

Schlussbericht



Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Fakultät Maschinenbau

Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung (IFQ)

Entwicklung einer Methodik für eine anforderungs-, werkstoff- und fertigungsgerechte Gussteilgestaltung zur Verkürzung der virtuellen Produktentwicklung

Förderkennzeichen: 03WKU06

Innovativer Regionaler Wachstums Kern AL-CAST

Januar 2009

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>	
1	Kurze Darstellung	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
1.4	Wissenschaftlicher und technischen Stand, an den angeknüpft wurde	18
1.4.1	Stand der Wissenschaft und Technik zum Zeitpunkt des Vorhabensbeginns	18
1.4.2	Genutzte eigene vorliegende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	18
1.4.3	Verwendete Fachliteratur	20
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	23
2	Eingehende Darstellung	23
2.1	Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis im Einzelnen, Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	23
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	23
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	24
2.4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes	24
2.5	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	25
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	26

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Entwicklung einer Methodik zur sinnvollen Nutzung technologie- und bauteileigenschaftsrelevanter Simulationen für eine anforderungs-, werkstoff- und fertigungsge-rechte Gussteilgestaltung zur Verkürzung der virtuellen Produktentwicklung.

Schaffung von theoretischen Voraussetzungen zur Ablösung der herkömmlichen Produktentwicklungskette, die gekennzeichnet ist durch eine lineare Aufeinander-folge von getrennten Simulationen, was dazu führt, dass Fehler und Probleme in der Bauteilentwicklung erst spät erkannt werden, durch eine neue Methode, die davon ausgeht, durch die Anwendung eines erarbeiteten heuristischen Schemas schon früh sinnvolle Simulationen durchzuführen und dadurch Fehler und Probleme in der Bau-teilentwicklung früh zu erkennen und damit rechtzeitig beseitigen zu können.

Ein Schwerpunkt dabei bildet die Verwaltung und Modifizierung aller Ein- und Aus-gangparameter.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt wurde entsprechend der Daten im Zuwendungsbescheid planmäßig am 01.04.2006 begonnen und am 31.08.2008 beendet.

Als wesentliche materielle Voraussetzungen für die Projektdurchführung waren an der ausführenden Stelle, dem IFQ, folgende Anlagen und Ausrüstungen vorhanden:

Simulationslabor, mit

- Simulationssoftware Simtec/WinCast mit folgenden Simulationsmöglichkeiten:
 - Formfüllung,
 - Erstarrung,
 - Gefüge,
 - Spannungen,
 - statische mechanische Eigenschaften.

- Konstruktionssoftware
 - SolidWorks mit:
 - SolidWorks mit 3D und 2D Software sowie umfangreichen Zusatzfunktionen;
 - COSMOS mit verschiedenen Analysewerkzeugen, so auch für die Festigkeitsprüfung und Strukturoptimierung;
 - SolidCAM für die Erstellung und Simulation von CNC-Bearbeitungsprogrammen;

 - Pro/ENGINEER als umfangreiches Konstruktionsprogramm;

- CADFEM ANSYS als FEM-Analysprogramm;
- MySQL SQL-Datenbanksystem, relational, Open-Source-Software
- Umfangreiche PC- und Workstationbasierte Rechentechnik;

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

In Abweichung zum mit dem Innovationskonzept zum Innovativen Regionalen Wachstumskern AL-CAST eingereichten Projektantrag wurde, auf Anraten der Gutachter, kurz vor der Bewilligung des Vorhabens, der Einreichende/Projektdurchführende geändert. An Stelle der im Antrag als Einreichender/Projektdurchführender aufgeführten Firma CastTech (in Gründung) trat die Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, mit dem Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung (IFQ) der Fakultät für Maschinenbau (FMB) als Einreichender/Projektdurchführender ein. Die Gutachter empfahlen, die Firma CastTech erst nach einem erfolgreichen Abschluss des Vorhabens zu gründen. Die Gründung der Firma CastTech wurde aus personellen und organisatorischen Gründen beim Einreichenden/Projektdurchführenden nicht realisiert, da der potentielle Gründer seine Tätigkeit beim Einreichenden/Projektdurchführenden beendete und auch aus dem Wirkungsfeld des Wachstumskerns AL-CAST ausschied. Die wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse des Vorhabens werden vom Einreichenden/Projektdurchführenden für seine weitere FuE-Arbeit auf dem Gebiet der Weiterentwicklung von Simulationssystemen und Strategien für die virtuelle Produktentwicklung und Fragen der optimalen Gestaltung von Fertigungsprozessketten genutzt und umgesetzt. Die wirtschaftliche Umsetzung der Projektergebnisse wird von MFF Magdeburger Forschungsinstitut für Fertigungsfragen e.V. – am Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung entsprechend der geplanten Vorgehensweise realisiert.

Der Ablauf des Vorhabens orientierte sich weitgehend am im Vorhabensantrag aufgestellten Arbeitsplan, mit der Abweichung, dass ein automatischer Ablauf der Optimierungsschleifen nach dem während der Forschungsarbeiten erzielten Erkenntnisstand nicht realisiert werden konnte. Bei der Planung und Beantragung des Vorhabens wurde mittels Meilensteinplanung (Meilenstein 2) das Vorhaben so strukturiert, das beide Wege, also der manuelle Ablauf der Optimierungsschleifen oder der automatisierte Ablauf, zu einem positiven Ergebnis führen. Im Rahmen der Entscheidungskriterien der Meilensteinplanung erfolgte eine entsprechende Änderung der weiteren Projektdurchführung in Richtung eines manuellen Ablaufes, dadurch änderte sich aber nicht das Gesamtziel des Vorhabens.

Zu Beginn der FuE-Arbeiten wurde die „Grundphilosophie“ der zu entwickelnden Methode aufgestellt (siehe Bild 1).

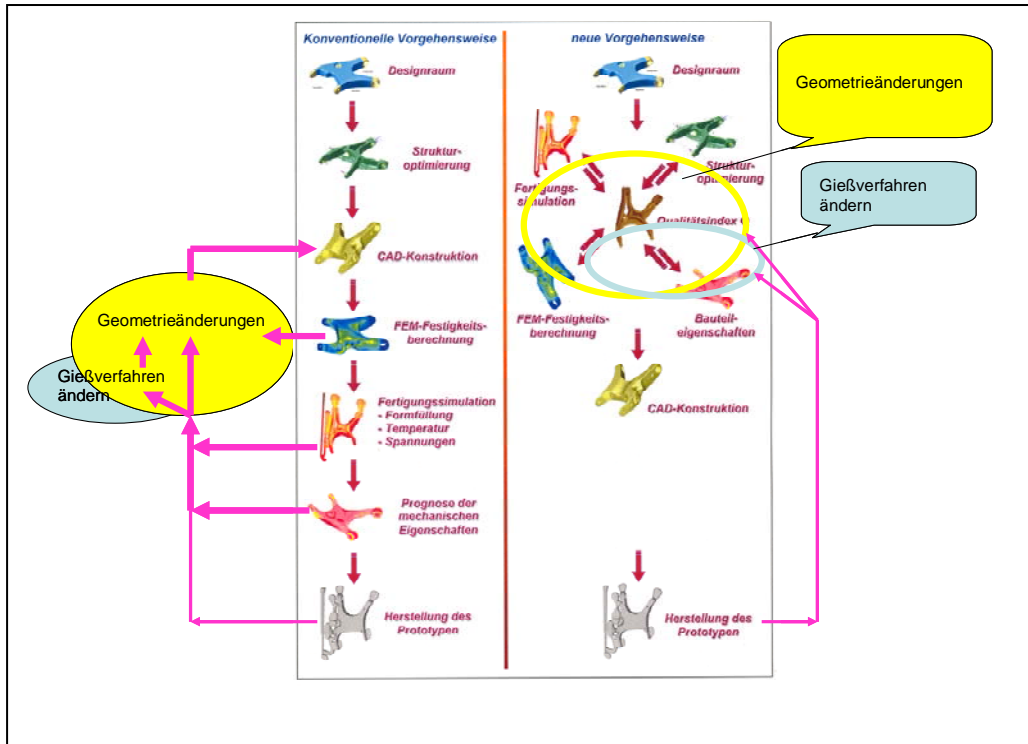


Bild 1: „Grundphilosophie“ der Methode – Gegenüberstellung alter und neuer Vorgehensweise

Auf der Basis der in der Projektplanungsphase aufgestellten Zielstellung wurde diese Grundphilosophie wie folgt ausformuliert:

Die Methodik basiert auf der Idee, die starren, linear aufgebauten Ketten in der Produktentwicklung von Bauteilen, die Aluminiumussteile als Rohteile haben, aufzubrechen.

Die konventionellen Produktentwicklungsketten greifen erst zu einem fortgeschrittenen Zeitpunkt auf die aktuell möglichen Simulationsrechnungen bezüglich der optimalen technologischen Fertigung und der aus dieser Fertigung zu erwartenden mechanischen Bauteileigenschaften zurück. Zeigt sich bei einer derartigen Simulation ein ergebnisrelevantes schwerwiegendes Problem, das die auf Basis der qualitativen und quantitativen Eingangsparameter formulierte Zielfunktion des Bauteilentwicklungsprozesses (Bauteil mit ganz bestimmten quantitativen und qualitativen Eigenschaften) in Frage stellt, muss ein Rücksprung in der Kette zu der Stelle erfolgen, in welcher die negativ wirkenden Parameter verändert werden können. Die veränderten Parameter können auf die Parameter und Ergebnisse der nachfolgenden Entwicklungsschritte relevante Auswirkungen haben, so dass jeweils Gestaltungsschritte erforderlich sind. Diese Prozedur kann sich iterativ wiederholen.

Es wurden als erster FuE-Arbeitsschritt umfangreiche Analysen und Bewertungen möglicher Varianten der Verknüpfung der Fertigungssimulation mit den Entwicklungsarbeiten in den einzelnen Stufen der Produktentwicklungskette durchgeführt. Dabei wurde der Schwerpunkt auf die sinnvolle Nutzung von Simulationen in den einzelnen Stufen gelegt und es wurde jeweils die Frage beantwortet, wie sich eine

fertigungstechnische Optimierungsschleife auf den späteren Serienfertigungsprozess zeit-, kosten- und ressourcenmäßig auswirkt.

Dazu wurden vorhandene Ergebnisse, Daten usw. verschiedener Bauteilentwicklungsprozesse aus eigenen zurückliegenden Arbeiten (Mitwirkung an zahlreichen Bauteilentwicklungsprozessen, in verschiedenen Stadien, im Rahmen von Simulationen, Technologieentwicklungen und –optimierungen, Werkstoffentwicklungen und –optimierungen u.a.), aus entsprechenden Arbeiten bei den AL-CAST-Partnern und aus Veröffentlichungen genutzt. Das Hauptergebnis dieser Arbeiten war die Aufstellung eines heuristischen Schemas, das auf einer Achse die Bauteilentwicklungsprozessstufen und auf der anderen Achse die Fertigungssimulationsarten auflistet. In den jeweiligen Schnittmengen des Schemas wird betrachtet, welche Daten verfügbar sind und ob mit diesen generell die relevante Simulationsart durchführbar ist, und ob diese Simulation auch entwicklungstechnisch, technologisch und wirtschaftlich sinnvoll ist. Das folgende Bild 2 zeigt einen Teil des Schemas:

		Fertigungssimulation					
		Formfüllung	Erstarrung	Gefüge	mechanische Eigenschaften	mechanische Bearbeitung	Montage
Bauteilentwicklungsprozess	Bauraumdefinition	nicht sinnvoll	nicht sinnvoll	nicht sinnvoll	nicht sinnvoll	nicht sinnvoll	nicht sinnvoll
	Struktur-optimierung	eingeschränkt sinnvoll	eingeschränkt sinnvoll	eingeschränkt sinnvoll	eingeschränkt sinnvoll	nicht sinnvoll	nicht sinnvoll
	CAD-Konstruktion Fertigteil	sinnvoll	sinnvoll	sinnvoll	sinnvoll	sinnvoll	sinnvoll
	Prototypenfertigung	sinnvoll	sinnvoll	nicht immer sinnvoll*	nicht immer sinnvoll*	sinnvoll	sinnvoll
	Prototypen-erprobung	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant	Ergebnisse nutzbar	kann sinnvoll sein**	sinnvoll
	Überarbeitung CAD-Konstruktion Fertigteil	sinnvoll	sinnvoll	sinnvoll	sinnvoll	sinnvoll	sinnvoll
	Rohteil-konstruktion	sinnvoll	sinnvoll	sinnvoll	sinnvoll	sinnvoll	nicht sinnvoll
	Einformschema Formplattenbelegung	sinnvoll	sinnvoll	sinnvoll	sinnvoll	eingeschränkt sinnvoll	eingeschränkt sinnvoll
	Urformwerkzeug-konstruktion	sinnvoll	sinnvoll	sinnvoll	sinnvoll	eingeschränkt sinnvoll	eingeschränkt sinnvoll
	Urformwerkzeug-herstellung	Ergebnisse nutzbar	Ergebnisse nutzbar	Ergebnisse nutzbar	Ergebnisse nutzbar	Ergebnisse nutzbar	Ergebnisse nutzbar

Bild 2: Heuristisches Schema zur Beurteilung der sinnvollen Durchführung von fertigungstechnischen Simulationen in der Produktentwicklungskette (Ausschnitt)

Ein Schwerpunkt bei den Arbeiten zur Aufstellung und Erprobung des heuristischen Schemas waren Betrachtungen in der Hinsicht, ob und wie die jeweilige Fertigungssimulation im jeweiligen Entwicklungsschritt im Rahmen einer Optimierungsschleife den späteren Serienfertigungsprozess zeit-, kosten- und ressourcenmäßig positiv beeinflussen kann, so dass die durch die zusätzlich in den Bauteilentwicklungsprozess eingeschobene Simulation verursachten Zusatzaufwendungen (Zeit,

Personalkosten, Rechnerkosten, usw.) durch die damit erzielten Prozessverkürzungen und Optimierungen aufgehoben und amortisiert werden. Es wurden Wirkungskriterien des Einflusses der im Untersuchungsabschnitt des Bauteilentwicklungsprozesses relevanten fertigungstechnischen Optimierungsschleifen auf den späteren Serienfertigungsprozess, geordnet nach den Parametern *Zeitbeeinflussung*, *Kostenbeeinflussung* und *Ressourcenbeeinflussung*, aufgestellt.

Ein nächster Arbeitskomplex befasste sich schwerpunktmäßig mit der Spalte des heuristischen Schemas „*mechanische Eigenschaften*“. Ausgangspunkt dieser Überlegungen war die Tatsache, dass die Ermittlung der statischen mechanischen Eigenschaften auf der Basis durchgeführter gießereitechnologischer Simulationen und über die daraus abgeleitete Simulation der Gefügeausbildung (bei Aluminiumlegierungen speziell der Dendritenarmabstand DAS) erfolgt. Dort, wo die gießereitechnologische Simulation im heuristischen Schema auf einer Stufe (Zeile) der Produktentwicklungskette als sinnvoll erkannt wurde, wurde untersucht, ob mit der vorhandenen Datenmenge (Bauteildaten und Randbedingungen) rechentechnisch weiter gearbeitet werden kann, so dass eine Gefügesimulation sinnvoll durchführbar ist. Konnte die Realisierbarkeit einer Gefügesimulation als positiv entschieden werden, wurde weiter untersucht, ob wiederum alle notwendigen Bauteildaten und Randbedingungen vorliegen, so dass die Simulation der wichtigsten statischen Bauteileigenschaften durchführbar ist.

Die jeweils minimal notwendigen Produktdaten und Randbedingungsparameter wurden herausgearbeitet und aufgelistet.

Es wurden Betrachtungen angestellt, ob an der jeweiligen Stelle des Bauteilentwicklungsprozesses die Berechnung der statischen mechanischen Bauteileigenschaften auch sinnvoll ist, oder ob spätere konstruktive und/oder fertigungstechnische Einflüsse und Veränderungen des Produktdatensatzes die berechneten statischen Bauteileigenschaften so verändern, dass diese als nicht mehr relevant eingestuft werden müssen. So wurde beispielsweise im Bereich der Fertigungssimulation herausgearbeitet, dass die berechnete statische Bauteilfestigkeit und besonders das dafür als Grundlage berechnete Gefüge für Leichtmetalllegierungen von geringerer Bedeutung ist, da für das Zerspanen von Leichtmetallen die Variation der Schnittwerte in Abhängigkeit des Gefüges fast nicht vorhanden ist bzw. gering ist. Bei Eisenwerkstoffen steht demgegenüber ein großes Spektrum variierten Schnittwerte zur Verfügung in Abhängigkeit des Gefüges, so dass hier eine frühzeitige Simulation des Gefüges frühzeitige objektive Eingangsdaten für eine Fertigungssimulation erbringt, die wiederum frühzeitig auf entstehende Probleme und Fehlerquellen in der Produktentwicklungskette hinweist, die dann wiederum durch entsprechende Ergebnissrückführung am Prozesskettenbeginn Geometrie- und /oder Parameteränderungen induzieren kann.

In diesem Arbeitskomplex wurden auch Betrachtungen angestellt hinsichtlich des Einflusses in der Produktentwicklungskette durchgeführter Topologieoptimierungen der jeweils vorliegenden Bauteilgeometrie auf den weiteren Produktentwicklungspro-

zess, besonders auf Eigenschaftsberechnungen. Es konnte herausgearbeitet werden, dass die erzeugte Topologiegeometrie, die gekennzeichnet ist durch grobe Stufen und Wanddickenschwankungen, zu falschen Simulationsergebnissen bei der Bauteileigenschaftsberechnung führen kann. Wie bereits oben erörtert, läuft die Berechnung der statischen Bauteileigenschaften über die gießereitechnologische Simulation und weiter über die Simulation des Bauteilgefüges. Die durch die Topologieoptimierung erzeugte grobe Struktur der Geometrie lässt in der Bauteilstruktur, besonders in Bauteilwänden, starke Sprünge der Querschnitte entstehen. Das gießereitechnologische Simulationsprogramm interpretiert Querschnittsverdickungen als thermische Zentren, also Bereiche die spät abkühlen und somit Lunker entstehen lassen können, bzw. durch die langsame Abkühlung Gefüge entstehen lassen, die über geringere statische Festigkeiten verfügen. Für diese Querschnitte werden also geringere statische Festigkeiten berechnet, als später, nach der Rückführung und Glättung der Ergebnisse der Topologieoptimierung in die aktuelle Bauteilgeometrie, tatsächlich vorliegen. Weiterhin werden in der Topologieoptimierung bestimmte Bauteilbereiche abgebaut, also aus der Geometrie auf Basis der berechneten Belastungskollektive entfernt, die später konstruktiv aus bestimmten Gründen doch wieder zur Bauteilgeometrie hinzu gefügt werden. An dieser Stelle würde also unmittelbar in der Topologieoptimierungsschleife keine Bauteilfestigkeitsberechnung erfolgen können, obwohl hier später doch wieder Material vorhanden ist.

Ein Ansatz zur „gefahrlosen“ Einordnung der Topologieoptimierung in die Produktentwicklungskette ist hierbei die verstärkte Berücksichtigung der so genannten Frozen-Bereiche („eingefrorene Bereiche“). Das sind Bereiche aus der Bauraubeschreibung, die Funktionsflächen enthalten, die auf keinen Fall im Zuge der Topologieoptimierung abgebaut werden dürfen. Die Frozen-Bereiche müssen an Beginn von Produktentwicklungsketten definiert werden. Zur Glättung der Topologiegeometrie wurden in der Literatur und in CA-Systemen „handwerkliche“ Strategien gefunden. So bietet beispielsweise das Programmpaket der Firma MAGMA automatisierte Programmroutinen, mit denen eine Geometrieglättung möglich ist. Das beim Projektbearbeiter vorhandene „Haussimulationssystem“ WinCast[®] der Firma RWP GmbH verfügt leider über derartige Software z.Z. nicht. Es muss manuell durch die Verschiebung von Netzknoten eine Geometrieglättung erfolgen. Da WinCast[®] aber mit einem Dreiecksnetz arbeitet, ist dieser Prozess relativ einfach durchführbar.

Eine Betrachtung des Einflusses der stark gestuften Ergebnisgeometrie der Topologieoptimierung und der dadurch induzierten starken Wanddickenschwankungen wurde bis zur mechanischen Bearbeitung fortgesetzt. Es kommt auch hier zu erheblichen Fehlinterpretationen bei der fertigungstechnischen Simulation. Um die gestufte Rohteiloberfläche in die glatte Fertigteiloberfläche durch spanende Bearbeitung zu überführen, erzeugen die zur fertigungstechnischen Simulation genutzten CAM-Module entsprechende Bearbeitungsstrategien (Werkzeuge, Schrubb- und Schlichtzyklen, Arbeitswerte usw.), die erheblich von den „eigentlichen“ Bearbeitungsstrategien für eine nicht gestufte Rohteiloberfläche abweichen, wesentlich mehr Material mit mehreren Werkzeugen und geringeren Arbeitswerten abtragen müssen und somit wesentlich höhere Bearbeitungszeiten und somit Bearbeitungskosten simulieren, als

objektiv notwendig sind. Es müssen zur Verhinderung dieser Problematik die gleichen „handwerklichen“ Strategien und Verfahrensweisen im CAD-Bereich, mit denen die Stufenstruktur der Ergebnisse von Topologieoptimierungen effektiv geglättet werden können, angewendet werden, bzw. da die Fertigungssimulation in der Regel zeitlich nach der Gießereisimulation erfolgt, sind die übergebenen Eingangsgeometrien bereits geglättet.

Ein sehr umfangreiches Arbeitsprogramm widmete sich der Erfassung, Kategorisierung und Handhabung der in Produktentwicklungsketten sehr zahlreich vorhandenen bzw. erzeugten und sehr unterschiedlich definierten Ein- und Ausgangsparameter.

In jeder Stufe der Produktentwicklungskette werden die Eingangsparameter im Produktentwicklungsschritt und in jeder eingefügten Simulation zu Ausgangsparametern transformiert. Dabei kann ihr Inhalt bzw. Wert verändert werden (z.B. erfolgt bei der Auswertung einer Gießereisimulation der Vorschlag zur Vergrößerung einer Wanddicke und damit eine Veränderung der entsprechenden Koordinate im CAD-Datensatz), oder der Inhalt bzw. Wert kann gleich bleiben.

Die gebildeten Ausgangsparameter stehen der nächsten Stufe als Eingangsparameter zur Verfügung oder werden erst in späteren Stufen bzw. am Entwicklungsprozessende benötigt.

Die Eingangsparameter typischer Produktentwicklungsketten, in denen Gussteile das Rohteil bilden, wurden analysiert und kategorisiert. Es wurden zwei Parameterhauptgruppen,

- die quantitativen Parameter und
- die qualitativen Parameter

gebildet.

Diese Parameterhauptgruppen wurden weiter untergliedert.

Da die Ausgangsparameter durch Transformation aus Eingangsparametern entstehen, wurde für diese die gleiche Kategorisierung angewendet.

Das folgende Bild 3 zeigt einen Ausschnitt aus der erarbeiteten Parameterkategorisierung.

Auf der Basis dieser Kategorien wurden drei unterschiedliche Verarbeitungsweisen der Parameter herausgearbeitet und gruppiert:

- Parameter, die Schritt für Schritt vom einem Simulationssystem bzw. Produktentwicklungskettenglied zum nächsten gereicht werden (das sind vorwiegend quantitative geometrische Parameter).
- Parameter, die in Sprüngen nur zu einigen Simulationssystemen bzw. Produktentwicklungskettengliedern gereicht werden (das können alle Parameterkategorien sein). Diese Parameter müssen am Entstehungsort in der Produktentwicklungskette aufgenommen, zentral verwaltet und dem Produktkettenglied zur Verfügung gestellt werden, das diese als Eingangsparameter benötigt.

- Parameter, die nur für die Dokumentation des fertigen Bauteils benötigt werden. Diese Parameter müssen am Entstehungsort in der Produktentwicklungskette aufgenommen und zentral gespeichert werden.

<p>1. Quantitative Parameter</p> <p>1.1. Geometrische quantitative Parameter</p> <ul style="list-style-type: none"> • Designraum • Anschlussmaße (Berührungsflächen (Wirkflächen nach Mathiesen) mit benachbarten Baugruppen, Aggregaten, Produkten oder Nutzern (z.B. Handflächenabmessungen und Profile beim Knauf von Schalthebeln)) • Definierte Funktionsabstände, Winkel und Lagebeziehungen <p>1.2. Physikalische quantitative Parameter</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lastkollektive • thermische Belastungen • Schwingungen • Drücke • Umgebungsmedien <p>1.3. Kaufmännische quantitative Parameter</p> <ul style="list-style-type: none"> • Stückzahlen und Losgrößen • Produktionstermine • Kostentargets <p>2. Qualitative Parameter</p> <p>2.1. Geometrische qualitative Parameter</p> <ul style="list-style-type: none"> • Oberflächenqualitäten, besonders auch an den Berührungsflächen (Wirkflächen nach Mathiesen), z.B. Rauheit, an Sichtflächen Optik und/oder Haptik • Akustisches Verhalten des Bauteils <p>2.2. Umweltechnische qualitative Parameter (physikalisch und/oder chemisch)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Umgebungsmedien im und um den Designraum (Luftfeuchte, Gase, Flüssigkeiten, Temperatur, Strahlung, Chemikalien,...) -> Korrosionsverhalten des Bauteils • Emissionen des Bauteils (Geruch). <p>2.3 Kaufmännische qualitative Parameter</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bevorzugung bestimmter Werkstoffe und Zulieferer • Bevorzugung bestimmter Fertigungsverfahren und Fertiger
--

Bild 3: Ausschnitt aus der aufgestellten Parameterkategorisierung

Die kategorisierten relevanten Ausgangsparameter wurden hinsichtlich einer rechen-technischen und organisatorischen Parametervereinheitlichung mit den relevanten Eingangsparametern verglichen. In Auswertung der Arbeiten zu den Ausgangs- und Eingangsparametern wurde aus der festgestellten differenzierten Parameterstruktur die Notwendigkeit des Aufbaus einer Datenbank zur Parameterspeicherung und Verwaltung abgeleitet. In diese Datenbank werden Entscheidungswerkzeuge integriert, mit denen die Parameter logisch verwaltet werden. Die eingegangenen Ausgangsparameter müssen gegebenenfalls in Eingangsparameter für andere Prozesskettestufen bzw. Prozesskettenglieder transformiert werden. Dabei können die Prozesskettenglieder, die die transformierten Eingangsparameter empfangen, in der Produktentwicklungskette in einer tieferen (späteren) Ebene liegen, der normale Produktentwicklungsfluss läuft von oben nach unten, sie können aber auch in einer höheren Ebene liegen, im Zuge von Rückschleifen (Rücksprüngen). Außerdem kann

hier eine Beurteilung der Parameter erfolgen hinsichtlich ihrer Qualität in Bezug auf die Zielfunktion der Produktentwicklungskette.

Die aufgestellte Kategorisierung der Ausgangs- und Eingangsparameter war auch hilfreich bezüglich der für die Schnittstellenproblematik wichtigen rechen-technischen Beurteilung und Unterscheidung der Parameter in Richtung einer Automatisierung der Optimierungsschleifen. Rechen-technisch relativ unproblematisch sind die quantitativen geometrischen Parameter.

Besonders für die qualitativen aber auch für einige quantitative Parameter (z.T. physikalische, generell umwelttechnische und kaufmännische Parameter) ließ sich keine sinnvoll realisierbare Automatisierungsmöglichkeit erkennen.

Die rechen-technisch verwaltbaren Ein- und Ausgangsparameter können relativ problemlos über die in der CA-Welt vorhandenen und erprobten „Standard“-Schnittstellen (STL, VDA, IGES usw.) gehandhabt werden und würden einen automatisierten Datenaustausch erlauben. Teilweise muss aber auch hier über manuell bediente Zwischenschritte, zum Beispiel zur Flächenreparatur, gegangen werden.

Die problematischen quantitativen und die qualitativen Parameter lassen sich über diese „Standard“-Schnittstellen nicht ohne weiteres übertragen. Die Parameterdatenbank ist das zentrale Verwaltungsmodul der zu entwickelnden Methodik.

Ein weiterer zentraler Untersuchungsgegenstand war der Qualitätsindex Q . Es wurde untersucht, inwieweit der Qualitätsindex als ein berechenbarer und graphisch darstellbarer komplexer Parameter einen quantifizierbaren Vergleich der bisher in der Produktentwicklungskette durch Simulation und Berechnung ermittelten Bauteileigenschaften der bis hierher definierten virtuell vorliegenden Bauteilvariante auf der Basis der Variation der relevanten, die Bauteileigenschaften marginal beeinflussenden Produktentwicklungsparameter, wie Bauteilgeometrie, Bauteilwerkstoff (Gusslegung), Fertigungsprozessgestaltung (Rohteilfertigung mit dem Schwerpunkt der Form- und Gießverfahren mit ihren Prozessparametern und Werkzeugen) und der Wärmebehandlung zulässt, auf dessen Basis entschieden werden kann, ob die bisherige Ausgestaltung des Produktentwicklungsprozesses ein entsprechend der definierten Ergebnisparameter (Bauteileigenschaften, Fertigungszeiten, Kosten usw.) zu einem optimalen Ergebnis führt, oder ob relevante Parameter verändert werden müssen und dementsprechend eine neue Zyklusschleife des Produktentwicklungsprozesses durchlaufen werden muss.

Dazu wurde der Begriff *Qualitätsindex* und seine wissenschaftliche und technisch-technologische Bedeutung nochmals eingehend analysiert. Es wurde herausgearbeitet, dass der Qualitätsindex eingeführt wurde, um

- eine quantitative Bewertung hinsichtlich der Duktilitäts- und Festigkeitseigenschaften von Gussstücken verschiedener Legierungen und
- einen Vergleich der Eigenschaften eines Gussstückes, gefertigt mit verschiedenen Form- und Gießverfahren, Schmelzebehandlungen und Wärmebehandlungen, also mit unterschiedlichen technologischen Fertigungsprozessketten, durchführen zu können.

Für einen bestimmten Q-Wert (z.B. $Q = 400$), dieser Wert verkörpert eine nach rechts abfallende Gerade im R_m -A-Diagramm, können unendlich viele Gusstücke gleicher Geometrie aber mit unterschiedlichen Werkstoffen, Legierungen, Behandlungen und Fertigungsprozessketten auf dieser Gerade aufgetragen werden, die nach der Formel von DROAZNY ($Q = R_m + a \cdot \log A$) das gleiche Verhältnis von R_m zu A aufweisen. Die Konstante a verkörpert dabei die große Vielfalt der Werkstoffe, Gefügezustände, einschließlich Ungängen (Lunker, Gas- und Schwindungsporen, Einschlüsse), Fertigungsverfahren und Behandlungszustände. Auf der Basis verschiedener theoretischen Ansätze, wie der Formel von STROPPE ($Q = R_m \cdot \{1 + [A - n \cdot (1 + \ln A)] \cdot \ln(100 \cdot A)\}$), wurde beim Projektbearbeiter für das vorhandene Gießereisimulationssystem ein Berechnungsmodul für die Simulation des Qualitätsindex Q entwickelt. Die Werte von R_m und A entstammen wiederum Simulationen der statischen mechanischen Eigenschaften.

Grundlage für die Simulationen von R_m und A ist die Simulation des Gefüges, dabei speziell des Dendritenarmabstandes DAS. Der DAS wird wiederum über spezielle Funktionen aus der lokalen Erstarrungszeit abgeleitet, deshalb erfolgt als Grundlage für die DAS-Simulation die Simulation des Temperaturfeldes. Da eine simulationstechnische Ermittlung des Qualitätsindex also nur über eine DAS-Simulation nach dem derzeitigen Stand der Technik möglich ist, lässt sich Q also nur für Aluminiumlegierungen ermitteln, die bei der Erstarrung Dendriten ausbilden. Das sind in der Regel untereutektische Aluminiumlegierungen. Die Nutzung des Q-Index als Entscheidungsmerkmal für manuelle oder automatisierte Optimierungsschleifen, als zentrale Schalt- und Entscheidungsstelle zwischen den Simulationssystemen, ist also nur bei untereutektischen Aluminiumlegierungen möglich. Deshalb ist im Rahmen der Strategie der Qualitätsindex Q nur für den eingeschränkten Bereich der untereutektischen Aluminiumlegierungen als Entscheidungskriterium nutzbar, was seine universelle Nutzung einschränkt.

Trotzdem wurden die Untersuchungen zur Nutzung des Qualitätsindex weitergeführt. Dazu wurden die definierten Parameterkategorien mit Unterkategorien herangezogen. Zu Beginn der Analysen wurden die Anforderungen und Vorgaben des Kunden, als die Eingangsinformation zum Start der Produktentwicklungskette, auf die Parameterkategorien mit Unterkategorien projiziert.

Weiterhin wurde herausgearbeitet, dass und wie aus diesen zahlreichen Kundenanforderungsparametern vom Produktentwickler (Konstrukteur) die ideale, bzw. optimale Paarung Werkstoff – Geometrie zu ermitteln ist. Eine gefundene Werkstoff-Geometrie-Paarung verkörpert einen ganz bestimmten Widerstand gegen die Belastungskollektive (entspricht den statischen und dynamischen Bauteilfestigkeiten). Dieses „Belastungskollektivwiderstandsmoment“ resultiert immer aus einem Verhältnis beider Partner der Paarung und ist die Zielfunktion des Optimierungsprozesses der Paarungsfindung. Dieses „Belastungskollektivwiderstandsmoment“ muss immer, entsprechend Kundenanforderung, konstant gehalten werden. Dabei können theoretisch beide Partner unendlich oft variiert werden, bei Einhaltung der Konstanz der Zielfunktion, dem „Belastungskollektivwiderstandsmoment“, so dass theoretisch unend-

lich viele Werkstoff-Geometrie-Paarungen gefunden werden können. Es wurden Restriktionen aus den Kundenanforderungen auf der Basis der definierten Parameterkategorien mit Unterkategorien für jeden Paarungspartner (also für den Werkstoff und dann für die Bauteilgeometrie) abgeleitet. Es wurde herausgearbeitet, dass diese aufgeführten, aus Kundenanforderungen resultierenden Restriktionen jeweils nur auf einen Partner der Werkstoff-Geometrie-Paarung oder auf beide Partner wirken können. Die Wirkung auf beide Partner kann gleichstark oder ungleichstark sein. Bei der Beurteilung der Ergebnisse der Simulationen über den Q-Index muss beachtet werden, dass der Q-Wert nicht konstant über alle Bauteilquerschnitte (Gussteilquerschnitte) verteilt ist. Das ist damit begründet, dass die Erstarrung der Schmelze, und somit das lokale Erstarrungsintervall, vom jeweiligen Bauteilquerschnitt abhängig ist. Dementsprechend ist das Bauteilgefüge und somit auch die simulierbaren mechanischen Bauteileigenschaften (R_m , A , $Rp_{0,2}$) nicht konstant über den Bauteilquerschnitt verteilt.

Die stellt ein weiteres entscheidendes Hindernis bezüglich der Nutzung des Q-Indexes als Entscheidungsmerkmal für automatisierte Optimierungsschleifen dar, da nicht mit einem konstant im Bauteil verlaufenden Merkmal gearbeitet werden kann.

Darüber hinaus wurde betrachtet, dass die Ergebnisse eines Simulationssystems die Eingangsparameter (zum Teil als transformierte Ausgangsparameter) der anderen beteiligten Simulationssysteme verändern und damit auch die Simulationsergebnisse der anderen beteiligten Simulationssysteme beeinflussen. So hat beispielsweise eine bei der FEM-Berechnung vorgeschlagene Verdickung einer Rippe, da sonst eine bestimmte Belastung dieser geometrischen Struktur zur einer ungewollten Verformung führen würden, eine Auswirkung im Rahmen der Gießereisimulation bezüglich Formfüllung und Erstarrung (Massenanhäufung führt zur Hot-Spot-Bildung führt zur Lunkerung).

Dieser Umstand kann über den Qualitätsindex nicht koordiniert werden.

Es musste also ein zweiter Regelkreis aufgebaut werden, der alle beteiligten Simulationssysteme verbindet und der nicht über den Q-Index läuft. In diesem Regelkreis müssten die Auswirkungen der Simulationsergebnisse auf die anderen Simulationssysteme abgeglichen werden. Dabei musste besonders auch eine „Verarbeitung“ der restriktiven und besonders auch der qualitativen restriktiven Parameter aus den Kundenanforderungen, die nicht mit dem Q-Index direkt abgebildet werden können, erfolgen.

Die Notwendigkeit des Aufbaus dieses zweiten, auch von qualitativen Parametern stark beeinflussten Regelkreises musste als ein k.o.-Kriterium für die Automatisierung der Optimierungsschleifen angesehen werden.

Als Ergebnis dieser Betrachtungen musste weiterhin festgestellt werden, dass der Qualitätsindex Q auch nicht als ein generelles Entscheidungsmerkmal für manuelle Optimierungsschleifen geeignet ist.

Diese Erkenntnisse knüpften an die bereits getroffenen Ergebnisaussagen, dass der Aufbau einer Datenbank als zentrales Verwaltungs- und Entscheidungsmodul der zu entwickelnden Methodik unbedingt notwendig ist.

Im Rahmen des Meilenstein 2 wurden, wie oben bereits auf Seite 4 beschrieben, die entsprechenden Entscheidungen für die Weiterführung der Methodenentwicklung gefällt, in der Hinsicht, einen Verzicht auf eine durchgängig automatisierte Lösung und einen Verzicht auf den Qualitätsindex als zentrale Schaltstelle vorzunehmen, dafür aber den Aufbau einer manuellen Lösung mit einer Datenbank als „Schaltzentrale“ zu realisieren.

Dementsprechend wurden die Arbeiten zur Entwicklung der Methodik fortgeführt und zum Abschluss gebracht.

Es wurden dazu anfänglich weitere umfangreiche Untersuchungen bezüglich Datenhändlerbarkeit, nun unter dem Aspekt der Nutzung einer zentralen SQL-Datenbank, angestellt. Es wurden wiederum die definierten zwei Parameterkategorien mit Unterkategorien als Differenzierungskriterien herangezogen.

Die quantitativen geometrischen Parameter (beispielsweise die Ausgangsparameter einer Topologieoptimierung) können über die in der CA-Welt üblichen „Standard“-Schnittstellen als komplexe geometrische Modelle übertragen werden. Gegebenenfalls notwendige manuelle Eingriffe (z.B. Flächenreparatur, Glättung der vom Topologieoptimierungsprogramm überarbeiteten Bauteilgeometrien) müssen manuell am CA-System mit vorhandenen Algorithmen vorgenommen werden.

Alle anderen Parameter werden über die SQL-Datenbank gehandelt, wobei durch entsprechende Kriterien entschieden wird, ob die Parameter für nachfolgende Simulationssysteme und Berechnungsmodule zu Eingangsparametern zu transformieren sind, oder ob sie gespeichert werden und erst am Ende der Produktentwicklungskette in die Abschlussdokumentation einfließen.

In der auf Seite 4 beschriebenen „Grundphilosophie“ wurde, auf der Basis der bis hierher erzielten Erkenntnisse, besonders bezüglich des Parameterflusses, als Vorbereitung der Konzeption der Datenbank, die konventionelle Seite (linke Seite des Schemas) der Darstellung wie im Folgenden Bild 4 gezeigt wird, modifiziert:

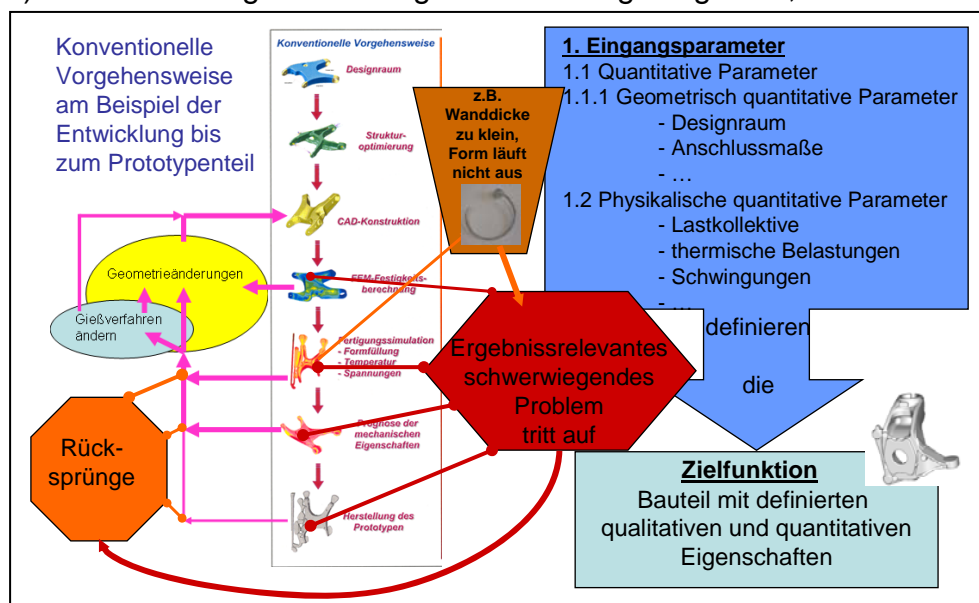


Bild 4: Modifizierte Darstellung der konventionellen Seite der „Grundphilosophie“

Als Ergebnissdarstellung der FuE-Arbeiten im Vorhaben wurde in der auf Seite 4 beschriebenen „Grundphilosophie“ die neue Vorgehensweise (rechte Seite des Schemas), mit einer relationalen Datenbank als zentrale „Datenschaltstelle“ wie im Folgenden Bild 5 gezeigt wird, modifiziert:

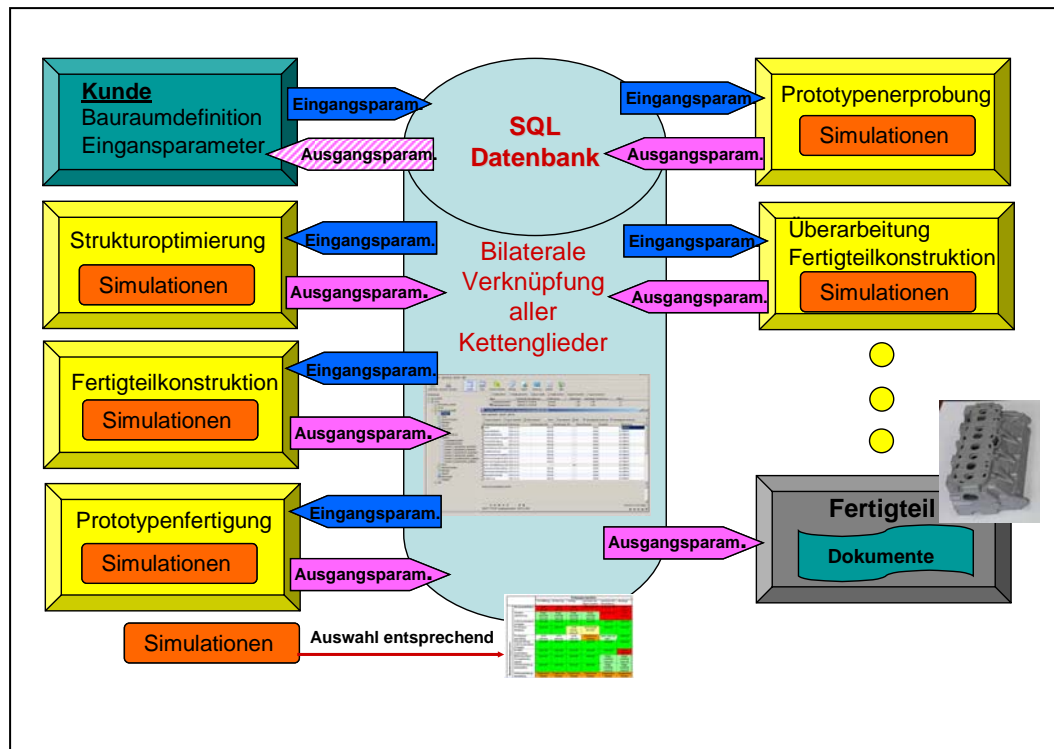


Bild 5: Einführung einer Datenbank zur Eingabe, Speicherung, Verwaltung und Ausgabe aller Parameter

Es begannen nun intensive Arbeiten zur Konzeption einer Datenbank. Dazu wurden die bisher erarbeiteten Lösungen zur Fragen der Ein- und Ausgangsparameter und der rechentechnischen und organisatorischen Parametereinheitlichung (Siehe oben Seite 10) nochmals bearbeitet hinsichtlich der Handhabung dieser Parameter über eine relationale Datenbank. Das folgende Bild 6 zeigt derartige Arbeiten:

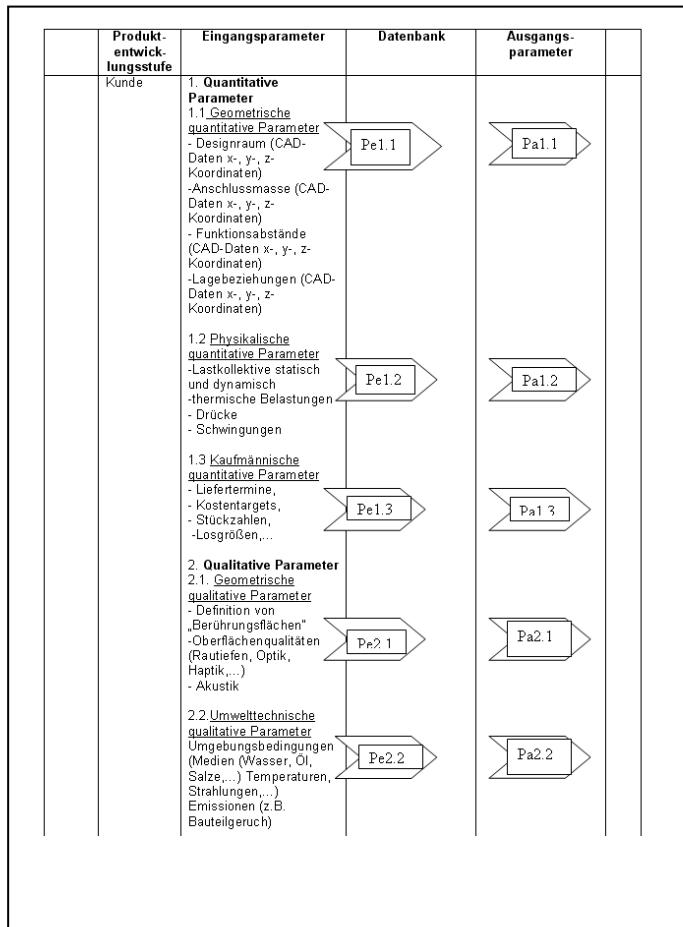


Bild 6: Ausschnitt aus einem Arbeitsblatt zur Analyse des Parameterflusses für das Datenbankkonzept

Auf der Basis dieser analytischen Arbeiten wurde das Datenbankprinzip aufgestellt:

Es gibt eine strukturierte Menge von Eingangsparametern (Kundendaten). Diese Daten müssen in der Datenbank als Eingangsinformation abgelegt werden und werden im Weiteren als Datenbanksausgangsparameter für die nachfolgenden Programme und Systeme der Produktentwicklungskette bereitgestellt. Die Module der Produktentwicklungskette holen sich die für sie jeweils relevanten Ausgangsparameter aus der Datenbank als Eingangsparameter für ihre Berechnungen, Simulationen usw. Im Ergebnis der Aktivitäten in einem Modul der Produktentwicklungskette werden Parameter verändert, diese werden als neue Eingangsparameter der Datenbank übergeben. Unveränderte Parameter werden der Datenbank zurückgeführt bzw. bleiben in der Datenbank.

In tabellarischer Form wurde die Handhabung der unterschiedlichen Parameterkategorien in einer Datenbank „durchgespielt“. Das folgende Bild 7 zeigt einen Ausschnitt aus derartigen Arbeiten für *kaufmännische quantitative Parameter* an einem Beispiel:

Eingangsparameter Modul der Produktentwicklungskette	Liefertermin	Kostentarget [€/Stück]	Jahresstückzahl [Stück]	Losgröße [Stück]	Bemerkung
Kunde	31.12.2010	≤ 250,00	20.000	20	T. muss eingehalten werden
Bauraumdefinition	31.12.2010	≤ 250,00	20.000	20	Parameter nicht verändert
Struktur- optimierung	31.12.2010	≤ 250,00	20.000	20	Parameter nicht verändert
CAD-Konstruktion Fertigteil	31.12.2010	≤ 250,00	20.000	20	Parameter nicht verändert
Prototypen- fertigung	31.12.2010	≤ 250,00	20.000	20	Parameter nicht verändert
Prototypen- erprobung	31.12.2010	≤ 250,00	20.000	20	Parameter nicht verändert
Überarbeitung CAD-Konstruktion Fertigteil	31.12.2010	≤ 250,00	20.000	20	Parameter nicht verändert
Rohteil- konstruktion	31.12.2010	≤ 250,00	20.000	20	Parameter nicht verändert
Einformschema Formplattenbelegung	31.12.2010	≤ 250,00	20.000	20	Parameter nicht verändert
Urformwerkzeug- konstruktion	31.12.2010	≤ 250,00	20.000	20	Parameter nicht verändert
Urformwerkzeug- herstellung	31.12.2010	≤ 250,00	20.000	20	Parameter nicht verändert
Form- und Gießprozess (Gussstückfertigung)	31.12.2010	> 320,00	20.000	20	*)
Gussstück-nachbehandlung	31.12.2010	≤ 250,00	20.000	20	Parameter nicht verändert
Mechanische Bearbeitung (Fertigteilfertigung)	31.12.2010	≤ 250,00	20.000	20	Parameter nicht verändert
Baugruppenmontage	31.12.2010	≤ 250,00	20.000	20	Parameter nicht verändert
Auslieferung	31.12.2010	≤ 250,00	20.000	20	Parameter nicht verändert

*) Die abschließende gießereitechnologische Simulation hat ergeben, das Gusstücke in der geforderten Qualität, Jahresstückzahl und Liefertermin nur gefertigt werden können, wenn ein aufwendigeres Form- und Gießverfahren zur Anwendung gelangt. Es müssen Entscheidungen gefällt werden:

a) Mit dem Kunden über der neuen Preis verhandeln
b) Rücksprung in der Produktentwicklungskette zur Rohteilkonstruktion

Bild 7: Beispiel für die tabellarische Erprobung der Parameterhandhabung an einem Beispiel für kaufmännische quantitative Parameter

Es folgte nun die Auswahl einer geeigneten Datenbanksoftware. Die Wahl viel auf das relationale Datenbanksystem MySQL, das als Open-Source-Software beschaffbar und auf der bei der ausführenden Stelle, dem IFQ, vorhandenen Rechentechnik problemlos einsetzbar ist.

Die FuE-Arbeiten konzentrierten sich nun auf die Übertragung der bisher erarbeiteten Erkenntnisse, der neuen Vorgehensweise auf die Datenbanksoftware. Das folgende Bild 8 zeigt den Datenbankaufbau an Hand des oben im Bild 7 gezeigten Beispiels für kaufmännische quantitative Parameter:

Name	Uhrzeit der Aktualisierung	Zellenformat	Indexlänge	Datenlänge	AutoIncr...	Zellen
ausgangsparameter	2008-08-21 14:00:00	Dynamic	1 KB	2 KB		16
eingangsparameter	2008-08-21 13:59:30	Dynamic	1 KB	2 KB		16

Produktentwicklungsmodul	Liefertermin	Kostentarget_Max	Kostentarget_Min	Jahresstückzahl	Losgröße	Bemerkung
Kunde	2010-12-31	250,00	(Null)	20000	20	(MEMO)
Bauraumdefinition	2010-12-31	250,00	(Null)	20000	20	(MEMO)
Strukturoptimierung	2010-12-31	250,00	(Null)	20000	20	(MEMO)
CAD-Konstruktion Fertigteil	2010-12-31	250,00	(Null)	20000	20	(MEMO)
Prototypenfertigung	2010-12-31	250,00	(Null)	20000	20	(MEMO)
Prototypenprüfung	2010-12-31	250,00	(Null)	20000	20	(MEMO)
Überarbeitung CAD-Konstr.	2010-12-31	250,00	(Null)	20000	20	(MEMO)
Rohzettelkonstruktion	2010-12-31	250,00	(Null)	20000	20	(MEMO)
Einformschema Formplatter	2010-12-31	250,00	(Null)	20000	20	(MEMO)
Uniformwerkzeugherstellung	2010-12-31	250,00	(Null)	20000	20	(MEMO)
Form- und Gießprozess (Gu)	2010-12-31	(Null)	(Null)	320	20000	20 (MEMO)
Gussstücknachbehandlung	2010-12-31	250,00	(Null)	20000	20	(MEMO)
Mechanische Bearbeitung (I)	2010-12-31	250,00	(Null)	20000	20	(MEMO)
Baugruppenmontage	2010-12-31	250,00	(Null)	20000	20	(MEMO)
Auslieferung	2010-12-31	250,00	(Null)	20000	20	(MEMO)

Termin muss eingehalten werden

Record 1 of 16 in Page 1

SELECT * FROM 'eingangsparameter' LIMIT 0,1000

Bild 8: Datenbankaufbau am Beispiel mit kaufmännischen quantitativen Parametern

1.4 Wissenschaftlicher und technischen Stand, an den angeknüpft wurde

1.4.1 Stand der Wissenschaft und Technik zum Zeitpunkt des Vorhabenbeginns

Die nach dem Stand der Wissenschaft und Technik zum Zeitpunkt des Beginns der FuE-Arbeiten zum Vorhaben übliche Vorgehensweise bei der Bearbeitung von Produktentwicklungsketten für Bauteile auf den Basis von Gussteilen zeigt plastisch die konventionelle Seite (linke Seite) im Bild 1 unter Punkt 1.3 auf der Seite 4. Auf Seite 4 wird diese Vorgehensweise eingehend erläutert.

Das auf der Seite 6 dargestellte Heuristische Schema zeigt im Tabellenspaltenkopf die nach dem Stand der Technik üblich angewendeten Fertigungssimulationssysteme, der Tabellenzeilenkopf zeigt die üblichen Glieder einer Produktentwicklungskette.

Unter Punkt 1.2 auf der Seite 3 werden die Systeme aufgelistet, die zu Bearbeitung des Vorhabens genutzt wurden.

Spezielle Verfahren und Schutzrechte wurden für die Vorhabensdurchführung nicht benutzt.

1.4.2. Genutzte eigene vorliegende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

Das Vorhaben knüpft an an beim Projektdurchführenden, dem IFQ, in den vergangenen Jahren zahlreich bearbeiteten Aufgabenstellungen, FuE-Aufträgen und For-

schungsprojekten im Bereich der numerischen Simulation von Gießprozessen, der virtuellen Bauteilentwicklung und der theoretischen Herleitung von Modellen und Berechnungsalgorithmen für Gießprozesse und Gusstücke. Schwerpunkt der Forschungsarbeiten war und ist, neben der Grundlagenforschung, auch die angewandte Forschung in enger Zusammenarbeit mit zahlreichen nationalen und internationalen Forschungsinstituten und Industriebetrieben. Diese enge Kooperation ermöglichte und ermöglicht die erfolgreiche Bearbeitung aktueller anspruchsvoller Forschungsthemen zu Fragen der Bauteilentwicklung und -optimierung, der Gießprozessplanung, -gestaltung und -optimierung sowie zur Entwicklung von physikalischen bzw. werkstofftechnischen Modellen zur Beschreibung verschiedenster Phänomene der Gießereitechnik.

Durch das IFQ wurden in den letzten Jahren innerhalb verschiedener Forschungsprojekte (besonders mit der Automobilbranche) Gussteile im Rahmen der virtuellen Produktentwicklung mit Hilfe der numerischen Simulation hinsichtlich ihrer gießgerechten Gestaltung und Auslegung des Fertigungsprozesses (Prozessparameter, gießtechnische Auslegung der Form usw.) optimiert. Verbunden waren solche Arbeiten meist mit entsprechenden experimentellen und werkstofftechnischen Untersuchungen. Innerhalb der zahlreichen Projekte wurden damit zusammenhängend Methoden der statistischen Versuchsplanung und Auswertung ebenfalls erfolgreich zur Unterstützung der theoretischen und praktischen Untersuchungen angewendet.

Es konnte dadurch auf dem Gebiet der numerischen Simulation von Erstarrungsprozessen hier ein sehr großes Know-how entwickelt werden.

Die Entwicklung von verschiedenen Berechnungsmodellen zur simulationstechnischen Vorhersage von Gussteileigenschaften ist ebenfalls Schwerpunkt der vergangenen und laufenden Forschungsprojekte. Durch *TODTE* konnte ein Modul zur Prognose der mechanischen Eigenschaften von Aluminiumlegierungen durch numerische Simulation des Erstarrungsprozesses entwickelt werden. Die Anwendung dieses neuen Berechnungsmodells war zu diesem Zeitpunkt ein weltweites Alleinstellungsmerkmal. Damit ist es möglich im Rahmen der virtuellen Bauteilentwicklung ein Werkzeug anforderungs-, fertigungs- und werkstoffgerecht zu konstruieren.

Ein weiteres Forschungsprojekt, dass sich mit Grundlagenuntersuchungen und Modellentwicklungen zur Bewertung von Gussqualitäten beschäftigte („Komplexe Qualitätsbewertung von Aluminiumguss“) konnte ebenfalls erfolgreich bearbeitet und abgeschlossen werden. Mit diesen Ergebnissen ist es möglich durch simulationstechnische Untersuchungen basierend auf den entwickelten Kriteriumsfunktionen im Rahmen der virtuellen Bauteilentwicklung verschiedene Varianten von Gießverfahren, Werkstoffen bzw. Geometrien am Computer (ohne experimentelle Untersuchungen) zu untersuchen, zu vergleichen und zu optimieren.

Am IFQ wurden Grundlagenuntersuchungen zur Genauigkeit von Simulationssystem durchgeführt. Dabei wurden nicht nur die mathematischen bzw. physikalischen Modelle betrachtet, sondern auch die für eine Simulation notwendigen Anfangs- und Randbedingungen näher untersucht.

Ein weiteres Projekt wurde über die Analyse und Bewertung bekannter methodischer Erkenntnisse und der daraus abgeleiteten vorhandenen Ansätze zur Optimierung der

Bauteilentwicklung und darauf aufbauend die Gewinnung neuer methodischer Erkenntnisse hinsichtlich der Vorgehensweise bei der Entwicklung von Bauteilen für die Automobilindustrie und die Erarbeitung eines neuen Ansatzes zur Optimierung der Entwicklung von Automobilteilen, erarbeitet. Die Betrachtungen erfolgten am Beispiel eines hochbeanspruchten Bauteils aus der Automobilindustrie. Anhand dieses Gussteils erfolgte auch eine experimentelle Überprüfung der gewonnenen Erkenntnisse und des vorgeschlagenen Ansatzes zur Optimierung des Bauteilentwicklungsprozesses. Es wurden in diesem Projekt jeweils die besten Werkstoff-, Verfahren-, und Gestaltungsvarianten einander gegenübergestellt und anhand werkstoff- und verfahrensrelevanter Kriterien verglichen.

1.4.3 Verwendete Fachliteratur

- [1] Todte, M.: „Prognose der mechanischen Eigenschaften von Aluminium-Gussteilen durch numerische Simulation des Erstarrungsprozesses“
Dissertation (2003) Universität Magdeburg
- [2] Sturm, J. C.: „Vorhersage lokaler Eigenschaften von Gussbauteilen im Motorenbau“
3. VDI-Fachtagung „Gießtechnik im Motorenbau“; Februar 2005 Magdeburg
- [3] Behm, I.: „Ganzheitliche Entwicklung von Motorenbauteilen“ Dissertation
(2000) Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- [4] Honsel, CH.; Weiß, K.; Todte, M.: „Von der Erstarrungssimulation zur virtuellen Produktentwicklung.“ Giesserei-Praxis 7 (2003) Nr. 7, S. 306 – 309
- [5] Sauter, J.; Lauber, B.: „Integrierte Gestalt- und Topologieoptimierung im Konstruktionsprozess.“ Simulation (2002) Nr. 1, S. 6 – 12
- [6] Todte, M.; Schmidt, K.: „Forschungsuntersuchungen zum Formfüllverhalten von Zylinderköpfen.“ Interner Bericht, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- [7] Todte, M.: „Prognose der mechanischen Eigenschaften von Aluminium-Gussteilen durch numerische Simulation des Erstarrungsprozesses.“
Dissertation (2003) Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- [8] Todte, M.; Bähr, R.; Honsel, C.; Saewert, H.-C.; Wagner, A.: „Virtuelle Bauteilentwicklung auf der Basis der Simulation des Fertigungsprozesses und der Gussteileigenschaften.“ Konferenz Einzelbericht, Deutscher Gießereitag München, Juni 2004
- [9] Stroppe, H.: „Einfluss der Porosität auf die mechanischen Eigenschaften von Gusslegierungen.“ Gießereiforschung, 52 (2000) Nr. 2, S. 58 – 60.
- [10] Bähr, R.; Todte, M.; Laugwitz, F.; Mnich, F.: „Eigenspannungsuntersuchungen an Zylinderköpfen.“ Gießerei, 87 (2000) Nr. 1, S. 54 – 57.
- [11] Krebs, E.; Wagner, A.: „Optimierung der Eigenspannungen eines Zylinderkopfes durch Nutzung der numerischen Simulation der Eigenspannungen.“ Interner Bericht (2004), Rautenbach Guss Wernigerode GmbH.

- [12] Mulfinger, F.; Sauter, J.: „Integration der numerischen Simulation und Optimierung in die virtuelle Produktentstehung.“ XXV. FEM-Kongress (1998) Baden- Baden
- [13] Sturm, J. C.: „Optimierung von Gießtechnik und Gussteilen.“ Symposium (2003) Bremen
- [14] Dr. Gosch, R.: „Virtuelle Produktenstehung und die Rolle des Gießers.“ Konstruieren und Giessen 28 (2003) Nr. 3
- [15] Binder, T.; Haffner, P.: „Optimierung von Guss- und Schmiedeteilen bei AUDI.“ FEM-, CFD- und MKS-Simulation; 2 (2003)
- [16] Burbli, A.; Dr. Fricke, H.; Dr. Hennigs, D.: „Rückführung von optimierten Strukturen in den Entwicklungsprozess.“ FEM-, CFD- und MKS-Simulation 1 (2003)
- [17] Tovar, J.: „Auswirkungen der adaptiven Netzverfeinerung im Topologieoptimierungsprozess.“ Diplomarbeit, Universität Karlsruhe
- [18] Peter, G.: „ Virtuelle Produkt- und Produktionsentstehung.“ ifam Jahresbericht 20001
- [19] Minimierung von Bearbeitungszugaben durch komplexe Temperaturfeld- und Spannungssimulation.“ Internationales User- und Salespartner-Meeting (2002) Roetgen
- [20] Prognose der mechanischen Eigenschaften von Aluminium-Gussteilen durch numerische Simulation des Erstarrungsprozesses.“ Internationales User- und Salespartner-Meeting (2004) Roetgen
- [21] N.N.: „Topologieoptimierung eines Motorträgers“ IFAM Bremen www.simtop.de
- [22] N.N.: „Topologieoptimierung eines Robotergreifers mit MSC.CONSTRUCT“ FE-Design GmbH Karlsruhe www.fe-design.de
- [23] Matthiesen, S.: „Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme“ Institut für Maschinen-Konstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau Universität Karlsruhe (TH) 2002 Band 6
- [24] N.N.: „BIO-DESIGN“ www.heberguss.de/biodesign/mechanica.htm
- [25] Boggasch, M.; Friedrich, M.: „Anwendung neuer Methoden bei der Topologie- und Formoptimierung von Elastomerbauteilen“ Symposium „Simulation in der Produkt- und Prozessentwicklung“ 5. – 7.11.2003 Bremen
- [26] Rechsteiner, A.: „Konstruieren mit Gusswerkstoffen“ 12. Schweizer CADFEM Users' Meeting 2007
- [27] Buchner, T.; Herfs, W.; Brecher, C.: „Anforderungen an die Produktionstechnik in Hochlohnländern“ Konstruktion Mai 5 2008
- [28] du Maire, E.; Schmidt, T.: „Von der Natur lernen – kraftflussgerechte, neuartige Gestaltung gegossener Komponenten“

2. NEWCAST-Forum „Konstruieren mit Gusswerkstoffen“ Innsbruck 21. und 22.04.2005
- [29] Warnke, E.-P.: „Auslegungskriterien für Gusskomponenten“
2. NEWCAST-Forum „Konstruieren mit Gusswerkstoffen“ Innsbruck 21. und 22.04.2005
- [30] Beermann, S.: „Effizientes Auslegen von Getrieben“
Konstruktion Juni 6-2007 S. 40 - 42
- [31] N.N.: „Mit drei Software-Produkten zur funktionierenden Prozesskette“
Konstruktion Juni 6-2008 S. 30 - 32
- [32] Weiß, K.; Honsel, C.: „Simulation von Gefüge und mechanischen Eigenschaften von Strukturbauteilen aus Magnesium“
GIESSEREI 94 11/2007 S. 30 - 37
- [33] Dachsel, S.; Nast, I.: „Konstruktionsbegleitende Berechnungen im Schienenfahrzeugbau“
Konstruktion Juli/August 7/8-2007 S. 28 - 29
- [34] Schmidt, T.: „Struktur aus Guss“
Konstruktion Juni 6-2007 S. 5 - 6
- [35] Krack, R.: „Optimierung von Kühlsystemen durch Zyklus- und Erstarrungssimulationen“
GIESSEREI 94 11/2007 S. 78 - 83
- [36] Fuchs, H.; Wappelhorst, M.: „Werkstoffentwicklung für Leichtmetallmotorblöcke und Zylinderköpfe“
GIESSEREIKOMPAKT 01/2005 S. 4 - 7
- [37] Bühring-Polaczek, A.; Pustal, B.; Vroomen, U.; Winartomo, B.; Ehlen, G.: „Mehrphasige Simulationsmodelle in der Gießereitechnik“
GIESSEREI 92 01/2005 S. 18 - 21
- [38] Martin, T.; Weber, R.; Uhl, W.: „Leichtbau und Höchstleistung“
3. VDI-Fachtagung „Gießtechnik im Motorenbau“; Februar 2005 Magdeburg
- [39] Kerz, P.: „Natur als Vorbild“
GIESSEREI 92 01/2005 S. 31 - 32
- [40] Hofmann, E.; Reek, R.: „Bauteiloptimierung durch Nutzung biologischer Wachstumsregeln“
GIESSEREI 91 12/2004 S. 40 - 43
- [41] Hessel, C.: „Integration der Technologieoptimierung“
Berichte aus der Produktionstechnik Aachen Shaker Verlag Band 21/2003
- [42] Egner-Walter, A.; Olive, S.: „Using Stress Simulation to tackle Distortion and Cracking in Castings“
Wold Foundry Congress 2006 S. 51/1 – 51/9
- [43] Chaeo Lim, Jeongho Nam, Insung Cho, Seungmok Yoo, Jeongkil Choi: „Intelligent Riser/Chill/Gating Design System Using Simulations and Discrete Optimization Algorithm“
Wold Foundry Congress 2006 S. 173/1 – 173/9
- [44] Binder, T.; Hougardy, P.: „Optimierung von Gussteilen bei Audi“
GIESSEREI 92 11/2005 S. 78 - 81

- [45] Bähr, R.; Mnich, F.; Saewert, H.-C.; Fiedler, D.: „Neue Wege in der virtuellen Produktentwicklung“
GIESSEREI 92 10/2005 S.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen der jährlich durchgeführten AL-CAST-Workshops wurden die jeweils erarbeiteten Forschungs- und Entwicklungsansätze, Zwischenergebnisse usw. den Wachstumskernpartnern vorgestellt. In Diskussionen mit den Partnern konnten dann zahlreichen Anregungen zur weiteren Erarbeitung des Vorhabens aufgenommen werden. Besonders intensiv war dieser Erfahrungsaustausch mit den Wachstumskernpartnern der Forschungskomplexe „Struktur“ und „Powertrain“.

2. Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis im Einzelnen, Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die Zuwendung wurde entsprechend Zuwendungsbescheid verwendet. Da im Rahmen von Tarifveränderungen die Personalkosten des Projektbearbeiters über die im Antrag und im Zuwendungsbescheid fixierte Mittel stiegen, wurden die geplanten und zugewendeten Mittel für Reisekosten zur Abdeckung der höheren Personalkosten verwendet. Die Kosten für im Rahmen des Vorhabens durchgeführte Reisen wurden aus den Eigenmitteln des Projektdurchführenden finanziert.

Unter Punkt 1.3 (siehe oben ab Seite 4) wird umfassend auf die im Einzelnen erzielten Ergebnisse und die vorgegebenen Ziele eingegangen.

Wichtigstes Ergebnis der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Rahmen des Vorhabens ist die Findung einer Methodik für eine anforderungs-, werkstoff- und fertigungsgerechte Gussteilgestaltung zur Verkürzung der virtuellen Produktentwicklung, umgesetzt in einem heuristischen Schema zur frühzeitigen Erkennung der sinnvollen Nutzung der zahlreich auf dem Markt etablierten technologischen Simulationssysteme und in ein relationales Datenbankkonzept zur Verwaltung aller auftretenden Ein- und Ausgangsparameter.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Laufzeit des Vorhabens:	01.04.2006 bis 31.08.2008
Abgerechnete Ausgaben insgesamt:	134.549,06
Anteil Bundesmittel:	80.729,44
Anteil Eigenmittel:	53.819,62

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

In der Aufgabenstellung des Vorhabens (siehe Punkt 1.1 auf Seite 3) wird darauf eingegangen, dass in herkömmlichen, linear aufgebauten Produktentwicklungsketten die zahlreich auf dem Markt etablierten fertigungstechnischen Simulationsprogramme nicht immer rechtzeitig sinnvoll eingesetzt werden, um frühzeitig Fehler und Probleme zu erkennen, die in späteren Abschnitten der Produktentwicklungskette die Notwendigkeit von Entscheidungen zur Veränderung und/oder Überarbeitung des vorliegenden Bauteilentwicklungskonzeptes erzwingen, was zu Rücksprüngen im Entwicklungsprozess führen und damit zu zeitlichen und monetären Verlusten führen kann und/oder bestimmte kaufmännische und organisatorische Vorgaben (z.B. Kostentargets) nicht realisieren lässt. Gerade notwendige Rücksprünge führen zur Verlängerung von Produktentwicklungsketten.

Die entwickelte Methodik zeigt, wie Simulationsprogramme frühzeitig sinnvoll eingesetzt werden können, um so Produktentwicklungsketten zu reduzieren. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes

Mit der entwickelten Methodik steht Produktentwicklern für Bauteile auf der Basis von Leichtmetallgussstücken ein Strategie zur Verfügung, mit welcher sie auf dem Markt etablierte fertigungstechnisch orientierte Simulationsprogramme frühzeitig und sinnvoll einsetzen können, um, wie oben unter Punkt 2.3 (siehe Seite 24) dargestellt wird, frühzeitig fehlerhafte oder ungünstige Entwicklungen hinsichtlich der anforderungs-, werkstoff- und fertigungsgerechten Bauteilauslegung aufdecken und beseitigen zu können, und so die Produktentwicklungsketten verkürzen zu können.

Schwerpunktmäßig kann das als ein Ergebnisteil aufgestellte heuristische Schema (siehe Bild 2 auf der Seite 6) auf andere Produktentwicklungsketten für Produkte mit anderen Rohteilen (Eisen- und Schwermetallgussstücke, Schmiedeteile, Teile der Blechumformung bis hin zu überwiegend spanend gefertigten Bauteilen) angewendet werden, wenn die entsprechenden Kopf- und Spaltenzeilen des Schemas mit den jeweils relevanten Simulationsprogrammen und Bauteilentwicklungsprozessstufen versehen werden.

Das gleiche trifft auf den zweiten Ergebnisteil, die relationale Datenbank (siehe Bild 5 auf der Seite 15), zu. Das erarbeitete Datenbankkonzept zur Verwaltung der Ein- und Ausgangsparameter kann sich auch auf andere Produktentwicklungsketten übertragen lassen.

Ebenfalls verwerten lassen sich eine Vielzahl von Teilerkenntnissen und Systematisierungen, die bei der Vorhabensbearbeitung gewonnen und aufgestellt wurden, wie beispielsweise die Parameterkategorisierung (siehe Bild 3 auf Seite 10), oder die Aufstellung eines „Belastungskollektivwiderstandsmomentes“, welches aufzeigt, dass

theoretisch eine unendlich große Anzahl von Werkstoff-Geometrie-Paarungen vorgegebenen statischen und dynamischen, gegebenenfalls auch physikalischen und chemischen Lastkollektiven gerecht werden kann. Entscheidend sind dann qualitative Parameter, wie kaufmännische und organisatorische, welche Paarung ausgesucht wird und ein Optimum darstellt. Besonders bei Gussstücken zeigt sich wiederum der Zusammenhang zwischen Werkstoff und Geometrie. Viele Gusswerkstoffe lassen sich nur mit bestimmten Fertigungsverfahren, beim Gießen also die Form- und Gießverfahren, herstellen, Stahlgussteile können in der Regel nur mit verlorenen Formen gegossen werden. Welches spezielle Formverfahren ausgewählt wird entscheiden dann die kaufmännischen und organisatorischen Parameter, wie Kosten, Lieferzeiten, Jahresstückzahlen, Verfügbarkeit von Gießereien usw.

Das ausgewählte Form- und Gießverfahren hat wiederum einen großen Einfluss auf die erzeugbare Geometrie (Mindestwanddicken, Formfüllungsvermögen, Fließlängen, usw.) und auf das erzeugte Gussstückgefüge, also den sich ausbildenden Werkstoffzustand.

Der Projektbearbeiter, das IFQ, wird diese Erkenntnisse und Ergebnisse selbst in weiteren Forschungs- und Entwicklungsprojekten, die in naher Zukunft eingeworben werden sollen, zur Anwendung bringen, um auf dem Gebiet der virtuellen Produktentwicklung weiter zu forschen, wie bereits oben unter Punkt 1.3 (siehe Seite 4) erläutert. Wie dort ebenfalls erläutert, wird eine wirtschaftliche Umsetzung der Ergebnisse über das MFF Magdeburger Forschungsinstitut für Fertigungsfragen e.V. – am Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung erfolgen.

Die Ergebnisse werden dann weiterhin in erste Linie den Partnern des Wachstumskerns AL-CAST in geeigneten Formen im Zuge der weiteren intensiven FuE-mäßigen Zusammenarbeit am Forschungs- und Entwicklungsgegenstand Bauteile aus Aluminiumlegierungen zur Verfügung gestellt werden.

Im Rahmen von wissenschaftlichen Publikationen (Zeitschriftenartikel, Beiträge in Kolloquia, auf Workshops, wissenschaftlichen Tagungen usw.) über die Ergebnisse und Erkenntnisse des Vorhabens und über weitere FuE-Projekte zum Forschungsgegenstand soll einem größeren Interessentenkreis die entwickelte Methode zur Kenntnis gebracht werden.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Vorhabens sind keine Ergebnisse von anderen Stellen bekannt geworden, die auf dem Gebiet des Vorhabens relevant sind.

Die ständig begleitend zu den Arbeiten an den Arbeitspaketen durchgeführte Marktbeobachtung zeigte ein breites Spektrum von Anwendungen der einzelnen Simulationssysteme und Berechnungsmodule im Rahmen von Produktentwicklungsketten. Besonders in der Literaturstelle [34] wird dargestellt, wie ein Gussstück mittels FEM-Berechnung, Topologieoptimierung und Gießereisimulation entwickelt wurde. Es wird

aber beschrieben, dass die Nutzung der Simulationsmodule als Diskussionsgrundlage für die nachfolgenden Konstruktions- und Entwicklungsschritte genutzt werden. Es erfolgt dort also nicht die systematische Verknüpfung der Systeme, sondern nur eine punktuelle Nutzung mit einer unterbrochenen manuellen Nutzung der Ausgangswerte für die Konfiguration der Eingangswerte des nächsten Moduls. Diese Forschungsergebnisse waren also nicht direkt für das Vorhaben nutzbar, zeigen aber, wie wichtig die Arbeiten sind, um den Marktvorsprung des Wachstumskerns AL-CAST beizubehalten und weiter auszubauen.

Es zeigte sich also, dass es auf dem Markt Arbeiten gibt, die zwar Teile der zu entwickelnden Methode tangieren, aber nicht die vollständige Systematik, in ihrer Einheit von anforderungs-, werkstoff- und fertigungsgerechter Gussteilgestaltung berühren. Die Ergebnisse dieser Arbeiten waren dementsprechend für die Durchführung des Vorhabens nicht relevant.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Eine erste Präsentation der Ergebnisse des Vorhabens erfolgte im Rahmen des AL-CAST-Abschlussworkshops am 27.08.2008 in Harzgerode, im Vortrag von Prof. Bähr „Simulation“.

Weitere Veröffentlichungen im Rahmen von wissenschaftlichen Publikationen (Zeitschriftenartikel, Beiträge in Kolloquia, auf Workshops, wissenschaftlichen Tagungen usw.) sind vorgesehen.