung und Fertigung der Produkte Gussteile und Gießwerkzeuge. Die Visualisierung der Ergebnisse aus der Produktentstehung in der virtuellen Realität verspricht ein hohes Potential zur Erhöhung des Erfüllungsgrads zum Kriterium Kommunikationsfähigkeit. In *Abbildung 32* sind die Potentiale in den Verknüpfungen der Produktentstehungsprozesse zur Erhöhung des

Erfüllungsgrads zum Kriterium Kommunikationsfähigkeit für die Tätigkeit Visualisierung, unter Stützung auf das Analyseergebnis aus diesem Kapitel, dargestellt. Die Verknüpfungen und Potentiale aus *Abbildung 22* bestehen weiterhin, werden jedoch aus Gründen der Übersichtlichkeit und Fokussierung auf die Visualisierung in der virtuellen Realität in *Abbildung 32* nicht eingeblendet. Des Weiteren ist in *Abbildung 32* die Tätigkeit Kinematiksimulation von Fertigungssystemen, zur höheren Erfüllung des Kriteriums Aufgabenspektrum, enthalten.

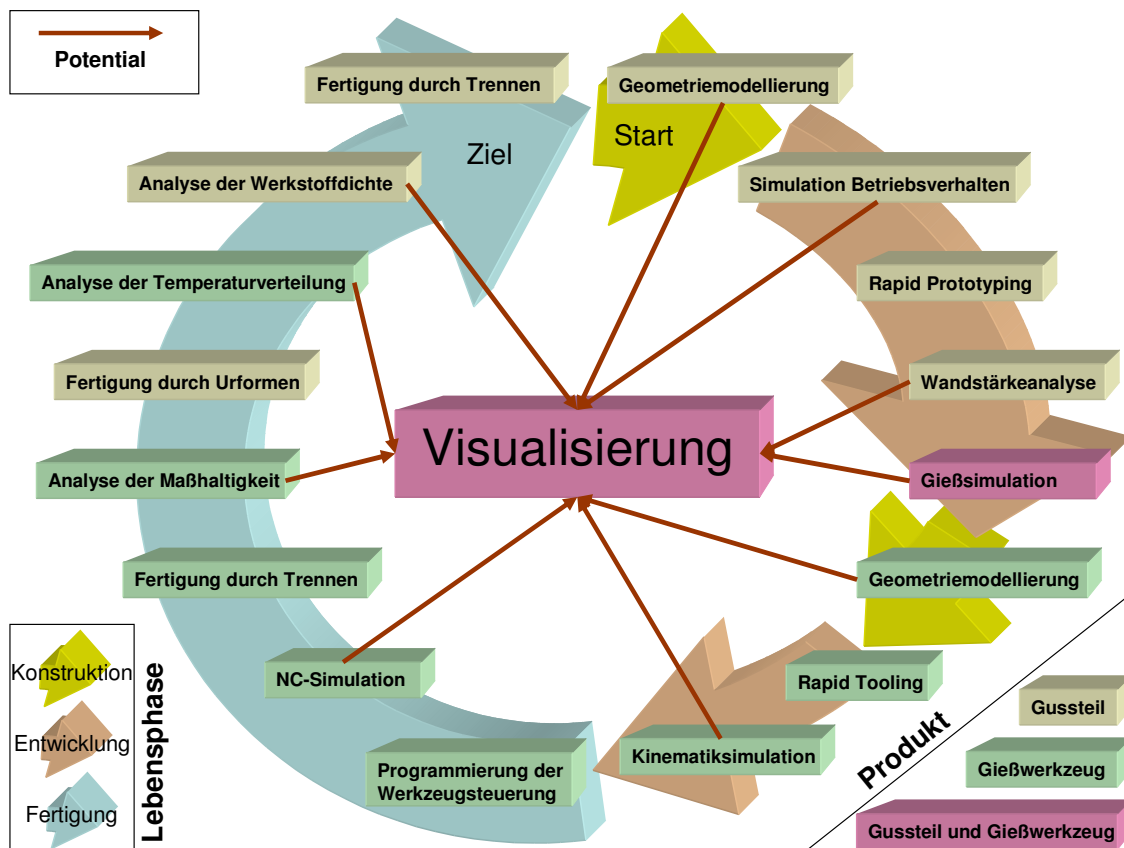


Abbildung 32: Erweiterung der Kommunikationsfähigkeit der Produktentstehung

Aus *Abbildung 32* wird deutlich, dass die Verknüpfung der Tätigkeiten Geometriemodellierung, Simulation Betriebsverhalten, Wandstärkeanalyse, Gießsimulation, Kinematiksimulation, NC-Simulation, Analyse der Maßhaltigkeit, Analyse der Temperaturverteilung und Analyse der Werkstoffdichte mit der Tätigkeit Visualisierung ein hohes Potential zur Verbesserung der Kommunikationsfähigkeit in der Produktentstehung der Gießtechnik birgt. Aus diesem Grund werden in Kapitel 5 Verfahren zur Visualisierung von Ergebnissen in der virtuellen Realität aus der Produktentstehung der Gießtechnik in diesen Tätigkeitsfeldern entwickelt. Die Grundlage

zur Entwicklung der Visualisierungsverfahren bilden die Produktentstehungssysteme, die in diesem Kapitel erarbeitet worden sind. Unter Berücksichtigung der Funktionen in diesen Produktentstehungssystemen wird in Kapitel 5 ein VR-System zur Entwicklung der Visualisierungsverfahren ausgewählt.

Die Tätigkeit Simulation Betriebsverhalten von Gussteilen hat einen entscheidenden Einfluss auf die Geometriemodellierung von Gussteilen. Die Simulation des Betriebsverhaltens wird nach *Abbildung 27* in verschiedenen CAE-Systemen durchgeführt und visualisiert. Richtigerweise muss in diesem Kontext hinzugefügt werden, dass nicht das Betriebsverhalten der Gussteile, also der Rohteile, simuliert wird, sondern das Betriebsverhalten der Fertigteile. Die Fertigteile sind die automobiltechnischen Produkte, die als Bauteile bzw. Baugruppen in Fahrzeugen verbaut werden und den auftretenden Betriebsbedingungen gerecht werden müssen. Zur Überprüfung des Fertigteilverhaltens bei den auftretenden Betriebsbedingungen werden CAE-Systeme, wie oben erwähnt, verwendet. Die in *Abbildung 27* enthaltenen Funktionen zur Durchführung von Simulationen des Betriebsverhaltens haben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Funktionen sollen lediglich den Komplexitätsgrad der zu untersuchenden physikalischen Effekte verdeutlichen.

Da sich diese Arbeit mit der Produktentstehung der Gießtechnik beschäftigt, werden für die Funktionen zur Visualisierung der Ergebnisse aus dem Prozess Simulation Betriebsverhalten keine Verfahren in der virtuellen Realität entwickelt. An dieser Stelle wird jedoch darauf hingewiesen, dass aufgrund der Analyse der Potentialerfüllungsgrade in den Produktentstehungssystemen in diesem Kapitel, die Entwicklung von Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität für den Prozess Simulation Betriebsverhalten, zur Verbesserung des Kriteriums Kommunikationsfähigkeit in der Produktentstehung der Automobiltechnik, empfohlen wird.

Kapitel 5 Entwicklung von Methoden und Verfahren

Im letzten Kapitel ist die Analyse der Produktentstehungsprozesse der Gießtechnik abgeschlossen worden. Das Analyseergebnis ist die Erweiterung der Prozesse unter Berücksichtigung der hergeleiteten Potentiale in Kapitel 4. Das zentrale Ziel in diesem Kapitel ist die Realisierung der Erweiterung der Produktentstehungsprozesse. Um dieses Ziel zu erreichen, werden zuerst Simulationsmethoden und daraufhin Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität zur Unterstützung der Produktentstehung der Gießtechnik entwickelt.

5.1 Simulationsmethoden

Aus der Analyse der Produktentstehungssysteme hinsichtlich der Potentialerfüllung zu dem Kriterium Aufgabenspektrum resultiert die Anforderung zur Erweiterung der charakteristischen Tätigkeiten der Produktentstehung der Gießtechnik um die Tätigkeit Kinematiksimulation. Deshalb werden in diesem Teil des Kapitels 5 Methoden für die Durchführung und Analyse von Kinematiksimulationen von Fertigungssystemen entwickelt.

5.1.1 Kinematiksimulation von Fertigungssystemen

Die Entwicklung von Methoden für die Kinematiksimulation von Fertigungssystemen erfolgt auf Basis des gleichnamigen Produktentstehungssystems aus *Abbildung 31*. Dieses System beinhaltet die Funktionen Kinematiksimulation und Visualisierung. Diese beiden Funktionen sollen in einem CAE-System gelöst werden. Das CAE-System zur Lösung dieser beiden Funktionen ist an diesem Punkt der Arbeit noch unbestimmt.

Um ein geeignetes CAE-System für die Durchführung und Analyse von Kinematiksimulationen auswählen zu können, werden zuerst die Anforderungen an die Durchführung von Kinematiksimulationen gestellt. Basierend auf den gestellten Anforderungen wird ein geeignetes CAE-System zur Durchführung von Kinematiksimulationen ausgewählt. Auf Grundlage der Anforderungen und der Auswahl des CAE-Systems wird im Anschluss die Funktion Kinematiksimulation des Produktentstehungssystems in einen höheren Detaillierungsgrad für die Entwicklung der Simulationsmethoden umgewandelt. Die Entwicklung der Simulationsmethoden in dem Produktentstehungssystem bildet den Abschluss dieses ersten Teils des Kapitels 5.

Wie oben beschrieben, werden zuerst die Anforderungen an die Durchführung von Kinematiksimulationen wie folgt aufgestellt:

- Berücksichtigung der Komponenten des Fertigungssystems, die für die Bewegungen eine Rolle spielen,
- Modellierung der kinematischen Verhältnisse der Komponenten,
- Modellierung der Bewegungsformen Translation und Rotation in Abhängigkeit von der Zeit,
- Bildung von Simulationsvarianten,
- Prüfung der Größen Kollision und Abstand zwischen den Komponenten von Fertigungssystemen.

Auf Grundlage dieser Anforderungen wird ein geeignetes CAE-System zur Durchführung von Kinematiksimulationen ausgewählt. Dazu werden zuerst die softwaretechnisch verfügbaren Programme bzw. Programmbestandteile geprüft. Für diese Prüfung kommen die konkret benannten Anwendungssoftwaresysteme aus *Abbildung 26* in Frage, die bereits in der Produktentstehung der Gießtechnik eingesetzt werden. Das Ergebnis der Prüfung sind die Anwendungssoftwaresysteme CATIA V5 und Tebis zur Geometriemodellierung, das CAM-Modul des CAD-Systems Tebis zur Programmierung der Werkzeugsteuerung und das CAE-Modul des CAD-Systems Tebis zur NC-Simulation.

Das hauptsächlich angewendete Anwendungssoftwaresystem zur Geometriemodellierung in der Produktentstehung der Gießtechnik, so wie die Produktentstehung in dieser Arbeit betrachtet wird, ist das CAD-System CATIA V5. Das CAD-System Tebis bildet eine Nebenrolle bei der Geometriemodellierung und wird genutzt, insofern spezielle Anforderungen an die Geometriemodellierung von Gießwerkzeugen gestellt werden, die in dem CAD-System CATIA V5 nicht erfüllt werden können. Aus diesem Grund werden das CAD-System Tebis bzw. CAE-Module dieses Systems nicht weiter für die Auswahl des CAE-Systems berücksichtigt, das zur Entwicklung von Methoden zur Kinematiksimulation von Fertigungssystemen verwendet werden soll. Stattdessen werden ausschließlich CAE-Module des CAD-Systems CATIA V5 betrachtet. Nach einer groben Abschätzung der Erfüllung o.a. Anforderungen durch CAE-Module des CAD-Systems CATIA V5 lässt sich der Auswahlkreis auf die beiden Module Kinematics Simulator und Fitting Simulator aus der Workbench DMU einschränken. Die wesentlichen Merkmale zur Erfüllung der Anforderungen sind für diese beiden Simulationssysteme in

Tabelle 3 gegenübergestellt.

Simulator	Fitting Simulator	Kinematics Simulator
Einsatzbereich	•Simulation von Montage und Demontage-prozeduren geometrischer Einheiten	•Simulation von Bewegungsabläufen geometrischer Einheiten
Verbindungen zwischen Geometrie-komponenten	•Gruppierung •Bewegungsträger	•niedere Paarverbindungen (Drehverbindungen, prismatische, ebene Verbindungen, Kabel- und Kugelgelenkverbindungen) •höhere Paarverbindungen (Punkt-, Gleit-, Rollkurven-, Punktflächenverbindungen)
Kinematik	•Verfahrwege (Translation/Rotation) •Sequenzbildung •Aufzeichnung und Wiedergabe von Simulationen	•Mechanismuskonstruktion: •Regeln •Bedingungen •Generierung von Bahnkurven •Sequenzbildung •Aufzeichnung und Wiedergabe von Simulationen
Analyse- und Prüf-funktionen	•Translationsvolumen •Kollisionsprüfung •Abstandsmessung •Pfadsuchfunktion •Sensoren •Experimente/Berichte	•Translationsvolumen •Kollisionsprüfung •Abstandsmessung •Überprüfen von Verbindungsbegrenzungen •Messen von Elementeigenschaften •Darstellung und Simulation von Submechanismen •Sensoren •Kombination von Sensorcurven •Messen von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen

Tabelle 3: CAE-Systeme zur Kinematiksimulation

Aus *Tabelle 3* geht folgendes hervor. Das CAE-System Kinematics Simulator bietet deutlich mehr Definitionsmöglichkeiten für Verbindungstypen zwischen Geometriekomponenten. Dadurch können verhältnismäßig komplexe kinematische Systeme modelliert werden. Die Definitionsmöglichkeiten für Verbindungstypen im CAE-System Fitting Simulator beschränken sich dagegen auf Bewegungsträger in Form von lokalen Koordinatensystemen der Geometriekomponenten. Die definierbaren Bewegungstypen sind dabei Translation und Rotation. Das CAE-System Kinematics Simulator beinhaltet zwar teilweise mehr Analyse- und Prüffunktionen, es können jedoch keine Experimente und Berichte generiert werden.

Zusammenfassend werden die beiden Simulationssysteme in Bezug auf die Eignung zur Erfüllung der oben genannten Anforderungen folgendermaßen eingeschätzt. Das CAE-System Fitting Simulator bietet mit insgesamt einfacheren Funktionalitäten, Möglichkeiten zur Erfüllung der oben gestellten Anforderungen. Darüber hinaus können Experimente durchgeführt und Berichte generiert werden. Das CAE-System Kinematics Simulator bietet wesentlich komplexere Funktionalitäten, die zur Erfüllung der Anforderungen nicht nötig sind. Die komplexeren Funktionalitäten würden voraussichtlich zu komplexeren Simulations-

methoden führen. Aus diesen Gründen wird das CAE-System Fitting Simulator zur Entwicklung von Methoden zur Kinematiksimulation von Fertigungssystemen ausgewählt.

In Anbetracht der gestellten Anforderungen sowie der Möglichkeiten zu ihrer Erfüllung in dem CAE-System Fitting Simulator wird zur Entwicklung der Simulationen die Funktion Kinematiksimulation aus *Abbildung 31* in dem Produktentstehungssystem Kinematiksimulation von Fertigungssystemen in einen höheren Detaillierungsgrad umgewandelt (*Abbildung 33*).

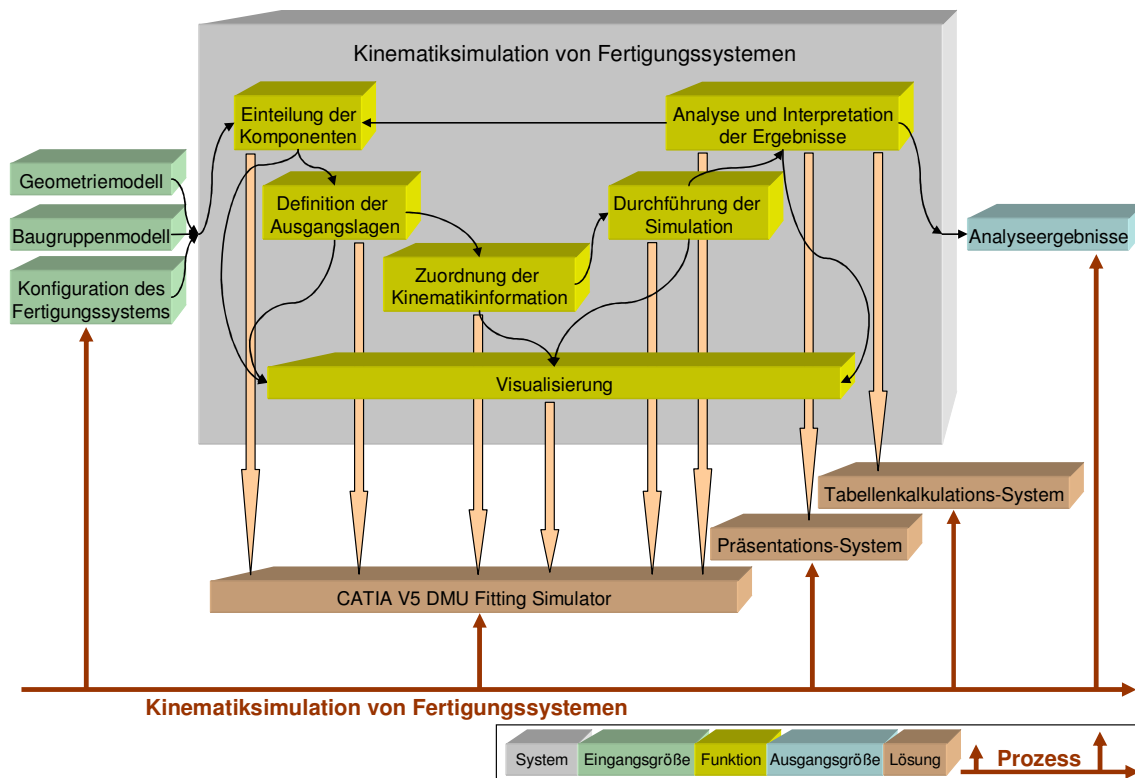


Abbildung 33: Detaillierung der Funktion Kinematiksimulation

Aus den oben genannten Voraussetzungen wird eine Methode zur Kinematiksimulation auf Basis des Produktentstehungssystems aus *Abbildung 33* entwickelt. Die Systemeingangsgrößen sind das Geometriemodell, das Baugruppenmodell sowie die Konfiguration des Fertigungssystems. Das Geometriemodell des Fertigungssystems kann aus zahlreichen Einzelteilen bestehen. Durch das Baugruppenmodell werden die Einzelteile ordnend beschrieben. In der Konfiguration des Fertigungssystems sind die relativen Lageinformationen der Einzelteile und Baugruppen zueinander enthalten. Die relativen Lageinformationen der Einzelteile und Baugruppen können bereits vollständig oder teilweise im Baugruppenmodell enthalten sein. Die weiteren Eingangsgrößen der Konfiguration des

Fertigungssysteme sind die Kinematikinformationen der Einzelteile und Baugruppen. Die Einzelteile des Geometriemodells werden in das CATIA-eigene tesselierte Datenformat cgr gewandelt. Die Vorteile der Verwendung des cgr-Formats sind die kleinen Dateigrößen sowie die einfache Handhabung der Geometrie- und Baugruppenmodelle in CATIA V5.

Nachdem Vorliegen der Eingangsgrößen werden die Geometriekomponenten, bestehend aus Einzelteilen und Baugruppen, in Geometriekomponenten mit Relativbewegungen und Geometriekomponenten ohne Relativbewegungen zu einem Ursprungskoordinatensystem eingeteilt. Anschließend werden die Ausgangslagen der vorhandenen Geometriekomponenten relativ zum Ursprungskoordinatensystem definiert. Diese beiden Funktionen werden durch die Funktion Visualisierung im CAE-System Fitting Simulator unterstützt. Aufbauend auf diesem Ausgangszustand erfolgt die Zuordnung der Kinematikinformationen zu den Geometriekomponenten mit Relativbewegungen zu dem Ursprungskoordinatensystem. Dazu werden zuerst die lokalen, körperfesten Koordinatensysteme für die Geometriekomponenten definiert. Die lokalen, körperfesten Koordinatensysteme sind auf das Ursprungskoordinatensystem bezogen. Die Bezeichnung für ein lokales, körperfestes Koordinatensystem im Fitting Simulator ist Shuttle. Anschließend werden die Bewegungen, getrennt nach Translation und Rotation, in den lokalen Koordinatensystemen für die Geometriekomponenten, in Abhängigkeit von der Zeit, definiert. Die Bewegungen sind die Kinematikinformationen der Systemeingangsgröße Konfiguration des Fertigungssystems. Die Bezeichnung für die zeitabhängigen Bewegungen Translation und Rotation in den lokalen Koordinatensystemen im Fitting Simulator ist Track.

Bis zu diesem Punkt sind die Bewegungen der Geometriekomponenten separat definiert. Zum Aufbau der Kinematik des gesamten Fertigungssystems werden die einzelnen zeitabhängigen Bewegungen zueinander in Beziehung gesetzt. Dazu werden die Einzelbewegungen in einer Bewegungssequenz abgebildet. In der Bewegungssequenz können die Einzelbewegungen sowohl sequentiell als auch simultan abgebildet werden. Die Bezeichnung für die Bewegungssequenz im Fitting Simulator ist Sequence. In einer Bewegungssequenz sind die gesamten Kinematikinformationen der Geometriekomponenten mit Relativbewegungen zum Ursprungskoordinatensystem durch die zeitabhängigen Bewegungen Translation und Rotation in den lokalen, körperfesten Koordinatensystemen abgebildet. Somit ist die Funktion Zuordnung der Kinematikinformation aus *Abbildung 33* im CAE-System Fitting Simulator gelöst. Die Lösung dieser Funktion wird auch durch die Funktion Visualisierung im CAE-System Fitting Simulator unterstützt.

Die Funktion Durchführung der Simulation beinhaltet die Vorbereitung und Durchführung der Simulationsexperimente zur Prüfung der Größen Kollision und Abstand der kinematisch

modellierten Geometriekomponenten im CAE-System Fitting Simulator. Zur Erfassung der Größen Kollision und Abstand im digitalen Fertigungssystem werden die Kollisionserfassung und Abstandserfassung zwischen Geometriekomponenten im Fitting Simulator genutzt. Die Bezeichnung für die Kollisionserfassung ist Interference und für die Abstandserfassung Distance im CAE-System Fitting Simulator. Interference und Distance gehören zu der Funktionsgruppe Sensoren im CAE-System Fitting Simulator. Zur Prüfung der Größen Kollision und Abstand werden die Sensoren, die nach ihrer Definition den Bewegungssequenzen zur Verfügung stehen, in den Bewegungssequenzen aktiviert. Als Folge werden beim Ablauf der Bewegungssequenzen die Größen Kollision und Abstand zwischen den Geometriekomponenten berechnet und angezeigt.

Die Generierung und das Speichern der zeitabhängigen Simulationsergebnisgrößen Kollision und Abstand geschieht in Simulationsexperimenten. Zur Vorbereitung werden die Bewegungssequenzen, in denen die Sensoren zur Kollisions- und Abstandserfassung aktiviert sind, ausgewählt und anschließend als Simulationsexperimente durchgeführt. Die Simulationsergebnisgrößen Kollision und Abstand werden im Textformat gespeichert und stehen der nachfolgenden Analyse zur Verfügung. Die Bezeichnung für Simulationsexperiment im Fitting Simulator ist Experiment.

Die Funktion Analyse und Interpretation der Ergebnisse des Produktentstehungssystems Kinematiksimulation von Fertigungssystemen wird auf Basis der Ergebnisgrößen der Simulationsexperimente im CAE-System Fitting Simulator sowie in einem Tabellenkalkulations-System wie beispielsweise Excel und einem Präsentations-System wie beispielsweise Powerpoint gelöst. Im Simulationsexperiment des CAE-Systems Fitting Simulator können die Ergebnisgrößen Kollision und Abstand in Abhängigkeit von der Simulationszeit als grafische Funktionen dargestellt werden. Diese grafische Darstellung der Ergebnisgrößen sowie die Einstellung der Bewegungssequenzen entlang der Simulationszeit werden zur Analyse und Interpretation der Simulationsergebnisgrößen genutzt. Zur genaueren Analyse und Interpretation der grafischen Funktionen der Ergebnisgrößen wird das Tabellenkalkulations-System Excel verwendet, in dem die Simulationsergebnisgrößen Kollision und Abstand im Textformat verarbeitet werden. Die Analyse- und Interpretationsergebnisse werden zur Bildung von weiteren Simulationsvarianten durch Änderung des Geometriemodells, des Baugruppenmodells sowie der Konfiguration des Fertigungssystems verwendet. Weitere Simulationsvarianten werden ausgehend von der Funktion Einteilung der Komponenten im Produktentstehungssystem erstellt, berechnet und ausgewertet.

Zur Vorstellung der Analyse- und Interpretationsergebnisse vor einem interdisziplinären Anwenderkreis werden sowohl das CAE-System Fitting Simulator, als auch das Präsentations-

System Powerpoint eingesetzt. Mit der Bezeichnung interdisziplinärer Anwenderkreis werden die mitwirkenden Personen aus allen Lebensphasen der Produktentstehung der Gießtechnik verstanden, die einen Einfluss auf die Ein- und Ausgangsgrößen des Produktentstehungssystems Kinematiksimulation von Fertigungssystemen haben. Im Präsentations-System Powerpoint werden unter Verwendung von Bildschirmabzügen im Bildformat, Bewegungssequenzen im Videoformat sowie grafischen Funktionen, als Ergebnis der Analyse in Excel, neue Simulationskonfigurationen festgelegt, die der Funktion Einteilung der Komponenten des Produktentstehungssystems Kinematiksimulation von Fertigungssystemen als Eingangsgrößen für weitere Simulationsiterationen zugeführt werden.

5.2 Ergebnisvisualisierung in der virtuellen Realität

Im ersten Teil dieses Kapitels wurden Simulationsmethoden für die Tätigkeit Kinematiksimulation entwickelt. Aus der Analyse der Produktentstehungssysteme hinsichtlich der Potentialerfüllung zu dem Kriterium Kommunikationsfähigkeit resultiert die Anforderung zur Erweiterung der charakteristischen Tätigkeiten der Produktentstehung der Gießtechnik um die Tätigkeit Visualisierung (*Abbildung 32*). Deshalb werden in diesem Teil des Kapitels 5 Verfahren in der virtuellen Realität zur Visualisierung von Ergebnisdaten für die in Kapitel 4 festgelegten Tätigkeiten entwickelt. Zu diesen Tätigkeiten zählen Geometriemodellierung, Wandstärkeanalyse, Gießsimulation, Kinematiksimulation, NC-Simulation, Analyse der Maßhaltigkeit, Analyse der Temperaturverteilung und Analyse der Werkstoffdichte.

Zu der Tätigkeit Visualisierung wird ein gleichnamiges Produktentstehungssystem gebildet (*Abbildung 34*). Die Bildung des Produktentstehungssystems Visualisierung basiert auf der Erweiterung der Produktentstehungssysteme mit dem Potential zur Verbesserung der Kommunikationsfähigkeit in Kapitel 4.3.2 durch die allgemeine Lösung VR-System zur Funktion Visualisierung. Die Eingangsgrößen des Produktentstehungssystems Visualisierung sind die Eingangsgrößen der Funktionen Visualisierung in den Produktentstehungssystemen mit Potential zur Verbesserung der Kommunikationsfähigkeit. Diese Eingangsgrößen ergeben sich direkt aus den funktionalen Zusammenhängen in den Produktentstehungssystemen und sind in *Abbildung 34* benannt. Zur Systemabgrenzung der Tätigkeit Visualisierung wird das Produktentstehungssystem Visualisierung für die Entwicklung von Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität in weitere Teilsysteme aufgegliedert. Die Aufgliederung orientiert sich an den Tätigkeiten, deren Produktentstehungssysteme das Potential zur Verbesserung der Kommunikationsfähigkeit aufweisen.

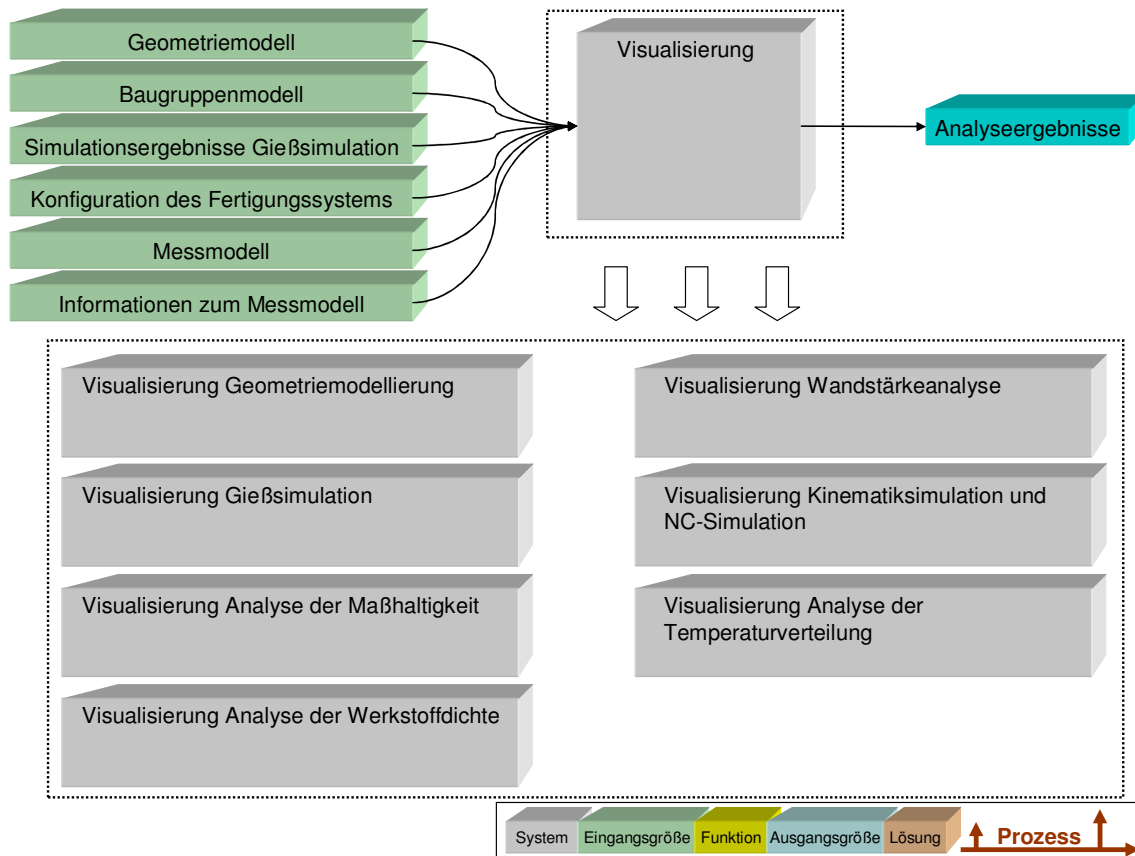


Abbildung 34: Produktentstehungssystem Visualisierung

Zur Entwicklung der Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität wird das VR-System Covise mit folgender Begründung verwendet. Die Funktionen, die in dem VR-System Covise gelöst werden können, haben, im Gegensatz zu den Funktionen anderer verfügbarer VR-Systeme, den höchsten Überdeckungsgrad mit den Funktionen, die in den Teilsystemen aus *Abbildung 34* mit folgendem Ziel, im weiteren Verlauf dieses Kapitels, gelöst werden sollen. Dieses Ziel ist die Visualisierung von Ergebnisdaten aus den Tätigkeiten der Produktentstehung der Gießtechnik, für die das Potential zur Verbesserung der Kommunikationsfähigkeit in Kapitel 4 hergeleitet wurde.

Das VR-System Covise ist durch eine visuelle Programmieroberfläche gekennzeichnet, auf der informationstechnische Funktionen in der Ausprägung von Covisemodulen miteinander verknüpft und ausgeführt werden können. Die Ausführung der Covisemodule resultiert in der Visualisierung von Datenmodellen in der virtuellen Realität. Die Funktionen der Covisemodule können Teilfunktionen beinhalten. Auf dieser Grundlage werden im zweiten Teil des Kapitels 5 Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität entwickelt. Zur Entwicklung der Funktionen sowie der Lösungen wird die Vorgehensweise bei der Entwicklung von Softwareprodukten in

Anlehnung an [PAH-07], die in *Abbildung 7* dargestellt ist, verwendet. Eingesetzte Lösungsmethoden sind die konventionellen, die intuitiv sowie diskursiv betonten, die Methoden zur Lösungskombination sowie die Auswahl- und Bewertungsmethoden. Diese Lösungsmethoden werden in Kapitel 2.1.3 erläutert. Die Problemanalyse, der Entwurf, die Implementierung, der Test sowie die Wartung der Softwareprodukte werden mit den Methoden und Werkzeugen gelöst, die in Kapitel 2.3.1 beschrieben sind.

5.2.1 Geometriemodellierung

Zur Visualisierung von Geometriemodellen und Baugruppenmodellen von Gussteilen und Gießwerkzeugen aus den CAD-Systemen CATIA V5 und Tebis in der virtuellen Realität werden Verfahren im CAD-Modul des Anwendungssoftwaresystems Magics sowie im VR-System Covise entwickelt. Der Prozess zur Visualisierung von Geometriemodellen in der virtuellen Realität ist in *Abbildung 35* dargestellt und wird im Folgenden erläutert.

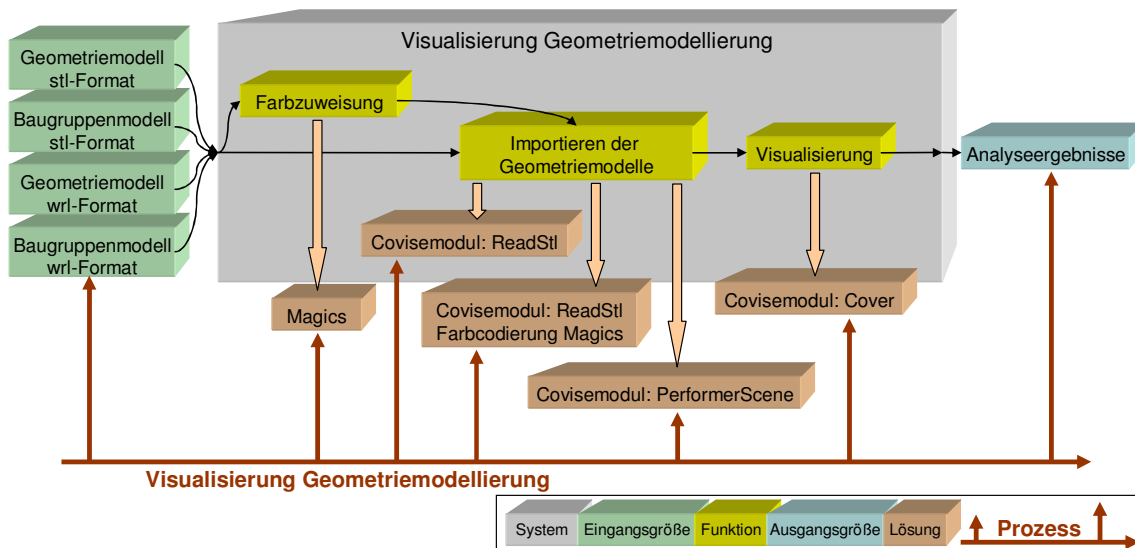


Abbildung 35: Visualisierung Geometriemodellierung

Als Systemeingangsgrößen stehen die Geometriemodelle als Exportdaten aus CATIA V5 bzw. Tebis in den Formaten stl und wrl bereit. Beim Datenexport in das stl-Format gehen die Farbinformationen, die im CAD-System zugewiesen wurden, verloren. Deshalb besteht für diese Datentypen durch die Funktion Farbzuweisung im CAD-Modul von Magics die Möglichkeit, die Geometriemodelle bzw. Baugruppenmodelle erneut einzufärben und in das stl-Format mit der Farbcodierung von Magics zu wandeln. Somit werden die Geometrie-

modelle im stl-Format zum einen einfarbig durch das Covisemodul ReadStl in das VR-System importiert. Zum anderen werden die erneut eingefärbten Geometriemodelle im stl-Format durch das Covisemodul ReadStl mit der Lesefunktion für die Farbcodierung von Magics in das VR-System importiert.

Der Datenexport der Geometriemodelle aus den CAD-Systemen im wrl-Format hat den Vorteil, dass die zugewiesenen Farben erhalten bleiben. Dieser Vorteil kommt insbesondere bei der Visualisierung von komplexen Baugruppenmodellen in der virtuellen Realität zum Tragen. Der Grund für den Erhalt der Farben ist die Abbildbarkeit von Farbinformationen im wrl-Format. Die Geometriemodelle im wrl-Format werden durch das Covisemodul PerformerScene in das VR-System importiert. Die Visualisierung der importierten Geometriemodelle im stl- bzw. wrl-Format erfolgt durch das Covisemodul Cover. Zur Visualisierung von Geometrie- und Baugruppenmodellen in der virtuellen Realität wird die Verwendung des wrl-Formats aus den genannten Gründen empfohlen.

5.2.2 Wandstärkeanalyse

Die Wandstärkeanalyse ist eine weitere Tätigkeit der Produktentstehung der Gießtechnik mit dem Potential zur Verbesserung der Kommunikationsfähigkeit. Aus diesem Grund wird für diese Tätigkeit ein Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität entwickelt. Die Ergebnisse der Entwicklung werden in *Abbildung 36* gezeigt.

Aus *Abbildung 36* geht hervor, dass die Visualisierung der Wandstärkeanalyseergebnisse in der virtuellen Realität auf Geometriemodellen im stl-Format beruht. Die Geometriemodelle der Gussteile werden daher im stl-Format aus den CAD-Systemen CATIA V5 bzw. Tebis in das CAE-System Magics Tooling Expert übertragen. Im CAE-System Magics Tooling Expert erfolgt daraufhin die parametergesteuerte Berechnung der Wandstärke in dem facettierten Geometriemodell im stl-Format. Das Ergebnis der Berechnung sind die skalaren Größen der Wandstärke im Geometriemodell. Die skalaren Größen der Wandstärke werden auf den facettenförmigen Elementen des Geometriemodells als Farbwerte abgebildet. Der Größenbereich sowie die Abbildungsfunktionen der Größen auf den Farbwerten sind im Tooling Expert einstellbar. Das Geometriemodell mit den Farbwerten der Wandstärke wird als Ergebnismodell im stl-Format mit der Magics Farbcodierung exportiert. Die mit dem Geometriemodell korrespondierende Ergebnisskala wird als Bildschirmabzug im png-Format aus dem CAE-System Magics Tooling Expert exportiert.

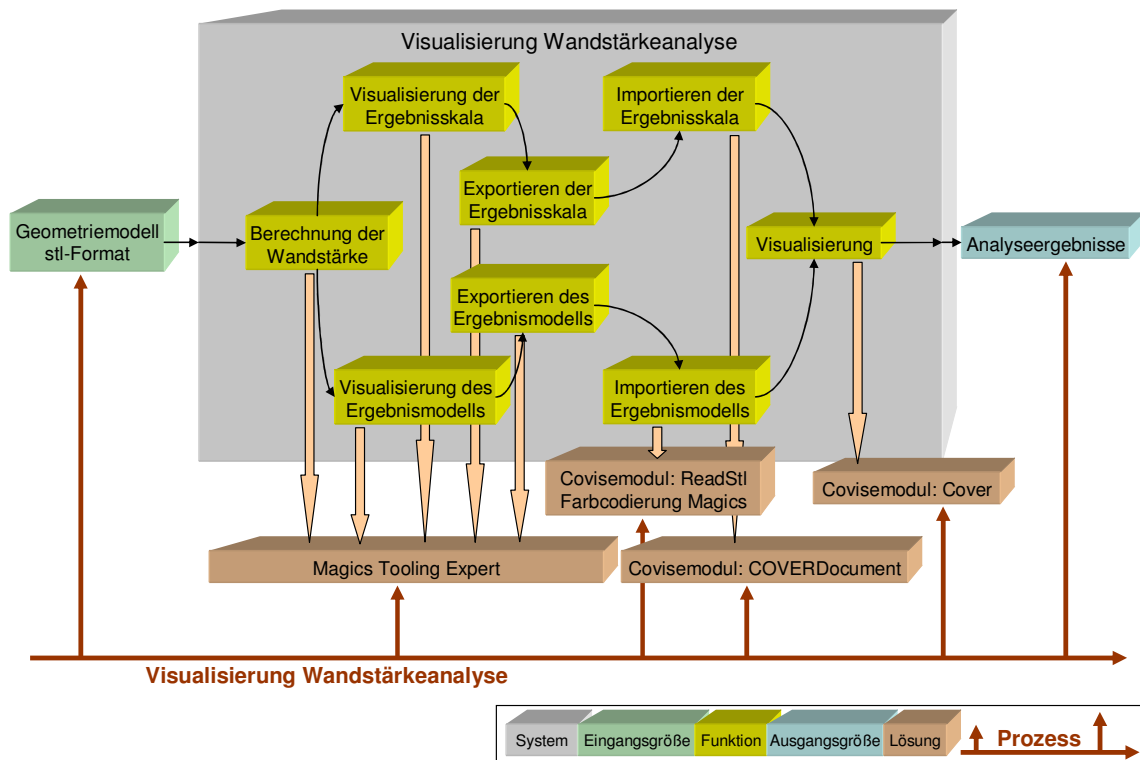


Abbildung 36: Visualisierung Wandstärkeanalyse

Der Import des Ergebnismodells der Wandstärkeberechnung in das VR-System erfolgt mit Hilfe des Covisemoduls ReadStl. Die Ergebnisskala wird durch das Covisemodul COVERDocument als zweidimensionales Bild in das VR-System importiert. Ergebnismodell und Ergebnisskala werden im letzten Visualisierungsschritt im Covisemodul Cover in der 3D-Umgebung dargestellt und stehen der Wandstärkeanalyse zur Verfügung.

5.2.3 Gießsimulation

In diesem Teil der Arbeit werden Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität für Ergebnisse der Gießsimulation aus dem CAE-System Magmasoft entwickelt. Im Vergleich zu den anderen Tätigkeiten der Produktentstehung, für die in diesem Kapitel Visualisierungsverfahren entwickelt werden, stehen bei der Tätigkeit Gießsimulation viele verschiedene Ergebnistypen zur Verfügung. Aufgrund der Verschiedenheit der Ergebnistypen aus Magmasoft werden mehrere Visualisierungsverfahren entwickelt. Zur Einteilung der Visualisierungsverfahren werden die Ergebnistypen aus Magmasoft in den Ergebnisgruppen Formfüllung und Erstarrung sowohl zeitabhängig, als auch zeitunabhängig betrachtet (Abbildung 37). Die Ergebnistypen sind Füllfronten, -spuren und -kriterien sowie

Erstarrungsfronten und -kriterien. Die unter den Ergebnistypen angeordneten Ergebnisgrößen bezeichnen die skalaren Größen, die bei Gießsimulationen berechnet werden.

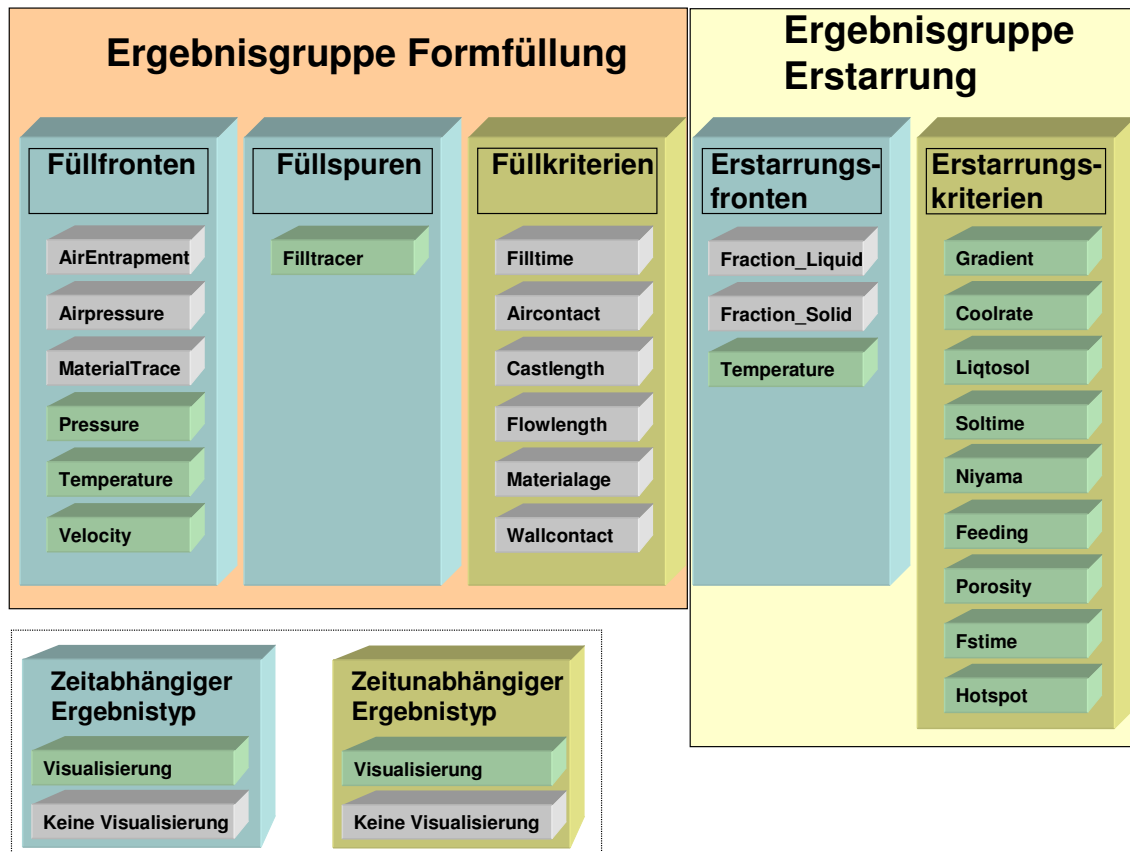


Abbildung 37: Ergebnisse der Gießsimulation

Die Übertragung der Ergebnisgrößen aus dem CAE-System Magmasoft in das VR-System wird im Rahmen der Visualisierungsverfahren durch Funktionen, die an der API von Magmasoft bereitgestellt werden, realisiert. In Abhängigkeit von der Verfügbarkeit der Ergebnistypen durch Funktionen an der API im CAE-System Magmasoft sowie den Visualisierungsmöglichkeiten der verfügbaren Ergebnistypen im VR-System werden für bestimmte Ergebnisgrößen Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität entwickelt. Diese Ergebnisgrößen sind in *Abbildung 37* grün gekennzeichnet. Die grün gekennzeichneten Ergebnistypen werden in Hinsicht auf die technische Realisierbarkeit der Visualisierungsverfahren durch Funktionen von Anwendungssoftwaresystemen in:

- Füll- und Erstarrungsfronten aus den Ergebnisgruppen Formfüllung und Erstarrung,
- Füllspuren aus der Ergebnisgruppe Formfüllung und

- Erstarrungskriterien aus der Ergebnisgruppe Erstarrung eingeteilt.

Das Produktentstehungssystem Visualisierung Gießsimulation aus *Abbildung 34* wird zur Entwicklung der Visualisierungsverfahren aufgrund der Einteilung der Ergebnistypen in die drei Systeme Visualisierung Füll- und Erstarrungsfronten (*Abbildung 38*), Visualisierung Füllspuren (*Abbildung 39*) sowie Visualisierung Erstarrungskriterien (*Abbildung 40*) unterteilt. Mit Hilfe dieser drei Produktentstehungssysteme werden im weiteren Verlauf dieses Teils des Kapitels Visualisierungsverfahren für die Tätigkeit Gießsimulation entwickelt.

Als erstes werden Visualisierungsverfahren für die Ergebnistypen Füllfronten aus der Ergebnisgruppe Formfüllung und für die Ergebnistypen Erstarrungsfronten aus der Ergebnisgruppe Erstarrung aus *Abbildung 37* entwickelt. Das Ergebnis dieser Entwicklung ist in *Abbildung 38* dargestellt und wird im Folgenden erläutert.

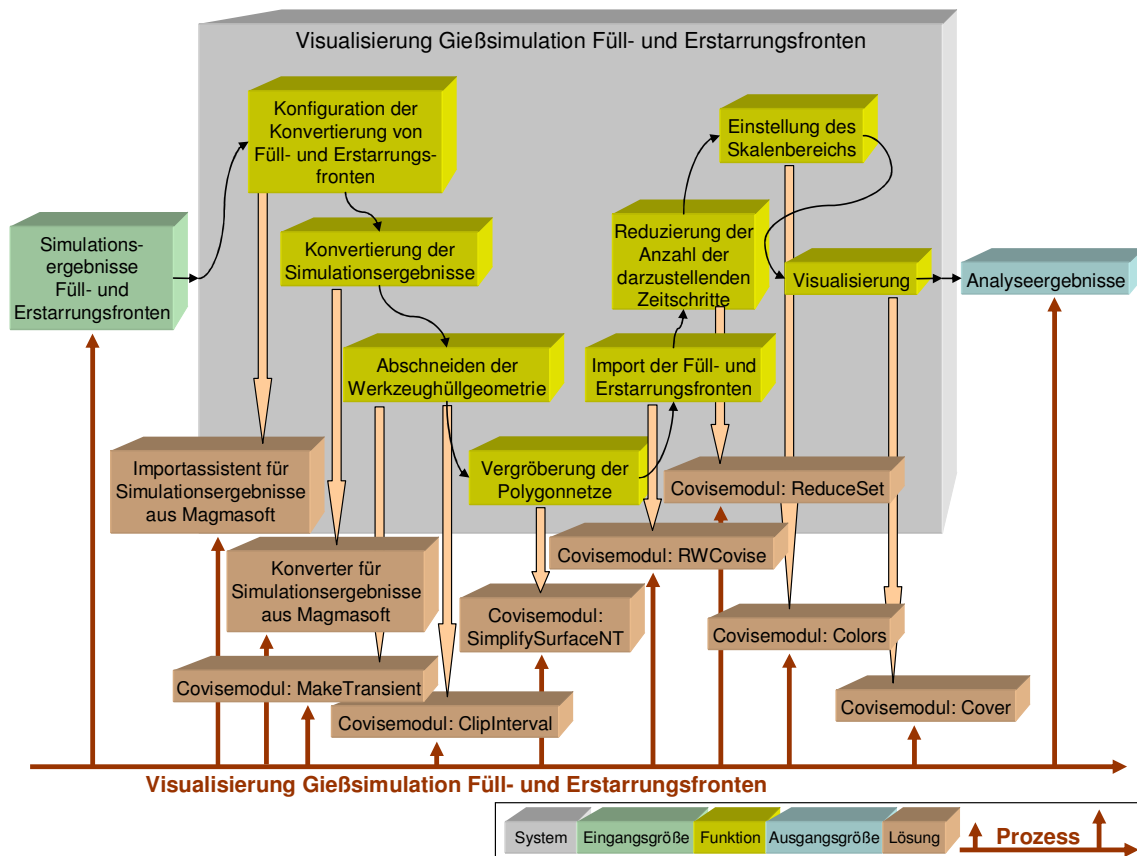


Abbildung 38: Visualisierung Füll- und Erstarrungsfronten

Die Eingangsgrößen des Produktentstehungssystems Visualisierung Füll- und Erstarrungsfronten sind die gleichnamigen Simulationsergebnisse aus dem CAE-System

Magmasoft. Es handelt sich um zeitabhängige Ergebnistypen. Die Simulationsergebnisse sind triangulierte Flächenbeschreibungen und Skalarwerte. Die Konfiguration der Konvertierung wird in dem Importassistent für Simulationsergebnisse aus Magmasoft durchgeführt. Der Importassistent ist ein Teilsystem des VR-Systems. Ein Programmbestandteil des Importassistenten bewirkt das Aufrufen von Informationen zu den Ergebnisgrößen aus dem CAE-System Magmasoft durch die Verwendung von Funktionen der API. Diese Informationen werden an der grafischen Benutzungsschnittstelle des Importassistenten angezeigt. Die Informationen sind die Grundlage zur Konfiguration der Konvertierung. Nach der Konfiguration findet die Konvertierung der Simulationsergebnisse durch das Konvertierungsprogramm (Konverter) des Importassistenten statt, der die Ergebnisgrößen vom CAE-System Magmasoft in das VR-System, unter zu Hilfenahme der Funktionen der API, überträgt.

Die Simulationsergebnisse sind zu diesem Prozessschritt zeitabhängige Geometriemodelle der Füll- und Erstarrungsfronten, zeitunabhängige Werkzeughüllgeometriemodelle sowie zeitabhängige Skalarwerte für beide Geometriemodelle. Zur Visualisierung der Simulationsergebnisse im VR-System ist die Durchführung von vorbereitenden Arbeitsschritten notwendig, die jetzt erläutert werden.

Die Anzahl der Zeitschritte der zeitabhängigen Skalarwerte wird auf den zeitunabhängigen Werkzeughüllgeometriemodellen unter Hinzunahme des Covisemoduls MakeTransient abgebildet. Zeitschritte bezeichnen die diskreten Zeitpunkte, an denen die Ergebnisgrößen einen bestimmten Wert annehmen. Die Werkzeughüllgeometriemodelle sind somit eine geometrisch konstante Funktion der Zeitschritte. Diese zeitabhängigen Werkzeughüllgeometriemodelle werden im Covisemodul ClipInterval zusammen mit den zeitabhängigen Skalarwerten zu zeitabhängigen Werkzeughüllgeometriemodellen mit veränderlicher Geometrie durch Abschneiden von Geometriebereichen in Abhängigkeit von definierten Skalarwerten gewandelt. Darauf werden die zeitabhängigen Geometriemodelle der Füll- und Erstarrungsfronten, die zeitabhängigen Werkzeughüllgeometriemodelle sowie die korrespondierenden zeitabhängigen Skalarwerte für beide Geometriemodelle im Covisemodul SimplifySurfaceNT vergrößert. Das Ziel der Anwendung des Vergrößerungsalgorithmus ist die Reduzierung der Datengröße der Simulationsergebnisse.

Der Import der Füll- und Erstarrungsfronten sowie der Werkzeughüllgeometrien in das VR-System geschieht nach der Durchführung der vorbereitenden Arbeitsschritte durch das Covisemodul RWCovise. Dabei besteht die erneute Möglichkeit zur Reduzierung der Datengröße der Simulationsergebnisse durch die Verringerung der Anzahl der darzustellenden Zeitschritte im Covisemodul ReduceSet. Als letzter vorbereitender Visualisierungsschritt wird im Covisemodul Colors der Bereich der Skalarwerte definiert, der auf den zeitabhängigen

Geometriemodellen abgebildet wird. Die Visualisierung der Füll- und Erstarrungsfronten sowie der Werkzeughüllgeometrien wird im Covisemodul Cover umgesetzt. Die Ausgangsgrößen dieses Systems sind die Analyseergebnisse.

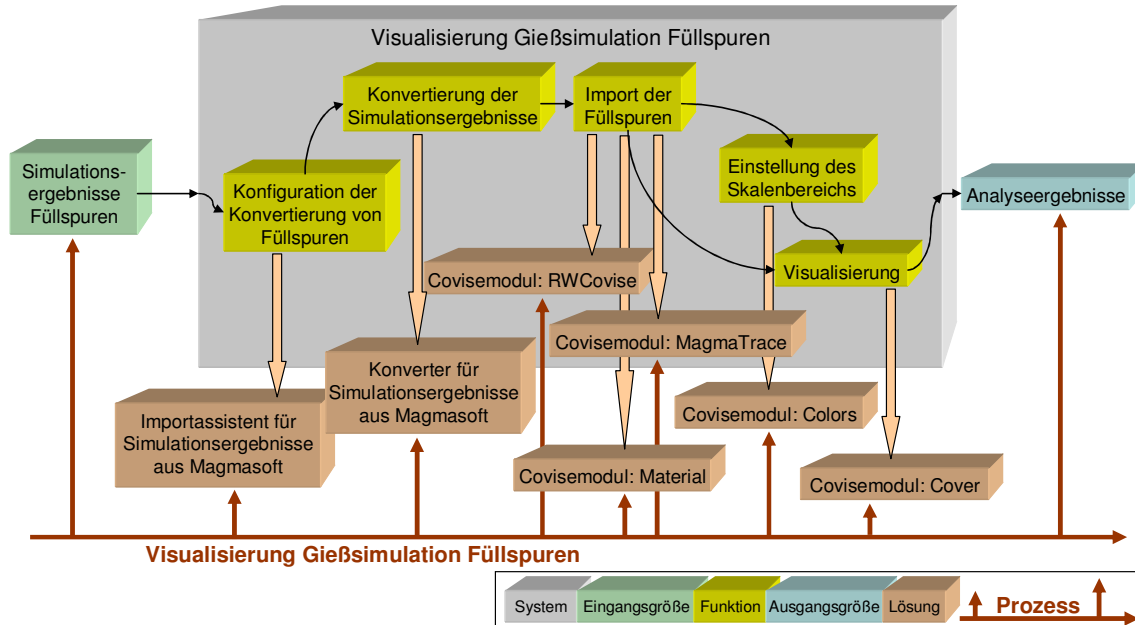


Abbildung 39: Visualisierung Füllspuren

Die Verfahren zur Visualisierung der Ergebnistypen Füllspuren sind in *Abbildung 39* enthalten. Füllspuren sind, wie in *Abbildung 37* gezeigt, zeitabhängige Ergebnisgrößen. Die Funktionen Konfiguration der Konvertierung sowie Konvertierung der Simulationsergebnisse werden im Importassistenten gelöst. Das Covisemodul RWConvise leitet den Import der Füllspuren in das VR-System ein. Die Füllspuren liegen nach dem Import als zeitabhängige Geometriemodelle sowie dazu korrespondierende zeitabhängige Skalarwerte, im VR-System vor. Diese beiden Ergebnisgrößen werden im Covisemodul MagmaTrace in ein Format konvertiert, das von den Standardcovisemodulen verarbeitet werden kann. Die Definition des Skalenbereichs findet im Covisemodul Colors statt.

Zur besseren Zuordnung der relativen Lage der Füllspuren im Gießwerkzeug werden durch das Covisemodul RWConvise die zeitunabhängigen Werkzeughüllgeometrien in das VR-System geladen. Diese triangulierten Geometriemodelle werden im Covisemodul Material mit systemeigenen Skalarwerten belegt. Der Zweck ist dabei die Sichtbarmachung der Geometrie in der 3D-Umgebung. Die Werkzeughüllgeometrien und die Füllspuren werden in das Covisemodul Cover zur Visualisierung und Analyse geladen.

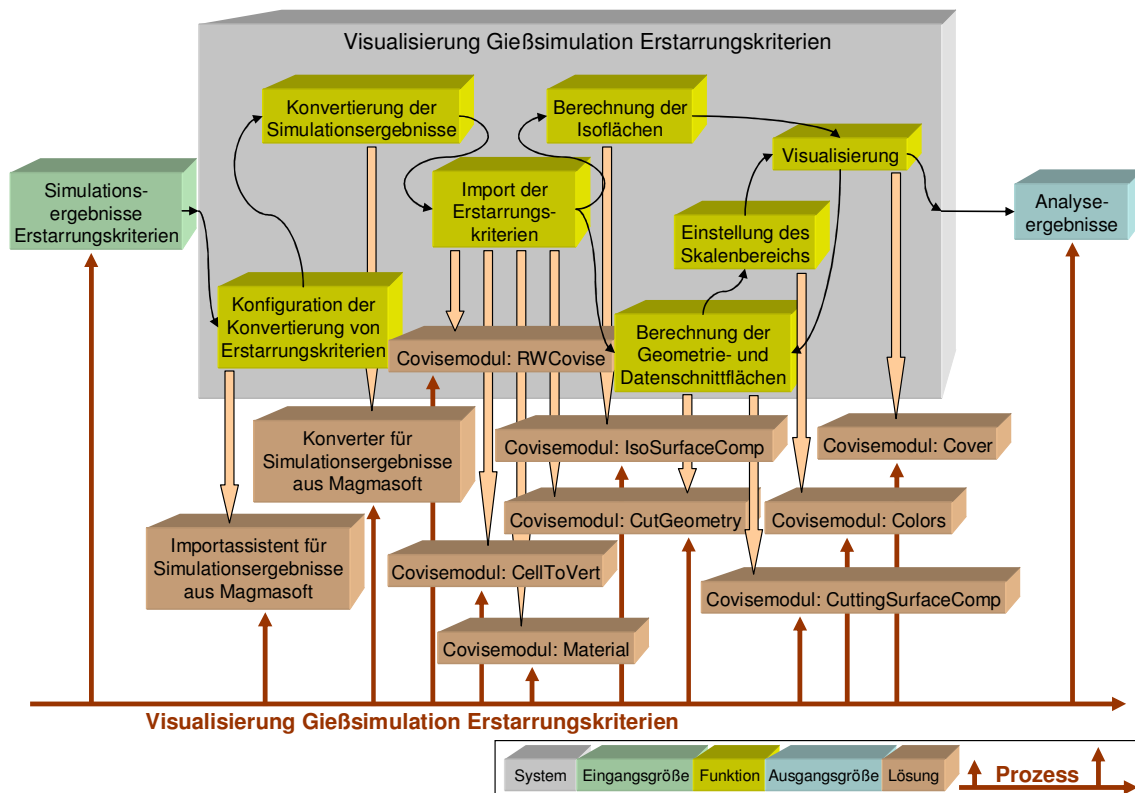


Abbildung 40: Visualisierung Erstarrungskriterien

Das Ergebnis der Entwicklung der Visualisierungsverfahren für die Ergebnistypen Erstarrungskriterien ist in *Abbildung 40* im Produktentstehungssystem abgebildet. Ausgangsbasis dieses Produktentstehungssystems sind die Simulationsergebnisse aus dem CAE-System Magmasoft, die an der API durch Funktionen in das VR-System übertragen werden. Die Konvertierungskonfiguration sowie die Konvertierung dieser Simulationsergebnisse geschehen, wie bei den oben beschriebenen Ergebnistypen, mit Hilfe des Importassistenten.

Der Import der Ergebnisgrößen Erstarrungskriterien und der Werkzeughüllgeometriemodelle erfolgen durch das Covisemodul RWCovise. Die Erstarrungskriterien werden als Volumendaten in einem einheitlichen Gitter in das VR-System geladen. In diesem Voxelgitter liegen die Ergebnisgrößen als Skalarwerte jeweils in der Voxelmitte vor. Durch das Covisemodul CellToVert werden die Skalarwerte in der Voxelmitte auf den Knotenpunkten des Voxelgitters interpoliert, da diese gitterbezogenen Ergebnispositionen besser im VR-System Covise weiterverarbeitet werden können. Die Werkzeughüllgeometriemodelle werden einerseits im Covisemodul CutGeometry mit den Skalarwerten der Erstarrungskriterien und

andererseits im Covisemodul Material mit definierbaren Skalarwerten für die Visualisierung vorbereitet.

Anhand dieses Importverfahrens gibt es zwei Möglichkeiten zur Visualisierung von Erstarrungskriterien. Eine Möglichkeit ist die Darstellung der Erstarrungskriterien als Isoflächen. Die zweite Möglichkeit ist die Darstellung in Form von Datenschnittflächen. Für die Darstellung von Isoflächen werden im Covisemodul IsoSurfaceComp die Isoflächen aus den skalaren Daten des Voxelgitters berechnet. Die Skalarwerte für die Berechnung der Isoflächen können in diesem Modul definiert werden. Daraufhin werden die Erstarrungskriterien als Isoflächen für die definierten Skalarwerte sowie die Werkzeughüllgeometrie, die im Covisemodul Material aus definierbaren Skalarwerten generiert worden ist, durch das Covisemodul Cover visualisiert.

Bei der zweiten Darstellungsmöglichkeit werden die Geometrie- und Datenschnittflächen in den Covisemodulen CutGeometry und CuttingSurfaceComp auf Basis der importierten Voxeldaten berechnet. Im nächsten Prozessschritt wird die Ergebnisskala für die Datenschnittflächen sowie für die Werkzeughüllgeometriemodelle aus dem Covisemodul CutGeometry in dem Covisemodul Colors definiert. Daraufhin werden die Werkzeughüllgeometriemodelle mit den Skalarwerten der Erstarrungskriterien aus dem Covisemodul CutGeometry sowie die Geometrie- und Datenschnittflächen im Covisemodul Cover visualisiert. Im Cover können die Geometrie- und Datenschnittflächen zur Analyse in der Lage verändert werden. Sobald das geschieht, werden sie neu berechnet und anschließend im Cover visualisiert.

5.2.4 Kinematiksimulation und NC-Simulation

Für die Tätigkeiten Kinematiksimulation und NC-Simulation wird ein einheitliches Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität entwickelt. Der Grund dafür ist, dass die Funktionen und Lösungen auf informationstechnischer Ebene für beide Tätigkeiten gleich sind. Die Kinematikmodelle der Tätigkeiten Kinematiksimulation und NC-Simulation werden in der VRML modelliert und dann im VR-System visualisiert. Das entwickelte Visualisierungsverfahren ist in *Abbildung 41* dargestellt.

Die Eingangsgrößen des Produktentstehungssystems in *Abbildung 41* sind Geometrie- und Baugruppenmodelle sowie Konfigurationen der Fertigungssysteme. Die Geometrie- und Baugruppenmodelle sind die Geometriekomponenten, die zur Durchführung und Analyse der Kinematik- und NC-Simulationen verwendet wurden. Die Konfigurationen der Fertigungs-

systeme beinhalten die relativen Lageinformationen sowie die Kinematikinformationen der Geometriekomponenten. Die Kinematikinformationen für NC-Simulationen sind die NC-Programme.

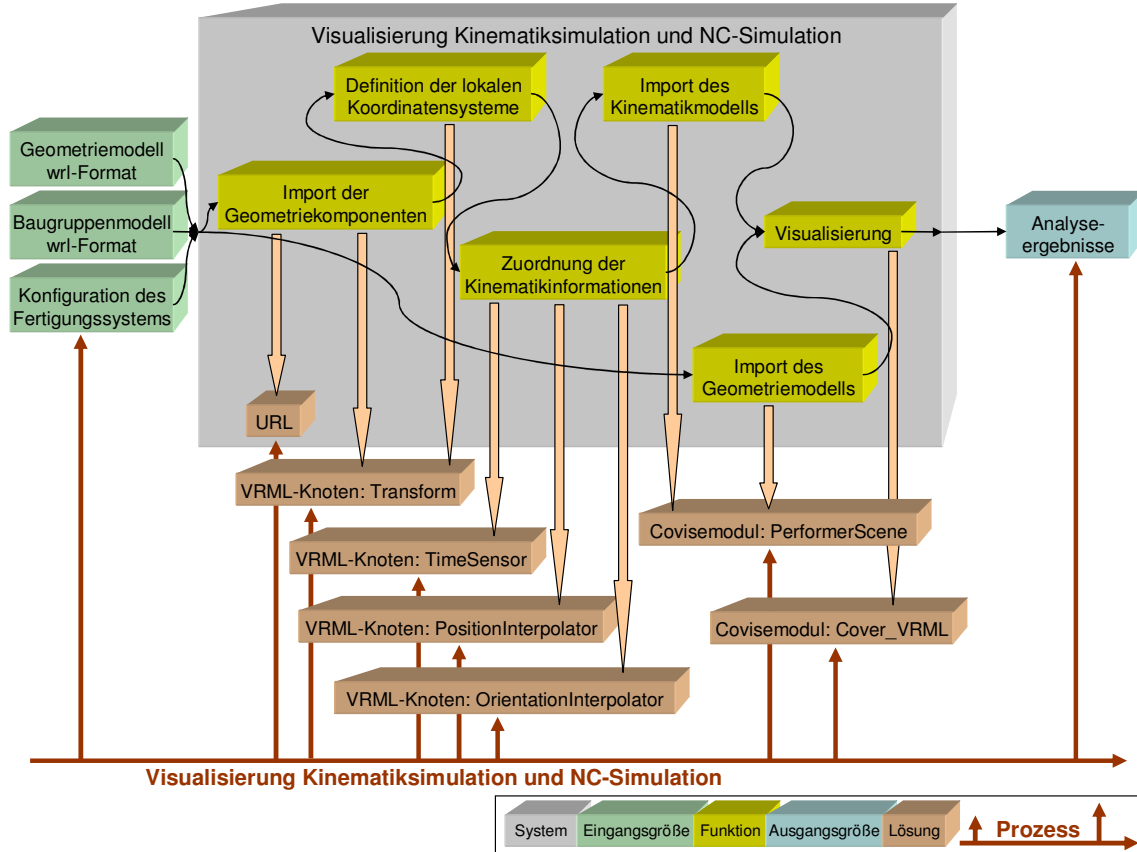


Abbildung 41: Visualisierung Kinematiksimulation und NC-Simulation

Die Modellierung der Kinematikmodelle beginnt mit der Verknüpfung der Geometrie- und Baugruppenmodelle im wrl-Format durch den VRML-Knoten Transform über einen einheitlichen Quellanzeiger, dem URL (Uniform Resource Locator). Die relativen Lageinformationen aus den Eingangsgrößen Konfigurationen der Fertigungssysteme sind bereits in den Geometrie- und Baugruppenmodellen enthalten. Die Definition der lokalen Koordinatensysteme geschieht durch die Verknüpfung der Geometrie- und Baugruppenmodelle im VRML-Knoten Transform.

Die Kinematikinformationen werden in mehreren VRML-Knoten den Geometriekomponenten zugeordnet. Translationen der Geometriekomponenten werden in dem VRML-Knoten PositionInterpolator abgebildet. Rotationen der Geometriekomponenten werden in dem VRML-Knoten OrientationInterpolator abgebildet. Die Translationen und Rotationen sind die

zeitabhängigen Verfahrenswege der Geometriekomponenten der Fertigungssysteme. Durch den VRML-Knoten TimeSensor werden Zeitimpulse in definierbaren Zeitzyklen erzeugt. Die Translationen bzw. Rotationen der Geometriekomponenten werden durch die ereignisgesteuerte Taktung der VRML-Knoten Position- und OrientationInterpolator mit den Zeitimpulsen des VRML-Knotens TimeSensor auf den lokalen Koordinatensystemen der Geometriekomponenten der VRML-Knoten Transform angewendet. Daraus resultiert die zeitabhängige Interpolation der Lage der Geometriekomponenten. Die zeitabhängige Interpolation der Lage der Geometriekomponenten in der VRML sind die Kinematikmodelle, die im VR-System visualisiert werden.

Der Import der Kinematikmodelle in das VR-System erfolgt durch das Covisemodul PerformerScene. Der Import von Geometriemodellen, die aus dem CAE-Systemen Fitting Simulator bzw. aus dem CAE-Modul von Tebis als statische Simulationsmodelle im wrl-Format exportiert werden, geschieht auch durch das Covisemodul PerformerScene. Beide Modelle werden im Covisemodul Cover visualisiert und analysiert.

5.2.5 Analyse der Maßhaltigkeit

Die informationstechnischen Funktionen zur Visualisierung der Tätigkeit Maßhaltigkeit sind ähnlich zu den entwickelten Visualisierungsverfahren der Tätigkeit Wandstärkeanalyse. Aus diesem Grund orientiert sich die Entwicklung von Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität für die Tätigkeit Maßhaltigkeit an den Visualisierungsverfahren der Tätigkeit Wandstärkeanalyse. Das kommt insbesondere bei dem Aufbau des Produktentstehungssystems Visualisierung Maßhaltigkeit in *Abbildung 42* zum Ausdruck.

Die Visualisierung der Ergebnisse der Tätigkeit Maßhaltigkeit beginnt mit den Eingangsgrößen Geometriemodelle und Messmodelle. Die Geometriemodelle sind Datenmodelle aus den CAD-Systemen CATIA V5 und Tebis. Die Messmodelle sind Datenmodelle aus dem optischen Messsystem. In dem CAQ-System ATOS werden die geometrischen Abweichungen zwischen den Messmodellen und den Geometriemodellen als skalare Größen berechnet und in einem definierbaren Skalenbereich auf den Messmodellen abgebildet. Die Messmodelle mit der Abbildung der geometrischen Abweichung werden als Ergebnismodelle bezeichnet. Die Ergebnisskalen der berechneten Skalarwerte werden im CAQ-System ATOS dargestellt.

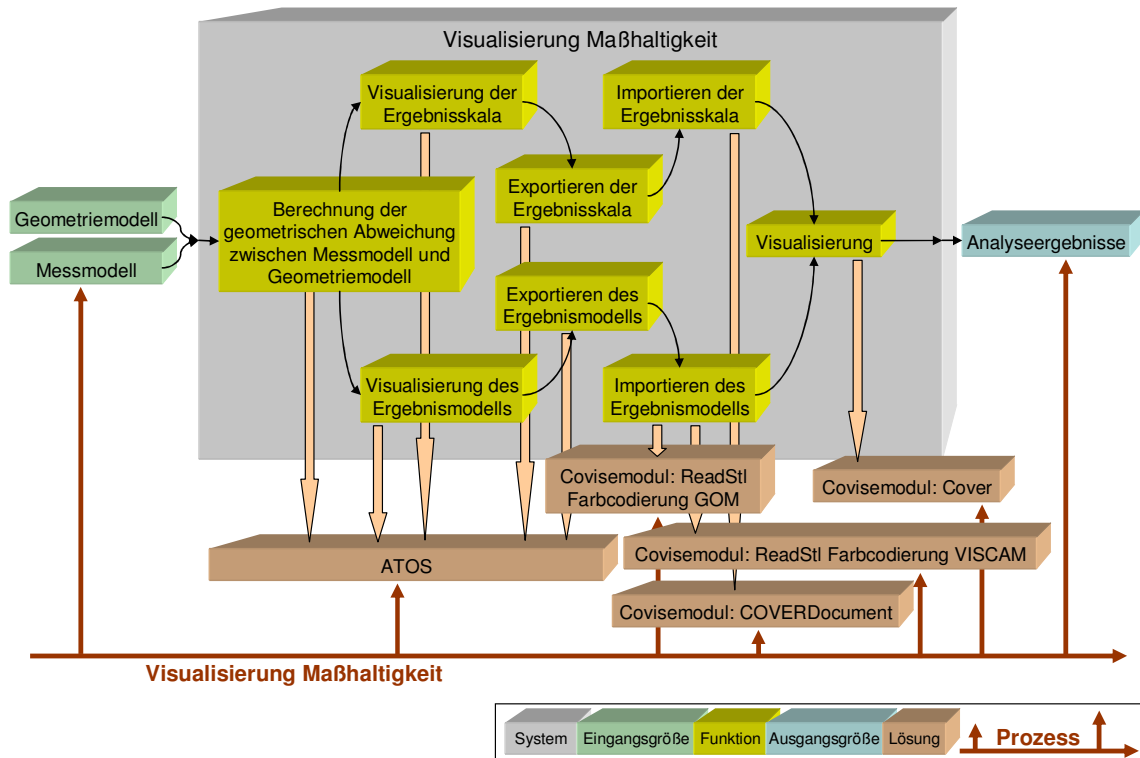


Abbildung 42: Visualisierung Maßhaltigkeit

Für den Export der Ergebnismodelle aus dem CAQ-System ATOS bestehen zwei Möglichkeiten. Einerseits werden die Ergebnismodelle im stl-Format in der Farbcodierung mit der Bezeichnung GOM exportiert. Andererseits werden die Ergebnismodelle im stl-Format in der Farbcodierung mit der Bezeichnung VISCAM exportiert. GOM und VISCAM stehen für zwei unterschiedliche Verfahren zur Abbildung von Farbinformationen in tesselierten Geometriemodellen im stl-Format. Diese beiden Verfahren zur Farbabbildung werden in dieser Arbeit nicht erläutert. Der Export der Ergebnisskalen geschieht aus ihren Darstellungen heraus im CAQ-System ATOS in Form von Bildschirmabzügen. Die Bildschirmabzüge werden im png-Format gespeichert.

Die Ergebnismodelle werden durch das Covisemodul ReadStl im stl-Format entweder in der Farbcodierung GOM oder VISCAM importiert. Der Import der Ergebnisskalen erfolgt in dem Covisemodul COVERDocument. Die Visualisierung der Ergebnismodelle und der Ergebnisskalen sowie die Analyse der Ergebnismodelle erfolgen im Covisemodul Cover.

5.2.6 Analyse der Temperaturverteilung

Die Entwicklung von Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität für die Tätigkeit Analyse der Temperaturverteilung ist in *Abbildung 43* dargestellt.

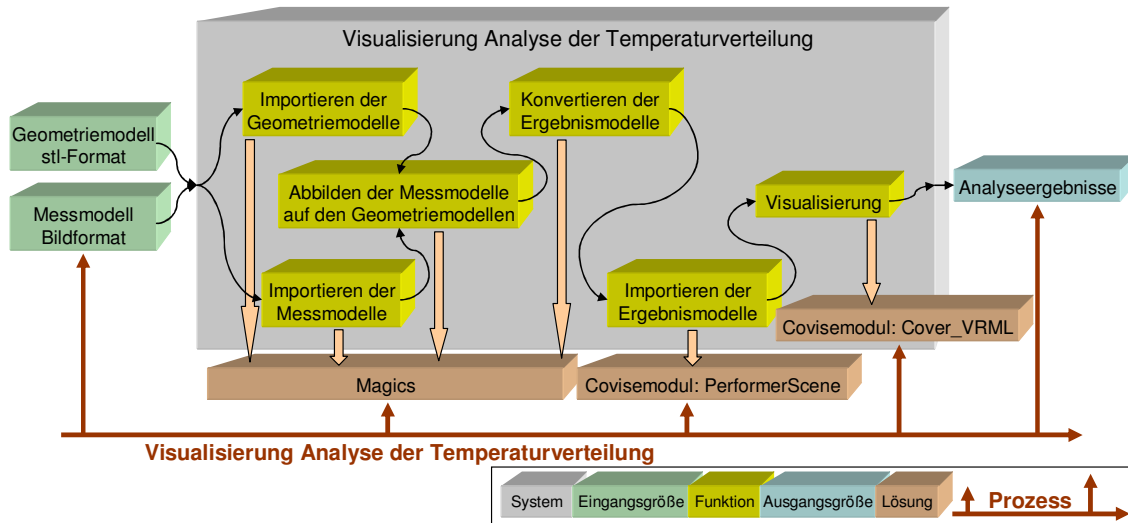


Abbildung 43: Visualisierung Analyse der Temperaturverteilung

Den Ausgangspunkt zur Visualisierung der Temperaturverteilung bilden die Geometriemodelle der Gießwerkzeuge aus den CAD-Systemen CATIA V5 bzw. Tebis im stl-Format und die geometrisch korrespondierenden Messmodelle der Strahlungsintensität in einem Bildformat. Die Geometriemodelle werden in das CAD-Modul des Anwendungssystems Magics geladen. In Magics werden auf den Oberflächen der Geometriemodelle die Messmodelle als Texturen abgebildet. Die Ergebnismodelle werden daraufhin in Magics in das wrl-Format konvertiert. Im wrl-Format bleiben die Texturen auf den Geometriemodellen beim Exportieren erhalten.

Der Import der Ergebnismodelle in das VR-System erfolgt durch das Covisemodul PerformerScene. Die Ergebnismodelle werden dabei im wrl-Format importiert. Die Visualisierung und die Analyse der Ergebnismodelle finden im Covisemodul Cover_VRML statt.

5.2.7 Analyse der Werkstoffdichte

Den Abschluss des Kapitels 5 bildet die Entwicklung von Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität für die Tätigkeit Analyse der Werkstoffdichte. Das gleichnamige Produktentstehungssystem ist in *Abbildung 44* wiedergegeben. Die Visualisierungsverfahren für die anderen Tätigkeiten, die in diesem Kapitel entwickelt worden sind, basieren auf Geometriemodellen in tesselierten Datenformaten. Ausgenommen davon ist das Visualisierungsverfahren des Ergebnistyps Erstarrungskriterien für die Tätigkeit Gießsimulation. Im Gegensatz dazu basiert das Visualisierungsverfahren für die Tätigkeit Analyse der Werkstoffdichte auf einem Datenformat, dessen Modelle in Volumen beschrieben werden.

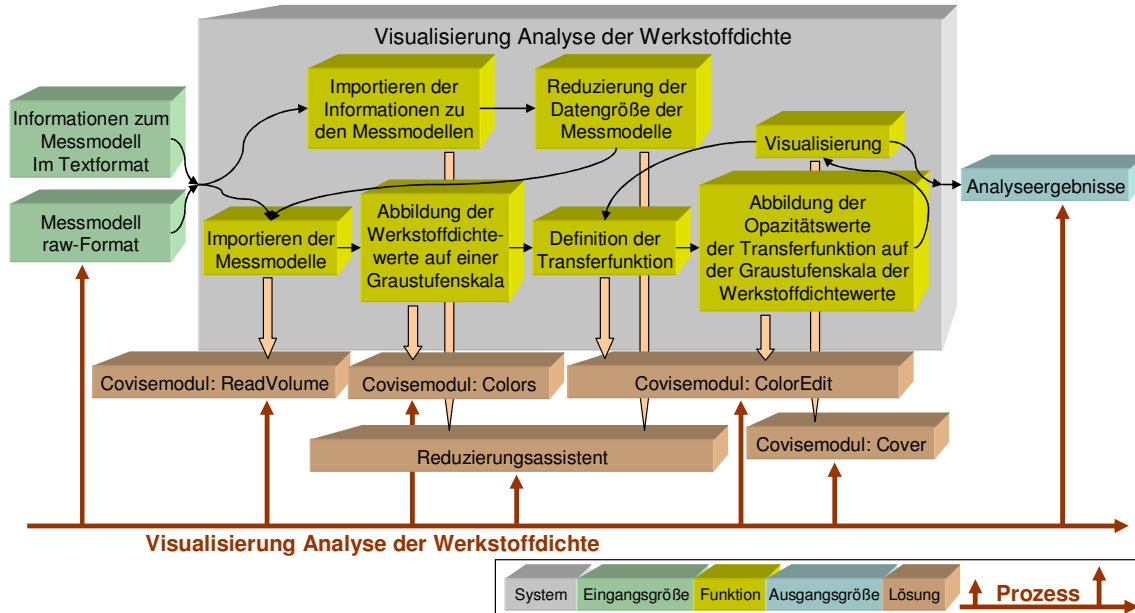


Abbildung 44: Visualisierung Analyse der Werkstoffdichte

Die Eingangsgrößen des Produktentstehungssystems aus *Abbildung 44* sind die Messmodelle der Gussteile sowie die Informationen zu den Messmodellen. Die Messmodelle liegen als Volumendaten vor. Die Volumendaten bestehen aus scheinbar angeordneten Bildern. Die Bilder liegen im Rohdatenformat, dem raw-Format, mit einer Graustufung aus dem CAQ-System VGStudio MAX vor. Die detektierten Dichtewerte sind somit als Rohdaten in den scheinbar angeordneten Bildern im Volumen beschrieben. Desweiteren liegen Informationen zu den Messmodellen im Textformat vor. Die Informationen enthalten unter

anderem die Dimension und Auflösung des Voxelgitters der Volumendaten. Durch die Informationen ist der Aufbau des Voxelgitters definiert.

Zur Visualisierung der Volumendaten werden zuerst die Informationen zu den Messmodellen in den Reduzierungsassistenten importiert. Der Reduzierungsassistent ist als Bestandteil des VR-Systems ein Programm, durch das der Import der Messmodelle vorbereitet wird. Dieses Programm enthält Lesefunktionen für die Informationen zu den Messmodellen, eine grafische Benutzungsschnittstelle zur Konfiguration der Importparameter sowie Ausführungsfunktionen zur Anwendung der konfigurierten Importparameter im VR-System. Nach dem Import der Informationen werden im Reduzierungsassistent die Verringerung der Dimension sowie die Auflösung des Voxelgitters eingestellt. Diese Konfiguration der Importparameter wird durch den Reduzierungsassistent zur Ausführung des Covisemoduls ReadVolume angewendet.

Das Covisemodul ReadVolume importiert die Messmodelle unter Anwendung der Importparameter des Reduzierungsassistenten. In diesem Covisemodul werden die Skalarwerte der Werkstoffdichte, die als scheibchenförmige Bilder im Rohdatenformat vorliegen, auf einem einheitlichen Gitter abgebildet, das im VR-System Covise weiterverarbeitet werden kann. Die importierten Werkstoffdichtewerte werden auf einer Skala im Covisemodul Colors abgebildet. Dazu wird eine Graustufenskala verwendet. Die Anfangsfarbe der Graustufenskala ist schwarz. Die Endfarbe der Graustufenskala ist weiß. Schwarz bedeutet, dass im Gussteil kein Werkstoff vorhanden ist. Weiß bedeutet, dass im Gussteil Werkstoff zu hundert Prozent im detektierten Bereich vorhanden ist.

Die Definition einer Graustufenskala für die Werkstoffdichtewerte ist für eine Visualisierung unzureichend, da durch den linearen Verlauf der Graustufenskala die Lunker im Gussteil nicht erkannt werden könnten. Eine Möglichkeit zur Visualisierung von Lunkern ist das Wegblenden von Wertebereichen unterhalb der Werkstoffdichtegrenze im Skalenbereich, bei der die Werkstoffdichtewerte als Lunker angesehen werden. Um das zu erreichen, bietet sich die Abänderung der Graustufenskala in einen opaken Bereich unterhalb dieser Werkstoffdichtegrenze sowie in einen teilopaken bzw. nichtopaken Bereich oberhalb der Werkstoffdichtegrenze, an. Diese Abänderung der Graustufenskala wird in dem Covisemodul ColorEdit durch die Definition von Transferfunktionen realisiert.

Aus diesem Grund werden im Covisemodul ColorEdit Transferfunktionen definiert. Durch die Transferfunktionen können beliebige Bereiche der Graustufenskala mit Opazitätswerten belegt werden. Die Transferfunktionen werden in Abhängigkeit von den Werkstoffdichtewerten der Messmodelle individuell definiert. Durch die Transferfunktionen werden den Werkstoffdichtewerten, die in der Graustufenskala abgebildet sind, opake, teilopake sowie nichtopake Wertebereiche, in Abhängigkeit von der Werkstoffdichtegrenze, zur Visualisierung

zugewiesen. Die Volumendaten der Messmodelle werden im VR-System durch das Covisemodul Cover visualisiert. Zur visualisierungsgerechten Definition der Transferfunktionen kann diese Funktion im Produktentstehungssystem aus *Abbildung 44* mehrmals durchlaufen werden. Die Ergebnisse der Analyse der Werkstoffdichte sind die Ausgangsgrößen dieses Systems.

Kapitel 6 Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung

Bis hierhin wurden die Produktentstehungsprozesse in der Gießtechnik herausgearbeitet, analysiert und auf dieser Grundlage um Simulationsmethoden und Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität erweitert. Das Ergebnis ist die Erhöhung der Simulations- und Visualisierungskompetenz in der Produktentstehung der Gießtechnik. Die Erhöhung der Simulations- und Visualisierungskompetenz ist anhand der Tätigkeiten der Produktlebensphasen in *Abbildung 45* dargestellt. Die Ergebnisdaten der gelborange gekennzeichneten Tätigkeiten können durch die entwickelten Visualisierungsverfahren in Kapitel 5 in der virtuellen Realität visualisiert werden. Die Tätigkeit Kinematiksimulation symbolisiert die Erweiterung des Aufgabenspektrums in der Produktentstehung der Gießtechnik um Simulationsmethoden.

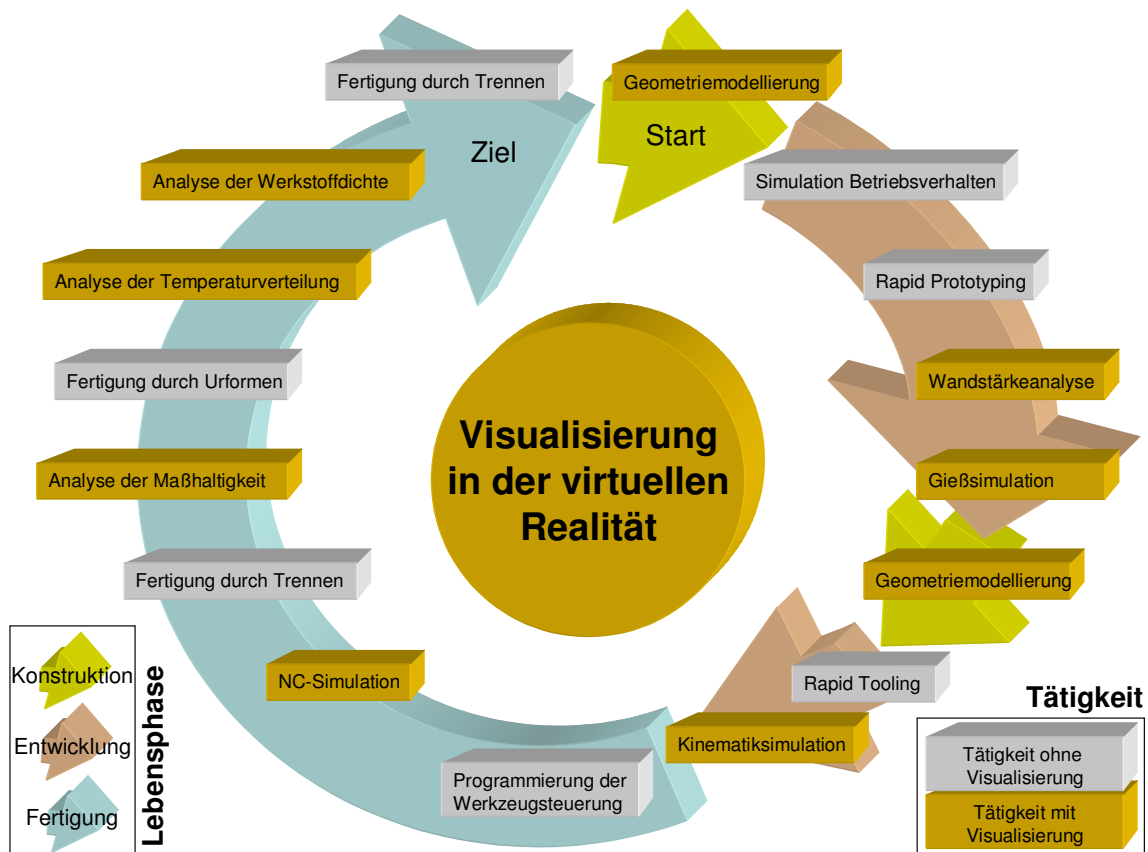


Abbildung 45: Erhöhung der Simulations- und Visualisierungskompetenz

Das Ziel in diesem Kapitel der Arbeit ist die Formulierung der Anforderungen an die Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik. Um dieses Ziel zu erreichen, werden die Abläufe in den Arbeitsbereichen der Produktentstehung der Gießtechnik aus Kapitel 3, die Erweiterungen der Produktentstehungssysteme aus Kapitel 4 sowie die Entwicklungen der Simulationsmethoden und Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität aus Kapitel 5 zuerst analysiert. Aus den Analyseergebnissen werden darauf Anforderungen an die Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik abgeleitet, die als Funktionen in den Produktentstehungssystemen formuliert werden. Aufgrund der Anforderungen wird eine Systemerweiterung durchgeführt. Die Funktionen aus den Produktentstehungssystemen Visualisierung sowie aus der Systemerweiterung werden daraufhin tätigkeitsneutral verallgemeinert. Auf Basis der verallgemeinerten Funktionen werden Funktionskategorien gebildet. In den Funktionskategorien werden die verallgemeinerten Funktionen beschrieben, die aus den Analyseergebnissen durch Ableitung der Anforderungen hervorgegangen sind. Das Ergebnis dieses Kapitels ist die Beschreibung der Visualisierung der Produktentstehung der Gießtechnik im Gesamtsystem Visualisierung auf Grundlage der Funktionskategorien, durch die der Bezug zu den Erkenntnissen dieser Arbeit besteht.

6.1 Analyse

Die Analyse der Ergebnisse dieser Arbeit, die bis zu diesem Punkt erreicht worden sind, hat zum Ziel, konkretisierte Anforderungen an die Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik in Form von Funktionen abzuleiten. Diese Funktionen sollen aus den Gebieten Informationstechnik und Produktentstehung abgeleitet werden. Deshalb werden die Arbeitsverfahren, -methoden und -werkzeuge der Produktentstehung der Gießtechnik aus Kapitel 3, die Erweiterungen der Produktentstehungssysteme aus Kapitel 4 und die Simulationsmethoden und Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität aus Kapitel 5 analysiert.

Ein Ergebnis des Kapitels 4 ist, dass die Verknüpfung der Tätigkeiten Geometriemodellierung, Wandstärkeanalyse, Gießsimulation, Kinematiksimulation, NC-Simulation, Analyse der Maßhaltigkeit, Analyse der Temperaturverteilung sowie Analyse der Werkstoffdichte mit der Tätigkeit Visualisierung das Potential zur Erhöhung des Erfüllungsgrads des Kriteriums Kommunikationsfähigkeit besitzen. Aufgrund dieses Ergebnisses wurden in Kapitel 5 Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität für oben genannte Tätigkeiten entwickelt. Dazu wurden geeignete Produktentstehungssysteme gebildet. In den gebildeten Produktent-

stehungssystemen wurden Funktionen und Lösungen zur Visualisierung der Ergebnisdaten der Tätigkeiten in der virtuellen Realität entwickelt. Das Ergebnis des Kapitels 5 ist in *Abbildung 45* dargestellt.

In Kapitel 3 wurden die Arbeitsverfahren, -methoden und -werkzeuge der Produktentstehung der Gießtechnik in den Lebensphasen Konstruktion, Entwicklung und Fertigung herausgearbeitet. Die Arbeitsverfahren, -methoden und -werkzeuge bilden eine entscheidende Grundlage für die Ableitung der Anforderungen in diesem Kapitel und werden zur Analyse im Detail betrachtet. Die Funktionen und Lösungen in den Produktentstehungssystemen zur Visualisierung aus Kapitel 5 sind die informationstechnischen Rahmenbedingungen, in denen die Arbeitsverfahren, -methoden und -werkzeuge der Gießtechnik mit einem bestimmten Überdeckungsgrad abgebildet werden können.

Die Definition der Anforderungen geschieht daher anhand der Arbeitsverfahren, -methoden und -werkzeuge der Gießtechnik unter Berücksichtigung der informationstechnischen Rahmenbedingungen. Dazu werden die Arbeitsverfahren, -methoden und -werkzeuge in den Arbeitsbereichen aus Kapitel 3 so detailliert wie nötig zur Definition der Anforderungen berücksichtigt. Des Weiteren werden die Funktionen der Produktentstehungssysteme zur Visualisierung aus Kapitel 5 zur Definition der Anforderungen analysiert. Bei der Analyse und Definition der Anforderungen wird im Besonderen die Verbesserung der informationstechnischen Abläufe geprüft.

6.1.1 Anforderungen

Die Ableitung der Anforderungen zur Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik geschieht auf Grundlage der Arbeitsverfahren, -methoden und -werkzeuge in der Produktentstehung der Gießtechnik aus Kapitel 3 und der Produktentstehungssysteme zur Visualisierung in Kapitel 5 (*Abbildung 34*). Die Produktentstehungssysteme zur Visualisierung sind:

- Geometriemodellierung (*Abbildung 35*),
- Wandstärkeanalyse (*Abbildung 36*),
- Gießsimulation (*Abbildung 38 bis Abbildung 40*),
- Kinematiksimulation (*Abbildung 41*),
- NC-Simulation (*Abbildung 41*),
- Analyse der Maßhaltigkeit (*Abbildung 42*),

- Analyse der Temperaturverteilung (*Abbildung 43*) und
- Analyse der Werkstoffdichte (*Abbildung 44*).

Aus dieser Aufzählung geht hervor, dass im Gegensatz zu Kapitel 5.2.4 die Tätigkeiten Kinematiksimulation und NC-Simulation getrennt bei der Ableitung der Anforderungen betrachtet werden. Im Folgenden werden für die aufgezählten Produktentstehungssysteme zur Visualisierung konkretisierte Anforderungen als Funktionen abgeleitet.

Geometriemodellierung: Als erstes werden für die Tätigkeit Geometriemodellierung Funktionen abgeleitet. Bedeutend für die verbesserte Visualisierung in diesem Tätigkeitsbereich ist der Import von Strukturmodellen aus dem zentralen PDM-System. Die Strukturmodelle ermöglichen das Anzeigen der Datenstruktur und das farbliche Markieren, das Ein- und Ausblenden sowie das Verschieben der Geometrie- und Baugruppenmodelle im VR-System Covise. Zum speichergerechten Laden und Visualisieren der Geometriemodelle ist die Verwendung von Reduzierungsalgorithmen voraussetzend. Die Einbindung von Teilfunktionen zur Geometriemodellierung im VR-System und deren Rückübertragung in die CAD-Systeme CATIA V5 bzw. Tebis ist ein weiteres wichtiges Bindeglied zur Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik. Der Import und die Visualisierung von Form- und Lagetoleranzen in Geometrie- und Baugruppenmodellen ist die letzte Funktion, die für die Tätigkeit Geometriemodellierung zur Durchführung von Toleranzanalysen abgeleitet wird.

Wandstärkeanalyse: Die Erweiterung der Tätigkeit Wandstärkeanalyse ist um folgende Funktionen sinnvoll. Die Ergebnisgrößen der Wandstärkeberechnung werden im derzeitigen Zustand in dem CAE-System Tooling Expert auf einer Farbskala mit kontinuierlichem Übergang abgebildet. Eine Erleichterung der Analyse im VR-System bietet die Abbildung der Ergebnisgrößen auf einer Farbskala mit diskretem Übergang. Diskret bedeutet hierbei die Abbildung auf circa fünf bis zehn Farbstufen. Das Setzen und Speichern von Viewpoints mit zugeordneten Geometrieschnittflächen sowie von geometrischen Markierungen auf dem Ergebnismodell sind weitere Funktionen, besonders für nachgelagerte Besprechungen zur Auswertung der Analyseergebnisse. Die Generierung von Bildschirmabzügen der 3D-Szene in einem Bildformat kann die dezentrale Auswertung begünstigen. Die Übertragung der Ergebnismodelle aus dem Tooling Expert in das VR-System, unter Erhalt der skalaren Werte auf den Geometriemodellen, kann zur lokalen Ergebnisabfrage genutzt werden. Das trägt zur Erhöhung der Analysegenauigkeit bei. Dazu

müssen die Skalarwerte aus dem CAE-System Tooling Expert exportiert, in das VR-System Covise importiert und für die Visualisierung bereitgestellt werden.

Gießsimulation: Für die Tätigkeit Gießsimulation werden diese Funktionen auf Basis der Analyse abgeleitet. Eine entscheidende Analysefunktionalität im CAE-System Magmasoft ist die Visualisierung der berechneten, zeitabhängigen, skalaren Werte der Ergebnistypen Füll- und Erstarrungsfronten aus *Abbildung 37*. Das Implementieren dieser Funktion im VR-System wird die Analysefähigkeit von Ergebnissen der Gießsimulation in der virtuellen Realität erheblich steigern. Eine weitere Funktion zur Verbesserung der Analysefähigkeit ist die Berechnung und Darstellung von zeitabhängigen Geschwindigkeitsvektoren. Die Geschwindigkeitsvektoren können auf interaktiv definierbaren Datenschnittflächen bereitgestellt werden. Eine weitere wesentliche Funktion ist die Konvertierung des gesamten Typenspektrums der Ergebnisgrößen, die in Magmasoft berechnet und zur Analyse visualisiert werden, in das VR-System. Das betrifft zum einen die Ergebnisgrößen, die in *Abbildung 37* grau hinterlegt sind, zum anderen alle anderen Ergebnisgrößen, die in dieser Abbildung nicht enthalten sind.

Die Funktion Abschneiden der Werkzeughüllgeometrie aus dem Produktentstehungssystem Visualisierung Gießsimulation Füll- und Erstarrungsfronten wird im Covisemodul ClipInterval durch einen Algorithmus gelöst. Die Ergebnisgrößen der Anwendung dieses Algorithmus werden durch die Funktion Visualisierung in der 3D-Umgebung abgebildet. Die Anforderungen, die an die Abbildung dieser Ergebnisgrößen in Bezug auf eine saubere Verschneidung der Polygone gestellt werden, sind nur zu einem geringen Teil erfüllt. Daher kann eine Veränderung des Algorithmus mit dem Ziel einer sauberen Polygonverschneidung den Erfüllungsgrad der Visualisierungsanforderungen erhöhen.

Die Ergebnisse von verschiedenen Simulationsvarianten unterscheiden sich meist nur im Detail. Deshalb kann die simultane Visualisierung von Ergebnissen aus verschiedenen Simulationsvarianten für den direkten Vergleich eine große Rolle bei der Analyse spielen. Die visualisierungsfähigen Gießsimulationsergebnisse im VR-System sollen VR-Projekte genannt werden. Eine Möglichkeit zur Reduzierung der Vorbereitungszeit zur Erzeugung der VR-Projekte ist die Parallelisierung der Funktionen Konvertierung in den Produktentstehungssystemen Visualisierung Gießsimulation Füll- und Erstarrungsfronten, Füllspuren sowie Erstarrungskriterien und die Parallelisierung der Funktion Vergrößerung im Produktentstehungssystem Visualisierung Füll- und Erstarrungsfronten auf mehreren Rechensystemen. Der Grund dafür ist der benötigte hohe Zeitumfang für die Ausführung dieser Funktionen im Vergleich zu den anderen Funktionen der Produktentstehungssysteme.

Wie in *Abbildung 21* erkennbar ist, wirkt sich die Tätigkeit Analyse der Werkstoffdichte auf die Tätigkeit Gießsimulation aus, da zwischen beiden Tätigkeiten eine Verknüpfung besteht. In diesem konkreten Fall bezieht sich die Verknüpfung auf den Vergleich der Größen und Lagen der Lunker in geometrischen Bereichen von Gussteilen. Die Ausgangsgrößen der Funktion Messung der Werkstoffdichte im Produktentstehungssystem Analyse der Werkstoffdichte (*Abbildung 30*) sind die relativen Größen- und Lageinformationen der Lunker in Gussteilen. Die Visualisierung dieser Größen- und Lageinformationen in der virtuellen Realität im Verbund mit der Ergebnisgröße Porosity des Ergebnistyps Erstarrungskriterien aus der Ergebnisgruppe Erstarrung (*Abbildung 37*) kann zu einem einfacheren Vergleich im Rahmen der Produktentstehung der Gießtechnik beitragen.

Durch die Überlagerung von Gießsimulationsergebnissen und Kinematiksimulationsmodellen in der 3D-Umgebung können einerseits diese Produktentstehungsprozesse veranschaulicht werden. Andererseits können Parameter wie beispielsweise Zykluszeiten, die das Verhalten in beiden Systemen beeinflussen, bewertet werden.

Die Datenmodelle, in denen die Simulationsergebnisse aus dem CAE-System Magmasoft in das VR-System übertragen werden, bewirken eine permanent hohe Belastung des Hardwaresystems, sobald sie durch das Covisemodul Cover visualisiert werden. Deshalb sind die software- und hardwareseitigen Systemkomponenten mit dem Ziel der höheren Belastbarkeit weiterzuentwickeln, ohne jedoch die visualisierungsbezogenen Funktionen einzuschränken. Die softwareseitige Parallelisierung der Funktion Visualisierung auf mehreren Hardwarekomponenten kann in einer Verringerung der Systembelastung durch die im Allgemeinen großen Datenmodelle resultieren.

Gießsimulationsergebnisse stehen nach der Ausführung der Funktionen in den Produktentstehungssystemen aus *Abbildung 38* bis *Abbildung 40* projektförmig zur Visualisierung bereit. Diese projektförmige Bereitstellung kann nur einzeln, für die grün gekennzeichneten Ergebnisgrößen aus *Abbildung 37*, erzeugt werden. Für eine schnelle und vielfältige Verfügbarkeit dieser projektförmigen Ergebnisgrößen in der 3D-Umgebung ist das parallele Öffnen bzw. Bereithalten entscheidend. Die projektförmig organisierten und gespeicherten Ergebnisgrößen werden, wie oben bereits erwähnt, als VR-Projekte bezeichnet. Eine Erhöhung der Analysefähigkeit von Gießsimulationsergebnissen in der virtuellen Realität bewirkt die Übernahme und Darstellung von Projektinformationen aus dem CAE-System Magmasoft in der 3D-Umgebung. Zu den Projektinformationen zählen Simulationseinstellungen, Ergebnisinformationen, Auswertungen sowie verfügbare Simulationsvarianten, die im Zusammenhang mit den VR-Projekten visualisiert werden können.

Die Handhabung der VR-Projekte ist verhältnismäßig aufwendig. Die magmasoftkonforme Organisation der VR-Projekte nach Baureihentypen und -varianten und Abbildung in der 3D-Umgebung durch interaktiv ausführbare Geometrielemente zur Steuerung wird das Anwenden der Visualisierungstechnik schneller und unkomplizierter gestalten. Zur engeren Verzahnung der Abläufe in den beiden Systemen, dem CAE-System Magmasoft und dem VR-System Covise, ist die Übertragung von definierbaren Analyseinformationen aus dem VR-System nach Magmasoft sinnvoll. Definierbare Analyseinformationen können dabei beispielsweise geänderte Simulationseinstellungen für die Berechnung weiterer Varianten und Auswertungsergebnisse in Form von Interpretationen sein. Ein baureihen- und variantenbasiertes Projektmanagement anhand von interaktiv nutzbaren Geometrieobjekten in der 3D-Umgebung kann die umfassende Abwicklung von VR-Projekten im starken Maß unterstützen.

Kinematiksimulation: Für die Tätigkeit Kinematiksimulation werden folgende Funktionen zur Verbesserung der Analyse in der virtuellen Realität hergeleitet. Durch eine Abspielfunktion sollten die Bewegungen der Geometrie Komponenten jederzeit angehalten werden können. Von Bedeutung ist die automatische Konvertierung der Kinematikinformationen aus dem CAE-System Fitting Simulator in das VR-System. Im Fitting Simulator werden laut Kapitel 5.1.1 bei der Durchführung von Kinematiksimulationen die Ergebnisgrößen Kollision und Abstand berechnet. Diese Ergebnisgrößen sollten, so wie die Kinematikinformationen, automatisch in das VR-System konvertiert und dort visualisiert werden. Wie bei den abgeleiteten Funktionen zur Gießsimulation bereits ausgeführt, sollte die Überlagerung von Gieß- und Kinematiksimulationen automatisiert im VR-System generiert werden können. Eine Möglichkeit zur Erweiterung des Aufgabenspektrums in der virtuellen Realität ist die Einbringung der Form- und Lagetoleranzen der Geometrie- und Baugruppenmodelle zur Analyse des Toleranzverhaltens in kinematischen Systemen.

NC-Simulation: Die Funktionen, die zur Tätigkeit NC-Simulation abgeleitet werden, beruhen im Wesentlichen auf den eingesetzten Fertigungsverfahren des Spanens in der Produktentstehung der Gießtechnik Fräsen, Bohren und ggf. Drehen. Zur besseren Interaktion mit den Simulationsmodellen in der 3D-Umgebung sollte das Abspielen der Bewegungen zu jedem beliebigen Simulationszeitpunkt gestoppt werden können. Des Weiteren kann die Interaktion durch das Ein- und Ausblenden sowie die Separation und Verschiebung von Geometrie Komponenten gesteigert werden.

Die manuelle Modellierung der NC-Programme in der VRML, so wie in Kapitel 5.2.4 beschrieben, ist zur Unterstützung des Simultaneous Engineering durch die Visualisierung in der virtuellen Realität zu aufwendig. Aus diesem Grund ist eine Automatisierung der Lese- und

Umsetzungsvorgänge von NC-Programmen in Datenstrukturen, die vom VR-System Covise verarbeitet werden können, unverzichtbar. Folgende Funktionen sollten dabei berücksichtigt werden. Zur richtigen Abbildung der Bewegungen werden die körperfesten Koordinatensysteme der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen in die körperfesten Koordinatensysteme der Werkstücke transformiert. Darüber hinaus werden die Einspannvorgänge für die Werkstücke, die Werkzeugwechsellvorgänge und die Fräserradiuskompensationen berücksichtigt. Fräserradiuskompensation ist die gesteuerte Änderung der Fräsbahn zur Erhaltung der Formgenauigkeit in Abhängigkeit von sich verringernden Fräsradien im Laufe der Standzeit.

Eine Möglichkeit zur Analyse der Kinematik ist die Darstellung von Bahnlinien bzw. Hüllkurven der Geometriekomponenten, auf denen die NC-Programme abgebildet sind. Die visualisierte Bahnlinie sollte abgeändert und als NC-Programm herausgeschrieben werden können. Zur Analyse von Kollision und Abstand zwischen Geometriekomponenten bei der Ausführung von NC-Programmen werden diese beiden Größen berechnet und dargestellt.

Durch die Berechnung und Visualisierung des Materialabtrags aufgrund des Eingriffs der Werkzeugschneide am Werkstück können eventuelle Kollisionen zwischen Werkzeug und Werkstück wesentlich genauer vorhergesagt werden. Dabei sollte beispielsweise beim Fräsen auf eine Differenzierung des Spanvolumens bei der Berechnung des Materialabtrags in Abhängigkeit von den beiden Vorgängen Schruppen und Schlichten geachtet werden. Die Berechnung und Darstellung der Spanbildung kann in diesem Zusammenhang Aufschluss über Spananhäufungen im geometrischen Umfeld der Werkzeugmaschine geben. Die Einflüsse von Parametern und Größen wie beispielsweise Temperaturen durch den Einsatz von Kühlmitteln, Reibwerte, Werkstoffkennwerte, Geschwindigkeiten, Kräfte und Momente sowie Schwingungen können bei der Berechnung des Materialabtrags berücksichtigt werden.

Zur Erleichterung der fachlichen Analyse bei NC-Simulationen ist die Visualisierung von Einstellparametern und Betriebsdaten hilfreich. Zu den Einstellparametern zählen der Werkzeugmaschinentyp in der verwendeten Konfiguration der Werkzeugwechseleinrichtung, das Werkzeugmagazin, das Werkzeug, das Werkstück sowie die Spannelemente. Zu den Betriebsdaten zählen die Zyklusphasen zum NC-Programm wie Werkzeugwechsel, Einspannung des Werkstücks, Zuführ- und Wegführbewegung des Werkzeugs zum Werkstück sowie Bewegungen mit und ohne Materialabtrag während des Spanens. Weitere Betriebsdaten sind die Lageinformationen der NC-Achsen, die Werkzeugumdrehungsanzahl pro Zeit, die Vorschubgeschwindigkeiten der NC-Achsen sowie die Verschleißinformationen wie Standzeiten und Standzeitkriterien. Im Wesentlichen können die in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Größen der Zerspanungskinematik, der Zerspankräfte sowie der daraus

resultierenden Schwingungen in geeigneter Form visualisiert werden. Dabei sollte geklärt werden, in welchem Detaillierungsgrad die Einstellparameter und Größen für die Analyse in der virtuellen Realität benötigt und zu welchen Teilen die Größen berechnet bzw. realen Betriebsdaten entnommen werden. Für die Übertragung dieser Informationen in das VR-System kann die informationstechnische Verknüpfung zwischen den Produktentstehungssystemen NC-Simulation und Fertigung Gießwerkzeug durch Trennen in Betracht gezogen werden.

Analyse der Maßhaltigkeit: Die Tätigkeit Analyse der Maßhaltigkeit kann durch zusätzliche Visualisierungsfunktionen unterstützt werden. Diese Visualisierungsfunktionen betreffen einerseits den Datenimport in das VR-System. Bei einem Direktimport des Standarddatenformats gom3d aus dem CAQ-System ATOS in das VR-System Covise können die manuellen Arbeitsschritte zur Wandlung des gom3d-Formats in das stl-Format mit den Farbcodierungen VISCAM bzw. GOM (siehe Kapitel 5.2.5) eingespart werden. Im Rahmen der Analyse der Maßhaltigkeit in der Produktentstehung der Gießtechnik wird eine hohe Anzahl von Messmodellen erzeugt. Die Einsparung der manuellen Arbeitsschritte zur Formatwandlung würde eine erhebliche Reduzierung der Vorbereitungszeit zur Visualisierung bewirken. Darüber hinaus sollten die Ergebnisgrößen in den Messmodellen örtlich visualisierbar sein.

Ein Bestandteil der Tätigkeit Fertigung von Gussteilen durch Urformen aus *Tabelle 2* ist beim Verfahren Kokillengießen das Fügen von Sandkernen in Kokillen. Die Sandkerne werden zuvor in einem Urformverfahren gefertigt. Die Analyse der Maßhaltigkeit aufgrund der Fertigungstoleranzen beim Fügen von Sandkernen in Kokillen könnte im VR-System durchgeführt werden. Dazu werden die Sandkerne optisch vermessen. Die Messmodelle der Sandkerne aus dem CAQ-System ATOS werden darauf zusammen mit den Geometrie-, Baugruppen- bzw. Strukturmodellen der Kokillen aus den CAD-Systemen CATIA V5 bzw. Tebis automatisiert in das VR-System Covise importiert. Für den Import und für die nachfolgenden Arbeitsschritte wird eine grafische Benutzungsschnittstelle verwendet. An der grafischen Benutzungsschnittstelle werden den importierten Geometriekomponenten die Ausgangslagen und die Kinematikinformationen für das Fügen zugewiesen. Im Anschluss werden die Bewegungen des Fügens in der 3D-Umgebung visualisiert. Simultan dazu werden die Größen Kollision und Abstand im VR-System unter Verwendung der Form- und Lagetoleranzen berechnet und dargestellt.

Analyse der Temperaturverteilung: Die Tätigkeit Analyse der Temperaturverteilung kann durch die Ableitung von Funktionen in einem erweiterten Umfang durch die Visualisierung in der virtuellen Realität unterstützt werden. Im Vergleich zu den

Visualisierungsverfahren, die in dieser Arbeit nach *Abbildung 32* für die anderen Tätigkeiten entwickelt worden sind, wurden die Resultate des Visualisierungsverfahrens für die Tätigkeit Analyse der Temperaturverteilung noch nicht ausreichend in Hinblick auf die Unterstützung der Produktentstehung der Gießtechnik überprüft. Aus diesem Grund sollte die Verwendbarkeit der Messmodelle auf den Geometriemodellen der Gießwerkzeuge durch die Bewertung ihrer Abbildungsgüte zur Erhöhung des Erfüllungsgrads des Kriteriums Kommunikationsfähigkeit, geprüft werden. Bei positivem Prüfergebnis wird die Einbindung der Ergebnisskala in Betracht gezogen. Abschließend wird die Überlagerung der Temperaturverteilung auf Gießwerkzeugen mit der Ergebnisgröße Temperature aus Gießsimulationsergebnissen visualisiert. Unter diesen Voraussetzungen wäre das Kriterium Kommunikationsfähigkeit der potentialbehafteten Verknüpfung zwischen den Tätigkeiten Analyse der Temperaturverteilung und Gießsimulation aus *Abbildung 22* zu einem höheren Grad erfüllt.

Analyse der Werkstoffdichte: Für die Tätigkeit Analyse der Werkstoffdichte in Gussteilen werden folgende Funktionen bzw. Lösungen zur Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik abgeleitet. Die Funktionen Definition der Transferfunktion und Abbildung der Opazitätswerte der Transferfunktion auf der Graustufenskala der Werkstoffdichtewerte werden nach Kapitel 5.2.7 in dem Covisemodul ColorEdit über die Funktion Visualisierung durch manuelle Tätigkeiten iterativ gelöst. Die Lösung dieser beiden Funktionen ist vergleichsweise kompliziert und zeitaufwendig. Daher ist die unkomplizierte Lösung dieser beiden Funktionen im Covisemodul Cover durch einfachere Benutzereingaben für die Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik für diese Tätigkeit empfehlenswert. Die automatische Lösung der Funktion Definition der Transferfunktion in Abhängigkeit von den Messmodellen im raw-Format würde einen besseren Einbindungsgrad als die manuelle Definition bewirken.

Eine wesentliche Funktion zur Einbindung ist die Erhöhung der maximal darstellbaren Volumendatenmenge der Rohdaten, da die durchschnittliche Volumendatenmenge der Messmodelle erheblich über der Speicherkapazität der Hardwarekomponenten des VR-Systems liegt. Die Erhöhung der maximal darstellbaren Volumendatenmenge kann durch Hardwarekomponenten mit großen Speichervolumina sowie deren hohe Auslastung auf Basis von softwareseitig realisierten Algorithmen erreicht werden. Insbesondere die softwareseitig realisierten Algorithmen erzielen im derzeitigen Systemzustand nur niedrige Auslastungsgrade der Hardwarekomponenten. Die Überlagerung der Messmodelle mit den Gießsimulationsmodellen der Ergebnisgröße Porosity aus *Abbildung 37* ist zur Verbesserung

der Vergleichsmöglichkeiten die letzte Funktion, die in diesem Teil des Kapitels 6 abgeleitet wird.

6.2 Systemerweiterung

Das Ziel in diesem Kapitel ist die Formulierung von Anforderungen zur Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik. Im ersten Teil des Kapitels wurden dazu Anforderungen auf Basis der Erkenntnisse dieser Arbeit abgeleitet. Die Ein- und Ausgangsgrößen eines bedeutenden Anteils dieser abgeleiteten Funktionen sind Informationen aus den Tätigkeiten der Produktentstehung der Gießtechnik. Daher ist die Nutzung dieser Informationen zur Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik wesentlich. Zur geeigneten Verarbeitung der Informationen wird das Produktentstehungssystem Informationsmanagement (*Abbildung 46*) gebildet.

Der technische Grundgedanke zur Nutzung der Informationen aus den Tätigkeiten der Gießtechnik im VR-System ist die Umwandlung vieler verschiedener Informationen in ein einheitliches Format. Ein Teil dieser umgewandelten Informationen soll direkt im VR-System visualisiert werden. Ein weiterer Teil dieser Informationen, davon soll der erste Teil nicht ausgeschlossen sein, wird in einer zentralen Wissensdatenbank abgelegt. Die Informationen der zentralen Wissensdatenbank stehen für Suchanfragen und Prüfungen aus dem VR-System zur Verfügung. Der Informationsstand der beiden Teile wird ständig aktualisiert.

Durch das Produktentstehungssystem Informationsmanagement aus *Abbildung 46* werden Informationen der Tätigkeiten der Produktentstehung der Gießtechnik in der virtuellen Realität abgebildet. Die Eingangsgrößen sind aufgeteilt in Informationen aus Tätigkeiten der Produktentstehung und Anfragen an die Informationen der Wissensdatenbank. Die Funktionen werden in einem unbestimmten Informationsmanagement-System gelöst. Die Ausgangsgrößen sind Informationen der Tätigkeiten und Antworten zu Suchanfragen.

Die Tätigkeiten, deren Informationen die Eingangsgrößen des Produktentstehungssystems Informationsmanagement bilden, werden auf Grundlage der Potentiale für die Verknüpfungen der Produktentstehungsprozesse in Kapitel 4.1 aus *Abbildung 22* festgelegt. Alle Tätigkeiten, von denen potentialbehaftete Verknüpfungen ausgehen, werden als Informationsquelle für das VR-System definiert. Aus diesem Grund erweitern sich die Eingangsgrößen, die im VR-System für die Visualisierung zur Verfügung stehen um die Informationen der Tätigkeiten Fertigung Gießwerkzeug durch Trennen und Fertigung Gussteil durch Umformen.

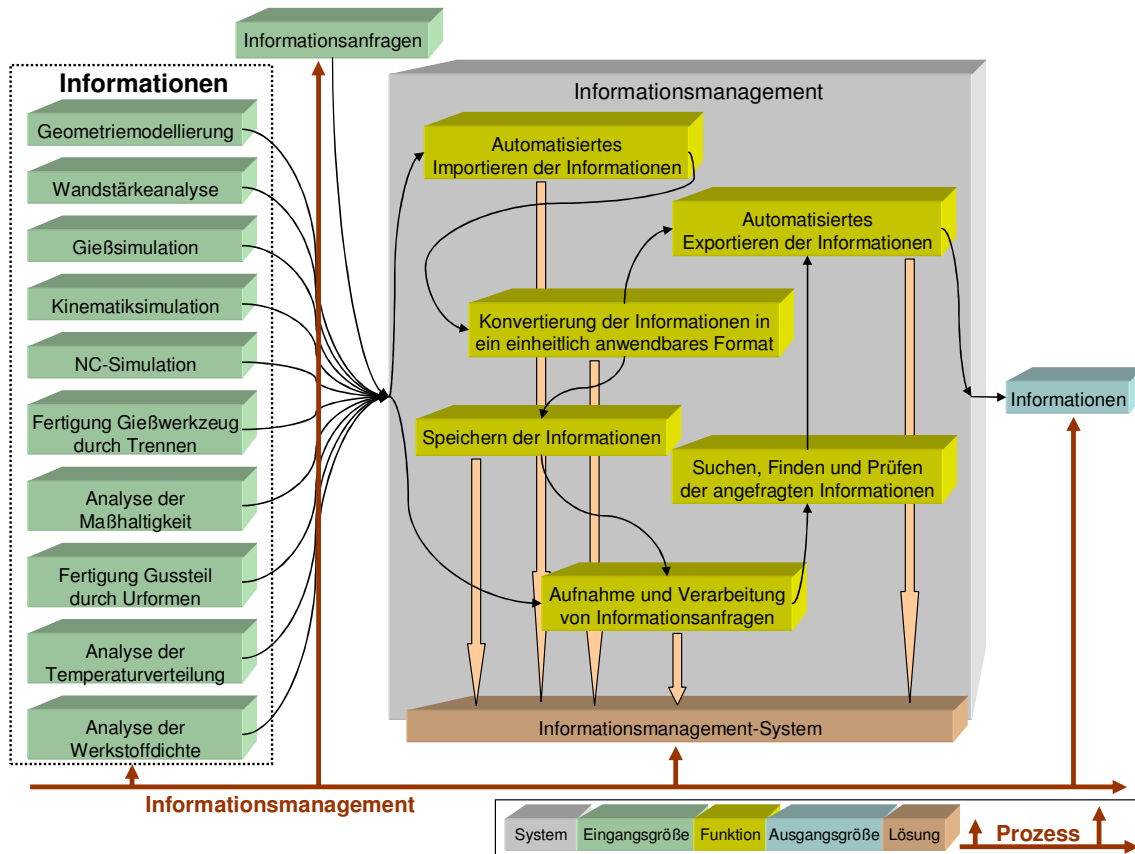


Abbildung 46: Produktentstehungssystem Informationsmanagement

Die Informationen werden in das Informationsmanagement-System automatisiert importiert. Nach dem Import erfolgt die Konvertierung der Informationen in ein einheitlich anwendbares Datenformat innerhalb des Informationsmanagement-Systems und des VR-Systems, so dass keine Datenkonvertierung zwischen beiden Systemen notwendig ist. Der Teil der Informationen, der im VR-System für Visualisierungen verwendet werden soll, wird automatisiert exportiert und an das VR-System weitergeleitet. Der Teil der Informationen, der in der Wissensdatenbank für Anfragen und Prüfungen zur Verfügung stehen soll, wird nach der Konvertierung gespeichert. Die Eingangsgrößen Informationsanfragen werden von der Funktion Aufnahme und Verarbeitung von Informationsanfragen für die Suche, das Finden und das Prüfen von angefragten Informationen in der Wissensdatenbank weiterverarbeitet. Informationsanfragen werden aus dem VR-System initiiert und nach der Bearbeitung automatisiert als Such- bzw. Prüfinformationen an das VR-System übertragen.

6.3 Verallgemeinerung der Funktionen

Die Funktionen zur Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik wurden in diesem Kapitel aus den Ergebnissen der Arbeit abgeleitet. Diese abgeleiteten Funktionen sollen im Folgenden allgemein und größtenteils tätigkeitsneutral formuliert werden. Das Ziel dabei ist die Herauslösung von allgemeingültigen Funktionen, die für die speziellen Anwendungsfälle in dieser Arbeit hergeleitet wurden. Die verallgemeinerten Funktionen enthalten folglich die konkretisierten Anforderungen an die Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik. Für die Verallgemeinerung wird eine konventionelle Lösungsmethode angewendet. Im Rahmen dieser Lösungsmethode werden die bekannten Produktentstehungssysteme zur Visualisierung und zum Informationsmanagement auf ein analoges, allgemeines System übertragen. Die Beschreibung der allgemeinen Funktionen dieses Systems ist das Ergebnis dieses Teils des Kapitels 6. Im Folgenden werden die durch das konventionelle Lösungsverfahren ermittelten verallgemeinerten Funktionen erläutert.

Die Konvertierung und Visualisierung von zeitunabhängigen sowie zeitabhängigen Volumendaten ermöglicht die Bewertung von vielfältigen Datenspektren der Produktentstehung in der virtuellen Realität. Eine Parallelisierung der Konvertierungs- und Reduzierungsvorgänge auf mehreren Hardwaresystemen wird zu einer Geschwindigkeitserhöhung dieser zeitintensiven Vorgänge beitragen. Die Funktionen Importieren, Konvertieren und Reduzieren zur Vorbereitung von VR-Projekten werden als Stapelverarbeitungsfunktionen definiert und automatisch umgesetzt. Eine wichtige Funktion ist das Importieren von Geometrie-, Baugruppen- und Strukturmodellen aus den CAD-Systemen CATIA V5 und Tebis. Bei der Ausarbeitung dieser Funktion wird geprüft, inwieweit Strukturmodelle in der 3D-Umgebung bzw. im Desktop-System abgebildet werden. Die Konvertierung von Kinematikinformationen zum Import in das VR-System ist zu automatisieren. Die Verbesserung von Konvertierungs- und Tesselierungsalgorithmen beim Import von Polygondatenmodellen mit Ergebniswerten erhöht die Darstellungsgüte dieser Geometrieobjekte und somit die Immersion in die 3D-Umgebung. Reduzierungsfunktionen sind für die Anpassung der Datengröße von Visualisierungsmodellen an die Speicherkapazität des Hardwaresystems notwendig. Die Definition und Verknüpfung der Covisemodule geschieht auf sogenannten Covise-Maps. Die automatische Generierung von Covise-Maps auf Basis von editierbaren Vorlagen ist für das schnelle und unkomplizierte Importieren der Datenmodelle unverzichtbar.

Durch paralleles Öffnen und Vorhalten mehrerer VR-Projekte könnten die teilweise lang andauernden Ladezeiten umgangen werden. Insgesamt ist eine schnelle Verfügbarkeit von vorbereiteten VR-Projekten sicherzustellen. Die Entwicklung geeigneter Abbildungsfunktionen für Skalar- und Volumenwerte tragen zu einem besseren Verständnis der Datenmodelle in der 3D-Umgebung bei. Die simultane Darstellung von mehreren Datenmodellen in der 3D-Umgebung erhöht die Vergleichsmöglichkeiten von Gussteil- und Gießwerkzeugvarianten aus allen Tätigkeitsfeldern drastisch. Dabei ist die simultane Darstellung von Datenmodellen gleichen und verschiedenen Typs für den Vergleich und die Überlagerung einzurichten. Für eine benutzungsfreundliche Anwendung werden die Vergleichs- und Überlagerungsmodelle durch eine grafische Benutzungsschnittstelle am Desktop erzeugt und verwaltet. Skalierungsfunktionen für Ergebniswerte sowie das Einblenden der Ergebnisskalen mit einstellbaren diskreten bzw. kontinuierlichen Werteverläufen sind für sämtliche Datenmodelle mit skalaren und vektoriellen Werten für die Analyse voraussetzend. Die Übernahme von Anwendungsfunktionen aus den Anwendungssoftwaresystemen, die interaktiv in der 3D-Umgebung bereitstehen, verbessert die Analysemöglichkeiten von VR-Projekten und ermöglicht die aktive Einflussnahme auf die Produktentstehung der Gießtechnik aus der 3D-Umgebung heraus.

Durch den Import und die geeignete Visualisierung von beliebigen Skalar- und Vektorfeldern sowie deren Abbildung auf Geometrieobjekten wird die Vielfalt der möglichen Visualisierungsvarianten erhöht. Dadurch können auch spezielle Visualisierungsanforderungen umgesetzt werden, die nicht mit den Visualisierungsverfahren aus Kapitel 5.2 erfüllbar sind. Aus diesen speziellen Visualisierungsanforderungen können im Anschluss Visualisierungsverfahren entwickelt werden. Die Berechnung und Visualisierung von Abstandsgrößen zwischen bewegten und unbewegten Geometriemodellen kann unter Einbeziehung der abgebildeten Form- und Lagetoleranzwerte zur Analyse verwendet werden.

Das Setzen und Speichern von Viewpoints mit zugeordneten Geometrieschnittflächen ist für die Vorbereitung und die Wiederverwendung von VR-Projekten eine Teilvoraussetzung. Zur Erhöhung der Interaktion ist die Generierung und Darstellung von korrespondierenden Daten- und Geometrieschnittflächen bei Simulationsergebnissen eine allgemeine Funktion. Das Messen von skalaren und vektoriellen Größen sowie die Visualisierung und Einbindung der Messgrößen als Objekte auf den VR-Modellen in der 3D-Umgebung ist eine Basis zur Analyse.

Die Funktionen im VR-System sind verhältnismäßig komplex. Für die einfache Anwendung dieser Funktionen werden angepasste grafische Benutzungsschnittstellen für das Desktop-System des VR-Systems entworfen. Ein VR-System verfügt über eine

Desktopschnittstelle, die als Teilsystem des VR-Systems in Form des Desktop-Systems angesehen wird. Das stl-Format ist ein weit verbreitetes Datenformat zum Austausch von Geometriemodellen zwischen Anwendungssoftwaresystemen der Produktentstehung. Um die Geometriemodelle aus vielen Anwendungssoftwaresystemen im VR-System visualisieren zu können, ist die Funktion Farbcodierung der Importfunktion, für unterschiedliche Farbcodierungen des stl-Formats anzupassen.

Die Relativbewegungen zwischen Geometriekomponenten in Abhängigkeit von der Zeit sollten zu jedem beliebigen Zeitpunkt angehalten werden können. Als Folge wird jeder Zustand von zeitabhängigen Systemen anwählbar sein. Geometriekomponenten sind farblich markierbar sowie zueinander in der Relativlage veränderbar. Die Visualisierung von speicherintensiven Datenmodellen kann auf mehreren Hardwaresystemen parallelisiert und unter Verwendung verschiedener Detailstufen durchgeführt werden. Die Berechnung und Visualisierung der Eindringtiefe bei Kollisionen sowie der Abstandswerte zwischen unbewegten und bewegten Geometriekomponenten würde die Analyse geometrischer Systeme unterstützen. Die Berechnung der Gestalt von Geometriemodellen im VR-System ermöglicht die Abbildung von komplexen Funktionen aus Anwendungssoftwaresystemen in der 3D-Umgebung und deren interaktive Nutzung. Die Berechnungsfunktionen können, in Abhängigkeit vom Anwendungsfall, vielfältige Ausprägungen haben und werden dahingehend angepasst. Die Generierung und der Export von Bildschirmabzügen von 3D-Szenen in einem Bildformat werden für die Dokumentation und die weitere Analyse eingerichtet. Das Setzen von Markierungen auf Geometrieobjekten in der 3D-Umgebung, die nicht durch Geometrieschnittflächen entfernbar sind, ist eine grundsätzliche Funktion für die Auswertung der Ergebnisdaten der Produktentstehung. Die Markierungen werden als beschriftbare Objekte in einem Menü im VR-System aufgelistet und können ausgeblendet werden. Bei zeitabhängigen Datenmodellen werden die Markierungen den Zeitschritten zugeordnet.

Zur Unterstützung der simultanen Arbeitsabläufe der interdisziplinären Arbeitsbereiche in der Produktentstehung der Gießtechnik werden kollaborative Arbeitsumgebungen zwischen örtlich verteilten VR-Systemen aufgebaut. Dabei sind auf die Abstimmung und die Synchronizität der Vorgänge in den verteilten 3D-Umgebungen zu achten. Die Einrichtung eines Informationsmanagementsystems ermöglicht die Visualisierung von Informationen aus den Tätigkeitsfeldern der Gießtechnik sowie die gezielte Suche und Prüfung von Informationen aus einer Wissensdatenbank. Die im VR-System als Analyseergebnisse definierten Informationen werden in die Anwendungssoftwaresysteme übertragen. Die übertragenen Analyseinformationen werden unter anderem als Einstellungen für weitere Arbeitsvorgänge genutzt.

Generell sind die Softwaresysteme wie Betriebssystem und VR-System so einzurichten bzw. zu gestalten, dass die verfügbare Speicherkapazität der Hardwaresysteme ausgenutzt werden kann. Eine weitere generelle Funktion ist die einfache, eindeutige und zuverlässige Auslegung der Software- und Hardwarekomponenten von VR-Systemen.

Das baureihen- und variantenbasierte Projektmanagement anhand von interaktiv nutzbaren Objekten im VR-System zum Aufruf von Informationen aus den Anwendungssoftwaresystemen, zur Informationseingabe von Analyseergebnissen und zur Initiierung von VR-Projekten in der 3D-Umgebung ist eine komplexe Funktion zur Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik. Die eindeutige Definition der Informations- und Datenquellen aus allen Anwendungssoftwaresystemen, in denen Visualisierung eine Rolle spielt, sowie die Vereinfachung der Informations- und Datenverfügbarkeit im VR-System durch Einrichtung, Verbesserung bzw. Vereinfachung der Schnittstellen sind grundlegende Funktionen zur Erweiterung des Visualisierungsspektrums.

Die Basisfunktion zur Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik ist die fachliche Analyse und Koordinierung der Tätigkeiten. Diese Funktion wird in dieser Arbeit VR-basiertes Projektmanagement genannt. Der Realisierung des VR-basierten Projektmanagements liegt die erfolgreiche Realisierung der zuvor verallgemeinerten Funktionen zugrunde.

6.4 Funktionskategorien

Im vorherigen Teil dieses Kapitels wurden die Anforderungen an die Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik als Funktionen verallgemeinert. Die verallgemeinerten Funktionen werden in diesem Teil des Kapitels in übergeordneten Kategorien zusammengefasst. Durch die Zusammenfassung der verallgemeinerten Funktionen in übergeordneten Kategorien soll ein übersichtliches Anforderungsprofil an die Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik erstellt werden, das mit den vorhergehenden Ergebnissen dieser Arbeit verbunden ist. Das übersichtliche Anforderungsprofil soll am Ende dieses Kapitels die Beschreibung des Gesamtsystems Visualisierung ermöglichen. Aus den verallgemeinerten Funktionen werden folgende Funktionskategorien zur Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik hergeleitet:

- **Interaktion** in der 3D-Umgebung,
- **Vernetzung** von örtlich verteilten VR-Systemen,

- **Konvertierung** von Daten zwischen Anwendungssoftwaresystemen und VR-System,
- **Datenimport** ins VR-System,
- **Benutzungsschnittstellen** am Desktop zum Konvertierungs-, Import- und Visualisierungs-System,
- **Datenexport** aus dem VR-System,
- **Darstellungsgüte** von 3D-Objekten,
- Darstellbare **Datengröße** von 3D-Objekten,
- **Berechnungen** im VR-System,
- **Kommunikation und Informationsaustausch** zwischen den Anwendungssoftwaresystemen und dem VR-System sowie
- Organisation und Handhabung der **VR-Projekte**.

Das Konvertierungs-, Import- und Visualisierungs-System sind Teilssysteme des VR-Systems. In den nachfolgenden Abbildungen (*Abbildung 47* bis *Abbildung 51*) sind die Zuordnungen der verallgemeinerten Funktionen zu den Funktionskategorien enthalten.

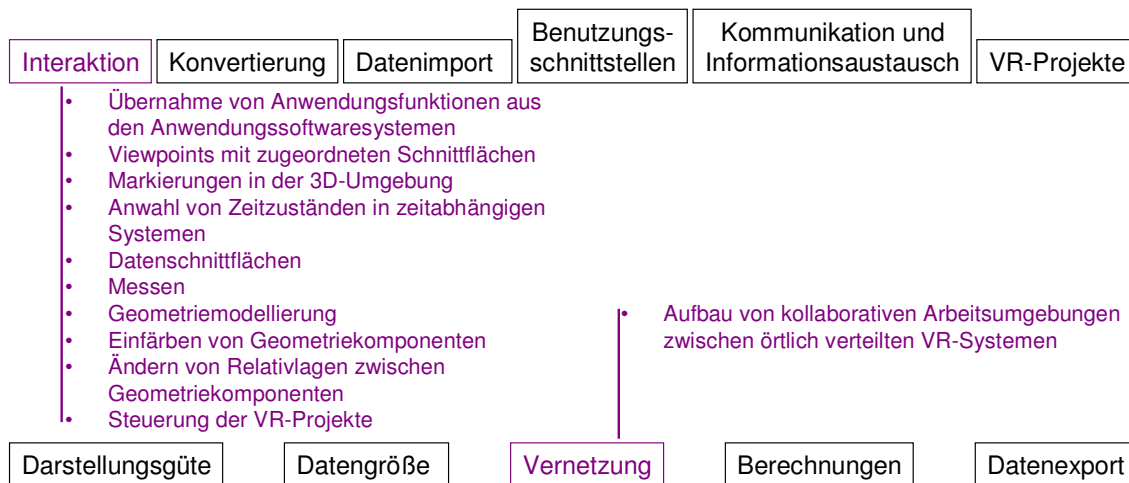


Abbildung 47: Funktionskategorien Interaktion und Vernetzung

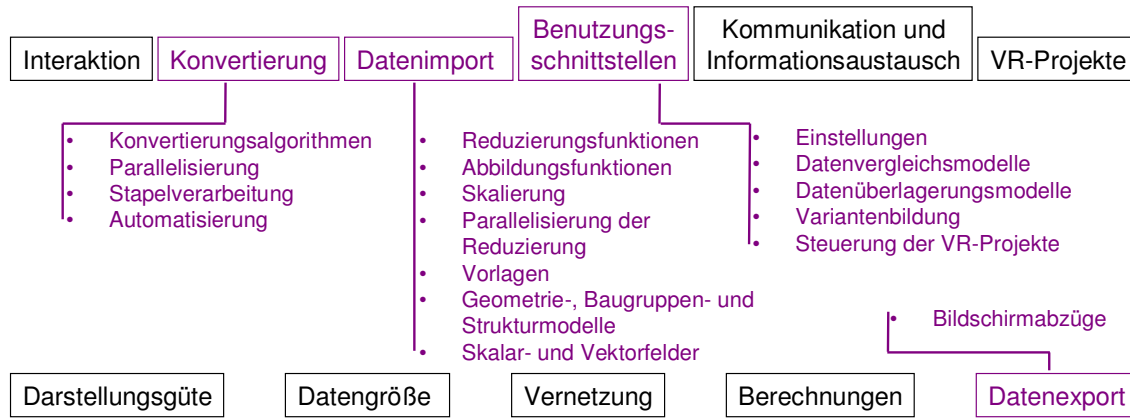


Abbildung 48: Funktionskategorien Konvertierung, Datenimport, Benutzungsschnittstellen und Datenexport

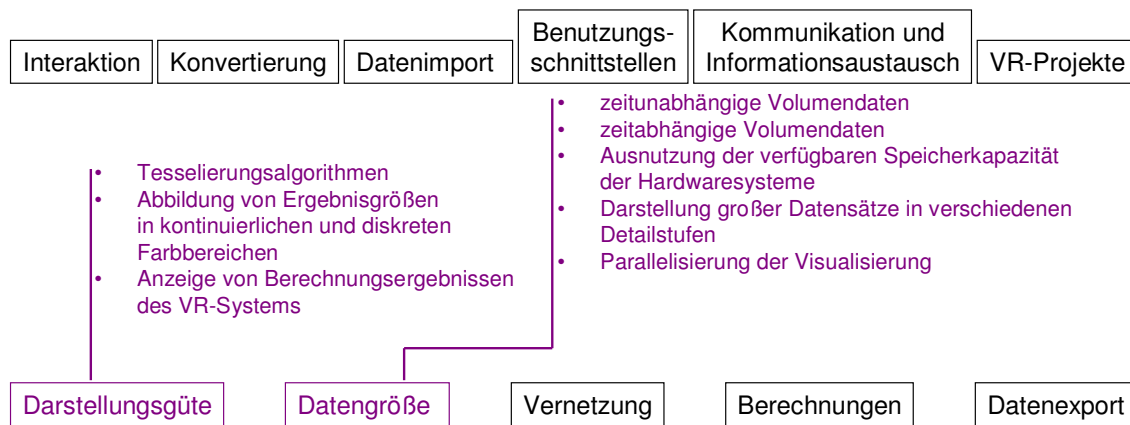


Abbildung 49: Funktionskategorien Darstellungsgüte und Datengröße

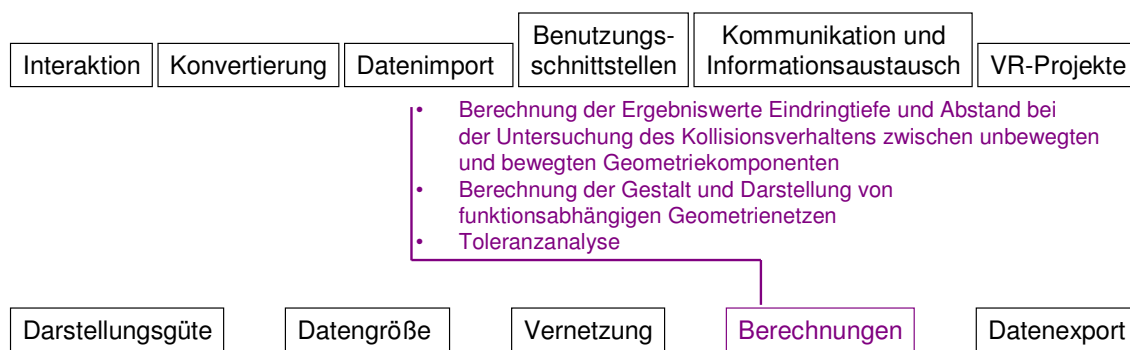


Abbildung 50: Funktionskategorie Berechnungen

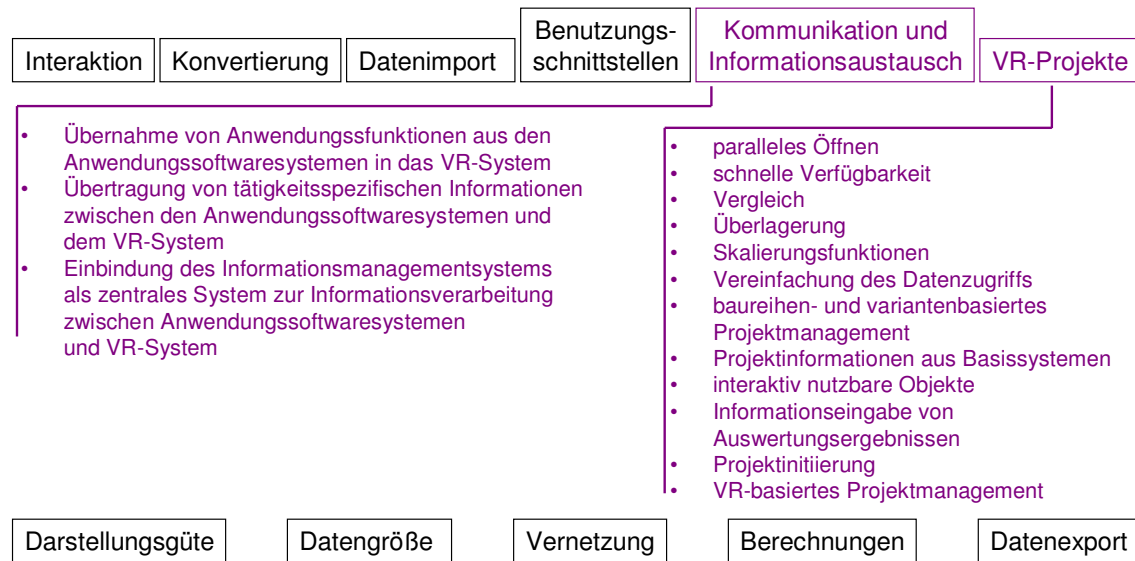


Abbildung 51: Funktionskategorien Kommunikation und VR-Projekte

6.5 Gesamtsystem Visualisierung

Zum Abschluss des Kapitels 6 wird, basierend auf den Funktionskategorien, das Gesamtsystem Visualisierung zur Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik beschrieben. Das Ziel dabei ist die Herstellung des Zusammenhangs zwischen dem formulierten Anforderungsprofil aus diesem Kapitel, das in Funktionskategorien vorliegt, und der Produktentstehung der Gießtechnik. In *Abbildung 52* ist das Gesamtsystem Visualisierung in den Produktlebensphasen dargestellt.

Das Gesamtsystem Visualisierung besteht aus den Produktenstehungssystemen der Gießtechnik, die in Kapitel 4.2.2 gebildet wurden, den Produktenstehungssystemen Visualisierung aus Kapitel 5.2, die in diesem Kapitel um Funktionen ergänzt wurden, dem Informationsmanagement-System, das in Kapitel 6.2 entwickelt wurde, sowie dem VR-System. Das Informationsmanagement-System sowie das VR-System werden als Produktenstehungssysteme zur Visualisierung angesehen und sind deshalb als solche in *Abbildung 52* eingefärbt. Die Teilsysteme, die innerhalb des Gesamtsystems zur Visualisierung von Ergebnisdaten und Informationen in der virtuellen Realität beitragen, sind die Produktenstehungssysteme Visualisierung, das Informationsmanagement-System sowie das VR-System.

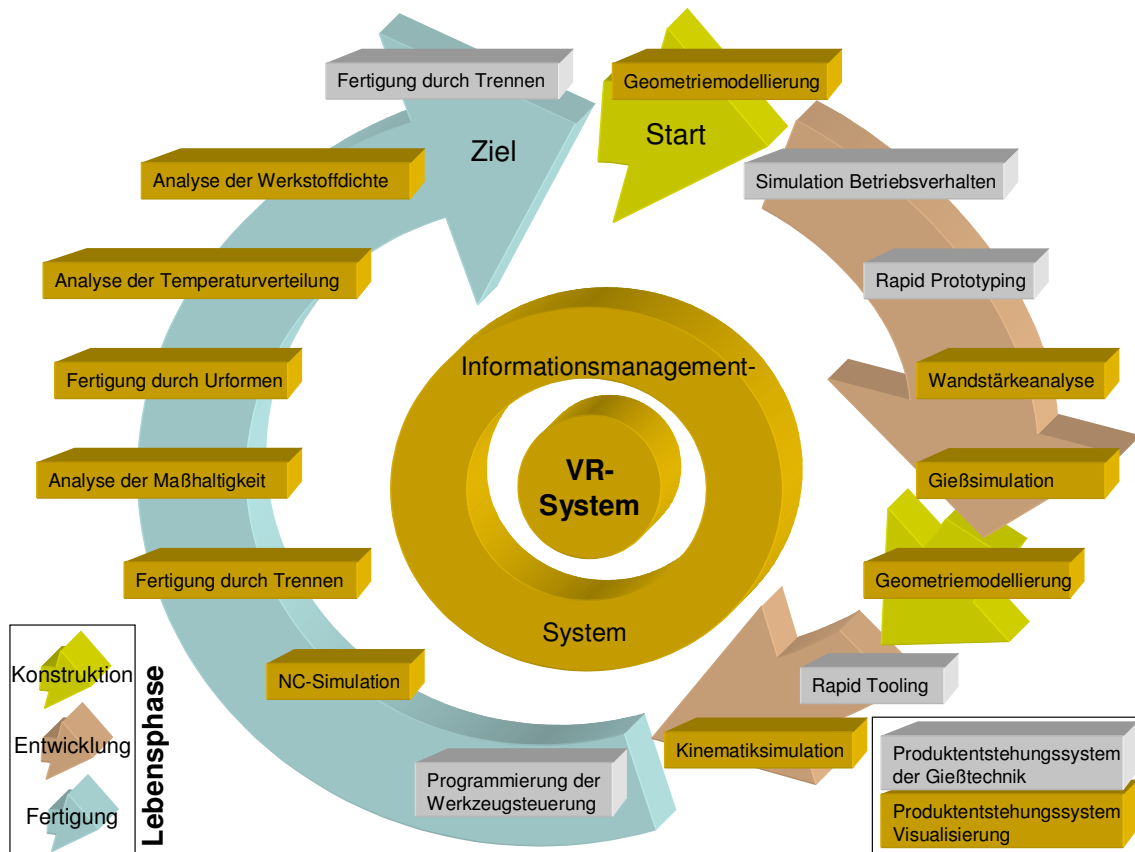


Abbildung 52: Gesamtsystem Visualisierung

Die Vorverarbeitung sowie die Visualisierung der Ergebnisdaten geschehen in den Produktentstehungssystemen Visualisierung und im VR-System. Die Vorverarbeitung der Ergebnisdaten, die im Wesentlichen durch die Datenübertragung sowie das Importieren bestimmt wird, erfolgt durch Funktionen aus den Kategorien Konvertierung von Daten zwischen Anwendungssystemen und VR-System, Datenimport ins VR-System, Benutzungsschnittstellen am Desktop zum Konvertierungs-, Import- und Visualisierungssystem sowie Datenexport aus dem VR-System.

Die Kategorien Darstellungsgüte von 3D-Objekten und Darstellbare Datengröße von 3D-Objekten enthalten Funktionen zur Visualisierungsqualität von Geometrieobjekten in der 3D-Umgebung. Die Visualisierungsqualität beeinflusst direkt die Analysefähigkeit von Daten aus den Tätigkeiten der Produktentstehung und steht daher bei der Einbindung der virtuellen Realität im Vordergrund. Die Funktionen dieser beiden Kategorien werden dem VR-System zugeordnet. Funktionen aus der Kategorie Interaktion in der 3D-Umgebung beeinflussen genauso wie die Darstellungsgüte und -größe der Ergebnisdaten die Analysefähigkeit. Eine hohe Analysefähigkeit in der virtuellen Realität wird in der Funktionskategorie Interaktion

unter anderem durch die Übernahme von Anwendungsfunktionen aus den Anwendungssoftwaresystemen in das VR-System erreicht. Die Vernetzung von örtlich verteilten VR-Systemen ist in der gleichnamigen Funktionskategorie enthalten. Die Vernetzung durch kollaborative Arbeitsumgebungen in der virtuellen Realität kann gerade bei örtlich verteilten Tätigkeiten die Kommunikationsfähigkeit erhöhen.

Insbesondere die Übernahme von interaktiv verfügbaren Anwendungsfunktionen aus den Anwendungssoftwaresystemen kann dazu führen, dass im VR-System Funktionen zu lösen sind, die hohe Anforderungen an die Rechenleistung stellen. In der Kategorie Berechnungen im VR-System werden Funktionen definiert, die trotz des hohen Rechenaufwands die Analysefähigkeit in der virtuellen Realität erheblich steigern können.

Den Abschluss der Beschreibung des Gesamtsystems Visualisierung, das für die Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik geeignet ist, sind die beiden Funktionskategorien Kommunikation und Informationsaustausch zwischen den Anwendungssoftwaresystemen und dem VR-System sowie Organisation und Handhabung der VR-Projekte. Für eine erfolgreiche Realisierung der Funktionen aus der Kategorie Kommunikation und Informationsaustausch ist die Anwendung des Informationsmanagement-Systems zwischen den Produktentstehungssystemen Visualisierung und dem VR-System essentiell. Die Anwendung der Funktionen aus der Kategorie Kommunikation und Informationsaustausch sowie aus allen vorherig beschriebenen Kategorien ist die Voraussetzung für eine erfolgreiche Realisierung der Funktionen der Kategorie Organisation und Handhabung der VR-Projekte.

Das Ziel in der Kategorie Organisation und Handhabung der VR-Projekte ist die Gestaltung eines Gesamtsystems Visualisierung, das durch die Lösung der Funktionen, die in diesem Kapitel entwickelt worden sind, zur Durchführung eines VR-basierten Projektmanagements, im erarbeiteten Tätigkeitsspektrum der Gießtechnik, befähigt. Dieses Ziel kann in weiterführenden Arbeiten, zusammen mit den Ergebnissen dieser Arbeit, zur Realisierung der Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik, verwendet werden.

Kapitel 7 Zusammenfassung

Im Kapitel 7 werden die Thematik, die Zielsetzungen, der Lösungsweg und die Ergebnisse dieser Arbeit zusammenfassend dargelegt. Auf Grundlage dessen wird der Nutzen der Ergebnisse bewertet. Im Ausblick werden die weiteren Verwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse dieser Arbeit diskutiert.

Die Arbeit ist aus dem Gebiet der Produktentstehung der Gießtechnik und der virtuellen Produktentstehung. Die Unterstützung der simultanen Arbeitsabläufe in der Produktentstehung der Gießtechnik kann durch die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von Methoden, Verfahren und Werkzeugen der virtuellen Produktentstehung verbessert werden. Daher ist die Zielsetzung dieser Arbeit die Entwicklung von Simulationsmethoden und Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität zur Unterstützung der Produktentstehung in der Gießtechnik.

Um die Zielsetzung dieser Arbeit zu erreichen, wird zuerst der Stand der Technik in der Produktentstehung und in der virtuellen Produktentstehung ausführlich im **Kapitel 2** herausgearbeitet.

In **Kapitel 3** werden die Arbeitsverfahren, -methoden und -werkzeuge der Produktentstehung der Gießtechnik zur Vorbereitung der Analyse in Kapitel 4 erarbeitet. Das Ergebnis ist die Darstellung der Verknüpfungen der Produktentstehungsprozesse, die durch die gegenseitigen Auswirkungen hervorgerufen werden. Die Produktentstehungsprozesse beschreiben die Tätigkeiten in der Produktentstehung der Gießtechnik.

Im **Kapitel 4** werden für die Vorbereitung der Entwicklung von Simulationsmethoden und Visualisierungsverfahren in Kapitel 5 die Produktentstehungsprozesse aus Kapitel 3 analysiert. Dazu werden die beiden Kriterien Aufgabenspektrum und Kommunikationsfähigkeit eingeführt. Hinsichtlich dieser beiden Kriterien erfolgt die Herleitung von Verbesserungspotentialen für einige Produktentstehungsprozesse aus Kapitel 3 auf Basis der gegenseitigen Verknüpfungen.

Parallel dazu werden aus den Produktentstehungsprozessen und den Verknüpfungen technische Produktentstehungssysteme gebildet. Kernpunkt bei der Systembildung ist die Zuordnung der Anwendungssoftwaresysteme sowie der Ein- und Ausgangsgrößen. In den Produktentstehungssystemen geschieht die Ableitung der Prozesse.

Die Prozesse bilden die Grundlage für die Analyse der Potentialerfüllung zu den beiden Kriterien Aufgabenspektrum und Kommunikationsfähigkeit in den Produktentstehungssystemen. Die Analyse ergibt in einigen Prozessen Verbesserungspotentiale für die Visualisierung der Ergebnisgrößen sowie die Erkenntnis, dass Aufgaben zur Kinematik-

simulation in dem bestehenden Tätigkeitsspektrum der Gießtechnik nicht erarbeitet werden können.

Zur Prüfung der Realisierbarkeit der Verbesserungspotentiale werden die Analyseergebnisse der verknüpften Produktentstehungsprozesse mit denen der Prozesse der Produktentstehungssysteme verglichen, die sich auf dieselben Tätigkeiten stützen. Der Vergleich zeigt Übereinstimmung beim Kriterium Aufgabenspektrum und Unterschiede beim Kriterium Kommunikationsfähigkeit. Die Unterschiede beim Kriterium Kommunikationsfähigkeit betreffen Verbesserungspotentiale für zwei weitere Tätigkeiten, basierend auf der Analyse der Produktentstehungsprozesse und deren Verknüpfungen. Da durch diese beiden Tätigkeiten keine nennenswerte Umsetzung von digitalen Ergebnissen erfolgt, werden sie zur Verbesserung des Kriteriums Kommunikationsfähigkeit in Kapitel 5 an diesem Punkt der Arbeit nicht berücksichtigt.

Aufgrund der Analyse ist ein Ergebnis des Kapitels 4 die Entscheidung zur Erhöhung des Erfüllungsgrads des Kriteriums Aufgabenspektrum durch die Entwicklung von Simulationsmethoden für die Tätigkeit Kinematiksimulation von Fertigungssystemen. Ein weiteres Ergebnis ist die Entscheidung zur Erhöhung des Erfüllungsgrads des Kriteriums Kommunikationsfähigkeit durch die Entwicklung von Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität für diese Tätigkeiten der Produktentstehung der Gießtechnik, die in Kapitel 3 herausgearbeitet wurden:

- Geometriemodellierung,
- Wandstärkeanalyse,
- Gießsimulation,
- Kinematiksimulation,
- NC-Simulation,
- Analyse der Maßhaltigkeit,
- Analyse der Temperaturverteilung und
- Analyse der Werkstoffdichte.

Ziel dieser Entwicklungen ist die Erweiterung der Simulations- und Visualisierungskompetenz in der Produktentstehung der Gießtechnik. Im Rahmen der Aufgabenabgrenzung wird sich in dieser Arbeit gegen die Entwicklung von Visualisierungsverfahren für die Tätigkeit Simulation Betriebsverhalten entschieden, obwohl dieser Tätigkeit in der Analyse ein Potential zugewiesen wird.

In **Kapitel 5** werden für die aufgrund der Analyse in Kapitel 4 ermittelten Tätigkeiten der Produktentstehung der Gießtechnik Simulationsmethoden und Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität entwickelt. Die Entwicklung geschieht in Produktentstehungssystemen zur Visualisierung, die zu diesem Zweck gebildet werden. Das Ergebnis ist die Beschreibung der Simulationsmethoden und Visualisierungsverfahren auf Grundlage der Prozesse in diesen Produktentstehungssystemen.

Den Abschluss dieser Arbeit bildet im **Kapitel 6** die Formulierung eines Anforderungsprofils an die Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik. Die Erarbeitung des Anforderungsprofils basiert auf den Ergebnissen der Kapitel 3, 4 und 5.

Zuerst werden durch die Analyse der Ergebnisse aus den vorherigen Kapiteln konkretisierte Anforderungen in Form von Funktionen in den Produktentstehungssystemen zur Visualisierung abgeleitet. Aus den Funktionen geht hervor, dass die Notwendigkeit zur Verwendung und Visualisierung von Informationen für die Erhöhung der Analysefähigkeit in der virtuellen Realität besteht. Zur Festlegung der Informationsquellen kommen die Tätigkeiten in Betracht, von denen durch die Analyse in Kapitel 4 potentialbehaftete Verknüpfungen ausgehen. Aus diesem Grund werden die beiden Tätigkeiten, für die auf Basis der Analyse in Kapitel 4 keine Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität entwickelt worden sind, als Informationsquellen definiert. Für diese beiden sowie für die oben aufgezählten Tätigkeiten wird darauf ein Informationsmanagement-System entwickelt.

Im weiteren Verlauf des Kapitels 6 werden die abgeleiteten bzw. entwickelten Funktionen größtenteils tätigkeitsneutral verallgemeinert und anschließend in übergeordneten Funktionskategorien zusammengefasst. Das Ergebnis des Kapitels 6 ist die Beschreibung der Visualisierung von Daten und Informationen aus der Produktentstehung der Gießtechnik in der virtuellen Realität im Gesamtsystem Visualisierung. Die Beschreibung der Visualisierung begründet sich auf die Funktionskategorien, die in den Produktentstehungssystemen dieser Arbeit verankert sind. Die Funktionskategorien stellen die Verbindungen zu den zuvor erarbeiteten Ergebnissen dieser Arbeit her.

Die Ergebnisse dieser Arbeit, die im Kapitel 6 in einer konzentrierten Form gebündelt werden, bilden die Grundlage für die Realisierung des Gesamtsystems Visualisierung. Die erfolgreiche Realisierung des Gesamtsystems Visualisierung befähigt zur Durchführung eines VR-basierten Projektmanagements in der Produktentstehung der Gießtechnik. Die Durchführung des VR-basierten Projektmanagements wird eine verbesserte Unterstützung der Produktentstehung der Gießtechnik durch die in dieser Arbeit entwickelten Methoden und Verfahren aus dem Gebiet der virtuellen Produktentstehung erzielen.

7.1 Nutzen

Die Anwendung der Ergebnisse dieser Arbeit bei der Produktentstehung der Gießtechnik ist von Nutzen. In *Abbildung 53* und *Abbildung 54* ist der Nutzen der Anwendung der Ergebnisse aus Kapitel 5 zusammengestellt. Die Ergebnisse des Kapitels 5 sind anwendbare Simulationsmethoden und Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität zur Unterstützung der Produktentstehung in der Gießtechnik. Der Nutzen wird in *Abbildung 53* in den technischen Nutzen, den Nutzen für die Arbeitsabläufe sowie in *Abbildung 54* in den wirtschaftlichen Erwartungsnutzen aufgeteilt.

Technischer Nutzen	Nutzen für die Arbeitsabläufe
<ul style="list-style-type: none"> • schnelle Vermittlung von technischen Wirkzusammenhängen aufgrund hoher Anschaulichkeit der Datenmodelle in der 3D-Umgebung • einheitliche Visualisierungsplattform für Daten und Informationen aus dem Tätigkeitsspektrum • Anpassung des Detaillierungsgrads der Datenmodelle an die Interessenschwerpunkte der Anwendergruppen • Informationsvermittlung an beliebige Anwendergruppen • Komplexitätsreduktion durch Loslösung der Datenmodelle aus den detailintensiven Anwendungssystemen der Produktentstehung der Gießtechnik 	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung der Prozesstransparenz und -kontrolle • belastbare, digitale Entscheidungsgrundlagen • Informationsquelle zur Projektabwicklung • Vermittlung von Zielen, Ergebnissen und Aufgaben • Unterstützung von simultanen Arbeitsabläufen durch schnelle Ergebniskommunikation

Abbildung 53: Nutzen der Methoden und Verfahren

Der technische Nutzen und der Nutzen für die Arbeitsabläufe in *Abbildung 53* begründen sich auf verallgemeinerte Erfahrungen des Autors bei der Anwendung der Methoden und Verfahren aus Kapitel 5. Der wirtschaftliche Erwartungsnutzen wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht. Der Autor geht jedoch davon aus, dass durch den technischen

Nutzen und den Nutzen für die Arbeitsabläufe bei der Anwendung der Methoden und Verfahren der wirtschaftliche Erwartungsnutzen in den beschriebenen Ausprägungen eintritt.

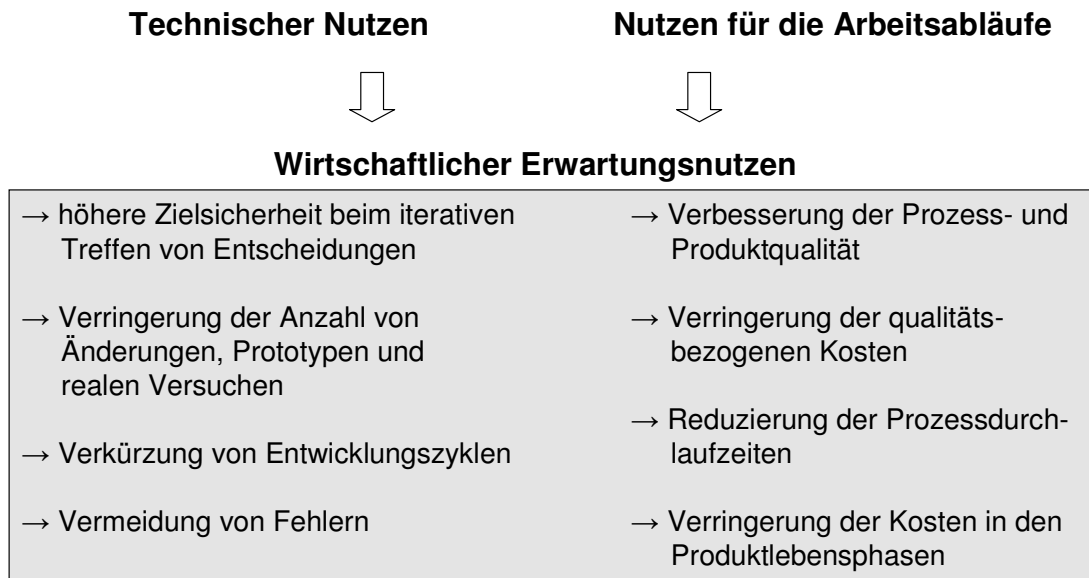


Abbildung 54: Wirtschaftlicher Erwartungsnutzen

Der technische Nutzen der Ergebnisse aus Kapitel 6 ist die Verfügbarkeit einer technischen Grundlage in Form eines komplexen Anforderungsprofils für die Realisierung der Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik. Die Realisierung des Anforderungsprofils aus Kapitel 6, bei gleichzeitiger Anwendung der Methoden und Verfahren aus Kapitel 5, wird zwangsläufig die Erhöhung des technischen Nutzens, des Nutzens für die Arbeitsabläufe aus *Abbildung 53* sowie des wirtschaftlichen Nutzens aus *Abbildung 54* bewirken.

7.2 Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit können angewendet bzw. weiterverwendet werden. Die entwickelten Simulationsmethoden und Visualisierungsverfahren in der virtuellen Realität aus Kapitel 5 können direkt in den erläuterten Anwendungssoftwaresystemen realisiert werden. Darüber hinaus eignen sich die Methoden und Verfahren aus Kapitel 5 zur Weiterentwicklung und zur Anpassung an spezielle Gegebenheiten und Anforderungen.

Das Ergebnis des Kapitels 6 ist das Anforderungsprofil an die Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik und ist für die Realisierung geeignet. Das Anforderungsprofil liegt einerseits tätigkeitsbezogen für die berücksichtigten Tätigkeiten aus

Kapitel 5 und andererseits allgemein sowie größtenteils tätigkeitsneutral vor. Das tätigkeitsbezogene Anforderungsprofil kann für die Weiterentwicklung der Visualisierungsverfahren aus Kapitel 5 verwendet werden. Das verallgemeinerte, größtenteils tätigkeitsneutrale Anforderungsprofil eignet sich für die tätigkeitsübergreifende Übertragung der Anforderungen sowie deren Realisierung. Dabei können die Anforderungen sowohl auf Tätigkeiten, die in dieser Arbeit betrachtet werden, als auch auf weitere Tätigkeiten, die in dieser Arbeit nicht betrachtet werden, übertragen und für diese realisiert werden. Als Ausgangsbasis zur Übertragung und Realisierung der Anforderungen eignen sich die erarbeiteten Funktionskategorien. Die erfolgreiche Übertragung und Realisierung der Anforderungen an die Einbindung der virtuellen Realität in die Produktentstehung der Gießtechnik wird zur Durchführung eines VR-basierten Projektmanagements befähigen.

- Kopplung an bestehende Systeme
- direkter, unkomplizierter Zugriff auf notwendige Daten und Informationen
- komplexe Berechnungen in Echtzeit
- Änderung und konsistente Rückübertragung von 3D-Modellen
- Geometriemodellierung mit Methoden der Featureverarbeitung, Parametrik, Strukturmodellierung sowie wissensbasierten Modellierung
- Bildung und Ableitung von Varianten
- Generierung von beliebigen Daten- und Informationsvergleichsmodellen
- Initiierung von Simulationsläufen und Darstellung der Ergebnisse
- Modellierung von Prozessen
- Abwicklung von Produktentstehungsprozessen
- gegenseitige Prozesskopplung von örtlich verteilten VR-Systemen
- Einbindung des Informationsmanagement- und PDM-Systems

Abbildung 55: Technischer Ausblick

Über das erarbeitete Anforderungsprofil aus Kapitel 6 hinaus ist eine Erweiterung des VR-basierten Projektmanagementsystems denkbar. Ein technischer Ausblick sowie ein Ausblick für die Arbeitsabläufe sind in *Abbildung 55* und *Abbildung 56* zusammengestellt.

- umfassende Informationsquelle zur Projektabwicklung
- Schnittstelle bzw. Kommunikationswerkzeug zur digitalen Fertigungsplanung
- Einbindung der Tätigkeit Simulation Betriebsverhalten von Fertigteilen
- Potential zur Einbindung des Qualitätsmanagementsystems
- Potential zur Realisierung von Methoden des Qualitätsmanagements wie Six Sigma
- Unterstützung der Anwendung von diskursiv betonten Lösungsmethoden und von Lösungsmethoden wie TRIZ
- Unterstützung der Anwendung von Methoden zur Lösungskombination sowie zur Auswahl und Bewertung
- Potential zur Einbindung von betriebswirtschaftlichen Zusammenhängen wie Kostenrechnung und Investitionsrechnung
- Verwendung einer kollaborativen Arbeitsumgebung zwischen örtlich verteilten VR-Systemen zur verbesserten Unterstützung von simultanen Arbeitsabläufen der Produktentstehung
- Komplexitätsreduktion sowie –kontrolle in einer durch Informationstechnik geprägten zukünftigen Systemwelt

Abbildung 56: Ausblick für die Arbeitsabläufe

Die wesentlichen Erweiterungen des zuvor diskutierten VR-basierten Projektmanagementsystems, die in *Abbildung 55* und *Abbildung 56* zusammengestellt sind, beziehen sich auf die verstärkte Übernahme von komplexen Anwendungsfunktionen aus den Anwendungssystemen, auf umfangreichere Funktionalitäten zur Abwicklung von Prozessen sowie auf die Aufweitung des Tätigkeitsspektrums. Die Entwicklung, Realisierung und Anwendung eines erweiterten VR-basierten Projektmanagementsystems könnte eine umfassende Prozesskontrolle in einer virtuellen Umgebung in der Produktentstehung der Gießtechnik ermöglichen.

vi Quellen

- [ALT-98] Altschuller, G. S.: Erfinden - Wege zur Lösung technischer Probleme, Limitierter Nachdruck der 2. Auflage, Herausgeber Möhrle, M. Cottbus: PI - Planung und Innovation, 1998
- [AND-00] Anderl, R.; Trippner, D.: STEP-Standard for the Exchange of Product Model Data. Stuttgart: Teubner, 2000
- [API-07] url: <http://de.wikipedia.org/wiki/Programmierschnittstelle>
- [AZU-97] Azuma, R. T.: A Survey of Augmented Reality. In Presence: Teleoperations and Virtual Environments 6, 1997
- [BAL-82] Balzert, H.: Die Entwicklung von Software-Systemen. Mannheim: Bibliogr. Inst., 1982
- [BAL-85] Balzert, H.: Moderne Software-Entwicklungssysteme und -werkzeuge. Mannheim: Bibliogr. Inst., 1985
- [BAU-75] Bauer, F. L.: Software engineering. Berlin: Springer, 1975
- [BAU-93] Bauer, F. L.; Goos, G.: Informatik I und II - Eine einführende Übersicht, 4. Auflage. Berlin: Springer, 1993
- [BAY-08] url:http://bayreuth.bayern-online.de/01_Magazin/Wirtschaft/Handwerk/Weltklasse_Oberfranken/Hofmann_Modellbau/
- [BEI-70] Beitz, W.: Systemtechnik in der Konstruktion. DIN-Mitteilungen 49, Seiten 295 - 302, 1970
- [BEI-71] Beitz, W.: Systemtechnik im Ingenieurbereich. VDI-Berichte Nr. 174. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1971

-
- [BEI-94] Beitz, W.: Design Science – The Need for a Scientific Basis for Engineering Design Methodology. Journal of Engineering Design 5, Nr. 2, Seiten 129 – 133, 1994
- [BEN-70] Bengisu, Ö.: Elektrohydraulische Analogie. Ölhydraulik und Pneumatik 14, Seiten 122 – 127, 1970
- [BIN-79] Binder, D.: Interpolation in numerischen Steuerungen. Berlin: Springer-Verlag, 1979
- [BIR-75] Birkhofer, H.; Ersoy, M.; Roth, K.: Methodisches Konstruieren neuer Sicherheitsgurtschlösser. VDI-Zeitschrift 117, Seiten 613 – 618, 1975
- [BLA-81] Blass, E.: Verfahren mit Systemtechnik entwickelt. VDI-Nachrichten Nr. 29, 1981
- [BLA-85] Blaschek, G.: Statische Programmanalyse. Elektronische Rechenanlagen 27, 1985
- [BOE-62] Boehm, B. W.: Software engineering. IEEE Trans. Computers C-25, 1962
- [BRU-86] Brunthaler, S.: Methodische Entwicklung technischer Systeme mit Software- und Hardwarekomponenten für integrierte Messdatenverarbeitung. Berlin: Schriftenreihe Konstruktionstechnik (Hrsg.: W. Beitz), TU Berlin, 1986
- [BUL-96] Bullinger, H.-J., Warnecke, H.-J.: Neue Organisationsformen im Unternehmen. Berlin: Springer, 1996
- [BUL-05] Bullinger, H.-J.; Warschat, J.; Schumacher, O.; Slama, A; Ohlhausen, P.: Buchkapitel: Ontology-Based Project Management for Acceleration of Innovation Projects, Buch: From Integrated Publication and Information Systems to Information and Knowledge Environments. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005

-
- [BUR-96] Burdea, G.: Force and Touch Feedback for Virtual Reality. Wiley Interscience, 1996
- [BÜC-69] Büchel, A.: Systems Engineering: Industrielle Organisation 38, Seiten 373 - 385, 1969
- [CAS-74] Caspers, P. G.: Aufbau von Betriebssystemen. Berlin: de Gruyter, 1974
- [CHE-65] Chestnut, H.: Systems Engineering Tools. New York: Wiley & Sons Inc., 1965
- [COI-89] Coineau, Y.; Kresling, B.: Erfindungen der Natur. Nürnberg: Tessloff, 1989
- [DAL-63] Dalkey, N. D.; Helmer, O.: An Experimental Application of the Delphi Method to the Use of Experts. Management Science Band 9, No. 3, April 1963
- [DEN-92] Denkena, B.: Verschleißverhalten von Schneidkeramik bei instationärer Belastung. Dissertation Universität Hannover, 1992
- [DGQ-95] Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V.: Begriffe zum Qualitätsmanagement, DGQ-Schrift 11-04, 6. Auflage. Berlin: Beuth, 1995
- [DIN-1] DIN 66215: Programmierung numerisch gesteuerter Arbeitsmaschinen: CLDATA. Teil 1 und 2. Berlin: Beuth Verlag, 1982
- [DIN-2] DIN 66025: Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen. Teil 1 und 2. Berlin: Beuth Verlag, 1983
- [DRE-75] Dreiholz, D.: Ordnungsschemata bei der Suche von Lösungen. Konstruktion 27, Seiten 233 - 240, 1975
- [DUB-05] Grote, K.-H; Feldhusen, J.: Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau, 21. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005

-
- [EHR-95] Ehrlenspiegel, K.: Integrierte Produktentwicklung – Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion. München: Hanser Verlag, 1995
- [EIG-01] Eigner, M.; Stelzer, R.: Produktdatenmanagement-Systeme. Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. Berlin: Springer, 2001
- [ETE-07] url: <http://www.e-teaching.org/glossar/hardware>
- [EVE-97] Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik, Band 3, 3. Auflage. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1997
- [FET-07] url: <http://de.wikipedia.org/wiki/Fertigungstechnik>
- [FEV-07] url: <http://de.wikipedia.org/wiki/Verfahren>
- [FFV-07] url: <http://de.wikipedia.org/wiki/Fertigungsverfahren>
- [FIN-07] url: <http://de.wikipedia.org/wiki/Finite-Elemente-Methode>
- [FÖL-67] Föllinger, O.; Weber, W.: Methoden der Schaltalgebra. München: Oldenbourg, 1967
- [FRI-06] Fritz, A. H.; Schulze, G.: Fertigungstechnik, 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006
- [GEB-96] Gebhardt, A.: Rapid Prototyping – Werkzeuge für die schnelle Produktentwicklung. München: Hanser, 1996
- [GOR-61] Gordon, W. J. J.: Synectics, the Development of Creative Capacity. New York: Harper, 1961
- [GRA-02] Grabowski, H.; Lossack, R. S.; Weißkopf, J.: Datenmanagement in der Produktentwicklung. Fackler, 2002

-
- [GRI-07] Grimm, S.: url: http://www.vdc-fellbach.de/DATA/Media/2007/PI_ICIDO_Finanzierung_20070621.pdf
- [GUT-83] Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, Band 1: Die Produktion, 24. Auflage. Berlin, Springer-Verlag, 1983
- [HAF-94] Haferkamp, H.; Gerken, J.; Schmidt, H.: Rapid Prototyping/Manufacturing metallischer Bauteile. VDI-Zeitschrift 136, Nummer 7/8, Seiten 63 bis 65, 1994
- [HAN-68] Ausschuss für wirtschaftliche Fertigung (AWF) e.V.: Handbuch der Arbeitsvorbereitung, Teil 1: Arbeitsplanung. Berlin: Beuth, 1968
- [HAN-92] Hansen, H.: Wirtschaftsinformatik I. Stuttgart: G. Fischer, 1992
- [HAR-07] url: <http://de.wikipedia.org/wiki/Hardware>
- [HEL-78] Hellfritz, H.: Innovation via Galeriemethode. Königstein/Ts.: Eigenverlag, 1978
- [HEN-72] Henderson, P.; Snowdon, R.: An experiment in structured programming. Bit 2, 1972
- [HEN-89] Henneberger, G.: Servoantriebe für Werkzeugmaschinen und Roboter, Stand der Technik und Entwicklungstendenzen. etz. Band 110. Seiten 200 bis 274, 1989
- [HER-63] Hertel, U.: Biologie und Technik – Struktur, Form, Bewegung. Mainz: Krauskopf, 1963
- [HER-00] Herb, R.; Herb, T.; Kohnhauser, V.: TRIZ – der systematische Weg zur Innovation. Werkzeuge, Praxisbeispiele, Schritt - für-Schritt - Anleitungen. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie, 2000
- [HES-81] Hesse, W.: Methoden und Werkzeuge zur Software-Entwicklung. Informatik-Spektrum 4, 1981

-
- [HIL-93] Hill, B.: Bionik – Notwendiges Element im Konstruktionsprozess. Konstruktion 45, Seiten 283 - 287, 1993
- [HLR-07] url: <http://www.hlrs.de/organization/vis/covise/>
- [HUB-84] Hubka, V.: Theorie Technischer Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1984
- [HUB-88] Hubka, V.; Eder, W.E.: Theory of Technical Systems. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1988
- [HUB-92] Hubka, V.; Eder, W.E.: Einführung in die Konstruktionswissenschaft – Übersicht, Modell, Anleitungen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1992
- [HUE-96] Czichos, H.: Hütte Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften, 30. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996
- [HUG-79] Hughes, J. W.: A formalization and explication of the Michael Jackson method of program design. Software – Practice an Experience 9, 1979
- [IGE-95] IGES – Initial Graphics Exchange Specification. ANSI Standard Y14.26M, National Institute of Standards and Technology (NIST), 1995
- [IMA-07] url: <http://de.wikipedia.org/wiki/Imagination>
- [IMM-07] url: <http://de.wikipedia.org/wiki/Immersion>
- [INT-07] url: <http://de.wikipedia.org/wiki/Interaktion>
- [ISO-1] ISO 10303-1: Industrielle Automatisierungssysteme und Integration – Produktdatendarstellung und –austausch, Teil 1: Überblick und grundlegende Prinzipien. Berlin: Beuth, 1995

-
- [ISO-2] ISO 10303-214: Industrielle Automatisierungssysteme und Integration – Produktdatendarstellung und –austausch, Teil 214: Anwendungsprotokoll: Datenmodelle für die Prozesskette Mechanik in der Automobilindustrie. Berlin: Beuth, 2001
- [ISO-3] ISO 14649: Overview and fundamental principles. TC184/SCI/WG7/N123 Draft Version, 1998
- [JAC-86] Jackson, M. A.: Grundlagen des Programmentwurfs, 6. Auflage. Darmstadt: Toeche-Mittler, 1986
- [KAM-95] Kamiske, G. F.: Qualitätsmanagement von A bis Z – Erläuterung moderner Begriffe des Qualitätsmanagements, 2. Auflage. München, Wien: Hanser, 1995
- [KEH-72] Kehrmann, H.: Die Entwicklung von Produktstrategien. Aachen: Dissertation TH Aachen, 1972
- [KER-81] Kernighan, B. W.; Plauger, P. J.: Software tools in Pascal. Addison-Wesley, 1981
- [KER-87] Kerz, P.: Biologie und Technik – Gegensatz oder sinnvolle Ergänzung; Konstruktionselemente und –prinzipien in Natur und Technik. Konstruktion 39, Seiten 321 – 327 und 474 - 478, 1987
- [KER-07] url: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kernschießen>
- [KES-51] Kesselring, F.: Bewertung von Konstruktionen, ein Mittel zur Steuerung von Konstruktionsarbeit. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1951
- [KET-98] Ketscher, N.; Herfurth, K.; Kademann, R.: Gießerei-Rundschau 45 5/6. Seiten 5 bis 13, 1998
- [KET-99] Ketscher, N.; Herfurth, K.; Steller, I.: Konstruktion 5. Seiten 13 bis 17, 1999
- [KIE-52] Kienzle, O.; Victor, H.: Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugmaschinen. VDI-Zeitschrift 94, Seiten 299 bis 305, 1952

-
- [KLE-02] Klein, B.: TRIZ/TIPS-Methodik des erfinderischen Problemlösens. München: Oldenbourg, 2002
- [KNO-77] Knorr, W.: Bedeutung des Schwefels für die Zerspanbarkeit der Stähle unter Berücksichtigung ihrer Gebrauchseigenschaften. Stahl und Eisen 97, Seiten 414 bis 423, 1977
- [KOK-07] url: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kokillengießverfahren>
- [KÖN-94] König; Celi, I. W.; Celiker, T. et al.: Rapid Metal Prototyping – Verfahren zur Direktherstellung metallischer Bauteile und Prototypenwerkzeuge. VDI-Zeitschrift 136, Nummer 7/8, Seiten 57 bis 60, 1994
- [KRA-87] Kramer, F.: Innovative Produktpolitik, Strategie – Planung – Entwicklung – Einführung. Berlin: Springer-Verlag, 1987
- [KRA-02] Krause, F. L.; Tang, T.; Ahle, U.: Abschlussbericht zum Projekt iViP – integrierte Virtuelle Produktentstehung. PFT Schriftenreihe, Forschungszentrum Karlsruhe. München: Hanser, 2002
- [LEE-99] Lee, K.: Principles of CAD/CAM/CAE Systems. Addison Wesley Longman, 1999
- [LEH-94] Lehmann, O.; Stuke, M.: Three-dimensional laser direct writing of electrically conducting and isolating microstructures. Materials Letters 21, Seiten 131 bis 136, 1994
- [LOC-93] Lockemann, P.; Krüger, G.; Krumm, H.: Telekommunikation und Datenhaltung. München: Hanser, 1993
- [MAS-07] Masak, D.: SOA? Serviceorientierung in Business und Software. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2007
- [MYE-78] Myers, G. J.: Composite/structured design. New York: Van Nostrand, 1978

-
- [MYE-79] Myers, G. J.: The art of software testing. New York: Wiley, 1979
- [NAB-95] Naber, H.; Geuer, A: Entwicklungspotentiale durch innovativen Einsatz von Rapid Prototyping. ZWF 90, 1995
- [NEW-73] Newman, W.; Sproull, R.: Principles of Interactive Computer Graphics. New York: McGraw-Hill, 1973
- [ORL-05] Orloff, M. A.: Grundlagen der klassischen TRIZ – Ein Lehrbuch des erfinderischen Denkens für Ingenieure, 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005
- [OSB-57] Osborn, A. F.: Applied Imagination – Principles and Procedures of Creative Thinking. New York: Scribner, 1957
- [PAH-74] Pahl, G.: Rückblick zur Reihe „Für die Konstruktionspraxis“. Konstruktion 26, Seiten 491 – 495, 1974
- [PAH-07] Pahl, G.; Beitz, W; Feldhusen, J; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre, 7.Auflage, Berlin: Springer-Verlag, 2007
- [PAT-82] Patsak, G.: Systemtechnik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1982
- [PAT-87] Patzke, M.: Einfluß der Randzone auf die Zerspanbarkeit von Schmiedeteilen. Dissertation Universität Hannover, 1987
- [POL-93] Polly, A.; Grabowski, H.; Anderl, R.: Integriertes Produktmodell. Entwicklungen zur Normung von CIM. Berlin: Beuth, 1993
- [PRI-86] Pritschow, G.: Die Lageregelung an numerisch gesteuerten Maschinen. Stuttgart: Selbstverlag FISW-GmbH, 1986
- [PRI-89] Pritschow, G.; Weck, M.; Spur, G.: Vorschubantriebe in der Fertigungstechnik. München: Hanser, 1989

-
- [PRI-97] Pritschow, G.; Spur, G.; Weck, M.: Schnittstellen im CAD/CAM-Bereich. München, Wien: Hanser, 1997
- [PRO-07] url: <http://de.wikipedia.org/wiki/Prozess>
- [REC-85] Rechenberg, P.: Werkzeuge der Softwaretechnik: Eine kommentierte Literaturlauswahl. Elektronische Rechenanlagen 27, 1985
- [REF-85] REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.: Methodenlehre der Planung und Steuerung, Teil 1: Grundbegriffe. München, Wien: Hanser, 1985
- [ROD-91] Rodenacker, W. G.: Methodisches Konstruieren. Konstruktionsbücher Band 27, 4. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 4. Auflage, 1991
- [ROH-69] Rohrbach, B.: Kreativ nach Regeln – Methode 635, eine neue Technik zum Lösen von Problemen. Absatzwirtschaft 12, Seiten 73 – 75, 1969
- [ROO-90] Roozenburg, N.; Eckels, J. (Editors): Evaluation und Decision in Design. Schriftenreihe WDK 17. Zürich: HEURISTA, 1990
- [ROS-77] Ross, D. T.: Structured analysis (SA). IEEE Trans. Software Engineering SE-3, 1977
- [ROT-96] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, 3. Auflage, Band III: Verbindungen und Verschlüsse, Lösungsfindung. Berlin: Springer - Verlag, 1996
- [ROT-00] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, 3. Auflage, Band I: Konstruktionslehre. Berlin: Springer - Verlag, 2000
- [ROT-01] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, 3. Auflage, Band II: Konstruktionskataloge. Berlin: Springer - Verlag, 2001

-
- [RUD-99] Rude, S.; Grabowski, H.: Informationslogistik. Stuttgart: Teubner, 1999
- [SCH-61] Schlösser, W. M. J.; Olderaan, W. F. T. C.: Eine Analogentheorie der Antriebe mit rotierender Bewertung. Ölhydraulik und Pneumatik 5, Seiten 413 - 418, 1961
- [SCH-77] Schomann, K. E.; Ross, D. T.: Structured analysis for requirements definition. IEEE Trans. Software Engineering SE-3, 1977
- [SCH-79] Schmid, D.: Die numerische Bahnsteuerung. Berlin: Springer-Verlag, 1979
- [SCH-87] Schweizer, M.: Robotertechnik. Bibliothek der Technik, Band 1. München: Verlag moderne industrie, 1987
- [SCH-91] Schwertfeger, K.: Metallurgie des Stranggießens. Düsseldorf: Stahleisen, 1991
- [SEE-83] Seeger, H.: Industrie-Designs. Grafenau: expert, 1983
- [SIE-89] Siegert, H.-J.: Betriebssysteme: Eine Einführung. München: Oldenbourg, 1989
- [SIM-07] url: http://de.wikipedia.org/wiki/Simultaneous_Engineering
- [SIX-07] url: http://de.wikipedia.org/wiki/Six_Sigma
- [SOF-07] url: <http://de.wikipedia.org/wiki/Software>
- [SPU-61] Spur, G.: Beitrag zur Schnittkraftmessung beim Bohren mit Spiralbohrern unter Berücksichtigung der Radialkräfte. Dissertation TU Braunschweig, 1961
- [SPU-83] Spur, G.; Stute, G.; Weck, M.: Fortschritte der Fertigung auf Werkzeugmaschinen, Band 4. Rechnergeführte Fertigung (Beiträge zur Weiterentwicklung der Automatisierungstechnik). München: Hanser, 1983
- [SPU-84] Spur, G.; Krause, F.-L.: CAD-Technik. München: Hanser, 1984

-
- [SPU-97] Spur, G.; Krause, F. L.: Das virtuelle Produkt. Management der CAD-Technik. München: Hanser, 1997
- [STA-99] Stahl-Fibel. Düsseldorf: Stahleisen, 1999
- [STC-74] Steinbuch, K.; Weber, W.: Taschenbuch der Informatik, Band 2 und 3. Berlin: Springer, 1974
- [STE-74] Stevens, W.; Myers, G. J.; Constantine, L.: Structured design. IBM Systems Journal 13, 1974
- [STI-98] Stierlein, S.; Schanz, P.: Si/SiC – Ceramics Low Process Shrinkage – High Temperature Material for the Laser Sinter Process. Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, Texas, 1998
- [STL-08] url: <http://de.wikipedia.org/wiki/STL-Format>
- [STO-84] Storr, A: Planung und Steuerung flexibler Fertigungssysteme. Stuttgart: Selbstverlag ISW, 1984
- [STU-81] Stute, G.: Regelung an Werkzeugmaschinen. München: Hanser, 1981
- [TÖN-82] Tönshoff, H. K.: Schneidstoffe für die spanende Fertigung. Werkstofftechnik-Zeitschrift Industrielle Fertigung 72, Seiten 201 bis 208, 1982
- [TÖN-88] Tönshoff, H. K.; Bußmann, w.: Formfehler bei der Hartbearbeitung: Fräsen gehärteter Führungsflächen. Industrieanzeiger 110, Seiten 35 und 36, 1988
- [TUF-80] Tuffentsammer, K.: Kurzlochbohren mit unterschiedlichsten Werkzeugen möglich. Industrieanzeiger 102, Seiten 38 bis 41, 1980
- [UHL-99] Uhlmann, E.; Krause, F. – L. et al.: Development of a Process Control Strategy for Selective Laser Sintering. Production Engineering Vol VI/1, Seiten 43 bis 46, 1999

-
- [VDA-87] VDA-Flächenschnittstelle (VDAFS) Version 2.0. Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA), 1987
- [VDI-1] VDI-Richtlinie 2219: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung Einführung und Wirtschaftlichkeit von EDM/PDM-Systemen. Berlin: Beuth, 2002
- [VDI-2] VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte: VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, 1993
- [VDI-3] VDI-Richtlinie 2225: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1977
- [VDI-4] VDI-Richtlinie 2243: Recyclingorientierte Gestaltung technischer Produkte: VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, 1993
- [VET-76] Vettin, G.; Warnecke, H.-J.; Gericke, E.: Auslegung der Verkettungseinrichtung flexibler Fertigungssysteme mit Hilfe der Simulation, Proceedings of the CIRP-Seminars on Manufacturing Systems 5. Seiten 155 bis 164, 1976
- [VIC-85] Victor, H.; Müller, M.; Opferkuch, R.: Zerspantechnik. Band I bis III. Berlin: Springer, 1985
- [VIR-07] url: http://de.wikipedia.org/wiki/Virtuelle_Realität
- [VIS-07] url: <http://www.visenso.de/leistungen/software.html>
- [VRM-08] url: <http://de.wikipedia.org/wiki/Vrml>
- [WAL-87] Walker, B.: Konfigurierbarer Funktionsblock Geometriedatenverarbeitung für numerische Steuerungen. ISW Forschung und Praxis, Band 68. Berlin: Springer-Verlag, 1987

-
- [WAR-74] Warnecke, G.: Spanbildung bei metallischen Werkstoffen. Fertigungstechnische Beratung Band 2. Gräfelfing: Resch, 1974
- [WAR-89] Warnecke, H.-J.; Schraft, R.-D.: Industrieroboter. Mainz: Krauskopf, 1989
- [WEC-89] Weck, M.; Ye, G: Elektrische Stell- und Positionsantriebe – Systemaspekte und Anwendungen bei Werkzeugmaschinen ETG-Fachber. 27. Berlin: VDE-Verlag, 1989
- [WES-02] Westkämper, E.; Bullinger, H.-J., Warnecke, H.-J.: Neue Organisationsformen im Unternehmen. Ein Handbuch für das moderne Management: Niemann, J.: Life Cycle Management – Das Paradigma der ganzheitlichen Produktlebenslaufbetrachtung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2002
- [WIR-71] Wirth, N.: Program Development by stepwise refinement. Commun. ACM 14, 1971
- [WIR-74] Wirth, N.: On the composition of well structured programs. Computing Surveys 6, 1974
- [WIT-58] Witing, C.: Creative Thinking. New York: Reinhold, 1958
- [YOU-79] Yourdon, E.; Constantine, L.: Structured design. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 1979
- [ZAN-69] Zangemeister, C.: Zur Charakteristik der Systemtechnik. Berlin: Aufbauseminar Systemtechnik (TU-Berlin), 1969
- [ZAN-70] Zangemeister, C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. München: Wittemannsche Buchhandlung, 1970
- [ZEI-07] url: [http:// www.zeix.ch/de/lexikon/hardware](http://www.zeix.ch/de/lexikon/hardware)
- [ZWI-69] Zwicky, F.: Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild. München: Droemer-Knauer, 1966

- [ZWI-71] Zwicky, F.: Entdecken, Erfinden, Forschen im Morphologischen Weltbild.
München: Droemer-Knauer, 1971