

Lehrstuhl für Produktentwicklung

Phasenübergreifende bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung

Michael Amft

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Bender
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. B.-R. Höhn

Die Dissertation wurde am 21.01.2002 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen
am 26.04.2002 angenommen.

Vorwort des Herausgebers

Problemstellung

Entwickler und Konstrukteure müssen heute hoch komplexe Produkte in immer kürzerer Zeit zielsicher entwickeln. Eine Vielzahl von Rechnerhilfsmitteln unterstützt sie bei Dokumentation und Analyse und leistet so Unterstützung bei der ganzheitlichen Sicherstellung geforderter Eigenschaften.

Auch im Zeitalter von CAx ist die Trennung von geometrischer und physikalischer Modellbildung noch weitgehend erhalten. Obwohl die rechnergestützten Teilmodelle auf viele gemeinsame Parameter angewiesen sind, müssen Entwickler trotz heute schon hoch integrierter Rechnersysteme noch immer eine Vielzahl von Daten von Hand zwischen den Modellen übertragen, abgleichen und verifizieren. Die entwicklungsorientierte Integration zwischen Berechnung und Gestaltung steht noch in den Anfängen.

Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit behandelt eine ganzheitliche bidirektionale Integration von Berechnung und Gestaltung. Das bedeutet, dass jeder geometrische Parameter in seiner Wirkung auf die Gesamtheit der (modellierten) physikalischen Eigenschaften betrachtet wird. Umgekehrt müssen die Wirkungen einer Veränderung physikalischer Parameter bezüglich der dann notwendigen geometrischen Änderungen berücksichtigt werden. Zielsetzung der Arbeit war die unmittelbare Erforschung der Möglichkeiten einer phasenübergreifenden bidirektionalen Integration. Darüber hinaus sollten die Gründe ermittelt werden, die einer besseren Integration von Berechnung und Gestaltung bisher im Wege stehen.

Ergebnisse

Die Arbeit setzt eine bidirektionale zeitlich durchgängige Integration von Gestaltung (CAD) und Berechnung (analytische Rechenverfahren) um. Alle Berechnungen des Entwicklungsprozesses werden durchgängig von den frühen bis in die späten Phasen im Produktmodell abgebildet, wobei die Berechnungsvorschriften und die abgebildeten Anforderungen zu jedem Zeitpunkt wirksam sind und Einfluss auf die Gestalt nehmen. Anhand einer ausführlichen Grundlagenbetrachtung sowie einer prototypischen Systemumsetzung zeigt die Arbeit Potenzial und Grenzen für das Forschungsfeld der Integration von Gestaltung und Berechnung.

Folgerungen für die industrielle Praxis

Die Ergebnisse zeigen, dass das Eingreifen des Entwicklers aus den Prozessen des Datenübertrags zwischen physikalischer und geometrischer Modellbildung zur Zeit nicht wegzudenken ist. Die sorgsame Betrachtung von Nutzen und Aufwand der Erzeugung komplexer vernetzter geometrischer und physikalischer Modelle setzt hier enge Grenzen der Anwendbarkeit. Die industrielle Praxis wird aus diesem Grund auf eine ganzheitliche Integration von Berechnung und Gestaltung noch geraume Zeit warten müssen. Die Arbeit zeigt auf, dass ausschließlich diskontinuierliche Integration als sequenzieller Übertrag von Daten zwischen Modellen im technischen Bereich der Variantenkonstruktion, also bei Wiederholprozessen eingesetzt werden kann. Auch hier ist der Aufwand der Modellbildung sehr hoch und daher für die Eignung zum Einsatz im industriellen Umfeld im individuellen Anwendungsfall zu prüfen.

Folgerungen für Forschung und Wissenschaft

Die Arbeit zeigt und beleuchtet Aspekte bei der Schaffung hoch integrierter Lösungen für die Integration von Berechnung und Gestaltung. Lösungsideen werden aufgezeigt und prototypisch dargestellt. Die Komplexität einer tatsächlichen Integration von Berechnung und Gestaltung durch Rechnersysteme wird aufgezeigt. Einem Lösungsansatz nähert sich die industrielle Praxis von der Seite der Anwendbarkeit und kommerzieller Nutzbarkeit, Forschung und Wissenschaft diskutieren und untersuchen das theoretisch Machbare. Die Arbeit zeigt, dass derzeitige Ergebnisse im ersten Fall oft ernüchternd einfach und im zweiten Fall nicht oder nur sehr beispielhaft kommerziell anwendbar sind.

Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann
Lehrstuhl für Produktentwicklung
Technische Universität München

Danksagung

Dieses Buch entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentwicklung in den Jahren 1996 bis 2001. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Professor Lindemann für die Betreuung dieser Arbeit, für die Anleitung und die anregenden Diskussionen, für die großzügigen Freiräume und das in mich gesetzte Vertrauen.

Bei Herrn Professor Höhn bedanke ich mich für die Mitberichterstattung und bei Professor Bender für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Mein besonderer Dank gilt Hans-Dieter Gaul und Franz Daniel Müller, die als meine Büromitbewohner in ganz besonderem Maße als geduldige und verständnisvolle Diskussionspartner immer für mich da waren und den Satz "Integration von Berechnung und Gestaltung" sicher mittlerweile nicht mehr hören können. Ganz besondere Erwähnung verdienen meine Freunde und Kollegen Christian Lutzenberger vom Lehrstuhl für angewandte Mechanik und Andreas Dyla von der FZG. Die vielen fachlichen und freundschaftlichen Gespräche mit ihnen haben mir ganz besonders geholfen, an das Erreichen meines fachlichen Zieles stets zu glauben.

Meine Forschungsarbeit wäre nicht möglich gewesen ohne meine studentischen Hilfskräfte. Eine große Zahl von Programmierern hat meine Ideen am Rechner über die Jahre hinweg umgesetzt. Ganz spezieller Dank gilt Florian Schönherr und Matthias Mörtl, die die Programmiererteams kompetent geleitet haben und die in unzähligen Teamsitzungen entscheidend die Form des entstandenen Systems mitbestimmen konnten.

Leider kann ich hier an dieser Stelle nicht alle Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls namentlich nennen, aber ich bedanke mich bei allen für die gute Zusammenarbeit, die fachlichen Diskussionen und die schöne Zeit am Lehrstuhl. Durch einen tragischen Unfall starb im August 2000 mein Kollege Rainer Schmidt, der mir mit seiner Menschlichkeit, seiner Empathie und seiner ganz besonderen sozialen Kompetenz in unserer leider nur kurzen gemeinsamen Zeit ganz besonders ans Herz gewachsen ist. Ich habe vieles von ihm lernen dürfen.

Ebenfalls während meiner Zeit am Lehrstuhl für Produktentwicklung starb mein Vater Gerhard Amft. Ich danke ihm und meiner so unendlich starken Mutter Ingrid Amft dafür, dass sie das alles, was ich heute bin, letztendlich möglich gemacht haben.

München im Mai 2002

Michael Amft

Für meine Eltern, für meine Geschwister und für meine Freunde.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
1.1	Ausgangssituation	2
1.2	Vision	3
1.2.1	Zukunftsszenario	3
1.2.2	Analyse und Diskussion des Szenarios	6
1.3	Zielsetzung und Hypothese der Arbeit	8
1.4	Erfahrungsgrundlage der Arbeit	10
1.5	Aufbau der Arbeit	11
2	SYSTEMATISCHE ERARBEITUNG DER GRUNDLAGEN FÜR DIE INTEGRATION VON GESTALTUNG UND BERECHNUNG	13
2.1	Untrennbare Verknüpfung von stofflicher Geometrie und Physik	14
2.2	Beschreibung des Forschungsfeldes „Integration von Gestaltung und Berechnung“	15
2.3	Bidirektionalität bei der rechnergestützten Integration von Gestaltung und Berechnung	17
2.3.1	Begriffliche Problematik	18
2.3.2	Grundlegende Ansätze	19
2.3.2.1	Kontinuierliche bidirektionale Integration	19
2.3.2.2	Sequenzielle bidirektionale Integration	19
2.3.3	Ansatz in dieser Arbeit	20
2.4	Der Faktor 'Intelligenz' beim Zusammenwirken von Gestaltung und Berechnung	21
2.4.1	Die Intelligenz des Konstrukteurs/Entwicklers im Berechnungs- und Gestaltungsprozess	21
2.4.2	Künstliche Intelligenz	22
2.4.3	Unverzichtbarkeit der primären Intelligenz im Integrationsprozess	26
2.4.3.1	Nähe des Konstrukteurs/Entwicklers zum Prozess	27
2.4.3.2	Primäre Intelligenz im Prozess der sequenziellen Integration	28
2.4.3.3	Primäre Intelligenz im Prozess der kontinuierlichen Integration	29
2.4.4	Zusammenfassung und Fazit	30
2.5	Redundanz bei physikalischer und geometrischer Modellbildung	31
2.5.1	Bidirektionaler Zusammenhang von Physik und stofflicher Geometrie	31
2.5.2	Maschinenbaulich relevante Physik als Teilmenge der vollständigen Physik	32
2.5.3	Bidirektionaler Zusammenhang von Berechnung und Geometrie	34
2.5.4	Exaktheit des geometrischen Modells versus Unexaktheit des physikalischen Modells	35

2.5.5	Redundanz von Physik und Geometrie	35
2.5.6	Zusammenfassung und Fazit	36
2.6	CAD-Parametrik	37
2.6.1	Grundlagen	37
2.6.2	Berechnungen in der CAD-Parametrik	38
2.6.2.1	Unidirektionale Wirkungsweise von CAD-Parametrik	38
2.6.2.2	Einschränkung des Einsatzgebietes durch den notwendigen Anspruch auf Fertigungsgerechtigkeit	40
2.6.3	Variationales CAD	41
2.6.4	Feature basiertes CAD	42
2.7	Berechnen in der Prozesssicht	43
2.8	Integriertes Gestalten und Berechnen in der Prozesssicht	45
2.8.1	Vorgehensplan für das Gestalten und Berechnen	46
2.8.1.1	Aufstellung und Beschreibung	46
2.8.1.2	Beispiel für das Durchlaufen des Vorgehensplans	50
2.8.2	Ganzheitliche Prozessführung	51
2.8.2.1	Arbeit am Ganzen durch Arbeit am Detail	52
2.8.2.2	Verantwortung des Konstrukteurs/Entwicklers	53
2.8.2.3	Hilfsmittel	53
2.8.3	Zusammenfassung	55
2.9	Schnittstellenkommunikation bei der Integration von Gestaltung und Berechnung	56
2.9.1	Modellorientierte Schnittstellenkommunikation	57
2.9.2	Parameterbasierte Schnittstellenkommunikation	62
2.9.3	Kombinierte Anwendung modellorientierter und parameterorientierter Schnittstellenkommunikation	63
2.9.4	Zusammenfassung	64
2.10	Zusammenfassung Kapitel 2	65
3	BETRACHTUNG DES STANDS DER TECHNIK UND DER FORSCHUNG UNTER DEN MAßGABEN DER ERARBEITETEN GRUNDLAGEN	67
3.1	Ansätze ohne Rechnerintegration	67
3.1.1	Allgemeine Beobachtungen	68
3.1.2	Bedeutung der Beobachtungen für rechnerintegrierte Ansätze	69
3.2	Stand der Technik	69
3.2.1	CAD-Parametrik	69
3.2.1.1	Direkte Hinterlegung von Berechnungen	69
3.2.1.2	Einbindung von Tabellenkalkulationen	70
3.2.1.3	Numerische Zielwertsuche	71
3.2.2	Kinematikuntersuchungen im CAD	72

3.2.2.1	Kinematikmodule	72
3.2.2.2	Inverse Kinematik	74
3.2.2.3	Mehrkörpersimulation	74
3.2.3	FEM (Finite-Elemente-Methode)	74
3.2.4	Topologieoptimierung	77
3.2.5	Toleranzanalyse	78
3.3	Stand der Forschung	79
3.3.1	Objektgebundene Ansätze	79
3.3.2	Methodenorientierte Ansätze	80
3.4	Zusammenfassung Kapitel 3	82
4	KONZEPT FÜR EIN SYSTEM ZUR PHASENÜBERGREIFENDEN BIDIREKTIONALEN INTEGRATION VON BERECHNUNG UND GESTALTUNG	85
4.1	Phasenübergreifende Bidirektionalität	86
4.1.1	Rekursionen und Zirkelbezüge	87
4.1.2	Ganzheitliche Berechnung in einem Gleichungssystem	87
4.1.2.1	Prozessuale Aufwandserhöhung	88
4.1.3	Mathematischer Solver	90
4.1.4	Anforderungen	91
4.1.5	Referenzobjekte	92
4.1.6	Umgang mit mathematisch/physikalischen Gleichungssystemen im Verbund mit der Geometriemodellierung	95
4.1.6.1	Unterbestimmtheiten	95
4.1.6.2	Bestimmtheiten	96
4.1.6.3	Überbestimmtheiten	96
4.1.7	Zeitliche Durchgängigkeit	97
4.2	Unschärfe	99
4.2.1	Ansatz für einen unscharfen bidirektionalen Datenfluss	100
4.2.2	Abgrenzung	103
4.3	Zusammenfassung Kapitel 4	106
5	UMSETZUNG DES KONZEPTES	107
5.1	Der Integrierte Konstruktionsarbeitsplatz Inka als Grundlage	107
5.1.1	Plattform	108
5.1.2	Die ausgewählten Applikationen	109
5.1.3	Das erweiterte Produktmodell / die Datenbasis	109
5.1.4	Client-Server-Kopplung der Systemelemente	109

5.2 Umsetzung des Konzeptes der phasenübergreifenden (kontinuierlichen) bidirektionalen Integration	110
5.2.1 Abbildung von Anforderungen und mathematisch/physikalischen Gleichungen	111
5.2.2 Verknüpfung mit dem CAD	111
5.2.3 Parametervariation	113
5.2.4 Parameteroptimierung	114
5.3 Umsetzung des Unschärfekonzepts	115
5.3.1 Rundung	116
5.3.2 Stufensprünge	117
5.3.3 Freiräume	117
5.3.4 Zweite Berechnungsebene	118
5.3.5 Löschung des unscharfen Übertrags bei Parametervariation im CAD-Modell	118
5.3.6 Betrachtung des Gesamtsystems	118
5.4 Evaluation des Gesamtkonzepts	120
5.4.1 Komplexität der beherrschbaren Modelle	120
5.4.2 Grenzen des Systems bei mathematischen Sonderfällen	120
5.4.3 Praxisrelevanz	121
5.4.3.1 Umfrage in der Industrie: Angewandte Berechnungsarten	121
5.4.3.2 Umfrage in der Industrie: Hilfsmittel zur Durchführung von Berechnungen	122
5.4.4 Vergleich der kontinuierlichen und der sequenziellen Integration	125
6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	127
6.1 Zusammenfassung	127
6.2 Ausblick	129
7 LITERATURVERZEICHNIS	131
8 ANHANG	141
8.1 Umfrage Formular	141
8.2 Dissertationsverzeichnis des Lehrstuhls für Produktentwicklung	143

1 Einleitung und Zielsetzung

Unsere Gesellschaft steht mit dem Eintritt in das Zeitalter der Informations- und Wissensgesellschaft vor neuen Anforderungen und Herausforderungen an Wissenschaft, Industrie, Handel und Dienstleistung. Bedingt durch extreme Mobilität der Menschen und der Güter sowie durch den Ausbau hoch leistungsfähiger Datennetze ist ein globaler Wettbewerb entstanden, der allen Bereichen zunehmend hohe Leistungen in den Bereichen Innovation, Prozesseffizienz und Produktivität abverlangt.

Immer komplexere technologische Produkte müssen in immer kürzerer Entwicklungszeit dem Weltmarkt zur Verfügung gestellt werden. Im Besonderen werden die Produktentwicklungsprozesse zunehmend von Rechnerunterstützung getragen. Moderne Prozesse sind ohne Rechnerwerkzeuge zur Datenbearbeitung und zum Datenmanagement nicht mehr denkbar.

Die Entwicklung stofflich-geometrischer Produkte, wie sie im Maschinen- und Anlagenbau, in Bau und Architektur im Mittelpunkt stehen, ist ebenso wie die Elektronik/Elektrotechnik und die Softwareentwicklung auf effiziente Rechnerunterstützung angewiesen. Hochkomplexe Software unterstützt die Entwickler und ihre Teams zunehmend. Neben DTP-Programmen¹ und Projektplanungssoftware sowie modernen rechnergestützten Kommunikationsstrukturen (Internet, Email, ftp etc.) wird die Entwicklung stofflich-geometrischer Produkte durch CAD-Systeme geprägt. Die Entwicklung von CAD-Systemen von anfänglich einfachen Zeichenprogrammen in zwei Dimensionen zu hochkomplexen 3D-Systemen zeigt die starken Bemühungen, aus der Rechnerunterstützung Vorteile für den Entwicklungsprozess zu gewinnen. Ähnliche Fortschritte wurden im Bereich der Berechnungsunterstützung gemacht. Der Computer entwickelte sich von – an heutigen Maßstäben gemessen – leistungsschwachen Großrechnern zu leistungsstarken Kompaktsystemen, auf denen hochkomplexe Berechnungssoftware von allgemeinmatischen Solvern bis hin zur Finite Elemente Berechnung und der Mehrkörpersimulation zur Verfügung stehen.

¹ Software zur Erstellung von Satz und Layout von Texten (DTP = Desktop-Publishing).

1.1 Ausgangssituation

Grundlage von Maschinen sind Stoff-, Energie- und Informationsumsätze. Diese Umsätze werden durch die Funktion und die Teilfunktionen der Maschinen ermöglicht, die auf physikalisch/technischen Wirkprinzipien beruhen. Eine Maschine ist ein stofflich geometrischer Gegenstand, der durch seinen Betrieb die Durchführung der Stoff-, Energie- und Informationsumsätze ermöglicht. Ihre Funktion und jede Wechselwirkung mit der Umwelt und in ihr selbst ist physikalisch.

Die Aufgabe des Produkt-/Maschinenentwicklers ist die Festlegung der Funktionen und anschließend der Geometrie der Maschine und seiner Bauelemente. Dabei legt er mit den geometrischen Parametern unmittelbar die physikalischen Eigenschaften der Maschine fest.

CAD-Systeme unterstützen den Konstrukteur/Entwickler² bei der Modellierung und Darstellung der geometrischen Parameter und deren Ausprägungen. Zugang zu den physikalischen Eigenschaften erhält der Konstrukteur/Entwickler über Berechnungen.

Die Rechnerunterstützung hat in beiden Bereichen – Geometrie und Berechnung – in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht. Nicht befriedigend gelöst ist jedoch derzeit das Zusammenwirken von CAD- und Berechnungsprogrammen, das eine unmittelbare Umsetzung von Berechnungsergebnissen in Geometrie oder umgekehrt gestattet (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1995, S 1).

Es ist Stand der Technik, dass der Konstrukteur/Entwickler auch bei rechnergestützten Berechnungen Ergebnisse in großem Umfang von Hand in die Geometriemodelle überträgt. Ebenso liest er in der Regel die notwendigen Eingangsparameter für seine Berechnungen aus dem CAD-Modell ab und überträgt sie über die Tastatur in die Eingabedatensätze. Der Konstrukteur/Entwickler arbeitet in der Regel mit unabhängigen Geometrie- und Physikmodellen (Bild 1-1) und muss alle Teilmodelle von Hand aufeinander abstimmen.

In der Informationstechnik steckt die Integration geometrischer und physikalischer Teilmodelle und der dazugehörigen Applikationen in den Anfängen. Daraus resultiert für den Konstrukteur/Entwickler ein erheblicher Aufwand bei der Erstellung und Abstimmung der getrennten Modelle.

² Gemeint sind ebenso Entwicklerinnen/Konstrukteurinnen. Für einen vereinfachten Sprachgebrauch wird im Folgenden von einer differenzierten Erwähnung abgesehen. Das Geschlecht der Entwickler/Konstrukteure spielt selbstverständlich keine Rolle.

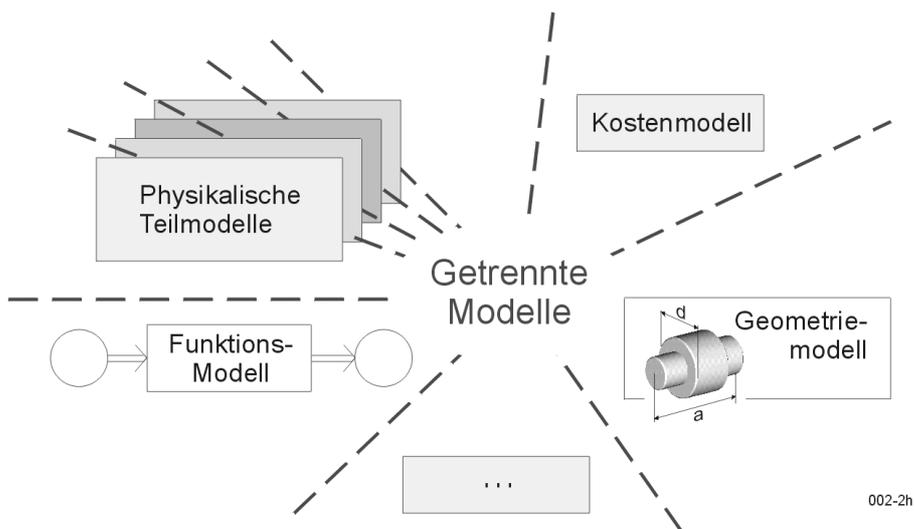


Bild 1-1: Informationstechnische Trennung zwischen Teilmodellen

1.2 Vision

Der folgende Abschnitt skizziert ein Szenario einer extrem hoch rechnerintegrierten Produktentwicklung in der Zukunft. Das Szenario ist im Stil einer Sciencefiction Geschichte geschrieben und soll dem Leser den Geist der vorliegenden Dissertation lebendig vor Augen führen. Im Anschluss wird das Szenario besprochen und nach Fiktion und realistischen Gedanken untersucht. Es wird versucht den Zeitpunkt zu bestimmen, an dem das Szenario spielt, und der Anteil extrahiert, der in absehbarer Zeit mit existierenden Technologien umsetzbar erscheint. Der anschließende Abschnitt 1.3 "Zielsetzung der Arbeit" beschreibt, welchen Anteil die vorliegende Arbeit leisten will.

1.2.1 Zukunftsszenario³

<< Heute war ein guter Tag. Peter atmete tief ein und genoss die gute Luft. Er schaute von seiner Terrasse hinab auf das ruhige Meer, die Klippen, im Hintergrund sah er die deutlichen Umrisse der Berge der benachbarten Insel. Was für ein schöner, friedlicher Ort, dachte er. Niemand Außenstehendes hätte geahnt, welche Aufgabe ihn noch erwartete. Er war nicht im Urlaub. Nein, er war hier, weil er ein brillanter Ingenieur war. Er war Spezialist für Fahrzeugbau – kaum einer kannte die Anforderungen an solch komplexe Systeme wie Personenkraftwagen besser als er. Darum war er so gefragt. Darum war er hier.

Peter verschränkte die Finger seiner beiden Hände ineinander und ließ sie leise krachen, ihm war bewusst, was heute noch vor ihm lag: Die Entwicklung eines neuen Fahrzeuges –

³ Autor: Michael Amft

eine Aufgabe die genug Herausforderung für 3000 Ingenieure über einen Zeitraum von mehreren Jahren bot.

Aber wo waren die anderen? Wo war das Team?

Peter war allein. Warteten die anderen auf seinen Anruf? Auf eine Videokonferenz? Auf einen Startschuss via Datenkabel oder Satellit? Nein, Peter war alleine! ER war die Entwicklungsabteilung! Er alleine!

Seine Aufgabe war auch tatsächlich im Eigentlichen recht einfach – keine neuen Wirkprinzipien wurden von ihm erwartet, keine neuen, wenig erforschten Wege der Physik sollten beschritten werden. Genau genommen sollten die neuen Anforderungen an das zu entwickelnde Fahrzeug, die man ihm gesetzt hatte, hinterfragt, verantwortungsbewusst ergänzt und schließlich zielgenau umgesetzt werden. Sein Auftrag lautete kurz zusammengefasst: Entwickeln sie ein Fahrzeug nach konventioneller Funktionsweise mit sechs vollwertigen Sitzplätzen, das

- a) der Corporate Identity der Firma entspricht und sich gut in die Produktpalette einpasst,*
- b) Zielkonflikte im Bereich Sicherheit-Gewicht-Verbrauch-Design-Geländetauglichkeit-Strabentauglichkeit zu einem neuen Optimum definiert,*
- c) für die gesellschaftliche Mittelschicht erschwinglich ist und sich somit insgesamt sehr gut am Markt platzieren lässt.*

Dazu eine im Computer gespeicherte Liste mit Detailvorstellungen des Vorstandes.

Peter entschied sich auf der Terrasse zu arbeiten. Er holte seine audiovisuelle Rechnerchnittstelle aus dem Koffer und machte es sich im Liegestuhl bequem. Ein Kopfhörer und ein Mikrofon für die Daten Ein- und Ausgabe und ein einfacher Bildschirm.

<<System betriebsbereit, bitte authentifizieren sie sich! >>

Peter brauchte nicht lange mit dem Computer zu diskutieren bis er Zugang zu den Datenbanken seiner Firma erhielt.

<<Computer, wir entwickeln heute ein neues Auto! Fangen wir an! >> Der Computer kannte schon den Arbeitsstil von Peter und machte einen Vorschlag für ein Auto. Er wählte einfach ein Konzernfahrzeug aus dem Jahre 1963 und stellte es auf dem Bildschirm dar. Peter würde ihm schon sagen wenn er was anderes wollte.

Peter lachte. Am liebsten hätte er jetzt die Freigabe erteilt und wäre seiner Frau und den Kindern auf den Ausflug gefolgt. <Ist doch ein prima Auto! >, dachte er sich schmunzelnd.

<< Wir gehen aus von unserem aktuellen 7-Sitzer und versuchen die Lücke zum 5-Sitzer unserer Produktpalette zu schließen! >>

Auf dem Bildschirm erschien eine Ansicht des aktuellen Minivans des Konzerns.

<<Das Ding soll eher aussehen wie eine Limousine! >> Die Konturen verschwammen und formten sich neu zu einer Limousine, die sehr gestreckt aussah. Der Rechner schlug zwei Rückbänke mit je zwei Sitzen vor und hatte sich an amerikanischen Stretchlimousinen orientiert. Das gefiel Peter zwar optisch – der Computer hatte die konzerneigene stilistische Linie mit den dafür typischen Parametern in das Modell eingearbeitet – aber wie soll man so ein langes Auto parken?

Er fragte den Computer, welche Vorschläge er habe zum Verringern der Gesamtlänge des Fahrzeugs. Umdrehen der ersten Rückbank und somit gemeinsamer Fußraum brachte fast einen halben Meter, weglassen des Gepäckraumes weitere 60 Zentimeter. Indem Peter um variable, umklappbare Bänke bat, sollte das Problem fehlenden Stauraums zumindest im Falle einer Nicht-Vollbesetzung überstanden sein. Das Ganze sah jetzt aus wie ein konventioneller Kombi. Peter – und vor allem sein Vorstand – wollte aber etwas Unkonventionelles.

Er dachte an drei Personen vorne und drei auf der Rückbank. Nach Überprüfung der Ergonomievorgaben aus dem Firmenlastenheft konnte der Rechner auch hier neue Vorschläge unterbreiten. Schließlich wählte Peter einen viel versprechenden Ansatz aus.

Der Computer hatte längst das Fahrverhalten des Fahrzeugs berechnet und konnte nun mit Peter in die Diskussion einsteigen. Peter wollte nach Vorgabe durch den Vorstand ein All-Terrain-Konzept ausprobieren und forderte den Computer auf dem Fahrzeug mehr Bodenfreiheit zu geben. Der Computer führte den Befehl sofort aus und auf dem Bildschirm erschien eine scheinbar einfach höhergelegte Variante. Der Computer merkte allerdings an, dass sich die Sicherheitsaspekte bezüglich Kippsicherheit bei schneller Kurvenfahrt nur mit sehr straffem Fahrwerk und somit starken Komforteinbußen sicherstellen ließen. Peter fragte nach dynamisch regelbaren Fahrwerksystemen, die den Fahrkomfort nur im Extremfall bei Bedarf senkten. Das System warnte vor den signifikant erhöhten Kosten des Gesamtsystems, Peter wollte trotz eng vorgegebenem Kostenrahmen aber nicht locker lassen. Er forderte den Computer auf Analysen in punkto einer weiteren Erhöhung der Achsbreite und Einsatz anderer Bereifungen durchzuführen. Das System simulierte potenzielle Ausprägungen nach den Maßgaben der Automobil-Zeitschriften-Sicherheitstests. Peter las die Vergleichstests und wählte entgegen der Kostenbedenken doch die elektronisch geregelte Variante. Er forderte den Computer auf an anderer Stelle die erhöhten Kosten wieder einzusparen. Er stimmte vier Vorschläge mit dem Computer ab, die er in Diagrammen und Tabellen hinterfragte und deren geometrische Ausprägung er auf dem Bildschirm beliebig betrachten konnte. Er entschied sich für eine geringere Serienausstattung, so sollten die hinteren Türen einem Easy-Entry-System weichen.

So weit so gut. Auf dem Bildschirm war ein vollständig ausgereiftes Serienprodukt zu sehen. Darauf konnte sich Peter verlassen. Der Computer hatte Zugriff auf die Datenbanken seines Unternehmens sowie auf weltweite Datenbanken von Patenten bis Prüfverfahren, von Normen bis hin zu Standard-Zulieferteilen.

Die Kosten für das entwickelte Fahrzeug bezifferte der Rechner auf Grund von Erfahrungswerten mit den Zulieferern – es blieb der Einkaufsabteilung die Vorgaben des Rechners auch tatsächlich vertraglich zu Papier zu bringen.

Heute verließ sich Peter darauf, dass der Rechner die üblichen Fragen des Vorstandes an das neue Konzept mit einberechnet hatte und schlüssig würde beantworten können. Er hätte noch jeden einzelnen Parameter des Fahrzeuges hinterfragen und verändern können, konnte jedoch davon ausgehen, dass der Computer bereits in den Vorgaben entsprechendes

Optimum eingestellt hatte. Der Rechner übertrug die Daten ins Heimatwerk für eine Präsentation von Fahrzeug und geplanter Fertigung. Die Fertigungsplanung hatte der Rechner bereits in jedem Zwischenschritt mit durchgeführt und auf die zu erwartenden Randbedingungen und die Ressourcen der Firma abgestimmt.

Peter setzte den Kopfhörer ab, schaltete den Bildschirm aus und genoss den Blick über die Bucht. >>

1.2.2 Analyse und Diskussion des Szenarios

Es ist schwer zu sagen, in welchem Jahr die Vision spielen könnte. In ihrem ganzen Umfang liegt sie auf jeden Fall in ferner und noch nicht greifbarer Zukunft. Man kann nicht einmal sagen inwieweit sie für alle Zeiten überzogen ist, genauso wenig lässt sich das Szenario aber für alle Zeiten ausschließen. Einzelne Teile beziehungsweise Elemente klingen bereits heute nicht allzu ungewohnt:

- Die informationstechnische Infrastruktur der Gegenwart lässt das Szenario bezüglich der Telearbeit an beliebigem Ort schon heute möglich klingen. Aktuelle Arbeiten zur verteilten Entwicklung greifen in besonderem Maße auf moderne Datennetze und computergestützte Kommunikationsmedien zurück [DOBLIES 1998, FRANKENBERGER 1997, GAUL 2001].
- Sprach- Eingabe und Ausgabe werden bereits heute schon zur einfachen Steuerung und Bedienung von diversen Systemen und als Eingabewerkzeug für zum Beispiel Textverarbeitungsprogrammen eingesetzt [AXEL 1999, PAULUS 1998]. Sprache zu erkennen stellt in der Regel keine technische Schwierigkeit mehr dar (bei deutlicher Aussprache und trainierten Systemen), die inhaltliche Interpretation jedoch ist durch die Grenzen der künstlichen Intelligenz stark eingeschränkt [KASPER 2000].

Anders verhält es sich mit der dargestellten Art der Kommunikation mit dem Rechner, die vergleichbar ist mit der Kommunikation mit einem Menschen. Sätze wie *"Der Computer kannte schon den Arbeitsstil..."* setzen eine Art künstliche Intelligenz voraus, wie sie heutige Rechnersysteme noch nicht leisten können. Eine Intelligenz, ähnlich zu der Leistung des menschlichen Gehirnes, wird Rechnern nach allgemeiner Ansicht der Forschung für immer verborgen bleiben. Der Neurobiologe und Hirnforscher Gerhard Roth sagt in BREUER&KÖNNEKER (2000, S. 72): Um das menschliche Gehirn auf Siliziumbasis in seinen Funktionen nachbauen und sogar verbessern können, *"... müssten wir das Gehirn erst einmal verstehen. Dies jedoch ist schon mit großen Schwierigkeiten verbunden. Ganz zu schweigen davon, dass es auf der Grundlage herkömmlicher Computertechnik ein System, das die Leistung unseres Gehirns erbringt, wahrscheinlich grundsätzlich nicht geben kann. Das Argument lautet: Das Gehirn ist nicht nur eine elektrische, sondern noch viel mehr*

eine neuro-chemische "Maschine". Auf Siliziumbasis ist da nichts zu machen. (...) Wenn man den Fortschritt der Rechnerleistung auf der Grundlage des Mooreschen Gesetzes⁴ extrapoliert und daraus erstaunlichste Fortschritte für die nächsten hundert Jahre ableitet, dann vergisst man, dass die Erfolge in der KI-Forschung, was die sogenannten höheren kognitiven Leistungen betrifft – Gesichter erkennen, komplexe Probleme lösen etc. –, extrem bescheiden waren. Ein künstliches Bewusstsein in diesem Sinne ist nicht in Sicht."

Intelligenz bleibt also bis auf unbestimmte Zeit dem Menschen allein vorbehalten. Anders ist es mit den sonstigen Leistungen, die der Mensch bei seiner Arbeit vollbringt: Körperliche Arbeit wird in unserer Gesellschaft mit einer stetig zunehmender Zahl von Hilfsmitteln erleichtert und mit zunehmendem Grad der Automatisierung ganz von Maschinen übernommen; die Leistungsfähigkeit des Menschen wird hier schnell um ein Vielfaches übertroffen. Ebenso sieht es aus bei geistiger Fleißarbeit. Rechnersysteme können wiederkehrende Arbeiten in beliebig komplexen Zusammenhängen mit sehr viel höherer Geschwindigkeit und somit extremen Vorteilen durchführen. So ist zum Beispiel die tatsächliche Berechnung eines determinierten Systems finiter Elemente keine hohe Intelligenzleistung, sondern eine relativ einfache Folge wiederholter Rechenschritte. Die Berechnung von Hand ist so überaus langsam, dass sie schlichtweg nicht anwendbar ist.

Die Arbeit mit den bestehenden Rechnertechnologien muss sich darauf beschränken den Menschen bei Fleißarbeiten und bei der systematischen Beherrschung komplexer Zusammenhänge zu unterstützen.

Die vorliegende Arbeit setzt sich die Aufgabe vor diesem technologisch begrenzten Hintergrund dennoch einen deutlichen Schritt in die Richtung auf die beschriebene Vision zu leisten. Die Arbeit geht unter Anwendung bekannter und bereitstehender Technologien vom aktuellen Stand der Technik aus. Ziel ist ein heute schon realisierbarer Konstruktions-Arbeitsplatz, der in prototypischer Umsetzung auf die beschriebene Vision zielt. Es wird untersucht, welchen Beitrag ein Ansatz ohne den Einsatz von Künstlicher Intelligenz leisten kann, der alleine auf interaktiver Unterstützung geistiger Fleißarbeit, auf Einbindung moderner Berechnungswerkzeuge und auf integriertem Datenbankzugriff basiert. Bild 1-2 zeigt diesen – an der extremen Weite der Vision gemessen – bescheidenen aber wesentlichen und vor allem umsetzbaren Schritt in die Richtung einer integrierten Gestaltung und Berechnung.

⁴ Mooresches Gesetz: Nach Gordon Moore, dem Erfinder des integrierten Schaltkreises, benannter Erfahrungssatz, wonach sich die Größe der Transistoren auf einem Mikroprozessor etwa alle zwei Jahre halbiert. Die Regel impliziert, dass sich die Rechenleistung eines handelsüblichen Computers im selben Zeitraum verdoppelt.

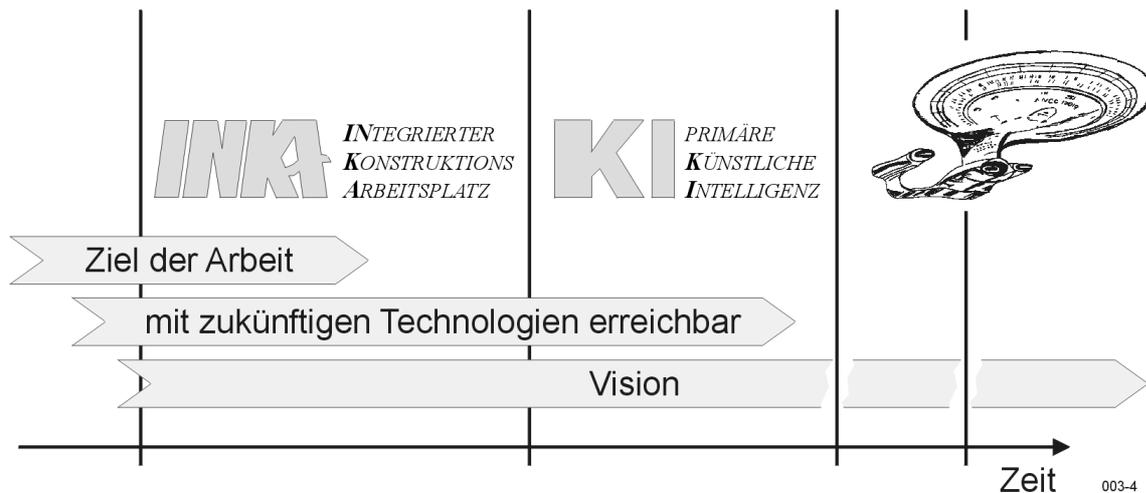


Bild 1-2: Die Arbeit als Schritt in Richtung zur beschriebenen Vision

Der wesentliche Ansatz ist die in der Vision beschriebene Art der Diskussion zwischen Rechner und Konstrukteur/Entwickler über Auswirkungen von Parameterveränderungen am Modell. Im Beispiel hat eine Erhöhung der Bodenfreiheit Auswirkungen verschiedenster Art auf sehr viele mathematisch/physikalisch damit zusammenhängende Parameter. Sind diese Zusammenhänge im bearbeiteten Produktmodell hinterlegt, kann auch ohne künstliche Intelligenz dem Konstrukteur/Entwickler die Auswirkung seiner Variation dargestellt werden. Eine Art Diskussion kann entstehen durch das Betrachten verschiedener Auswirkungen, die der Rechner dem Konstrukteur/Entwickler alternativ als Möglichkeiten dargestellt. So kann eine Längenänderung einer Bauteilkante die Änderung anderer Größen unter verschiedenen Zielsetzungen individuell nach sich ziehen: Zielsetzung kann sein, zum Beispiel die Gesamtlänge, das Gewicht des Bauteils, die Größe der Oberfläche, die Querschnittsfläche, oder auch das Flächenträgheitsmoment konstant zu halten. Allein die Darstellung dieser verschiedenen Möglichkeiten mittels Diagrammen, Tabellen und geometrischer Darstellung im CAD-Modell kann als Diskussion der Optimierungsschritte mit dem Computer interpretiert werden. Die Leistung des Rechners ist die Verwaltung komplexer Zusammenhänge, die durch signifikante Aufbereitung dem Konstrukteur/Entwickler zugänglich gemacht werden.

1.3 Zielsetzung und Hypothese der Arbeit

Hypothese der Arbeit ist, dass sich mit aktuellen Technologien, also ohne die Entwicklung visionärer KI-Methoden, ein wesentlicher Fortschritt auf dem Gebiet der Integration von Gestaltung und Berechnung erzielen lässt. Ziel ist die Schaffung eines integrierten Systems, dem ein erweitertes Produktmodell zu Grunde liegt, in dem Physik und Geometrie gemeinsam miteinander verknüpft abgelegt werden. Grundlegende Eigenschaft dieses Systems soll die Möglichkeit sein frei auf jeden Parameter – die geometrischen wie die

nichtgeometrisch/physikalischen – des Produktmodells zugreifen zu können. Die Auswirkungen von Parametervariationen auf den gesamttechnischen Zusammenhang sollen vom Rechner aufbereitet und dem Konstrukteur/Entwickler in geeigneter Form dargestellt werden.

Es soll ein System entstehen, das den Konstrukteur/Entwickler in seiner kreativen, intuitiven Vorgehensweise unterstützt, indem es geometrisch/mathematisch/physikalische Zusammenhänge ergonomisch aufbereitet und seinem Willen durch interaktive Zugriffe frei zugänglich macht. Die Erforschung der erforderlichen Funktionalitäten des Systems zielt auf die grundsätzlichen Vorgehens- und Denkweisen des Entwicklers/Konstrukteurs und soll sich nicht auf spezielle Produkte oder Maschinenelemente beschränken. Damit kann ein neues effizientes Werkzeug für die Produktentwicklung entstehen, das durch seine freie Einsetzbarkeit allgemein anwendbar ist und somit nicht als eine Expertenlösung einer beschränkten Anzahl von Anwendungen vorbehalten bleibt.

Die Arbeit setzt eine bidirektionale, zeitlich durchgängige Integration von Gestaltung und Berechnung um. Alle Berechnungen des Entwicklungsprozesses werden durchgängig von den frühen bis in die späten Phasen im Produktmodell abgebildet, wobei die Berechnungsvorschriften und die abgebildeten Anforderungen zu jedem Zeitpunkt wirksam sind und Einfluss auf die Gestalt nehmen. Der Konstrukteur/Entwickler arbeitet während des gesamten Produktentwicklungsprozesses mit einem einzigen Berechnungsmodell und kann die Auswirkungen von Parameteränderungen auf das gesamte Produkt von früher Phase an überwachen. Alle Berechnungen werden in einem Berechnungssystem zusammengeführt und zusammen verwaltet. Ein Solver ermöglicht die Auflösung des Gleichungssystems nach jeder beliebigen Variablen. Ziel ist eine durchgängige bidirektionale Integration durch alle Phasen des Produktentwicklungsprozesses (Bild 1-3).

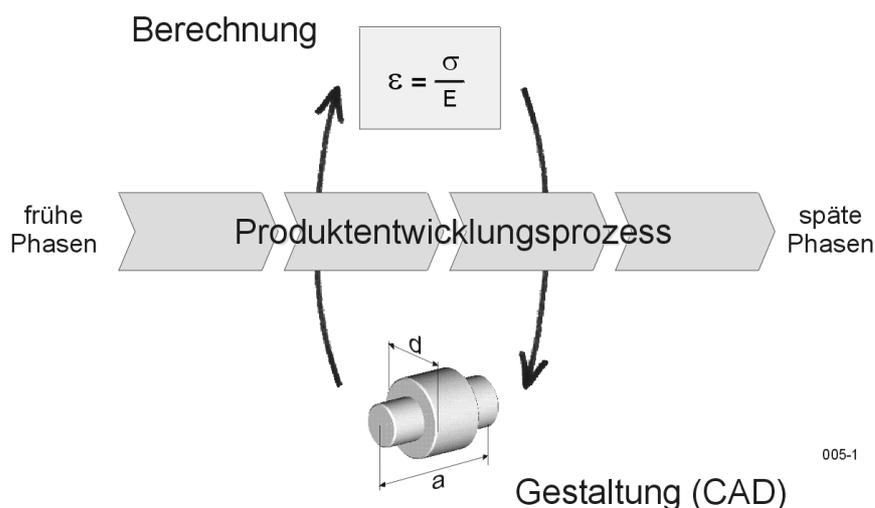


Bild 1-3: Zielsetzung einer phasenübergreifenden, bidirektionalen Integration von Gestaltung und Berechnung

Wesentliche Aufgabe bei der Erarbeitung und Bearbeitung dieser Ziele war die systematische Betrachtung der Grundlagen für das Forschungsfeld der Integration von Gestaltung und Berechnung. Erst dadurch war es möglich zielgerichtet den Stand der Technik und der Forschung zu beurteilen und entsprechend den notwendigen Handlungsbedarf zu erkennen und zu beschreiben. Aus diesem Grund stellt das Kapitel 2, "Systematische Erarbeitung der Grundlagen für die Integration von Gestaltung und Berechnung" einen wesentlichen Schwerpunkt der Arbeit dar.

1.4 Erfahrungsgrundlage der Arbeit

Die Aufgabenstellung und die Idee für die Arbeit basieren auf dem Schwerpunktprogramm "Innovative rechnerunterstützte Konstruktionsprozesse: Integration von Gestaltung und Berechnung 1995-2000" der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Der Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München wirkte in dem Schwerpunktprogramm in den Jahren 1996 bis 2001 mit. Es wurden zwei Forschungsprojekte mit den Titeln

- "Rechnergestützte Methoden zur bidirektionalen Integration von Gestaltung und Berechnung im Konstruktionsprozess" und
- "Bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung im Konstruktionsprozess: Unschärfen in der Schnittstelle."

durchgeführt.⁵

Insgesamt arbeiteten in dem Schwerpunktprogramm etwa 30 eigenständige Forschungseinrichtungen mit verschiedenen Fokussen. Der eine Teil der Arbeiten konzentrierte sich auf Integrationsthemen, die auf spezielle Anwendungsfälle und spezielle Objekte ausgerichtet waren. So standen bei diesen Projekten ausgewählte Maschinenelemente und Maschinensysteme sowie werkstoff- und fertigungsorientierte Bauteilgestaltung im Mittelpunkt. Der andere Teil der Arbeiten befasste sich mit allgemein anwendbaren Systemkonzepten, so auch die vorliegende Arbeit.

⁵ Die Kapitel 4 "Konzept für ein System zur phasenübergreifenden bidirektionalen Integration von Berechnung und Gestaltung" und 5 "Umsetzung des Konzeptes" zitieren aus den Forschungsanträgen und den Forschungsberichten LINDEMANN&AMFT (1997a, 1997b, 1997c, 1998a, 1998b, 1999a, 1999b, 1999c, 2000a und 2000b).

1.5 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit baut sich systematisch auf den Vorgehensschritten Hypothese, Analyse, Synthese, Evaluation und Zusammenfassung/Ausblick auf. In Bild 1-4 ist dargestellt, wie sich diese Systematik an der Gliederung spiegelt.

Die Hypothese wurde mit Hilfe eines sehr visionären Szenarios in **Kapitel 1** (Einleitung und Zielsetzung) aufgestellt. Ausgehend von dem Handlungsbedarf die informationstechnologische Integration von Gestaltung und Berechnung fortzuentwickeln, zeigt das Szenario, in welche Richtung die Bemühungen gelenkt werden müssen. Durch Beschränkung auf heute verfügbare Informationstechnologien kann die Zielsetzung des umsetzungsorientierten Teils dieser Arbeit formuliert werden.

In **Kapitel 2** werden wesentliche Grundlagen für Forschungs- und Umsetzungsprojekte im Bereich der Integration von Gestaltung und Berechnung erarbeitet. Die Forschungsergebnisse dieses Grundlagenkapitels sind allgemein Voraussetzung für das Verstehen der Integrationsproblematik, für die Formulierung von Zielsetzungen von Arbeiten zu dieser Thematik und zur Bewertung ihrer Ergebnisse. In ihrer Systematik und ihrer Neuartigkeit stellen die Grundlagen einen wesentlichen Hauptteil der vorliegenden Arbeit dar.

Kapitel 3 beschreibt und analysiert die Ausgangssituation für Forschungs- und Umsetzungsprojekte zur Integration von Gestaltung und Berechnung durch eine ausführliche Darstellung des Standes der Technik und aktueller Forschungen. Die Darstellung des Stands der Technik basiert auf den erarbeiteten Grundlagen und zeigt den Handlungsbedarf der Forschung.

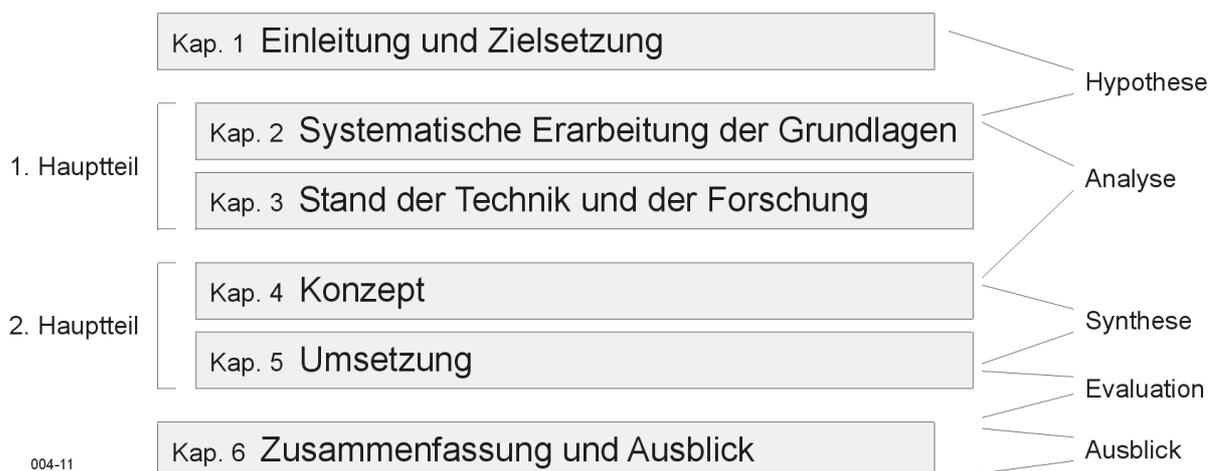


Bild 1-4: Inhaltlicher Aufbau der Arbeit

In **Kapitel 4** wird der praktische Teil der Arbeit beschrieben. Auf der Basis des Grundlagenkapitels und des Standes der Technik und der Forschung wird ein Konzept für eine

phasenübergreifende bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung vorgestellt.

Kapitel 5 beschreibt die Umsetzung des Konzeptes in einem integrierten System. Anhand der Beispielanwendung des Systems an ausgesuchten Produktbeispielen wird schließlich die Funktion beschrieben sowie die Einsetzbarkeit und Praxisrelevanz des Ansatzes beurteilt.

Kapitel 6 bietet die Zusammenfassung und einen Ausblick.

2 Systematische Erarbeitung der Grundlagen für die Integration von Gestaltung und Berechnung

In diesem Kapitel werden grundlegende Zusammenhänge bezüglich der Integration von Gestaltung und Berechnung erarbeitet. Dies ist für eine einheitliche Sprache und ein einheitliches Verständnis, mit deren Hilfe das Forschungsfeld in seiner Gesamtheit überblickt und strukturiert werden kann, notwendig. Kapitel 3 (Stand der Technik und der Forschung) greift die Begrifflichkeiten entsprechend auf. Die Forschungsarbeit dieser Dissertation lässt sich auf der Basis der Grundlagen in seiner besonderen Zielsetzung klar in dem Forschungsfeld positionieren.

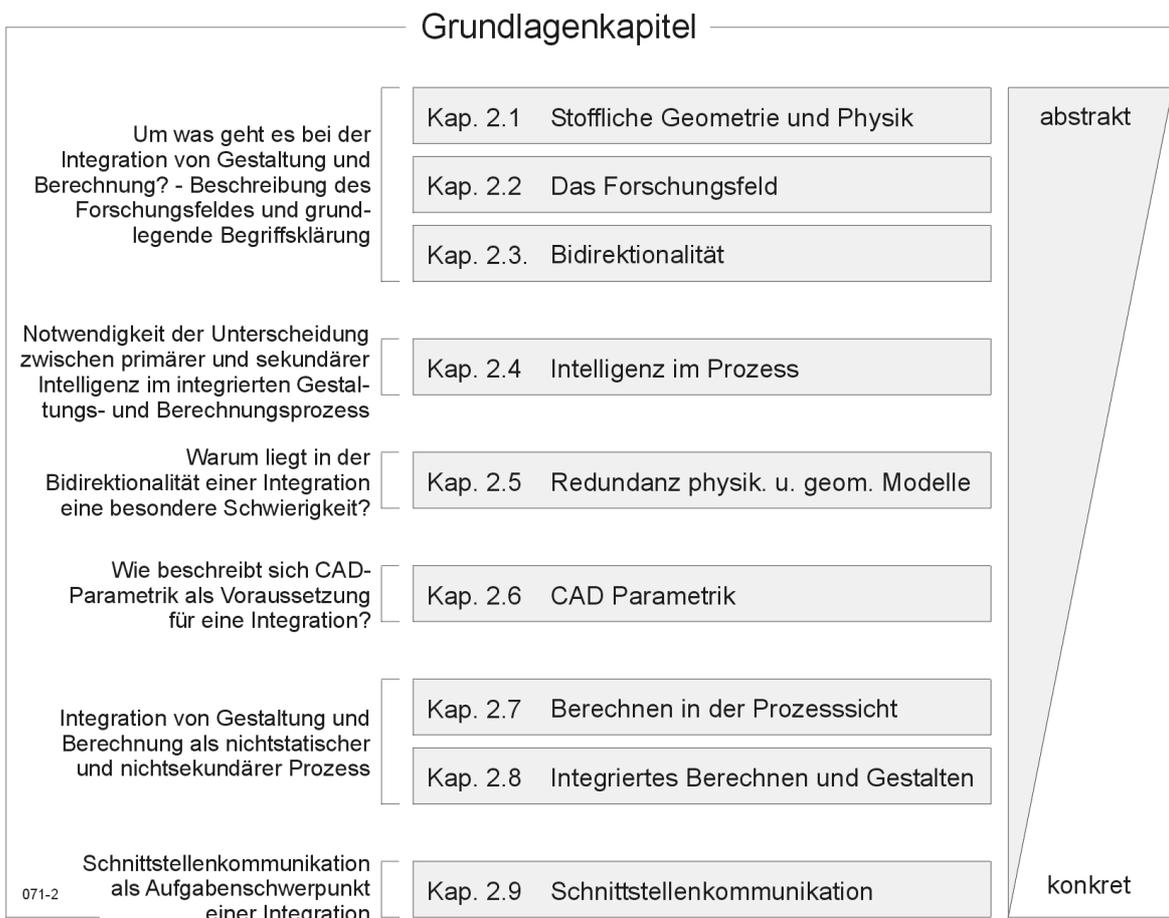


Bild 2-1: Die Fragestellungen zu den erarbeiteten Grundlagen zur Integration von Gestaltung und Berechnung

Bild 2-1 zeigt die Fragestellungen, denen sich die einzelnen Abschnitte des Grundlagenkapitels widmen sowie ihre logische Folge/Anordnung. Das eigentliche Ziel einer Integration findet sich sehr konkret in der Beantwortung von Schnittstellenproblemen im letzten Abschnitt. Für ein Grundverständnis der Problematik ist jedoch der Einstieg auf sehr viel abstrakterer Ebene notwendig. Die ersten Abschnitte (Abschnitte 2.1 bis 2.3) widmen sich daher sehr grundlegenden Betrachtungen und Begriffsdefinitionen und führen über Überlegungen zur Unersetzbarkeit menschlicher Intelligenz (Abschnitt 2.4) und zur Unauflösbarkeit naturgesetzlicher Redundanzen (Abschnitt 2.5) sowie über Systembetrachtungen und ganzheitliche Prozessbetrachtungen (Abschnitte 2.6 bis 2.8) hin zur konkreten Schnittstellenklassifikation (Abschnitt 2.9).

2.1 Untrennbare Verknüpfung von stofflicher Geometrie und Physik

Bild 2-2 zeigt die untrennbare Verknüpfung von Maschinengeometrie und physikalischen Eigenschaften, die durch die reale Existenz und den Betrieb der Maschine wirken.

Unmittelbare physikalische Eigenschaften resultieren allein aus der Existenz der Maschine. Beispiel sind einfache physikalische Größen wie Gewicht und Trägheitsmomente, die durch das statische Zusammenwirken von Stoff und Geometrie entstehen. Die meisten physikalischen Eigenschaften resultieren jedoch erst mittelbar aus dem Betrieb der Maschine. Unter Betriebsbedingungen bei laufendem Stofffluss kommen prozessrelevante physikalische Größen wie Temperatur, Drücke, Drehzahlen, Momente, Kräfte und Felder zum Tragen.

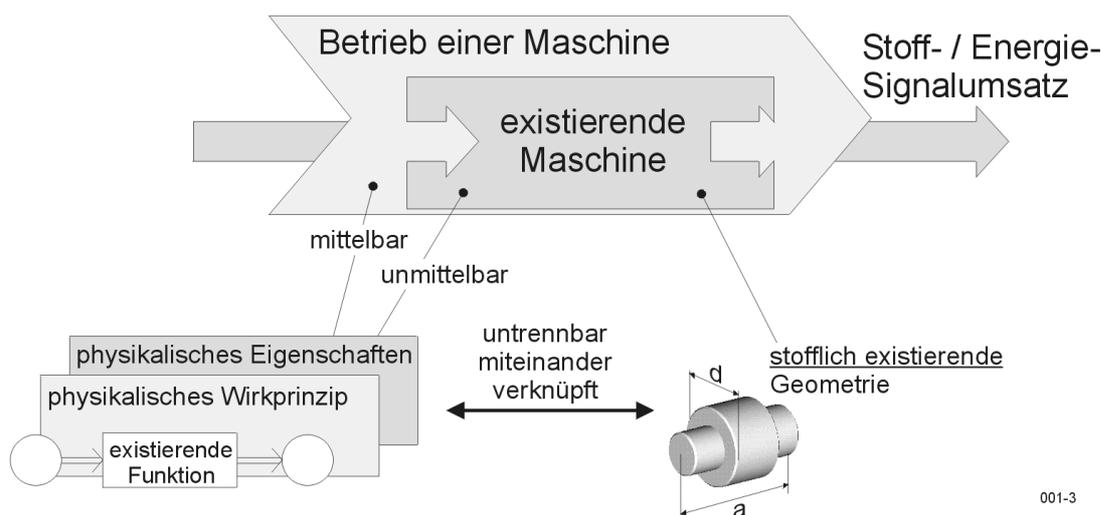


Bild 2-2: Verknüpfung Geometrie und Physik bei real existierender Maschine

In der Produkt-/Maschinenentwicklung arbeitet der Konstrukteur/Entwickler mit Modellen der Maschine. Das entstehende Geometriemodell besitzt selbst keine physikalischen Ei-

enschaften. Diese werden dem Entwickler erst durch die Bildung von Berechnungsmodellen, die relevante physikalische Teilprinzipien- und prozesse abbilden, zugänglich. Bild 1-1 zeigt die Trennung der verschiedenen und eigenständigen Modelle. Aufgabe des Konstrukteurs/Entwicklers ist es alle Modelle auseinander herzuleiten, aufeinander abzustimmen und gemeinsam zu optimieren.

Erst im Augenblick der Umsetzung der Geometrie in ein real existierendes Objekt sind Geometrie und physikalische Eigenschaften untrennbar miteinander verbunden. Dieser Zugang zur Physik entspricht während der Produktentwicklung dem Prototypenbau und Versuch.

Die Arbeit mit verschiedenen und getrennten geometrischen und physikalischen Modellen erfordert vom Konstrukteur/Entwickler iterative Schritte zur Erreichung des Gesamtziels seiner Entwicklungsarbeit, nämlich eines Geometriemodells als Abbild einer in reale Existenz umsetzbaren Maschine mit optimierten physikalischen Eigenschaften.

Der Begriff "Physik" soll im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit für *alle* nichtgeometrischen Größen stehen. Zum Beispiel auch die Kosten, die auf bewerteten physikalischen Größen/Prozessen basieren. Eine Bewertung bedeutet eine Verrechnung mit einem Kostenfaktor (Volumen, Masse, Spanvolumen, Werkzeugverschleiß, Fertigungszeit für einen Spanvorgang etc.). Auch andere nichtgeometrische Größen wie "Montagefreundlichkeit", "Umweltverträglichkeit" usw. lassen sich auf diese Weise unter dem Begriff "Physik" erfassen. Ebenso sind chemische und biologische Effekte letztendlich physikalisch wahrnehmbar und somit im maschinenbaulichen Sinne physikalisch beschreibbar.

2.2 Beschreibung des Forschungsfeldes „Integration von Gestaltung und Berechnung“

Jede Berechnung im Produktentwicklungsprozess steht im Zusammenhang mit der Gestaltungsaufgabe des Konstrukteurs/Entwicklers. Auch rein numerische Berechnungen nehmen Bezug auf geometrische Eigenschaften des entstehenden Konstruktes. Notwendig ist dafür eine physikalisch/mathematische Modellbildung. Dabei findet ein Transfer von Geometrieparametern in physikalisch/mathematische und damit numerische Größen statt. Die Integration von Gestaltung und Berechnung zielt darauf hin, diesen Transfer zu unterstützen.

Die gestalterische Arbeit findet im CAD statt. Es entsteht ein zunehmend detailliertes Modell, das der Konstrukteur/Entwickler aus Grundkörpern schrittweise aufbaut, ergänzt, anpasst, erweitert, variiert, optimiert und ausarbeitet, bis schließlich ein fertiges, für die Fertigung ausreichend determiniertes Gesamtmodell vorliegt. Dieses CAD Modell ist der eigentliche Ort der Gestaltung (siehe Bild 2-3, oberer Prozess). Im Anschluss an die Modell-

erstellung erfolgt eine Aufbereitung des Modells für die Fertigung in Form von Zeichnungserstellung und CAM.

Auf der Berechnungsseite nutzt der Konstrukteur/Entwickler sowohl rein rechnerische Verfahren als auch Verfahren mit geometrischen Ein- und Ausgabeformen (z. B. FEM oder Kinematikmodelle). Innerhalb der Berechnung führt er – genau wie im CAD-Gesamtprozess – eine Anpassung, Optimierung und Detaillierung der Berechnungsmodelle durch. Beruht das Verfahren auf geometrischer Modellierung der Berechnungsein- und Ausgabedaten, so kann auch hier – losgelöst vom CAD-Gestaltmodell – ein geometrisch gestalterischer Prozess stattfinden. Auf die Berechnungsparameter wird unmittelbar über das geometrische Hilfsmodell zugegriffen. Eine Einflussnahme auf die Berechnungsparameter bedeutet also eine geometrische Veränderung des Modells, was einem gestalterischen Prozess ähnlich dem CAD-Gesamtprozess gleichkommt. Tatsächlich ist das Gestalten innerhalb des Berechnungsverfahrens jedoch losgelöst von der eigentlichen Gestaltung des fertigungsgerechten Geometriemodells im CAD.

Das Schwerpunktprogramm der deutschen Forschungsgemeinschaft zum Thema „Integration von Gestaltung und Berechnung“ formuliert in seiner Zielsetzung (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1995, S. 1):

„Nicht befriedigend gelöst ist jedoch derzeit das Zusammenwirken von CAD- und Berechnungsprogrammen, das eine unmittelbare Umsetzung von Berechnungsergebnissen in fertigungsgerechte Modifikationen der stofflich-geometrischen Gestaltung oder umgekehrt gestattet (bidirektionale Arbeitsweise).“

Das Schwerpunktprogramm zielt damit auf den Hauptprozess der fertigungsgerechten Gestaltung im CAD. Explizit ausgeschlossen von der Förderung ist die Entwicklung neuer Berechnungsverfahren. Ausgeschlossen ist damit die Arbeit an geometrischen Hilfsmodellen als integraler Bestandteil der Ein- und Ausgabedatensätze numerischer Berechnungsverfahren. Diesen Sonderfall der Integration von Gestaltung und Berechnung abseits der eigentlichen Gestaltungsaufgabe des Konstrukteurs/Entwicklers im CAD zeigt das Bild 2-3 unten rechts. Dargestellt ist das Zusammenwirken geometrischer Hilfsmodelle und numerischer Prozeduren innerhalb einer in sich abgeschlossenen Berechnungsmethode.

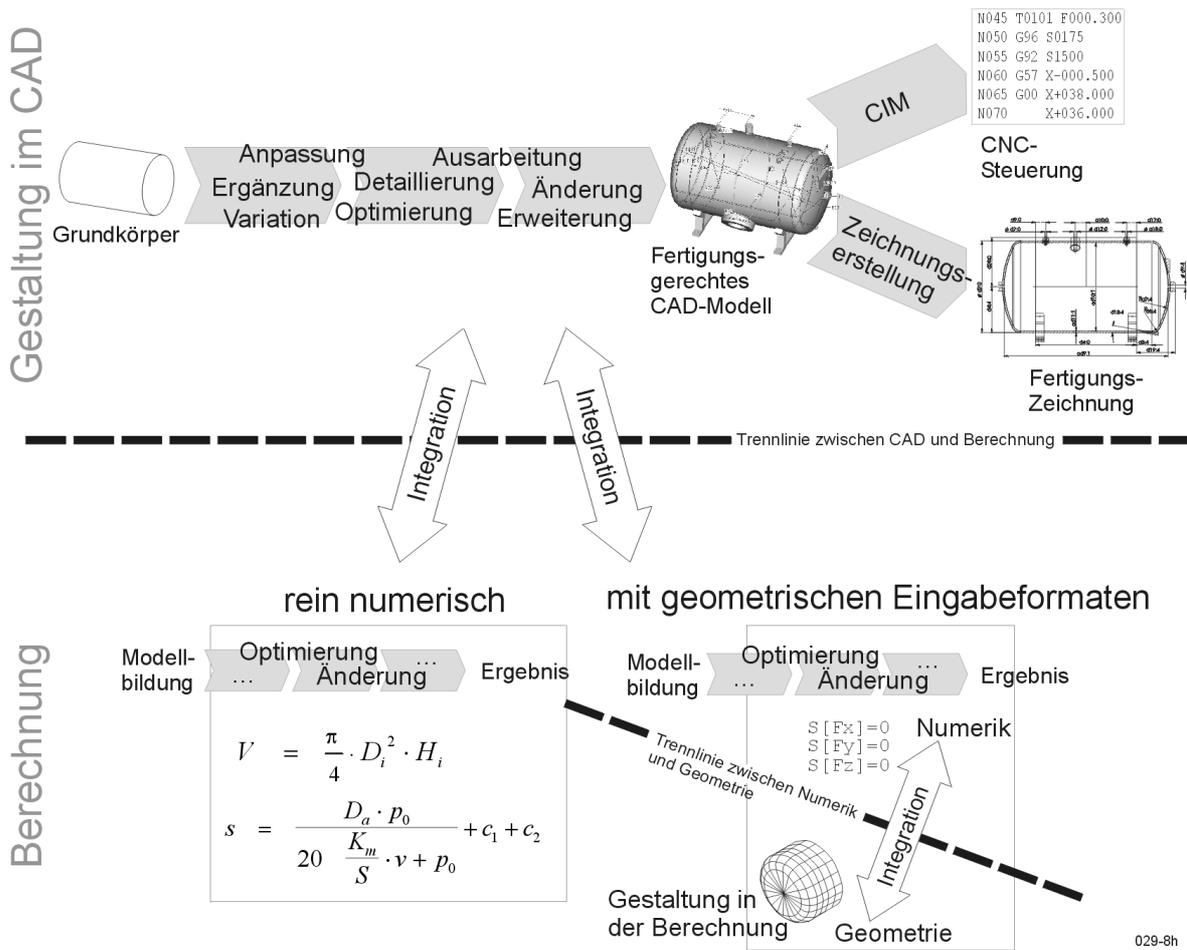


Bild 2-3: Beschreibung des Forschungsfeldes der Integration von Gestaltung und Berechnung

Das Bild 2-3 zeigt in seiner Gesamtheit das vollständige Forschungsfeld zur „Integration von Gestaltung und Berechnung“. Fokus des Schwerpunktprogramms der Deutschen Forschungsgemeinschaft ist die im Bild dargestellte obere Trennlinie zwischen dem Prozess der Gestaltung im CAD und der Berechnung. Die für die Integration in Frage kommenden Berechnungsverfahren können sowohl rein numerisch als auch wiederum geometrisch basiert sein, die Verfahren selbst und damit die untere Trennlinie zwischen Gestaltung und Berechnung der geometrischen Hilfsmodelle stehen jedoch nicht im Mittelpunkt der Betrachtung.

2.3 Bidirektionalität bei der rechnergestützten Integration von Gestaltung und Berechnung

In diesem Abschnitt wird der Begriff "Bidirektionalität" geklärt, über den in der Fachwelt keineswegs Einigkeit besteht. Ein im eigentlichen Sinne unidirektionaler Datenaustausch kann durch sequenziell gegenläufige Durchführung als bidirektional beschrieben werden

und steht damit begrifflich identisch neben einem tatsächlich zu jedem Zeitpunkt bidirektional stattfindenden Datenaustausch. Beide Ansätze unterscheiden sich jedoch grundlegend (AMFT ET AL. 2001).

2.3.1 Begriffliche Problematik

Die Problematik der Integration von Gestaltung und Berechnung ist grundsätzlich durch zwei Seiten definiert, die in Bild 2-4 symbolisch dargestellt sind. Auf der linken Seite im Bild befindet sich das CAD, rechts die Berechnung. Jeder Pfeil steht für eine der beiden prinzipiellen Richtungen des Datenflusses. Im Einzelnen ist gemeint, dass Ergebnisse aus der Berechnung ins CAD Modell transferiert werden, ebenso wie CAD-Parameter aus dem Geometriemodell als Eingabeparameter in die Berechnung fließen können.

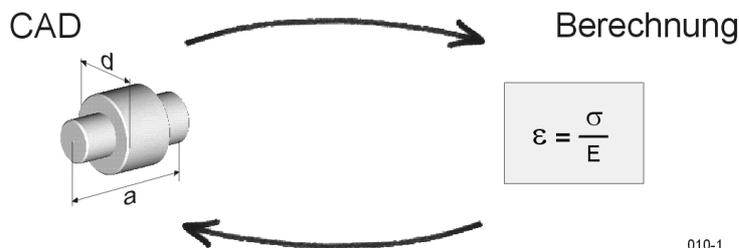


Bild 2-4: Bidirektionaler Datenaustausch zwischen Gestaltung und Berechnung

Diese einfache Vorstellung macht keine Aussage über den Zeitpunkt des Datenaustausches und über die Art der Datenverbindung. Die Problematik gewinnt erheblich an Komplexität, wenn der Produktentwicklungsprozess mit dessen Zeitkomponente in die Betrachtung mit einbezogen wird. Bild 1-3 (siehe vorne) zeigt diese zweite Dimension in Form eines horizontal angeordneten Prozesspfeils senkrecht zur Richtung des Datenaustausches.

Bei genauer Betrachtung der Grafik stellt sich die zunächst rein darstellerische Frage, wie der Aspekt der zeitlichen Anordnung der Datenaustauschpfeile richtiger zu berücksichtigen wäre. Der Datenaustausch vom CAD zur Berechnung soll nicht - wie in der Grafik zunächst flüchtig dargestellt - nur einmal in früher Phase stattfinden und in umgekehrter Richtung einmal in später Phase, vielmehr wird ein zu jedem beliebigen Zeitpunkt des Prozesses möglicher Datenaustausch in beliebige Richtungen angestrebt.

In dieser im Eigentlichen rein darstellerischen Schwierigkeit zeigt sich die tatsächlich grundlegende Frage nach Art der Ausgestaltung eines bidirektionalen Datenaustauschs. Der Beantwortung dieser Frage widmet sich die Forschung zur Integration von Gestaltung und Berechnung mit zwei prinzipiell unterscheidbaren Ansätzen, die im Folgenden beschrieben werden.

2.3.2 Grundlegende Ansätze

2.3.2.1 Kontinuierliche bidirektionale Integration

Eine bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung lässt sich durch unmittelbare Verschmelzung von Geometrie- und Berechnungsmodellen erreichen. Ein redundanzfreies, integriertes Modell bedeutet zu jedem Zeitpunkt die Übertragung jeder Veränderung der Geometrie auf die Berechnung und umgekehrt. Jedes neue Berechnungsergebnis kann über Abhängigkeiten seine eigenen Eingabeparameter beeinflussen. Es entsteht eine ganzheitliche Sicht auf Physik und Geometrie. Bild 2-5 zeigt, wie Gestaltung und Berechnung kontinuierlich in Verbindung stehen und gemeinsam auf der Zeitachse des Entwicklungsprozesses entlanggeführt werden.

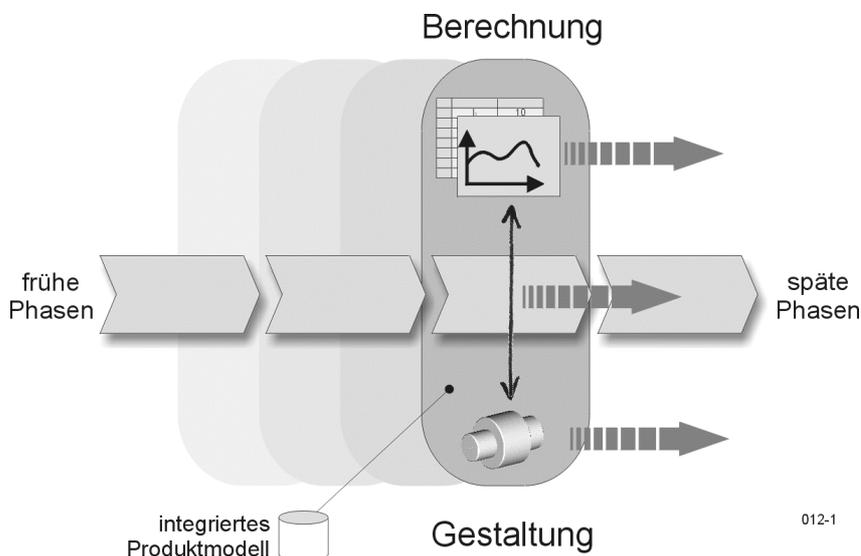


Bild 2-5: Kontinuierliche, bidirektionale Integration

2.3.2.2 Sequenzielle bidirektionale Integration

Als zweite Möglichkeit kann der bidirektionale Datenaustausch singularär angelegt sein. Der Datenaustausch ist in beide Richtungen und zu beliebigem Zeitpunkt möglich, im Moment des Datenaustausches ist er nur unidirektional. Nach jedem Transfer wird er unterbrochen und das Modell mit dem gearbeitet wird (auf der Berechnungsseite oder auf der Gestaltungsseite) detailliert. Das jeweils andere Modell bleibt von den Arbeiten zunächst unberührt. Die Modelle auf beiden Seiten stehen eigenständig und außer im Augenblick des Datenübertrages ungekoppelt nebeneinander. Bild 2-6 zeigt das Prinzip: Die Pfeile, die den Datenaustausch zwischen Berechnungs- und Gestaltungsseite symbolisieren, zeigen durch ihre einseitige Richtungsorientierung die Unidirektionalität und Singularität der Kopplung. Die Bruchlinien zwischen den Modellen symbolisieren die durch die Arbeit auf der jeweils anderen Seite entstehenden Entwicklungssprünge.

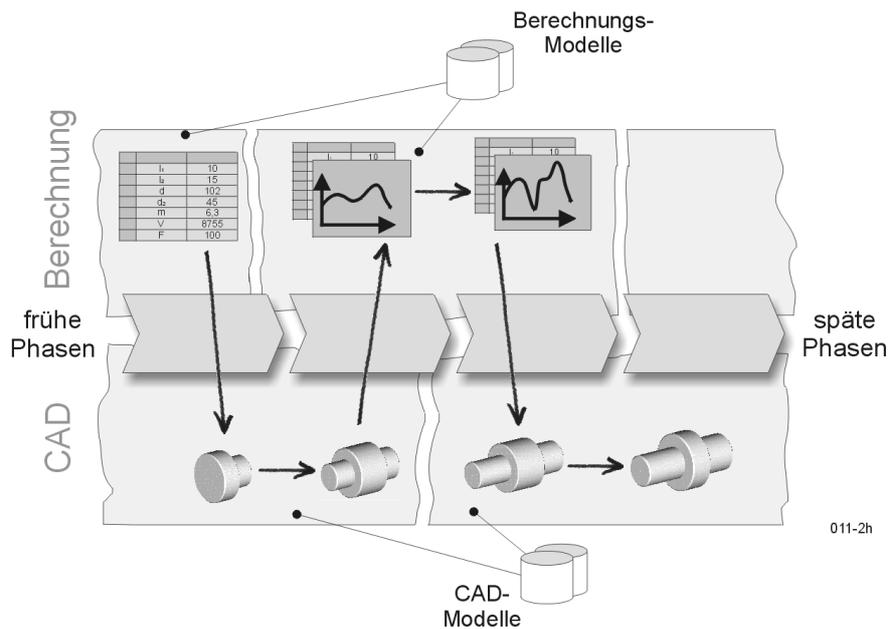


Bild 2-6: Sequenzielle, bidirektionale Integration

2.3.3 Ansatz in dieser Arbeit

Die vorliegende Arbeit geht den Weg der kontinuierlich bidirektionalen Integration.

Da diese Begrifflichkeit in der Fachwelt noch nicht etabliert ist, trägt die Arbeit den Titel "Phasenübergreifende bidirektionale Integration". In diesem Titel soll zum Ausdruck gebracht werden, dass in jeder Phase zu jedem Zeitpunkt auf jede abgelegte Berechnungsvorschrift aktiv zugegriffen wird. Dieses kontinuierliche Wirken der Berechnungsvorschriften wird in diesem Sinne als phasenübergreifend bezeichnet.

Auch die sequenzielle bidirektionale Integration ist zu jedem Zeitpunkt in verschiedenen Phasen des Entwicklungsprozesses einsetzbar. Der Übertrag von Berechnungs- und Geometrieparametern beeinflusst die Weiterentwicklung der Teilmodelle für alle nachfolgenden Ausarbeitungsschritte und damit für alle nachfolgenden Phasen. In diesem Sinne kann auch diese Integrationsform die Eigenschaft "phasenübergreifend" für sich beanspruchen, obwohl der Datenaustausch im Eigentlichen auf einzelne, individuell initialisierte Augenblicke beschränkt ist.

AMFT ET AL. (2001) beschreibt die beiden Formen und grenzt sie voneinander ab. Ob die Fachwelt die Begrifflichkeit der kontinuierlichen und der sequenziellen bidirektionalen Integration von Gestaltung und Berechnung annimmt bleibt abzuwarten.

2.4 Der Faktor 'Intelligenz' beim Zusammenwirken von Gestaltung und Berechnung

2.4.1 Die Intelligenz des Konstrukteurs/Entwicklers im Berechnungs- und Gestaltungsprozess

Aufgabe des Konstrukteurs/Entwicklers ist es technische/physikalische Zusammenhänge zu erkennen und abzubilden. Dafür muss er die relevanten physikalischen Parameter identifizieren und die korrekten Berechnungen aufstellen und durchführen. Wesentliche Aufgabe dabei ist das Erkennen von Zugehörigkeiten zwischen physikalischen und geometrischen Größen. Der Konstrukteur/Entwickler muss das Geometriemodell inhaltlich erfassen und die für die Berechnung relevanten Parameter darin identifizieren.

Für die rechtechnische Integration von Gestaltung und Berechnung ist im Besonderen der Übertrag von Ein- und Ausgabedaten zwischen CAD-Modell und Berechnung von Bedeutung. Ein CAD-Modell trägt eine Vielzahl von Längen und Winkelmaßen, die sich zunächst rechtechnisch semantisch nicht voneinander unterscheiden. Selbst bei feature-basiertem Modellaufbau (siehe Abschnitt 2.6.3) mit Hinterlegung von Zusatzinformationen über Art und Inhalt einzelner Geometrielemente ist die Zuordnung von Berechnungsparametern und Geometrieparametern in der Regel auf den Eingriff des Konstrukteurs/Entwicklers angewiesen. Trägt zum Beispiel ein Getriebemodell mehrere Wellen in sich, so müssen individuelle Wellenauslegungsberechnungen durchgeführt und zugeordnet werden. Ein berechneter Wellendurchmesser einer abgesetzten mehrstufigen Welle lässt sich auch innerhalb einer individuell gestalteten Welle nur schwer automatisiert ohne Eingriff des Konstrukteurs/Entwicklers zuordnen.

Darüber hinaus überträgt der Konstrukteur/Entwickler Berechnungsergebnisse in der Regel nicht eins zu eins, sondern unterzieht sie einer kritischen Betrachtung und einer bedarfsge-rechten Anpassung. Er rundet Ergebnisse zu sinnvollen und geraden Werten, berücksichtigt zur Verfügung stehende Halbzeuge und Maschinenelemente und wählt Abmessungen entsprechend zur Verfügung stehender Stufensprünge, er macht Zuschläge und Abschläge auf der sicheren Seite seiner Berechnungen, gleicht Maße untereinander ab und muss stets den gesamten Kontext der Entwicklung im Zusammenhang betrachten (Bild 2-7).

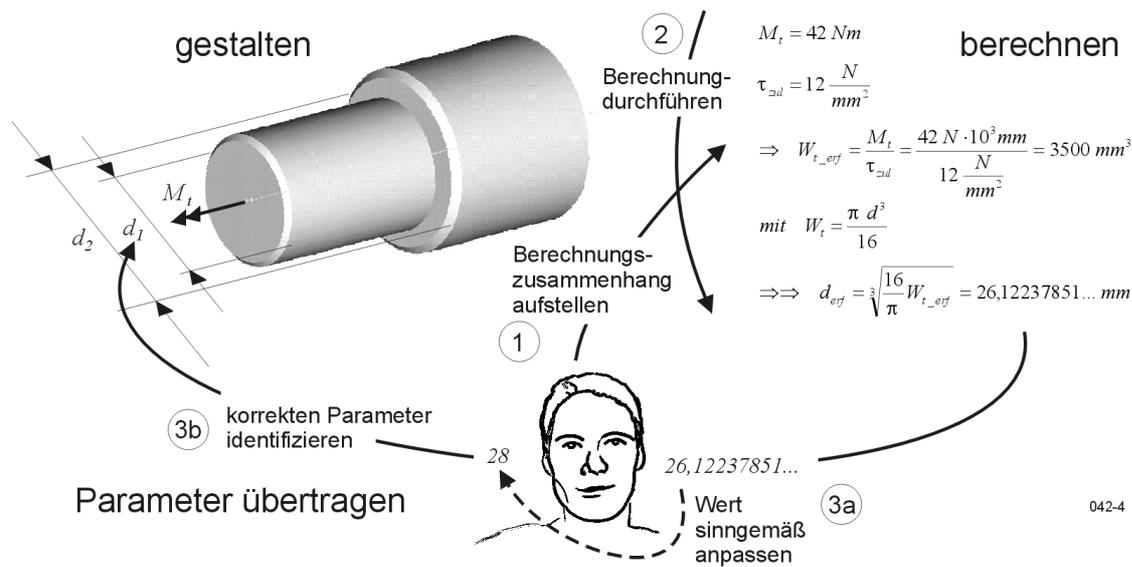


Bild 2-7: Intelligenzleistungen des Konstrukteurs/Entwicklers bei der Gestaltung und Berechnung

In den nächsten Abschnitten wird dargestellt, welche technologischen Möglichkeiten und Grenzen bestehen die beschriebenen Aufgaben von einem Rechnersystem übernehmen zu lassen. Viele Leistungen des Konstrukteurs/Entwicklers sind Intelligenzleistungen, die sich nur bedingt oder gar nicht im Rechner nachahmen oder abbilden lassen.

2.4.2 Künstliche Intelligenz

Der Begriff der Künstlichen Intelligenz (KI, auch engl.: Artificial Intelligence, kurz AI) stammt aus dem Jahr 1956. Auf einer Konferenz hieß es damals: Jeder Aspekt des Lernens wie auch jedes andere Merkmal der Intelligenz lässt sich grundsätzlich so genau beschreiben, dass man eine Maschine dazu bringen kann dieses Merkmal nachzuahmen. (CLICKFISH 2001)

Das bedeutet, in der KI-Forschung werden Computer dazu gebracht Aufgaben zu bewältigen, für die im nicht rechnerunterstützten Kontext menschliche Intelligenz benötigt wird. Viele KI-Technologien werden direkt für praktische Zwecke entwickelt. Beispiele dafür sind Spracherkennung (SUSEN 1999) und Bilderkennung. Andere Forschungen orientieren sich an grundsätzlichen Fragen zu Möglichkeiten der Modellierung von Intelligenz in Rechnern. Beispiel dafür ist die Entwicklung der Technik neuronaler Netze, die die physikalisch/biologischen Abläufe im menschlichen Gehirn in rechen-technischen Modellen nachahmt.

Interessant ist die Beobachtung, dass viele Dinge, die heute von Computern bewältigt werden, noch vor einigen Jahren als künstliche Intelligenz bezeichnet worden wären. Ein einfaches Beispiel dafür ist die automatische Rechtschreibkontrolle bei modernen Textverarbeitungsprogrammen. Vor 20 Jahren hätte man sich vom Computer gewünscht, er könne

Texte automatisch Korrektur lesen. Man stellte sich vor, der Rechner erkenne falsch geschriebene Wörter und schlage die richtige Schreibung vor. Heute ist dies gang und gäbe. Als künstliche Intelligenz würde man dies aber heute nicht bezeichnen. Es handelt sich um einen rechenintensiven Vergleich von einzelnen Wörtern mit einer Datenbank.

Der Rechner ist bis heute nicht in der Lage den Inhalt eines Textes zu erfassen. Auf Grund der fehlenden notwendigen Intelligenz ist eine *automatische* Rechtschreibkorrektur, die ohne Rückfrage an den Autor und damit ohne den Einsatz der menschlichen Intelligenz arbeitet, nicht sinnvoll.⁶ Für scheinbar zweifelsfreie Fälle stellen moderne Textverarbeitungsprogramme zwar vollautomatische Korrekturen ohne Benutzerinteraktion zur Verfügung, diese sind aber ausschaltbar, da immer wieder Fehler passieren.⁷

Mit dem folgenden einfachen Beispiel aus dem Gebiet der Produktentwicklung soll beschrieben werden, was der Unterschied zwischen dem ist, was gemeinläufig als künstliche Intelligenz bezeichnet wird und dem, was tatsächliche (menschliche) Intelligenz ausmacht:

Ein Konstrukteur hat den Auftrag einen Quader mit der Masse 1 kg und vorgegebenen Seitenverhältnissen zu konstruieren. Er arbeitet an einem Rechner, der Volumen- und Massenberechnung beherrscht, der Anbindung an eine Datenbank mit Werkstoffen besitzt und der über Optimierungsprozeduren verfügt. Das System erkennt für die gestellte Aufgabe einen geometrisch möglichst kleinen Quader als Optimum, also wählt es den in seiner Datenbank verfügbaren Werkstoff mit der höchsten Dichte: Gold. Der Konstrukteur rauft sich die Haare und wünscht sich, der Rechner sei intelligent genug auch an Kosten zu denken. Also verschafft er dem Rechner diese Fähigkeit, indem er Formalia der Kostenrechnung implementiert. Der Rechner kommt daraufhin sehr schnell zu einer neuen Lösung und wählt den billigsten Baustahl aus seiner Datenbank. Wieder rauft sich der Konstrukteur die Haare. Er erweitert das Modell um Formalismen zur Berechnung von Korrosionsbeständigkeit und Haltbarkeit sowie um die notwendigen Anforderungen an die Konstruktion. Der Rechner ist also nun so „intelligent“, wie es sich der Konstrukteur gleich zu Beginn gewünscht hätte. Das einfache zu Grunde liegende Berechnungsmodell kann aber nicht als *'im menschlichen Sinne'* intelligent bezeichnet werden.

Das Beispiel geht weiter: Der Rechner wählt mit seinen neu erworbenen Kenntnissen einen ausreichend korrosionsfesten Edelstahl. Leider muss der Konstrukteur feststellen, dass der gewählte Stahl 10 Wochen Lieferzeit hat. Sinnvoller wäre es einen etwas teureren aber am

⁶ Beispiel: Der Rechner erkennt die Wörter in der Redewendung "gang und gebe" als genauso richtig wie "gang und gäbe", obwohl die erste Schreibweise aus dem Zusammenhang heraus falsch ist. Durch eine einfache Abfrage dieses Spezialfalles könnte der Rechner die falsche Schreibung erkennen – intelligent ist er dadurch aber nicht.

⁷ Beispiel: Automatische Korrektur von versehentlich zwei großen ANfangsbuchstaben (entstehen oft durch versehentliches zu langes Halten der Shift-Taste) macht es z. B. unmöglich den Begriff "BAT Iia" zu schreiben: Das System ändert zu "BAT Iia". Die automatische Korrektur muss deaktiviert werden!

Lager vorhandenen Stahl zu verwenden. Das Modell im Rechner muss um Terminbetrachtungen und Kenntnisse des Lagerstandes erweitert werden.

Aber auch dann kann man noch nicht von einem intelligenten Rechner sprechen, auch wenn man sich zu Beginn einen so „intelligenten“ Rechner gewünscht hätte.

Bild 2-8 zeigt die eigentliche Intelligenzleistung im beschriebenen Beispiel. Sie besteht darin, dass das Modell situativ vom Konstrukteur/Entwickler angepasst wurde. Diese Handlung, das Modell ausreichend und richtig zu ergänzen und seine richtige Funktion zu überprüfen und zu hinterfragen, bleibt unersetzliche Intelligenzleistung des Konstrukteurs/Entwicklers.

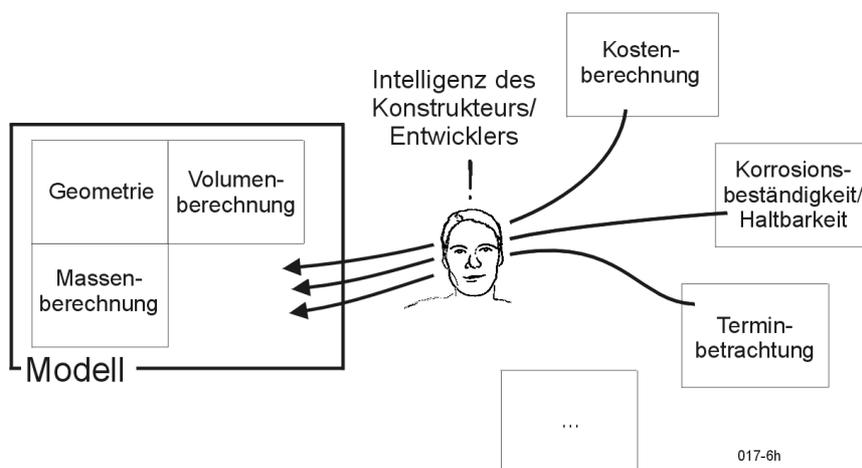


Bild 2-8: Die Intelligenzleistung besteht in der situativen Anpassung und Erweiterung des nach wie vor nicht-intelligenten Handlungsmodells im Rechner

Aus diesem Zusammenhang heraus folgt als logische Konsequenz das Bestreben, alle nur denkbaren Wechselwirkungen im Modell abbilden zu wollen. Bild 2-9 symbolisiert diesen Wunsch die Welt als Ganzes im Rechner zu modellieren. Aber selbst wenn es erreicht wäre, dass der Rechner alle Wechselwirkungen der Welt bis ins letzte Molekül berechnen kann, nachdem er mit allen Fertigkeiten diesbezüglich ausgestattet worden ist, so würde man auch dann noch nicht von tatsächlicher Intelligenz sprechen.

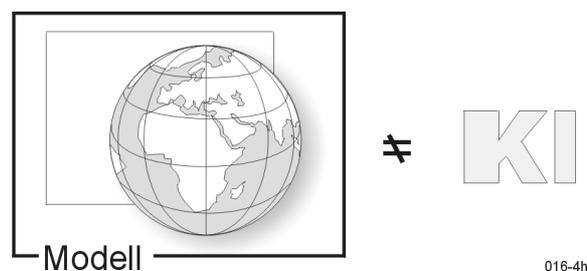


Bild 2-9: Selbst wenn man die Welt im Modell abgebildet hat, liegt im Sinne von Bewusstsein und Subjektivität keine Intelligenz vor.

KOLLER (1991) spricht von primären (nicht automatisierbaren) und sekundären (automatisierbaren) Konstruktionsaufgaben. Als primäre Konstruktionsaufgaben bezeichnet er solche Prozesse, bei denen der gedankliche Weg und die Lösungssuche noch völlig unklar sind und bei denen ein Konstrukteur noch eigene Einfälle liefern muss, um zu einer Lösung zu gelangen. Die Festlegung dieser originären Konstruktionsprozesse kann auch als *Konstruktionskunst* bezeichnet werden. Wenn der Konstrukteur die Lösung eines solchen primären Konstruktionsproblems gefunden hat, so kann diese oft durch automatisierbare sekundäre Konstruktionsprozesse umgestaltet werden, um abweichenden Zielen und Anforderungen zu genügen. Koller sieht bei den in der Konstruktionspraxis überwiegenden sekundären Konstruktionsprozessen hinsichtlich ihrer Beschreib- und Automatisierbarkeit keine Grenzen, schließt jedoch die primären Prozesse vollständig vom Zugang durch künstliche Intelligenz und Expertensysteme aus. BEHR (1995, S. 114) formuliert: "Erfahrungsbasierte, Kreativität erfordernde Entscheidungsprozesse, wie sie in den frühen Konstruktionsphasen ablaufen, lassen sich nach wie vor nur unzureichend im Rechner abbilden. Dies gilt umso mehr, je stärker die zu lösende Problemstellung den Charakter einer Neukonstruktion trägt."

FURBACH (2001) sagt: „Wenn Künstliche Intelligenz funktioniert, dann ist es keine!“. Dieses Erkenntnis beruht auf der Einsicht, dass Rechnersysteme zu jedem Zeitpunkt nur eine logische Schaltung darstellen, die nach den implementierten Gesetzen deterministisch ablaufen. Bewusstsein und Subjektivität bleiben Rechnersystemen unzugänglich. Das liegt auch daran, dass man bis heute nicht weiß, was Bewusstsein und Subjektivität tatsächlich sind. Schon allein daher ist es unmöglich sie im Rechner nachzuahmen. Die Unterschiede zwischen Mensch und Computer sind extrem groß und auch künstliche neuronale Netze, die in mancher Hinsicht dem Gehirn ähneln, können andere Charakteristika des menschlichen Gehirns unmöglich nachahmen, etwa den Einfluss von Hormonen und Neurotransmittern auf das menschliche Gehirn. Davon abgesehen ist die Lebenswelt des Menschen nicht mit der Umgebung eines Computers zu vergleichen, und das Bewusstsein des Menschen ist in seiner Lebenswelt verankert. Dieser Faktor wird in Romanen wie der scheinwissenschaftlichen Abhandlung "Homo sapiens" von RAY KURZWEIL (1999) vernachlässigt, indem die Entwicklung der Maschinenintelligenz proportional zur Entwicklung der Rechnergeschwindigkeit aufgezeichnet wird. Das Buch lässt in seiner freien Fiktion den Rechner den Menschen in allen Intelligenzbereichen weit überflügeln und stellt dies in rhetorisch geschickter und wissenschaftlich unhaltbarer Weise als unausweichliches Faktum kritisch dar. Arbeiten wie THIELEMANN (1995) und TSAVALOS (1997) beschränken sich auf Wiederholprozesse.

Bild 2-10 zeigt das philosophische Dilemma, in dem sich der KI-Forscher bewegt. Das, was in der Gegenwart ein fiktives, zukünftiges System intelligent im Sinne primärer Intelligenz erscheinen ließe, wird bei seiner späteren, technischen Realisierung lediglich als sekundäre Intelligenz umgesetzt. Das System wird zu diesem späteren Zeitpunkt tatsäch-

(Dörner 1979) befreit es nicht von der Notwendigkeit der kognitiven Kraft des Menschen. Problemlösen als reiner informationstechnischer Ablauf muss als "Aufgabenlösen" bezeichnet werden.

Abschnitt 2.4.1 beschreibt die gesamte Intelligenzleistung des Konstrukteurs/Entwicklers bei konventionellen Prozessen ohne Rechnerintegration zwischen Gestaltung und Berechnung (siehe Bild 2-7). Die rechtechnische Integration von Gestaltung und Berechnung bedeutet im Speziellen eine Übernahme des Datenübertrages durch den Rechner und bedeutet damit durch die Substitution der Person des Konstrukteurs/Entwicklers an dieser Stelle einen Entzug primärer Intelligenz aus dem Prozess.

2.4.3.1 Nähe des Konstrukteurs/Entwicklers zum Prozess

Bild 2-11 zeigt die unglückliche Situation, in die der Konstrukteur/Entwickler geriete, wenn er den Ergebnisübertrag vom Rechner mit Hilfe nicht unmittelbar kontrollierbarer und nicht vollständig nachvollziehbarer Mechanismen künstlicher Intelligenz durchführen ließe, zum Beispiel durch ein neuronales Netz, das keinen direkten symbolischen Zusammenhang zwischen Eingabe und Ausgabe erzeugt: Er verliert die direkte Kontrolle.⁸

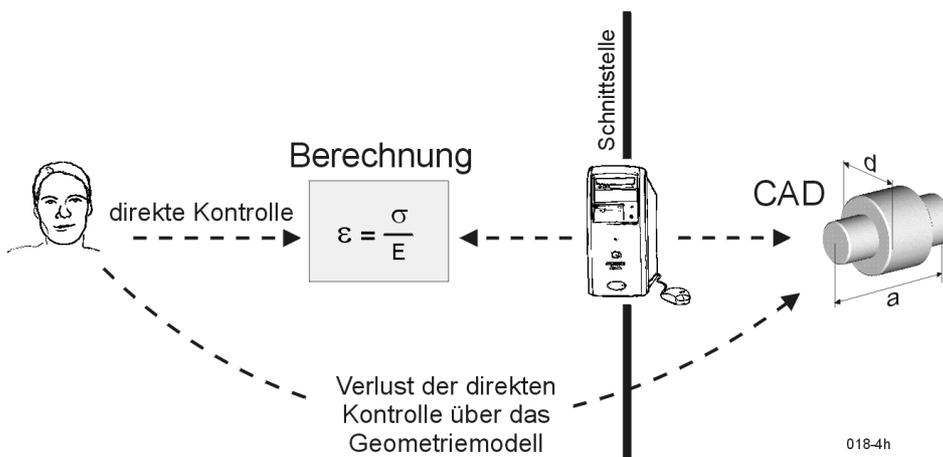


Bild 2-11: Bei Einsatz von KI-Integrationsmechanismen in der Schnittstelle verliert der Konstrukteur/Entwickler die direkte Kontrolle über das indirekt gesteuerte Teilmodell

Der Konstrukteur/Entwickler gerät an den Rand und hat nicht mehr das gesamte Modell unter direkter Kontrolle, wie es in konventionellen Prozessen, in denen ein Übertrag von Hand stattfindet, der Fall ist (Bild 2-12).

⁸ Bei bidirektionaler Wirkungsweise der Schnittstelle zwischen Berechnung und Gestaltung kann man sich den Konstrukteur/Entwickler auch auf der rechten Seite des Bildes vorstellen, je nachdem auf welcher Seite er gerade Eingriffe auf das Modell vornimmt.

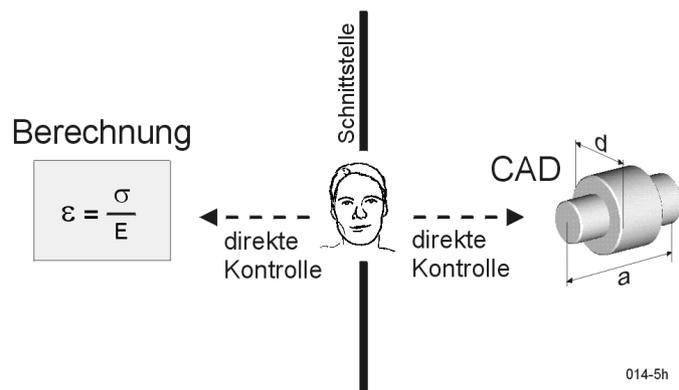


Bild 2-12: Bei konventioneller Handhabung von Gestaltung und Berechnung hat der Konstrukteur/Entwickler direkten Zugriff auf beide Seiten

2.4.3.2 Primäre Intelligenz im Prozess der sequenziellen Integration⁹

Bei der sequenziellen bidirektionalen Integration von Gestaltung und Berechnung besteht außer im Augenblick des Datentransfers keine Verbindung zwischen Gestaltung und Berechnung. Der Konstrukteur/Entwickler hat freie Hand für Eingriffe ins Gestaltmodell. Er kann iterativ die Parameter fertigungsgerecht ausgestalten und zu beliebigem Zeitpunkt auch wieder einer Berechnung zuführen. Damit bleibt der Prozess auch im Falle einer vollständig automatisierten Integration im Bereich des Datenübertrages für die primäre Intelligenz des Konstrukteurs/Entwicklers zugänglich. Bild 2-13 zeigt den Konstrukteur/Entwickler im sequenziellen Prozess mit der Unterstützung durch den Rechner beim Datentransfer. Durch Parameterveränderungen entsteht eine von der Berechnung losgelöste neue Ausprägung und damit berechnungsunabhängige neue Instanz des CAD-Modells.

Das bedeutet nicht, dass sequenzielle Integrationsansätze ohne Einsatz von primärer Intelligenz beim Datenübertrag auskommen. Möglichkeiten zur Einflussnahme durch den Konstrukteur/Entwickler und hohe Transparenz müssen auch hier vorgesehen werden und können nur im Falle extremer Objektbindung für Spezialfälle in den Hintergrund treten.

⁹ siehe Kap. 2.3.2.2 "Sequenzielle bidirektionale Integration"

Sequenzielle Integration

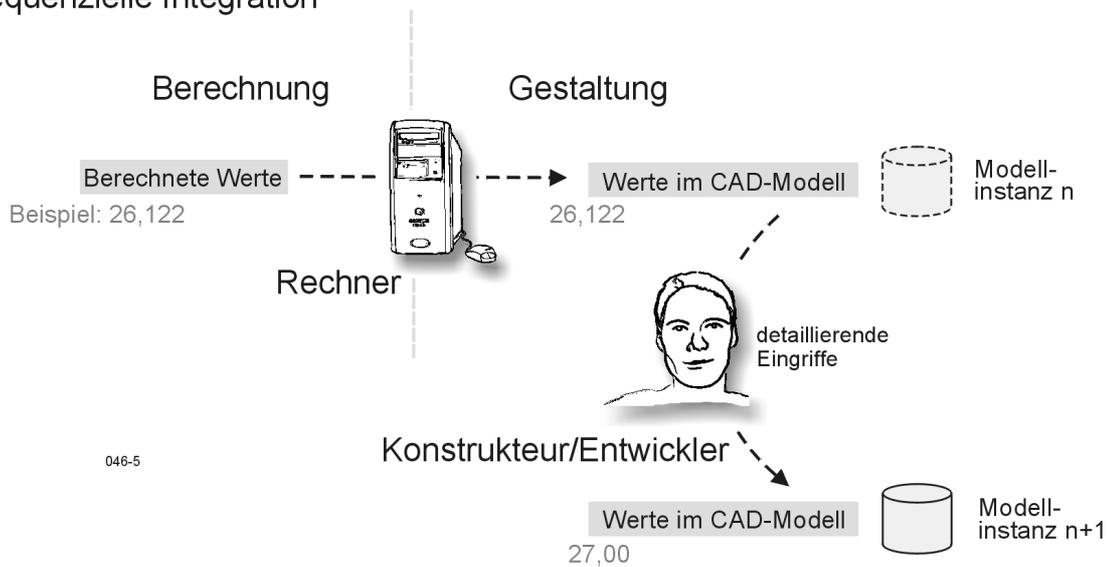


Bild 2-13: Sequenzielle Integration lässt dem Konstrukteur/Entwickler Freiraum für die Detaillierung der Modelle

2.4.3.3 Primäre Intelligenz im Prozess der kontinuierlichen Integration¹⁰

Bei der kontinuierlichen Integration von Gestaltung und Berechnung wird die Berechnung bei jeder Parametervariation unmittelbar mit einbezogen. Sie verändert zu jedem Zeitpunkt im Zusammenhang stehende Parameter nach Maßgabe der hinterlegten Berechnungsvorschriften und nicht nach fertigungsgerechten Gesichtspunkten. Der Eingriff des Konstrukteurs/Entwicklers auf einzelne Parameter ist prinzipiell möglich, die Herbeiführung einer ganzheitlichen Fertigungsgerechtigkeit aller Modellparameter ist jedoch weitestgehend unmöglich. Bild 2-14 zeigt, wie der zielgerichtete Eingriff des Konstrukteurs/Entwicklers auf einen einzelnen Parameter durch die kontinuierlich integrierte Berechnung ad absurdum geführt wird. Abhängige, nicht unmittelbar betrachtete Parameter können ihre fertigungsgerechte Ausprägung durch automatisierte Neuberechnung verlieren – ein Nachbessern an jenen Stellen wiederum beeinflusst die vom Konstrukteur/Entwickler ursprünglich gezielt herbeigeführten Ausprägungen.

Die besondere Herausforderung bei der Entwicklung von Systemen zur kontinuierlichen Integration von Gestaltung und Berechnung liegt darin die Schnittstellenvorgänge für den Konstrukteur/Entwickler zugänglich zu machen und damit das System für seine prozessual unverzichtbare primäre Intelligenz zu öffnen. Die vorliegende Arbeit widmet sich dieser Aufgabe. Während bei der sequenziellen Integration die primäre Intelligenzleistung des Konstrukteurs/Entwicklers im Augenblick des Datentransfers in den Hintergrund rücken kann, (da er anschließend nach der Abkopplung der Berechnung "nachbessern" kann) müs-

¹⁰ siehe Kap. 2.3.2.1 "Kontinuierliche bidirektionale Integration"

sen sich bei der kontinuierlichen Integration die Übertragungsmechanismen durch entsprechende Eingriffsmöglichkeiten durch den Konstrukteur/Entwickler auszeichnen.

Kontinuierliche Integration

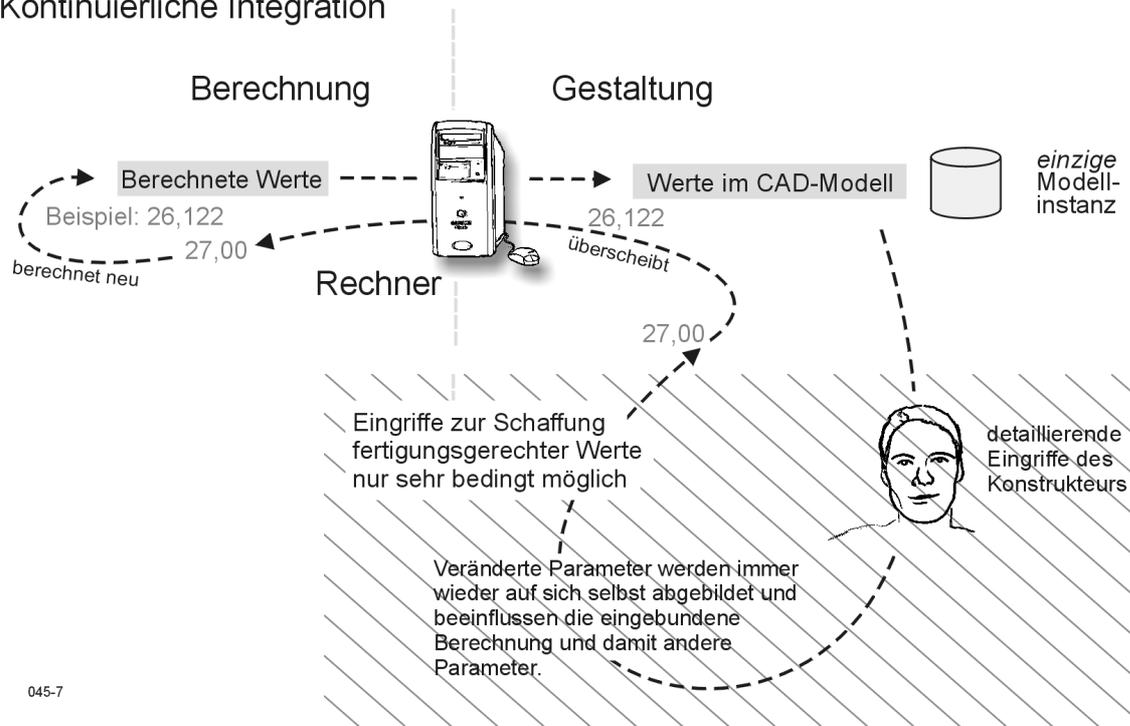


Bild 2-14: Kontinuierliche Integration: Der Konstrukteur/Entwickler wird von notwendigen Eingriffen zur fertigungsgerechten Parameteranpassung ausgeschlossen

2.4.4 Zusammenfassung und Fazit

Es ist zu unterscheiden zwischen primärer und sekundärer Intelligenz (nach KOLLER 1991):

- Primäre Intelligenz ist allein dem Menschen mit seinen interpretativen Fähigkeiten vorbehalten.
- Oft lassen sich Handlungen primärer Intelligenz in spezifischem Kontext nachbilden, sie sind also automatisierbar und damit in sekundäre Prozesse auf Basis sekundärer Intelligenz überführbar.

In Ermangelung der realen Existenz und Realisierbarkeit von künstlicher Intelligenz im Sinne einer primären Intelligenz, der der Konstrukteur/Entwickler in ähnlicher Weise blind vertrauen könnte wie einem menschlichen Mitarbeiter, muss sich ein System zur Integration von Gestaltung und Berechnung auf die Übernahme von Wiederhol- und Fleißarbeit beschränken und eine vollständige Prozesstransparenz sicherstellen. Die für den Konstrukteur/Entwickler vorzunehmenden Schritte zur Modellbildung und zur Kontrolle der

Vorgänge (hierbei ist der Einsatz der primären Intelligenz des Konstrukteurs/Entwicklers unabdingbar) müssen in einem positiven Nutzen-/Aufwandverhältnis zu den prozessualen Gewinnen durch die Integration stehen.

Im Besonderen fordern topologische Gestaltinstanzierungen¹¹ die "Konstruktionskunst" und damit die primäre Intelligenz des Konstrukteurs/Entwicklers. Gleiche bzw. ähnliche Konstruktionen lassen sich durch objektbindende Maßnahmen in sekundären Prozessen abbilden – schwierig gestalten sich jedoch berechnungsbedingte topologisch nicht ähnliche Gestaltvariationen im parametrischen Modell. Hier steht vor einer Parameteridentifizierung im Modell eine Parameterinstanzierung, also eine Veränderung der Gestalteigenschaften, die sich nur sehr bedingt der direkten Aufsicht des Konstrukteurs/Entwicklers entziehen kann.¹²

Die kontinuierliche Integration von Gestaltung und Berechnung lässt deutlich weniger Freiraum für die Einbringung primärer Intelligenz in den Prozess als die sequenzielle Integration. Die vorliegende Arbeit befasst sich daher im Besonderen mit den hier notwendigen komplexen Maßnahmen zur Sicherstellung der Zugänglichkeit für die primäre Intelligenz des Konstrukteurs/Entwicklers.

2.5 Redundanz bei physikalischer und geometrischer Modellbildung

2.5.1 Bidirektionaler Zusammenhang von Physik und stofflicher Geometrie

Die Existenz einer Sache kann einzig und allein durch ihre physikalische Wechselwirkung mit ihrer Umwelt wahrgenommen werden.¹³ Da auch Geometrie letztendlich wahrgenommen wird, unterliegt sie einer eindeutigen physikalischen Beschreibung. Daraus folgt:

*Eine **vollständige** physikalische Beschreibung determiniert **vollständig** die Geometrie. Ebenso determiniert eine **vollständige** Geometriebeschreibung bei stofflicher Umsetzung **vollständig** ihre Physik.*

Bild 2-15 zeigt diese bidirektionale Wechselwirkung.

¹¹ Instanzierung = Instanzenbildung

¹² Unberührt davon sind sogenannte Topologieoptimierungsprogramme, die abseits eines parametrischen Gestaltmodells in FEM-Netzstrukturen wirken. Ändert sich die Topologie eines Modells in solch einem Vorgang, können keine Netzzuordnungen zu einem eventuell vorhandenen parametrischen Ausgangsmodell hergestellt werden, weil dort entsprechende Eigenschaften parametrisch weitestgehend nicht instanzierbar sind (siehe dazu auch Kap. 3.2.3 FEM (Finite-Elemente-Methode) und Kap. 3.2.4 Topologieoptimierung).

¹³ Eine Sache, die *keinerlei* physikalische Wechselwirkung mit ihrer Umwelt hat, ist gleichsam nicht existent. Eine Sache, die *keine wahrnehmbare* physikalische Wechselwirkung mit ihrer Umwelt hat, kann existieren, bleibt aber verborgen und erreicht nicht unser Bewusstsein.

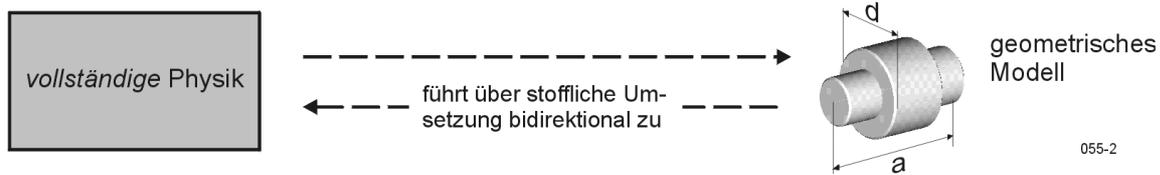


Bild 2-15: Ein vollständig determiniertes Geometriemodell führt über seine stoffliche Umsetzung zu einer vollständigen physikalischen Existenz. Umgekehrt führt eine vollständige physikalische Beschreibung zu einem eindeutigen Geometriemodell.

2.5.2 Maschinenbaulich relevante Physik als Teilmenge der vollständigen Physik

Die physikalische Wechselwirkung technischer Gegenstände mit ihrer Umwelt ist für die Naturwissenschaft nicht vollständig erfassbar. Bild 2-16 zeigt erfassbare und nicht erfassbare Anteile der Physik und klassifiziert sie.

Unbekannte Physik: Ein mutmaßlich großer Anteil der Physik entzieht sich auf Grund unvollständiger naturwissenschaftlicher Erkenntnisse unserem Bewusstsein.¹⁴ Ein weiterer Anteil von physikalischen Zusammenhängen ist mit heutigen Erkenntnissen und experimentellen Möglichkeiten (auf unabsehbare Zeit) nicht erklärbar.¹⁵ Die unbekannte Physik eines Tages vollständig zu erschließen bleibt mutmaßlich unerreichbar – auch unter der axiomatischen Voraussetzung einer rein naturwissenschaftlichen Schöpfung ohne die Existenz transzendenter Vorgänge.

Nicht wahrnehmbare Physik: Bild 2-16 zeigt als weiteren Bestandteil der vollständigen Physik einen nicht wahrnehmbaren¹⁶ Anteil, der sich zwar theoretisch berechnen oder voraussagen lässt, jedoch auf Grund nicht ausreichender Sensorik oder auf Grund von Störeffekten nicht messbar ist oder auch vollständig vernachlässigbar ist.¹⁷

¹⁴ Beispiel (aus der naturwissenschaftlichen Historie): Vor der Entdeckung der natürlichen Radioaktivität im Jahr 1896 durch A. H. Becquerel (MEYERS 1992) war Radioaktivität für den Menschen unbekannt und kein Teil der physikalischen Weltbetrachtung.

¹⁵ Beispiele (am Rand der heute bekannten Physik):
 - Die Existenz von Erdstrahlung ist bis heute wissenschaftlich außerordentlich umstritten (Wünschelrutengänge, schlechter Schlaf über Wasseradern etc.).
 - Mit heutigen physikalischen Erkenntnissen ist die Schwachheit der Massenanziehungskraft über größere Distanzen nicht erklärbar. Dies führt zu Theorien der Existenz höherer Dimensionen, in die die Schwerkraft mutmaßlich abstrahlen könnte (ARKANI-HAMED ET. AL. 2000).

¹⁶ Keine *direkte* Wahrnehmung durch Sinne mit oder ohne verstärkender oder übersetzender Hilfs-Sensorik (physikalische Messgeräte) und keine *indirekte* Wahrnehmung, die Rückschluss auf ursächliche Effekte geben kann.

¹⁷ Beispiel für nicht wahrnehmbare, nicht messbare oder vollständig vernachlässigbare physikalische Eigenschaften: Corioliskräfte auf einen Maßkrug beim Anheben zum Anstoßen.

Nicht bewusst wahrgenommene Physik: Weitere Anteile der Physik werden nicht bewusst wahrgenommen, weder direkt noch indirekt, und sind damit für eine maschinenbauliche Betrachtung irrelevant.¹⁸

Bewusst wahrgenommene Physik: Erst bei der bewusst wahrgenommenen Physik *nähert* man sich dem maschinenbaulich interessanten Bereich. Aber auch hier steht ein großer Anteil nicht im tatsächlichen technischen Betrachtungsmittelpunkt und ist daher beim Konstruieren/Entwickeln nicht von Interesse. Beispiel: Torsions- und Biegesteifigkeit eines Zugbolzens. Auch wenn sich alle bewusst wahrgenommenen Eigenschaften rechnerisch abbilden ließen, so wird sinnvoll nur der maschinenbaulich relevante Teil abgebildet. Hierbei werden positive (technische nützliche) wie negative (technisch schädliche) physikalische Eigenschaften gleichermaßen erfasst.

Nur dieser geringe Anteil der physikalischen Welt erschließt sich einer rechnergestützten Integration von Gestaltung und Berechnung. Aber auch hier ist die Modellbildung für die physikalischen Eigenschaften unvollkommen. PFEIFFER (1989, S. 1, S. 60-61) beschreibt, dass physikalische Modellbildung auch in Teilbereichen nicht vollständig sein kann, da die konstruktive und technologische Realität allein unter ökonomischen Gesichtspunkten stets Modellierungen mit Vernachlässigungen erfordert. Physikalische Modelle müssen so einfach wie möglich sein und ihre technische Aussage lediglich in ausreichender Genauigkeit sicherstellen. *"Es treten immer 'Dreckeffekte' in Form von Störungen auf. [...] Es existieren fast immer Erscheinungen, deren Physik nur unzureichend verstanden wird und die daher auch kaum realitätsnah modelliert werden können. [...] Man denke etwa an Reibungsercheinungen oder beispielsweise an tribologische Effekte bei Getrieben. Genau an dieser Stelle fängt [...] die nicht exakt wissenschaftlich zu begründende Arbeit des Ingenieurs an: Was kann man vernachlässigen und was ist zur Beschreibung der Funktion wichtig?"* PFEIFFER sagt darüber hinaus, die Aussage über die Güte eines Modells lasse sich nicht systematisieren. Ein *"gutes"* Modell gibt charakteristische Größen technischer Konstrukte und Abläufe *"ausreichend genau"* wieder.

Das bedeutet zusammenfassend, dass sich nur ein kleiner Teilbereich der Physik technischer Gegenstände erfassen lässt. Auch in diesem Teilbereich lässt sich die Realität nur unscharf und unexakt in physikalischen Formulierungen abbilden.

¹⁸ Beispiel für nicht bewusst wahrgenommene physikalische Eigenschaften: Die natürliche radioaktive Strahlung von Gegenständen.

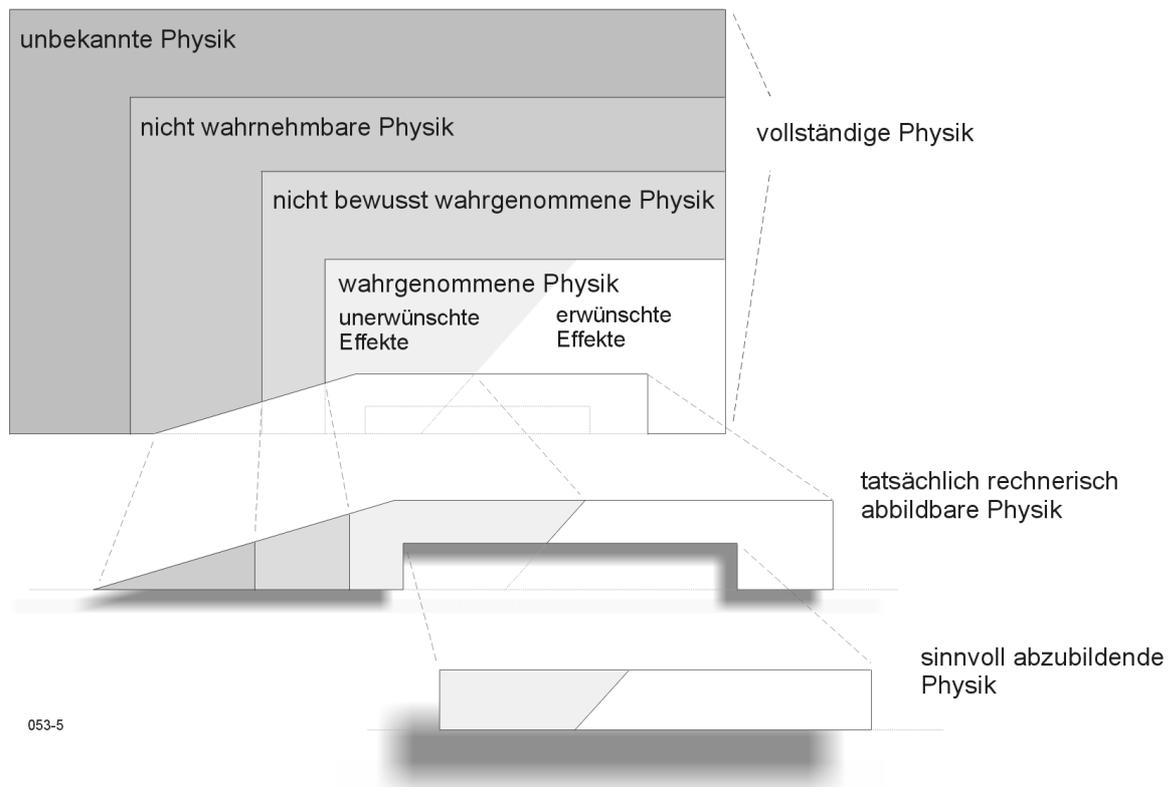


Bild 2-16: *Naturwissenschaftlich ist nur ein Bruchteil der realen Physik erfassbar und beschreibbar. Davon ist wieder nur ein Teil für die maschinenbauliche Betrachtung relevant und damit sinnvoll für eine mathematisch/physikalische Abbildung.*

2.5.3 Bidirektionaler Zusammenhang von Berechnung und Geometrie

Die Arbeit des Konstrukteurs/Entwicklers ist es technisch/physikalische Anforderungen in eine körperliche Geometrie umzusetzen sowie wiederum deren physikalische Eigenschaften zu erfassen und ganzheitlich abzustimmen. Die physikalische Sicht ist dabei stets unvollständig und unvollkommen. Es bedarf der Konstruktionskunst des Konstrukteurs/Entwicklers eine von unzähligen auf die geforderten physikalischen Eigenschaften zutreffenden geometrischen Lösungen herbeizuführen. Die unvollkommene physikalische Betrachtung und die Geometrie werden bidirektional über den Konstrukteur/Entwickler ineinander überführt und miteinander abgeglichen. Bild 2-17 zeigt diesen bidirektionalen Zusammenhang über die Konstruktionskunst des Konstrukteurs/Entwicklers, dem seitens der "Schöpfung" der bidirektionale Zusammenhang zwischen vollständiger Physik und stofflicher existierender Geometrie gegenübersteht.

ständigkeit der physikalischen Abbildung erfordert eine Überführung der Teilmodelle unter ständigem Abgleich durch die Konstruktionskunst²⁰ des Konstrukteurs/Entwicklers. Dies bedeutet, dass physikalische und geometrische Modelle auch bei rechentechnischer Integration aus der Natur der Sache heraus redundant und zweigeteilt bleiben und niemals vollständig automatisiert ineinander überführt werden können.

Das Fernziel einer vollständigen rechnerunterstützten kontinuierlichen bidirektionalen Integration von Gestaltung und Berechnung als Ersatz von händischem Abgleich durch den Konstrukteur/Entwickler bleibt aus diesem Grunde unerreichbar. Dies verweist die in der Einleitung beschriebene Vision einer vollständigen integralen bidirektionalen Abbildung von Physik und Geometrie (Abschnitt 1.2) für alle Zeiten in die Sciencefiction. Aufgabe der Forschung ist es sich diesem Ziel jedoch beliebig weit anzunähern.

2.5.6 Zusammenfassung und Fazit

Physik entsteht bei stofflicher Umsetzung eines Produktes *"von selbst"*. Eine physikalische Modellbildung zusätzlich zur geometrischen Modellbildung bedeutet daher stets die Schaffung von Redundanz in Geometrie und Berechnung. Auf Grund der Unvollkommenheit und Unvollständigkeit physikalischer Modelle können diese Redundanzen nicht bidirektional vollständig beherrscht werden.

Das bedeutet: Der Konstrukteur/Entwickler muss die Geometrie exakt und fertigungstechnisch realisierbar abbilden, kann sich bei der Physik aber auf ungenaue, besser: ausreichend genaue Festlegungen beschränken. Ein Ergebnisübertrag aus physikalischen Berechnungen in die Geometrie kann daher mit vordringlicher Priorität dem Grundsatz der Fertigungsgerechtigkeit/Fertigbarkeit folgen und die redundant abgebildeten physikalischen Parameter nur unscharf berücksichtigen.

Die Redundanz muss durch den Konstrukteur/Entwickler abgeglichen und geführt werden. Dieser Prozess kann nicht vollständig automatisiert werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es die Möglichkeiten und Grenzen einer Rechnerunterstützung auszuleuchten, sich dem unerreichbaren Ziel so weit wie möglich zu nähern und ein rechnerunterstütztes System zu entwickeln, das für den Zugriff und Abgleich durch den Konstrukteur/Entwickler geöffnet bleibt.

²⁰ nach KOLLER 1991

2.6 CAD-Parametrik

2.6.1 Grundlagen

Wichtige Grundlage für die Integration von Gestaltung und Berechnung ist die Parametrik moderner CAD-Systeme. Durch sie lässt sich die Geometrie steuern, indem variable Größen, die in konsistenter und logischer Verknüpfung zum gesamten Geometriemodell stehen, verändert werden. Als Ergebnis eines Zugriffs auf einen Parameter entsteht eine neue konsistente Ausprägung des Modells. (BÜHLMANN 1996)

Die Parametrik moderner CAD-Systeme ruht auf 3 Säulen:

- Konstruktionsbeziehungen
- Eigenschaften
- Variablen, Funktionen und Formeln.

Konstruktionsbeziehungen sind Beziehungen zwischen Geometrie-Objekten, die die Art und Weise beschreiben, wie ein oder mehrere Objekte erzeugt wurden, und welche anderen Objekte bzw. Parameter an der Konstruktion beteiligt waren. Beispiel sind sogenannte Eltern/Kind-Beziehungen, die die Reihenfolge, in der die Konstruktionselemente regeneriert werden und damit die Interaktion der Elemente untereinander bestimmen. Diese Beziehungen zwischen den Objekten entstehen automatisch bei der Konstruktion und werden im parametrischen CAD-Modell gespeichert. Spätere Manipulationen werden dadurch erheblich beeinflusst.

Eigenschaften legen verschiedene Lage- und Maßeigenschaften von Objekten fest. Die möglichen Eigenschaften reichen von fundamentalen geometrischen Eigenschaften, wie Parallelität von zwei Geraden, bis hin zu komplexeren Eigenschaften, wie Festlegen der Lage eines Punktes auf der Mitte einer Geraden. Im Allgemeinen werden die betroffenen Objekte bei der Verwendung von Eigenschaften für spätere Manipulationen bei weitem nicht so eingeschränkt, wie durch die Speicherung der Konstruktionsbeziehungen. Beispielsweise legt die Eigenschaft 'Parallelität zwischen zwei Geraden' lediglich fest, dass diese parallel sind und bei Manipulationen auch parallel bleiben. Die sonstige Lage der Geraden zueinander oder die Länge der Geraden ist aber unbestimmt und somit frei. Im Gegensatz zu Konstruktionsbeziehungen bestimmen also Eigenschaften die Objekte nicht eindeutig.

Variablen sind Platzhalter für beliebige Parameter und können über ihren Variablennamen angesprochen werden. Dadurch wird bei der Verwendung einer Variablen zur Konstruktion eines Objekts der aktuelle Inhalt der Variablen eingesetzt. Zur Festlegung von Parametern können nicht nur einfache Variablen, sondern auch **Funktionen** und auch komplexe arithmetische Ausdrücke (**Formeln**) eingesetzt werden. Der Parameterwert eines Geometrie-Objekts kann über eine Variable, eine Funktion oder auch über eine Formel berechnet

und dann zur weiteren Konstruktion verwendet werden. Auch ist es möglich diese Beziehung (Variable, Funktion, Formel) mit abzuspeichern. Ein Ändern der Variablen bewirkt dann, dass der oder die Parameter, die von dieser Variablen abhängig sind, neu berechnet werden. Somit ändert sich auch die Konstruktion.

2.6.2 Berechnungen in der CAD-Parametrik

Berechnungen im Produktentwicklungsprozess zielen auf die Variablen der Parametrik. Geometriebezogene Resultate einer Berechnung sind immer Längen- und Winkelmaße, die sich direkt in den Variablen der Konstruktionselemente widerspiegeln.²¹ Eigenschaften wie Parallelität, Rechtwinkligkeit, Mittenlage oder Symmetrie unterliegen in der Regel einer Konstruktionslogik und keiner Berechnung. Ebenso werden Konstruktionsbeziehungen (Eltern/Kind-Beziehungen etc.) nicht errechnet, sondern vom Konstrukteur/Entwickler im Produktmodell direkt gestalterisch/schöpferisch initialisiert. Das heißt, den Berechnungen, die Einfluss auf ein Gestaltmodell nehmen sollen, muss ein bezüglich der berechneten Größen konstruktionslogisch determiniertes Geometriemodell zu Grunde gelegt werden. Zum Beispiel: Die Berechnung eines Wellendurchmessers kann nicht selbstständig zur Erzeugung eines Wellenmodells führen. Dieses Modell muss dafür mit seinen Konstruktionsbeziehungen und Eigenschaften bereits angelegt sein. Der Versuch aus einem Berechnungsprogramm solche Modelle vollständig im CAD automatisiert zu erzeugen entspricht daher einer strengen Beschränkung auf *spezielle* Berechnungen *spezieller* Objekte, deren Konstruktionsbeziehungen und Eigenschaften zwar nicht unbedingt direkt im CAD aber doch in entsprechenden Modellgeneratoren bereits vorgegeben sind.

In einem parametrischen Produktmodell können die Elemente durch Parameter, Beziehungen (Relationen) und Constraints bezüglich ihrer Werte und Wirkungen begrenzt, gesperrt oder mit festen Größen belegt werden. Es können Wechselwirkungen über Formelbeziehungen im Produktmodell hinterlegt werden, die jedoch auf Grund der Wirkungsweise der CAD-Parametrik nicht tatsächlich wechselwirken, sondern nur unidirektional Einfluss üben. Der folgende Abschnitt beschreibt die unidirektionale Wirkungsweise innerhalb der Parametrik.

2.6.2.1 Unidirektionale Wirkungsweise von CAD-Parametrik

Beziehungen zwischen zwei und mehr Elementen sind durch die Festlegung von Führungsparametern und abhängigen Parametern gekennzeichnet. Das bedeutet: Wird ein Parameter in Abhängigkeit zu einem anderen gestellt, so verliert man den freien Zugriff auf ihn und kann ihn nur noch über diese Abhängigkeit durch Variation der Eingangsgrößen =

²¹ Auch wenn zum Beispiel eine Berechnung eine notwendige Querschnittsfläche eines Elements liefert, muss dieser Wert auf einen Durchmesser oder eine Kantenlänge umgerechnet werden.

Steuerparameter beeinflussen. Ein direkter Zugriff auf den Parameter erfordert eine Auflösung der parametrischen Abhängigkeit.

Diese nur unidirektional zwischen den Parametern wirkenden Beziehungen rühren daher, dass die Solver in parametrischen CAD-Systemen zwar weitestgehend alle Rechenarten beherrschen, jedoch nicht in der Lage sind Gleichungen umzustellen und nach beliebigen Variablen aufzulösen (Bild 2-18). Grundsätzlich behandeln die Solver ausschließlich Gleichungen der Form $a = f(b, c, \dots)$ mit $a \neq f(a)$, wobei a als gesteuerter Parameter für jeden anderen Zugriff gesperrt wird. Die anderen beteiligten Parameter sind Steuerparameter, bleiben frei zugänglich und werden durch die formulierte mathematische Beziehung weitestgehend nicht beeinflusst.²²

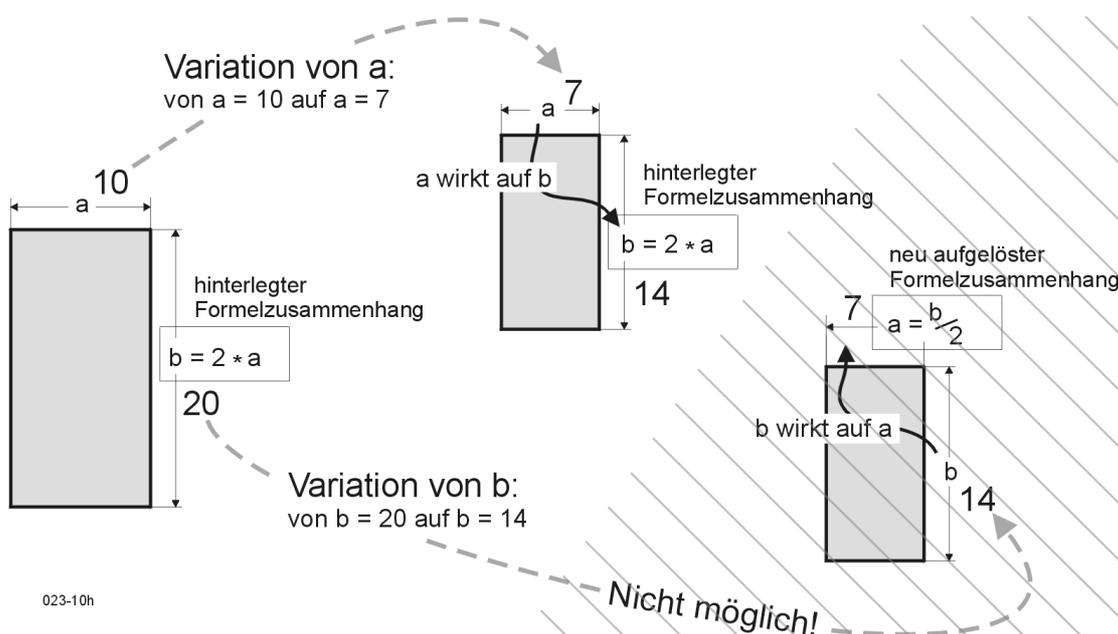


Bild 2-18: Unidirektionale Wirkungsweise von CAD-Parametrik

Abhängige Parameter a können wiederum als Steuerparameter für andere Parameter eingesetzt werden. Da die Systeme in der Regel keine Kontrollmechanismen haben, erfordert dies ein Höchstmaß an Sorgfalt, um Kreisschlüsse der Form $a = f_1(b = f_2(a))$ und damit Inkonsistenzen im CAD-Modell zu vermeiden.

Die Forderung nach einer bidirektionalen Integration von Gestaltung und Berechnung bedeutet, dass jede Veränderung auf der Seite der Berechnung sich auch in der Geometrie niederschlägt und umgekehrt. Das parametrische System wird damit um nichtgeometrische

²² Die einzige Einschränkung besteht darin, dass Steuerparameter durch die mathematische Gleichung unter Umständen indirekt einem Definitionsbereich unterliegen. Wenn sie diesen verlassen, kann das zu ungültigen Werten für die gesteuerten Parameter führen, was dann einer Regeneration des Modells widerspricht.

Parameter auf der Berechnungsseite erweitert. Sollen Parameter frei aufeinander in beliebige Richtung wirken – ob nun allein innerhalb des Geometriemodells oder über dessen Grenzen hinweg – so stellen die beschriebenen beschränkten unidirektionalen Fähigkeiten der CAD-Parametrik ein Hindernis dar. Die vorliegende Arbeit widmet sich einer entsprechenden methodischen Substitution der CAD-Parametrik.

Bild 2-19 fasst die Einschränkungen bei der Arbeit mit Gleichungen in der CAD-Parametrik an Beispielen zusammen. Die dargestellten Einschränkungen resultieren aus den nur unidirektionalen Fähigkeiten bei der mathematischen Formelbearbeitung innerhalb der CAD-Parametrik.

Beispiele für die Einschränkungen bei der Abbildung von Gleichungen in der CAD-Parametrik:

- Gleichungen können nicht in beliebige Richtung aufgelöst werden.
Nicht möglich: $a = 2 \cdot b \Leftrightarrow b = \frac{a}{2}$
- Gleichungen dürfen sich nicht bidirektional beeinflussen, das heißt: Das Ergebnis von Gleichung A darf nicht Eingangsparmeter von Gleichung B sein, wenn das Ergebnis von B Eingangsparmeter von A ist.
Ungültig: $\begin{cases} a = 11 - 3 \cdot b \\ b = 12 - 2 \cdot a \end{cases}$
- Ebenso darf das Ergebnis von Gleichung A nicht in Gleichung A selbst einfließen (direkte Rekursion).
Ungültig: $a = b \cdot c - a$
- Gleichungen müssen eindeutig nach einem gesteuerten Parameter aufgelöst sein. Links vom Gleichheitszeichen darf nur ein Parameter stehen.
Ungültig: $\frac{a}{b} = c + d$

041-5

Bild 2-19: Einschränkungen bei der Abbildung von mathematischen Gleichungen in der CAD-Parametrik.

2.6.2.2 Einschränkung des Einsatzgebietes durch den notwendigen Anspruch auf Fertigungsgerechtigkeit

Berechnungen, die direkt in der CAD-Parametrik hinterlegt werden, bleiben im Modell in der Regel bis über seine Fertigstellung hinaus erhalten, die Berechnungen müssen also Fertigungsgerechtheitsansprüchen genügen. Da in Bezug auf Fertigungsgerechtigkeit jedoch durch den Konstrukteur/Entwickler Anpassungen wie Auf- oder Abrunden, Anpassung an Rohteilmaße oder Normen, Sicherheitszuschläge und sonstige kontextbezogene Abweichungen von Berechnungsergebnissen notwendig sind, müssen sich die tatsächlich im CAD-Modell abgebildeten Berechnungen in der Regel auf sehr einfache Korrelationen (wie zum Beispiel Maß a = Maß b) oder wenig Einfluss übende Maße wie Rundungen oder Fasen beschränken.

Die vorliegende Arbeit widmet sich dieser Beschränkung und versucht durch entsprechende Methoden die Parametrik um entscheidende Fähigkeiten für eine breite Berechnungsunterstützung zu ergänzen.

2.6.3 Variationales CAD

Variational Design ist eine Grundfunktion moderner CAD Systeme, die als Eingabehilfe den Konstrukteur/Entwickler beim Modellaufbau unterstützt. Beim Anlegen geometrischer Körper müssen in einem mathematisch basierten Datenmodell *alle* Eigenschaften und Constraints vollständig und eindeutig beschrieben werden (WEISSBARTH 1994). Bei der Erzeugung des Modells würde dies einen erheblichen Aufwand erfordern, da der Konstrukteur/Entwickler jede Eigenschaft von Hand festlegen und die Vollständigkeit und Konsistenz der geometrischen Beschreibung überprüfen müsste. Zeichnet er zum Beispiel ein Viereck, so könnten theoretisch winzige Abweichungen von der Rechtwinkligkeit beim Ziehen der Linien im Modell hinterlegt werden (Beispiel: 89,95 Grad). Es entstehen bei exakter Umsetzung des unexakten Skizzierens nur im absoluten Zufall die in der Regel angestrebten rechtwinkligen Ausprägungen. Variationales CAD schlägt daher automatisch solche Winkel in rechtwinkliger Ausprägung vor und erkennt darüber hinaus Parallelität, Mittelpunktslagen, Endlagen, Symmetrien etc.. Damit bietet variationales CAD effektive Unterstützung für den Konstruktionsprozess, indem der Konstrukteur/Entwickler nur bei abweichenden Zielwerten systemgeführt die automatisch vorgeschlagenen Ausprägungen entsprechend anpasst. Variationales CAD schafft damit aus mathematisch unterbestimmten konstruktiven Vorgaben mathematisch vollständige und konsistente Modelle (siehe Bild 2-20).

Parametrisches Design wird in modernen CAD Systemen grundsätzlich durch Methoden des variationalen Designs unterstützt. Variationales Design rückt daher als integraler Bestandteil aus dem Bewusstsein der Anwender heraus und wird als Grundfunktion parametrischen Designs vorausgesetzt (HOSCHEK & DANKWORT 1994).

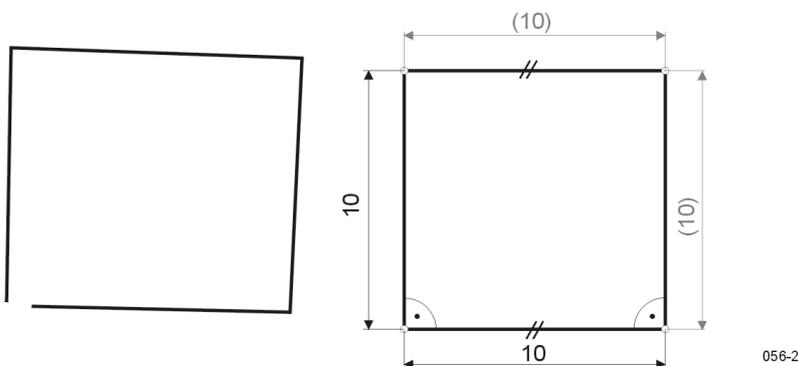


Bild 2-20: Variationales CAD ergänzt mathematisch unterbestimmte Konstruktionen durch Annahmen oder Vorschläge

2.6.4 Feature basiertes CAD

Aus einem CAD-Modell den Sinn der Linien (2D) oder der Flächen, Kanten und Volumenkörper (3D) zu erkennen ist ähnlich schwierig wie die Sinnerfassung natursprachlicher Texte (siehe Abschnitt 2.4, Künstliche Intelligenz). Feature basiertes CAD hinterlegt den Konstruktionselementen schon beim Konstruieren eine Bedeutung. Das erspart bei dem Versuch die Zeichnung / das Modell automatisiert zu lesen eine in der Regel sehr fehleranfällige Mustererkennung (HORN 1997, S.76). Wichtige Konstruktions- und Funktionsgrößen können wesentlich einfacher aus vorhandenen Datenstrukturen gewonnen werden. Die Einführung von zusammengefassten Geometriestrukturen in einer objektorientierten Umgebung ermöglicht die Assoziation nicht-geometrischer Merkmale und die Verwendung von Vererbungsmechanismen bei nicht definierten Attributen der Unterklassen. Darüber hinaus bietet feature basiertes CAD vielfältige Strukturierungsmöglichkeiten des Datenbestandes (KICKERMANN 1995). Der Begriff "feature" (engl. = Eigenschaft, Merkmal) hat sich auch im deutschsprachigen Raum allgemein für grafische Elemente mit Zusatzinformationen (z. B. "Wellenabsatz", "Presssitz", "Gewindebohrung" etc.) etabliert. PAHL (1997) betrachtet und bezeichnet Features als Partialmodelle und differenziert in Formelemente, Wirkelemente, Wirkkomplexe und Norm-/Wiederholteile, die in Bibliotheken abgelegt und in das jeweilige Produktmodell übernommen werden können. KICKERMANN (1995) formuliert folgende Definition: „*Ein Feature ist ein Datenstrukturelement, das dadurch gekennzeichnet ist, dass in einer geeigneten Weise geometrische und physikalische, technologische und andere Informationen zusammengefasst werden. Art und Inhalt dieser Informationen bestimmen den Typ des jeweiligen Features.*“

Vorteile für die Integration von Gestaltung und Berechnung ergeben sich daraus, dass die zu den jeweiligen Features gehörigen Parameter leicht und eindeutig zugänglich sind und dass die Konsistenz des Gesamtmodells bei Zugriffen auf diese Parameter in erhöhtem Maße sichergestellt werden kann. Eine automatische Erkennung notwendiger Zuordnungen von Berechnungsergebnissen zu Parametern eines featurebasierten CAD-Modells bleibt jedoch weitestgehend unmöglich, da ein aus einer beliebigen Berechnung stammender Parameter von Hand einem ausgewählten Feature zugewiesen werden muss.²³ Sogenannten "intelligenten Features" können Berechnungen direkt implementiert werden, (zum Beispiel eine "sich selbst berechnende Schraube"). Die korrekte Einfügung in den mathematisch/physikalischen Kontext mit Zugriff auf die jeweils richtigen einflussnehmenden Parameter aus der konstruktiven Umgebung bleibt jedoch weiter in der Regel auf eine Verknüpfung von Hand oder ein stark reglementiertes objektgebundenes Umfeld angewiesen.

²³ Beispiel: Viele Features beinhalten Durchmesser. Wird ein Durchmesser berechnet ($d^2 = A \cdot 4 / \pi$), so ist nicht automatisch klar, ob es sich zum Beispiel um einen Wellen-, Bohrungs- oder Flanschdurchmesser handelt, welchem konkreten Konstruktionsfeature die Berechnung also zugeordnet werden soll.

Zusammengefasst bedeutet der Featureansatz bei der Integration von Gestaltung und Berechnung in der Regel eine Konzentration auf spezielle Objekte in speziellem Umfeld. Wird bei freien Gestaltungs- und Berechnungsvorgängen mit Features gearbeitet, so müssen diese von Hand in den Kontext eingepasst werden. Werden sogenannte intelligente Features eingesetzt, die automatisiert auf Daten aus freiem Kontext reagieren, so neigen die Vorgänge dazu intransparent zu werden.

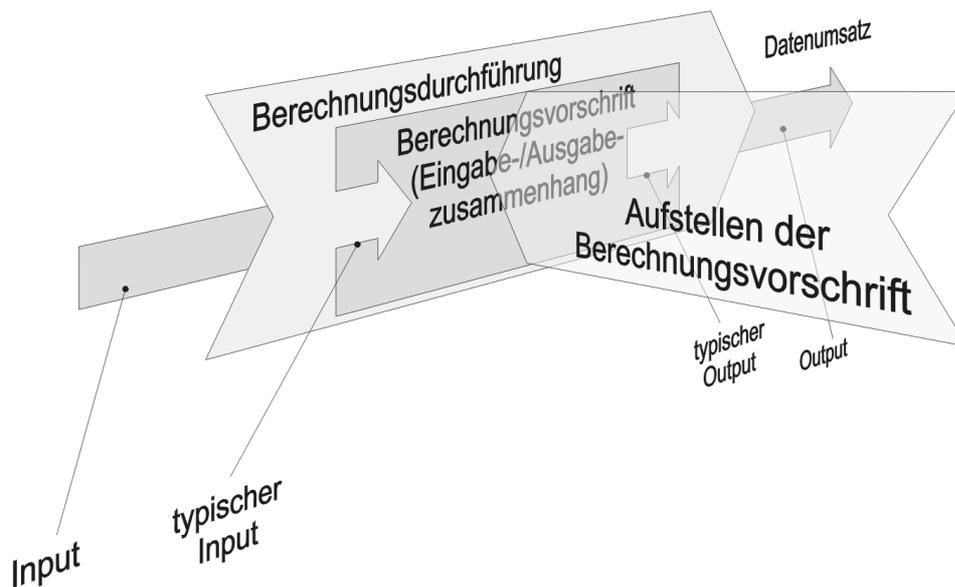
Beim Einsatz für einfache, wenig kontextbezogene Berechnungsaufgaben wie zum Beispiel Toleranzanalysen können mit Features deutliche Prozessvorteile gewonnen werden. Ebenso können die Analyse von Fertigungsabläufen und die Herstellbarkeit von Werkstücken durch Fertigungsfeatures effektiv unterstützt werden (SCHÜTZER 1995, S. 152). Diese Einsatzmöglichkeiten verlassen jedoch das unmittelbare Feld der Integration von Gestaltung und Berechnung (siehe Absatz 2.2). Eine ausführliche Übersicht über Feature-Ansätze gibt SCHULZ (1996, S. 20 ff.).

2.7 Berechnen in der Prozesssicht

Der Prozess der Berechnung ist zweigeteilt, wobei bei der Benutzung des Begriffs "berechnen" sowohl der Gesamtprozess gemeint sein kann wie auch nur ein Teilprozess davon. Die prozessuale Zweiteilung wird im Folgenden dargestellt und für die Thematik der Integration des Berechnens und des Gestaltens aufbereitet.

Beim Berechnen ist der erste Schritt in der Regel die Aufstellung der Berechnungsvorschriften. Diese erfolgt im technisch/physikalischen Zusammenhang in Form einer mathematischen Modellbildung. Der zweite Schritt ist anschließend das Einsetzen der im Berechnungsumfeld gegebenen Werte in die Berechnungsvorschriften mit der rechnerischen Ermittlung der angestrebten Ergebnisse. Die Berechnung ist damit prozessual zweigeteilt. Im Mittelpunkt dieses zweidimensionalen Prozesses steht als statisches Element die aufgestellte Berechnungsvorschrift. Bild 2-21 stellt statische und prozessual dynamische Elemente des Begriffs "Berechnung" grafisch dar.

Bei der Integration von Gestaltung und Berechnung ist diese prozessuale Zweiteilung von besonderer Bedeutung. Für das Aufstellen beziehungsweise Auswählen einer Berechnungsvorschrift ist in der Regel primäre Intelligenz erforderlich (s. Abschnitt 2.4 zum Thema Intelligenz im Integrationsprozess); ebenso für das korrekte Einbinden der Berechnung in das Datenumfeld (s. Abschnitt 2.9 zum Thema Schnittstellenkommunikation). Die letztendliche Durchführung der Berechnung als Datenumsatz von vorgegebenen Eingabedaten in rückführbare Ergebnisdaten über bereits formulierte Berechnungsvorschriften ist eine relativ einfach automatisierbare Handlung.



052-7

Bild 2-21: Berechnungsprozess: Berechnungsvorschrift und Berechnungsdurchführung

Dieser einfache Prozess der *Berechnungsdurchführung* steht bei Systemen zur Integration von Berechnung und Gestaltung in der Regel im Vordergrund. Bei vielen Arbeiten werden Berechnungssysteme mit ihren vorgegebenen Berechnungsalgorithmen in spezifischen Gestaltungskontext eingebunden. Ziel und Fokus dieser Arbeiten ist es durch die Automatisierung des Datenflusses Prozessvorteile zu gewinnen.

Wird eine Integration von Gestaltung und Berechnung für die Bearbeitung neuer, nicht-wiederholter Prozesse angestrebt ist es notwendig den Fokus über die *Berechnungsdurchführung* hinaus zu erweitern. Die integrierten Systeme müssen Unterstützung bei der Aufstellung von Berechnungen einschließlich der Verknüpfung mit dem geometrisch/physikalischen Gesamtzusammenhang bieten. Ebenso muss der freie gestalterische Umgang mit dem Geometriemodell sichergestellt werden und darf nicht allein auf spezifische Objekte beschränkt sein. Wichtige Aufgabe ist daher die Schaffung ergonomischer Schnittstellen, um das Integrationssystem für die aktuell im Prozess zu leistende primäre Intelligenz²⁴ des Konstrukteurs/Entwicklers zugänglich zu machen (siehe auch BEITZ ET AL. 1997, S. 157: Rechnerunterstützung der Konstruktionsarbeit durch CAD Systeme.). Automatisierter Datenfluss kann damit auch für zunächst unbekannte/neue Zusammenhänge grundsätzlich möglich gemacht werden. Darüber hinausgehende Prozessvorteile sind durch die Schaffung entsprechender ergonomischer Rechnerunterstützung für die Aufstellung von Berechnungen im Gestaltungszusammenhang zu erwarten.

²⁴ im Sinne von Konstruktionskunst nach KOLLER 1991

2.8 Integriertes Gestalten und Berechnen in der Prozesssicht

In VDI RICHTLINIE 2221 (1993, S.9) ist ein Vorgehensplan dargestellt, der einem typischen Entwicklungsprozess zu Grunde gelegt werden kann (Bild 2-22). Der Entwicklungsprozess gestaltet sich als iteratives und rekursives Durchlaufen der dargestellten Vorgehensschritte, die durch ihre entsprechenden Arbeitsergebnisse miteinander verknüpft sind. Dieser Vorgehensplan soll im Folgenden im Speziellen auf das Gestalten und Berechnen fokussiert werden.

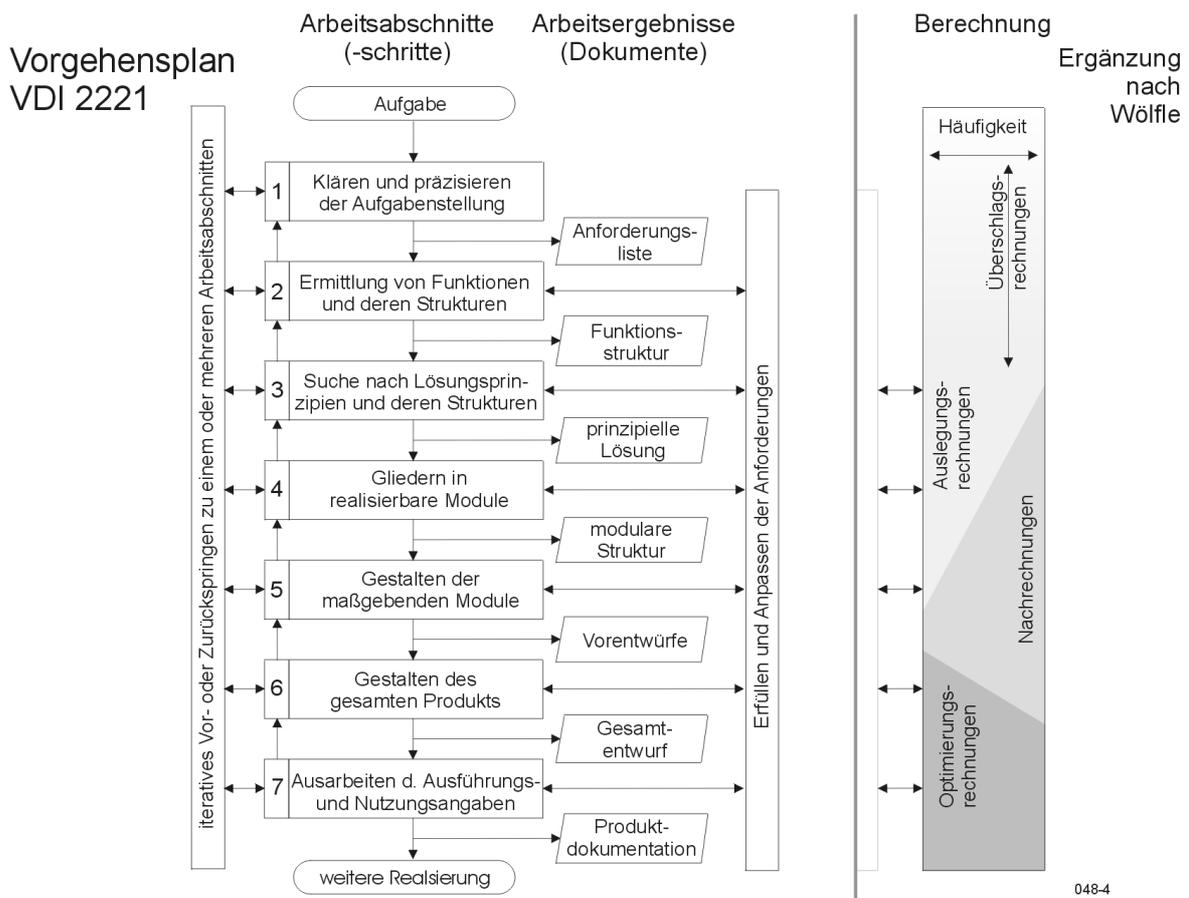


Bild 2-22: Vorgehensplan nach VDI-RICHTLINIE 2221 (1993, S. 9) mit Ergänzung durch WÖLFLE (1998)

WÖLFLE (1998) ergänzt den Plan durch eine Zuordnung typischer Berechnungstätigkeiten zu den Vorgehensschritten (siehe Bild 2-22, rechte Seite). So ordnet er der Aufstellung der Anforderungsliste begleitende Überschlagsrechnungen zu, die in Auslegungsrechnungen übergehen. Mit dem Einstieg in den Vorentwurf betrachtet WÖLFLE die Berechnung als Nachweisrechnung für instanziierte und ausgeprägte Wirkstrukturen, die im Verlauf des Detaillierungsprozesses mit zunehmend verfeinerten Berechnungen optimiert werden.

Für einen detaillierteren Einblick in den Prozess der Instanzierung und berechnungsgestützten Ausprägung von Produktparametern löst sich die vorliegende Arbeit im Folgenden von dem Vorgehensplan nach VDI 2221 und stellt – daran angelehnt – einen eigenen "Vorgehensplan für das Gestalten und Berechnen" auf. Ziel ist es den Gestaltungs- und Berechnungsprozess im Detail zu beschreiben und systematisch für das Forschungsfeld der Integration von Gestaltung und Berechnung zu öffnen.

2.8.1 Vorgehensplan für das Gestalten und Berechnen

2.8.1.1 Aufstellung und Beschreibung

Die Gestaltung und die Berechnung sind im Produktentwicklungsprozess die zentralen Aufgaben des Konstrukteurs/Entwicklers. Physik und Geometrie werden festgelegt²⁵, das heißt instanziiert und determiniert. Ziel ist es ein Produkt beziehungsweise ein Produktmodell zu entwickeln, das in seiner stofflich geometrischen Umsetzung alle erforderlichen Eigenschaften zur Erfüllung einer Aufgabe in geeigneten Merkmalen mit optimierter Ausprägung aufweist. Der Konstrukteur/Entwickler muss die Merkmale schöpferisch instanzieren und gesamtheitlich geometrisch/physikalisch, das heißt in der Regel rechnerisch²⁶, abstimmen. Für das detaillierte Vorgehen beim Gestalten und Berechnen lassen sich im Einzelnen folgende Schritte formulieren:

1. Aufgabe/Teilaufgabe abstrahieren, verstehen und quantifizieren.

Durch die Quantifizierung von Anforderung werden grundlegende Parameter des Produktes oder eines Konstruktionselements instanziiert und festgelegt. In der stofflich geometrischen Umsetzung sowie in den physikalischen/geometrischen Teilmodellen müssen sich alle relevanten Parameter auf die quantifizierten Anforderungen zurückrechnen lassen.

2. Funktionen/Teilfunktionen festlegen.

Durch die Festlegung von Funktionen und Teilfunktionen instanziiert der Konstrukteur/Entwickler aus den Anforderungen direkte – das heißt *ohne* Umrechnung aus den Anforderungen ablesbare – Parameter des Produktes, die die Anforderungen funktional umsetzen.

²⁵ Physik steht für alle nichtgeometrischen Größen wie zum Beispiel auch die Kosten (siehe Kap. 2.1, letzter Abschnitt).

²⁶ Zur Abstimmung geometrischer und physikalischer/nichtgeometrischer Größen können statt Rechnung auch Versuche/Experimente/Inbetriebnahme oder Erfahrungsschatz/Schätzung dienen.

3. *Physikalische Wirkprinzipien/Teilwirkprinzipien festlegen*

Durch die Auswahl von physikalischen Effekten zur Umsetzung der Funktionen und Teilfunktionen instanziiert der Konstrukteur/Entwickler erste indirekte, also über Berechnungen mit den umzusetzenden Anforderungen/Detailanforderungen verbundene Parameter des Produktes/des Produktelements. Diese Instanzierung erfolgt gedanklich oder papierbasiert oder vor allem in späteren Phasen auch rechentechnisch unterstützt. Der Konstrukteur/Entwickler muss Ein- und Ausgangsgrößen der Effekte erkennen und mit dem Umfeld der Aufgabe in der Größenordnung abstimmen. In dieser frühen Phase bedeutet das, er muss die Stärke der Effekte rechnerisch hier zuerst nur abschätzen – eine detailgenaue Parameterdeterminierung erfolgt erst in den anschließenden Vorgehenschritten.

4. *Wirkstruktur anlegen (~skizzieren)*

Der Konstrukteur/Entwickler macht wirkstrukturelle Überlegungen und instanziiert dazugehörige gestalterische und nichtgeometrische/physikalische Parameter.²⁷ Die geometrischen Parameter können in frühen Prozessphasen auch außerhalb der CAD-Gestaltung instanziiert werden (skizzieren auf Papier etc.), bei fortgeschrittenem Prozess erfolgt dies dann zum Beispiel im Skizziermodus des CAD-Systems. Beim geometrischen und nichtgeometrischen Skizzieren²⁸ ist es noch nicht notwendig die Ausprägungen korrekt festzulegen. Wichtig ist lediglich die gedankliche oder rechentechnische Instanzierung – der Wert/die Ausprägung ist egal, beziehungsweise liegt in der Regel lediglich in geschätzten Größenordnungen. Der Parameter ist damit datentechnisch und/oder im Bewusstsein des Konstrukteurs/Entwicklers vorhanden. Sein Auftrag ist es diese instanziierten Parameter in den folgenden Vorgehenschritten festzulegen. Die instanziierten geometrischen Parameter unterliegen dabei nicht zwangsweise einer Berechnung.

5. *Parameter grob festlegen (~entwerfen)*

In diesem Vorgehensschritt legt der Konstrukteur/Entwickler die Ausprägungen der instanziierten Parameter auf der Basis physikalisch/technischer Berechnungen²⁹ und wirkstruktureller Konstruktionskunst³⁰ gemäß der technischen Anforderungen fest.

²⁷ Beispiel für die Instanzierung nichtgeometrischer Parameter: Der Konstrukteur/Entwickler wird sich bewusst, dass er sich um das Gewicht, die Betriebstemperatur, die Kosten, den Werkstoff oder die Dauerfestigkeit einer Struktur kümmern muss sowie um Kräfte und Momente, die in der Struktur und auf sie wirken – dies kann man als nichtgeometrisches Skizzieren bezeichnen.

²⁸ siehe Fußnote 27

²⁹ siehe Fußnote 26

³⁰ nach KOLLER 1991

6. Parameter optimieren (~ausarbeiten)

Der Konstrukteur/Entwickler muss alle Parameter zunehmend ganzheitlich aufeinander abstimmen. Wesentliche Aufgabe ist es dabei auch die Struktur fertigungsgerecht auszuprägen.

7. Nachweis von Eigenschaften

Auch nach Abschluss des eigentlichen Entwicklungsprozesses (Abschluss des CAD-Prozesses) bleiben Berechnungsaufgaben erhalten. Der Konstrukteur/Entwickler muss alle Eigenschaften nachweisen und nachhaltig sicherstellen. Eine rekursive Wiederaufnahme der geometrischen und nichtgeometrischen Gestaltungstätigkeit kann dabei erforderlich werden.

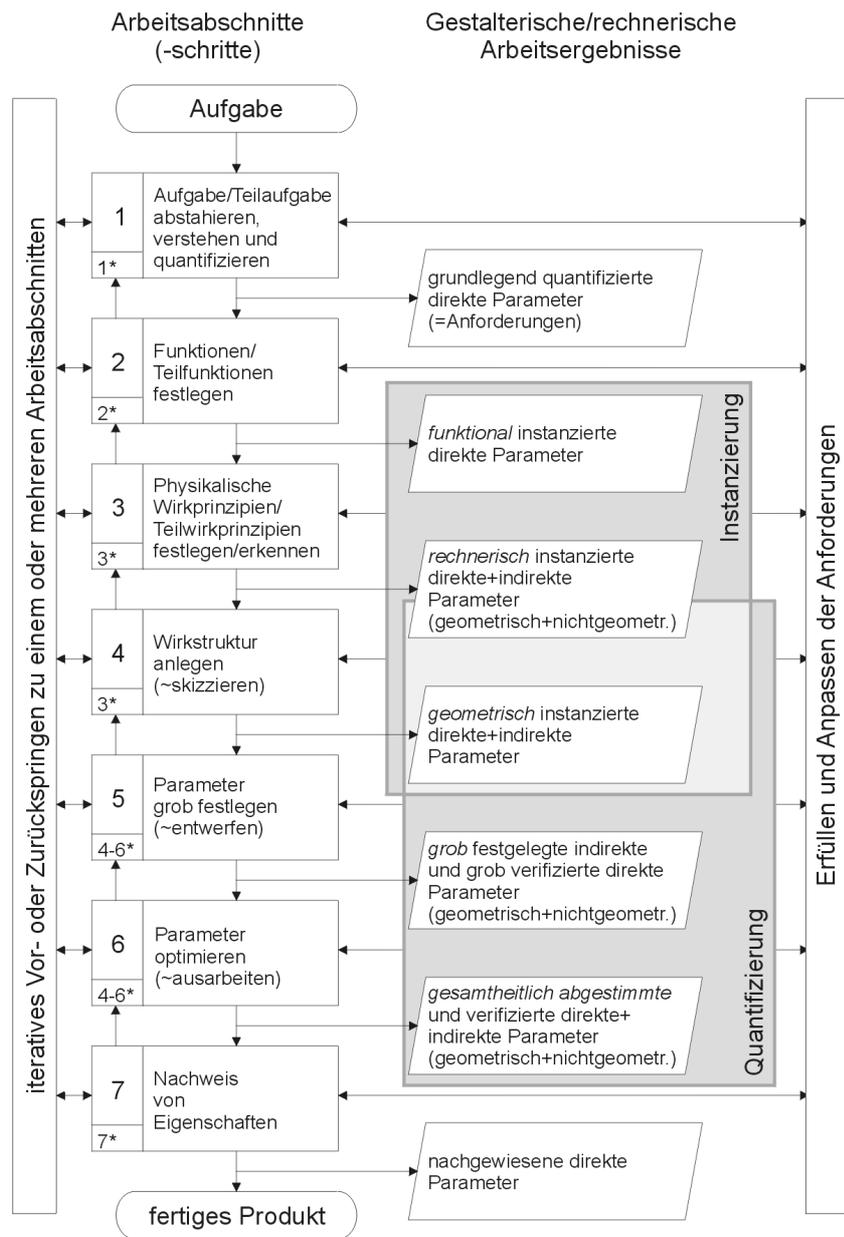
Die Vorgehensschritte lassen sich zu einem Vorgehensplan für das Gestalten und Berechnen zusammenstellen. Bild 2-23 zeigt den im Rahmen dieser Arbeit aufgestellten Plan in Anlehnung an den Vorgehensplan nach VDI 2221 (siehe oben Bild 2-22). In der rechten Spalte sind die Arbeitsergebnisse der einzelnen Teilschritte aufgeführt. Die Ergebnisse sind geometrische und nichtgeometrische Parameter, die sich als rechnerische oder/und geometrische Instanzen mit Ausprägung darstellen.

Rechnerische Instanzen tragen ihre Ausprägung im Vorgehensverlauf nicht von Anfang an. Wird ein Rechenmodell aufgestellt, so können darin viele Parameter instanziiert sein, von denen noch nicht ein einziger in seiner Ausprägung bekannt ist.³¹ Beispiel: Aufstellen einer Hebelgleichung ($F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2$). Die Instanzen für die Kräfte und die Längen sind in dem Rechenmodell vorhanden, ihre Ausprägung ist aber noch völlig offen. Aufgabe des Konstrukteurs/Entwicklers ist es nach der rechnerischen Instanzierung die Ausprägung der Parameter im Verlaufe des Entwicklungsprozesses festzulegen und ganzheitlich zu optimieren.

Anders als bei rechnerisch instanziierten Parametern tragen geometrisch im CAD instanziierte Parameter von Anfang an grundsätzlich eine Ausprägung. Die anfängliche Ausprägung ist jedoch weitgehend beliebig und muss nicht zwingend in der richtigen Größenordnung liegen. Erst im weiteren Vorgehen nach Verlassen des Skizziermodus des CAD werden die ganzheitlich geometrisch/physikalisch richtigen Werte zugewiesen.

³¹ Die Gleichung(en) des Rechenmodells sind dann mathematisch unterbestimmt.

Vorgehensplan für das Gestalten und Berechnen



* Zuordnung der Vorgehensschritte zum Vorgehensplan nach VDI 2221

050-6

Bild 2-23: Vorgehensplan für das Gestalten und Berechnen

In der Regel unterliegen die meisten geometrischen Instanzen direkt keiner explizit ausgeführten Berechnung sondern entstammen allein der gestalterischen Freiheit und Konstruktionskunst³² des Konstrukteurs/Entwicklers. Auch sie tragen zur Erfüllung der gestellten Anforderungen an das Produkt bei, lassen sich jedoch nicht unmittelbar rechnerisch auf quantifizierbare Anforderungen zurückführen – sie müssen aber zusammen mit allen ande-

³² nach KOLLER 1991

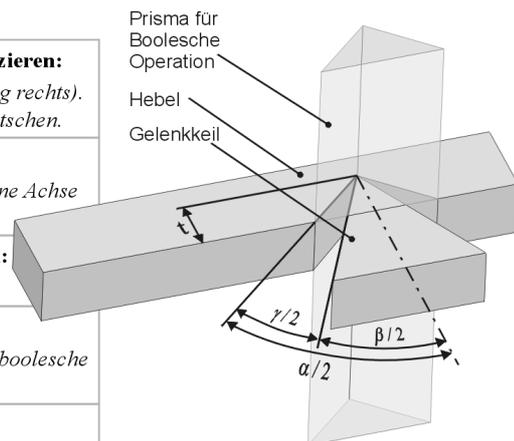
ren geometrischen Instanzen ein konsistentes Geometriemodell ergeben. Darüber hinaus beeinflusst jede geometrische Größe zumindest einfache (relevante oder auch nichtrelevante) physikalische Eigenschaften wie zum Beispiel das Gewicht des instanztragenden Bauteils – viele physikalische Parameter werden jedoch niemals in einer Berechnung instanziiert, auch wenn sie in der stofflich geometrischen Umsetzung des Produktes und in seinem Betrieb auftreten und wirken. In ihrer Richtigkeit verifiziert werden sie letztendlich dennoch im Probe- und Alltagsbetrieb des fertigen Produkts.

2.8.1.2 Beispiel für das Durchlaufen des Vorgehensplans

Bild 2-24 gibt ein einfaches Beispiel für das Durchlaufen der Vorgehensschritte. Es wird ein einfaches Gestaltelement in das geometrische und physikalische Modell eines einfachen Hebelmechanismus eingefügt. Damit werden mit dem Durchlaufen der Vorgehensschritte Anforderungen über physikalisch/geometrisch rechnerische Parameter in geometrische Instanzen des CAD-Modells umgesetzt.

Einfaches Beispiel für das rechnerische/gestalterische Vorgehen bei der Bearbeitung einer technischen Detailaufgabe:

1	Aufgabe/Teilaufgabe abstrahieren, verstehen und quantifizieren: <i>Gegeben ist ein einfacher Hebelmechanismus (siehe Abbildung rechts). Detailproblem: Die Hebelstange darf nicht vom Gelenkkeil rutschen.</i>
2	Funktionen/Teilfunktionen des Produktes festlegen: <i>Translatorische Bewegung sperren. Dreh-Freiheitsgrad um eine Achse erhalten.</i>
3	Physikalische Wirkprinzipien/Teilwirkprinzipien festlegen: <i>Kohäsion fester Körper</i>
4	Wirkstruktur anlegen (~skizzieren) <i>ein Dreieck im CAD Skizzieren und extrudieren = Prisma für boolesche Operation erzeugen</i>
5	Parameter grob festlegen (~entwerfen) <i>Gelenkkeil mit $\beta = 60^\circ$ Öffnungswinkel gegeben, notwendiger Hebel-Bewegungsspielraum $\gamma_{\min} \approx 70^\circ \Rightarrow$ Kerbe mit Öffnungswinkel $\alpha_{\min} = \beta + \gamma = 60^\circ + 70^\circ = 130^\circ \Rightarrow \alpha = 140^\circ$ <i>Höhe des Gelenkkeils gegeben: $h = 100$, Tiefe der Kerbe kleiner als 30 % der Gelenkkeil-Höhe $\Rightarrow t_{\max} = 0,3 \cdot h = 30 \Rightarrow t = 25$</i></i>
6	Parameter optimieren (~ausarbeiten) <i>Fräskopf mit 150° Öffnungswinkel vorhanden \Rightarrow vorher festgelegter Öffnungswinkel von $\alpha = 140^\circ$ auf $\alpha = 150^\circ$ anpassen</i>
7	Nachweis von Eigenschaften <i>Bewegungswinkel $\gamma = (150^\circ - 60^\circ) = 90^\circ > \gamma_{\min} = 70^\circ$</i>



049-9

Bild 2-24: Einfaches Beispiel für das Vorgehen bei der Gestaltung und Berechnung

Das Beispiel zeigt, wie im Produktgestaltungsprozess der Vorgehensplan auch für Details vollständig durchlaufen wird. So ist der dargestellte Hebelmechanismus nach dem dargestellten Abarbeiten der Vorgehensschritte noch nicht fertig ausgestaltet – zum Beispiel

müssen Anforderungen an die genauere Gestalt des zunächst quaderförmigen Hebels formuliert und in physikalischen und geometrischen Produktparametern Umsetzung finden. Hierbei müssen für jedes Gestaltelement, das der Konstrukteur/Entwickler einfügt, im Detail wieder alle Vorgehensschritte durchlaufen werden. Allerdings erfolgt dieser Prozess nicht immer in jedem Schritt bewusst. Wird zum Beispiel ein Gewinde für eine Schraube eingefügt, findet die Auswahl der dahinter stehenden Effekte "Keil" und "Kohäsion fester Körper" (Vorgehensschritt 3) nur unbewusst statt. Das Optimieren der Parameter (Vorgehensschritt 6) erübrigt sich bei einer Schraube, wenn keine kritischen Anforderungen vorliegen und eine überschlägige Auswahl einer Normschraube ausreicht. Auch Schritt 7 – der Festigkeitsnachweis eines so platzierten Elements – erübrigt sich dann.³³

Insgesamt werden stetig Anforderungen ergänzt und über physikalische Effekte mit neu instanziierten Wirkstrukturen und neu instanziierten physikalischen/nichtgeometrischen Parametern umgesetzt, deren Ausprägungen im Verlauf des Prozesses ganzheitlich optimiert werden.

2.8.2 Ganzheitliche Prozessführung

Auf Basis des Vorgehensplans für das Berechnen und Gestalten formt sich bei ganzheitlicher Betrachtung ein zweidimensionaler Prozess mit zwei senkrecht zueinander stehenden Richtungen:

- Zum Einen der Prozess der Abarbeitung der Vorgehensschritte für die einzelnen Parameter und
- zum Anderen die ganzheitliche Fortentwicklung aller instanziierten geometrischen und nichtgeometrischen Parameter.

Bild 2-25 zeigt die beiden Vorgehensrichtungen und bezeichnet die Arbeit an einzelnen Parametern als *mikroskopische Prozesssicht* und senkrecht dazu die Arbeit am Ganzen als *makroskopische Prozesssicht*.

Die Arbeit am Detail (mikroskopische Prozesssicht) liegt bei konventionellen Gestaltungs- und Berechnungsprozessen in der Hand des Konstrukteurs/Entwicklers und kann mit entsprechenden Integrationssystemen durch Datenkopplung oder Modellintegration sehr gut unterstützt werden.

Zweite Aufgabe für integrierte Systeme ist es, dem Konstrukteur/Entwickler makroskopische Rechnerunterstützung für den Überblick über seine ganzheitliche Gestaltungsaufgabe zu bieten. Mit Konzentration auf diese makroskopische Prozesssicht können integrierte

³³ Tatsächlich findet die Nachweisrechnung als "nicht erforderlich" quasi im Hintergrund statt. Die beteiligten Parameter werden bewusst oder sogar unbewusst als anforderungskonform erkannt.

Systeme ein Werkzeug zur effizienten Prozesssteuerung sein, bis hin zu ganzheitlich instanziierten und optimierten Produkten.

Im Folgenden werden diese zweidimensionale Prozesssicht und ihre Bedeutung für die Integration von Gestaltung und Berechnung eingehend beleuchtet.

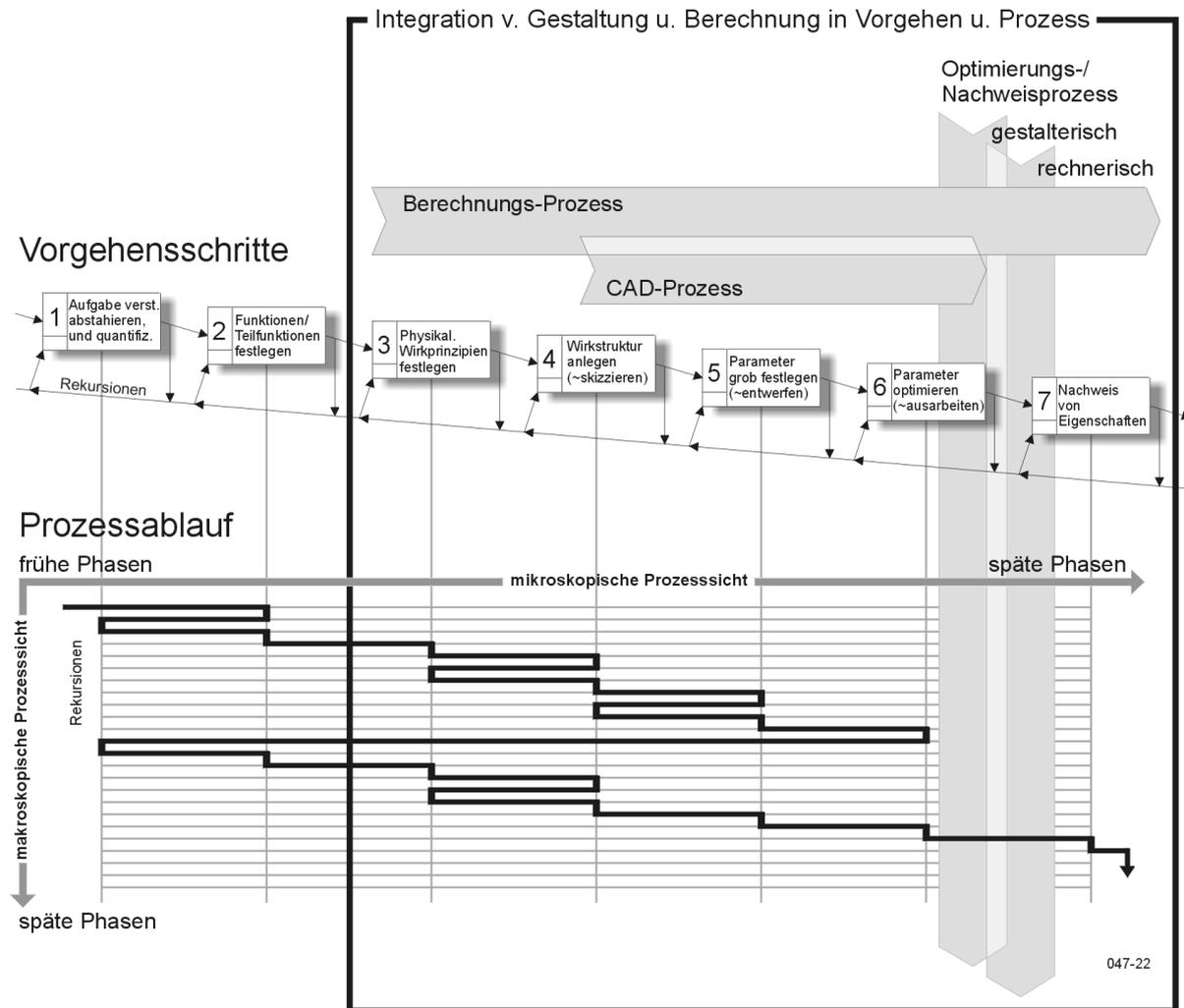


Bild 2-25: Integration von Gestaltung und Berechnung in Vorgehen und Prozess

2.8.2.1 Arbeit am Ganzen durch Arbeit am Detail

Grundsätzlich findet der Vorgehensplan für jeden *einzelnen* Parameter *einzelne* Anwendung. Das bedeutet der Konstrukteur/Entwickler kann stets nur einzelne Parameter instanziierten und auch nur unmittelbar auf einzelne Parameter ausprägungsverändernd zugreifen. Das heißt, er befindet sich bei seiner Arbeit am Modell stets auf Detailebene. Diese Arbeit am Detail muss sich fortwährend ganzheitlich einfügen und in ihrer ganzheitlichen Wir-

kung und Einflussnahme auf Gestalt, Physik und Anforderungen betrachtet werden. Ein Parameter als Bestandteil des Ganzen wirkt damit auf:

- andere Parameter

und ganzheitlich auf höhere Produktebenen wie:

- Funktionselemente,
- Funktionsgruppen,
- Bauteile,
- Baugruppen,
- Module
- und letztlich das ganze Produkt

(siehe Bild 2-26, Darstellung der Produkthierarchie).

2.8.2.2 Verantwortung des Konstrukteurs/Entwicklers

Für ganzheitlich zielgerichtete Arbeit am Produkt, die wie beschrieben stets über Eingriffe an einzelnen Parametern Umsetzung im Modell findet, ist ein steter oder wiederkehrender ganzheitlicher Blick notwendig. Nur so kann die Konsistenz von Physik, Geometrie und Nicht-Geometrie einhergehend mit steter oder wiederkehrender Überprüfung der Anforderungskonformität sicher gestellt werden.

Diese Aufgabe obliegt grundsätzlich dem Konstrukteur/Entwickler. Er muss überblicken, wie sich seine einzelnen Parametereingriffe ganzheitlich auswirken und welche Parameter sich abhängig mit verändern.

2.8.2.3 Hilfsmittel

Der Konstrukteur/Entwickler kann bei seiner ganzheitlichen Aufgabe durch integrierte Rechnersysteme unterstützt werden.

Unterstützung durch parametrisches CAD

Ganz entscheidende Unterstützung bei der ganzheitlichen Sicht auf das entstehende Produkt bietet schon heute das parametrische CAD. Durch die parametrischen Abhängigkeiten im Modell entsteht bei Parameterinstanzierung und Parametervariation grundsätzlich stets ein konsistentes Modell. Wird die Konsistenz durch unlogische Modellzustände verletzt, scheitert die Regenerierung. Der Konstrukteur/Entwickler kann/muss dann unmittelbar eingreifen und die Konsistenz wieder herstellen. Jede Parameterinstanz und -ausprägung wirkt durch parametrisches CAD *geometrisch* auf das Ganze. Mit Hilfsfunktionen wie Kollisionskontrolle, Kinematikanalyse etc. (s. Abschnitt 3.2 Stand der Technik) kann der Konstrukteur/Entwickler bei seinem ganzheitlichen Blick unterstützt werden.

Unterstützung durch partielle Berechnungsmodelle

Grundsätzlich ist es theoretisch möglich, alle geometrischen und nichtgeometrischen Abhängigkeiten außerhalb des CAD in Berechnungsmodellen abzubilden.³⁴ In der Regel sind Berechnungsmodelle aber nur sehr begrenzte Partialmodelle, deren Einfluss nicht ganzheitlich über alle am Entwicklungsprozess beteiligten Modelle reicht. Konsistenzen bzw. Inkonsistenzen in der Berechnung können den Konstrukteur/Entwickler in diesem Zusammenhang nur sehr begrenzt bei seiner ganzheitlichen Sicht unterstützen. Jedes Modell muss iterativ mit dem parametrischen CAD-Modell und allen anderen beteiligten Partialmodellen abgeglichen werden. Diese Arbeitsschritte obliegen dem Konstrukteur/Entwickler.

Unterstützung durch sequenziell integrierte Berechnungsmodelle

Sequenzielle Integration entspricht der konventionellen Arbeitsweise mit partiellen Berechnungsmodellen. Unterstützung bei der ganzheitlichen Sicht entsteht nur durch die vereinfachte Ergebniserzielung in den Partialmodellen, womit der Konstrukteur/Entwickler einen freieren und weniger abgelenkten Blick erhalten kann. Die geometrischen und nichtgeometrischen Parameterinstanzierungen und -variationen wirken nicht ganzheitlich. Durch die Integration entsteht unmittelbar kein neues Werkzeug zur ganzheitlichen Modellbetrachtung.

Unterstützung durch kontinuierliche Integration von Gestaltung und Berechnung

Die kontinuierliche Integration von Berechnung und Gestaltung stellt in diesem Zusammenhang ein erweitertes Hilfsmittel für den Konstrukteur/Entwickler dar die Konsistenz und Anforderungskonformität des entstehenden Produktes ganzheitlich herzuführen, zu überwachen und zu sichern. Die ganzheitliche Unterstützung durch das parametrische CAD wird unmittelbar um physikalische/nicht-geometrische Sichten erweitert. Durch die kontinuierliche Integration entsteht ein Werkzeug zur Unterstützung und Effizienzsteigerung des ganzheitlichen Gestaltungsprozesses.

Der Konstrukteur/Entwickler bleibt bei jeder Form der integrierten Berechnung und Gestaltung in der Gesamtverantwortung für alle Eigenschaften des Produktes. Bild 2-26 zeigt, wie sich die kontinuierliche und die sequenzielle Integration als Hilfsmittel für die ganzheitliche Prozessführung unterschiedlich einordnen. Die sequenzielle Integration wirkt bezüglich der ganzheitlichen Sicht nur indirekt. Dagegen ist die kontinuierliche Integration integraler Bestandteil einer ganzheitlich parametrischen Modellbildung und bietet als Werkzeug selbst direkt unmittelbare Vorteile für die makroskopische Prozessführung.

³⁴ Letztendlich ist auch parametrisch konsistentes CAD ein Berechnungsmodell.

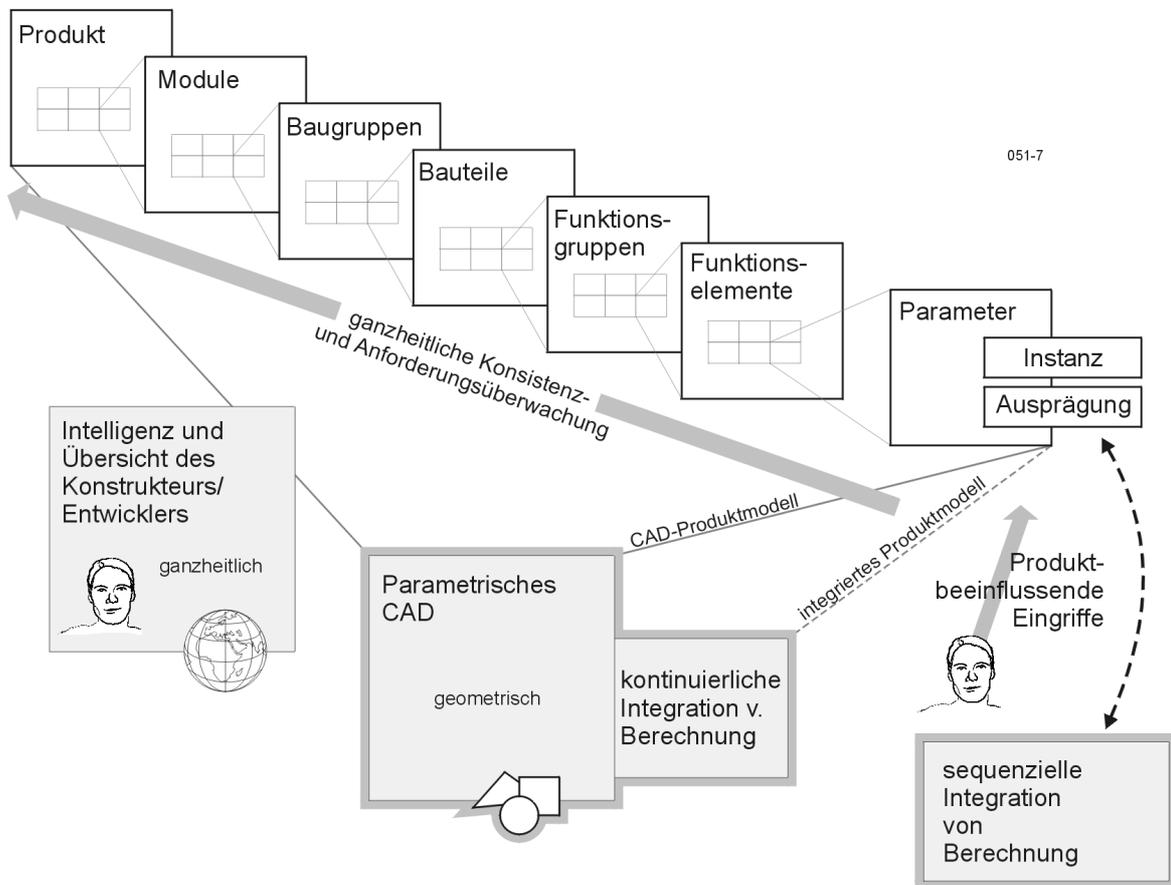


Bild 2-26: Kontinuierliche Integration von Gestaltung und Berechnung als Instrument zur ganzheitlichen Konsistenz- und Anforderungsüberwachung verglichen mit sequenzieller Integration zur Unterstützung des berechnungsbasierten Zugriffs auf einzelne Parameter

2.8.3 Zusammenfassung

Das Berechnen und Gestalten stellt sich in einem Vorgehensplan als Arbeit an einzelnen geometrischen und nichtgeometrischen/physikalischen Parametern dar, die im Verlaufe des Produktentwicklungsprozesses instanziiert (geschaffen) und ausgeprägt (mit Werten belegt) werden müssen.

Die einzelnen Parameter müssen übergreifend ganzheitlich zu einem gemeinsamen Optimum geführt werden.

Die Integration von Gestaltung und Berechnung führt geometrische und nichtgeometrische/physikalische Parameterbetrachtungen zusammen und bietet in erster Linie Prozessunterstützung für die Arbeit am Parameter/Detail. Im Falle einer kontinuierlichen Integration von Berechnung und Gestaltung kann zusätzlich der ganzheitliche Prozess wesentliche Unterstützung erfahren.

2.9 Schnittstellenkommunikation bei der Integration von Gestaltung und Berechnung

Im Folgenden soll der Begriff „Schnittstelle“ in seiner grundsätzlichen Bedeutung für die Integration von Gestaltung und Berechnung erläutert werden, da die Integrationsproblematik sehr häufig im Wesentlichen als ein Problem des Datentransfers und als Problem fehlender geeigneter Schnittstellen betrachtet wird.³⁵

Eine Schnittstelle ist das *Sprachrohr* und das *Gehör* einer Applikation. Über sie findet die Kommunikation mit der Außenwelt der Applikation statt:

- Mit anderen Applikationen,
- mit Datenbanken,
- mit Signalen und
- mit dem Menschen als Bediener des Rechners.

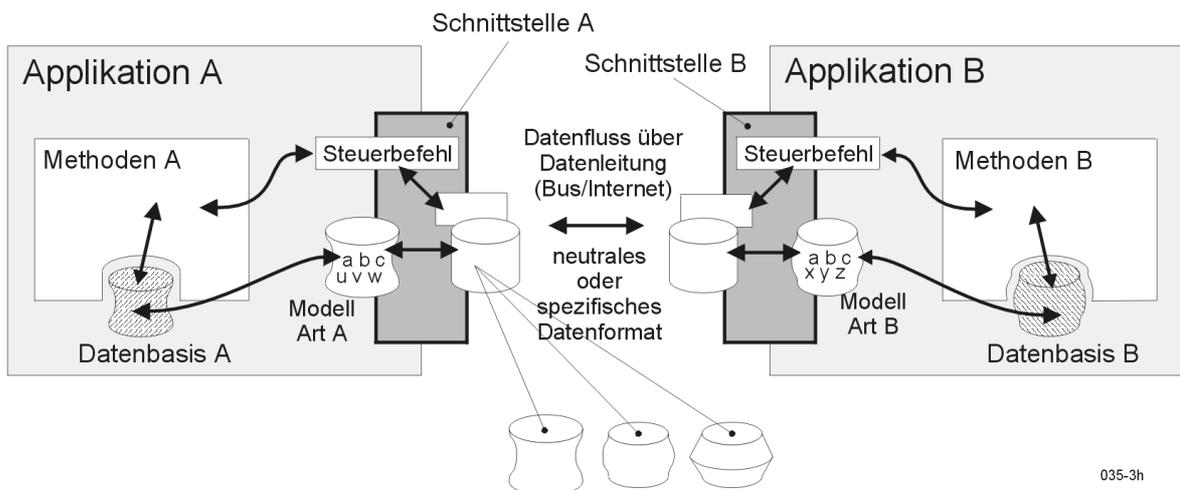
Die Integration von Gestaltung und Berechnung zielt auf das verbesserte Zusammenwirken von Berechnungs- und Gestaltungsprogrammen. Bild 2-27 zeigt die Rolle und die prinzipielle Funktionsweise von Schnittstellen im Falle der Kommunikation zweier Applikationen. Ziele der Kommunikation können im Wesentlichen von zweierlei Gestalt sein (ANDERL 1993):

- Datentransfer (Datenschnittstellen) und
- Sendung und Empfang von Steuerbefehlen (systemgeführte Dialogschnittstellen).

Die Schnittstellen einer Applikation haben die Aufgabe im Falle einer Datenversendung die eigenen, applikationsspezifischen Daten aufzubereiten und an die angebundene Datenleitung weiterzugeben. Dazu müssen die Daten in ein Format übersetzt werden, das für andere Schnittstellen verständlich ist. Dabei kann es sich um neutrale oder auch applikationsspezifische Formate handeln. Letztere können sich entweder an der eigenen Datenbasis oder an der Zieldatenbasis oder auch an dritten Standards orientieren.

Auf der Empfängerseite werden die eingehenden Daten in Steuerbefehle oder Modelldaten der Zielapplikation übersetzt und an diese weitergegeben.

³⁵ Das Kapitel wendet sich allein an die softwaretechnische Seite der Schnittstellen. Hardwareschnittstellen werden nicht betrachtet. Ebenso wendet sich das Kapitel nicht an sog. Protokollschnittstellen, die die Kommunikation von Rechnersystemen normieren.



035-3h

Bild 2-27: Applikationskommunikation über Schnittstellen

ANDERL (1993) bezeichnet Schnittstellen als „Verbindungsstellen“ oder „Nahtstellen“ zwischen zusammenwirkenden Systemen und zitiert nach GRABOWSKI ET AL (1986) folgende Definition: „Eine Schnittstelle ist ein System aus Bindungen, Regeln und Vereinbarungen, das den Informationsaustausch zweier miteinander kommunizierender Systeme oder Systemkomponenten festlegt.“

Damit fasst er die nach Bild 2-27 formulierte Zweiteilung der Kommunikation über jeweils eigene Schnittstellen der beteiligten Applikationen begrifflich zu einer Gesamtheit zusammen. Für die folgende detaillierte Betrachtung der Schnittstellenproblematik wird diese Definition nicht übernommen, sondern die tatsächliche Zweigeteiltheit der Kommunikation – mit jeweils den einzelnen Applikationen zugeordneten Schnittstellen A und B – auch begrifflich aufrecht erhalten.

2.9.1 Modellorientierte Schnittstellenkommunikation

Verschiedene Programme arbeiten in der Regel mit verschiedenen Datenmodellen und haben dementsprechend verschiedene Informationsbedürfnisse. Bei der modellbasierten Schnittstellenkommunikation ist es die Aufgabe der Schnittstellen aus vorhandenen Modellen spezifische Informationen herauszulesen und damit neue Modelle aufzubauen.

Idealerweise sind alle am Datentransfer beteiligten Modelle seitens ihres Informationsgehaltes identisch (Bild 2-28). Eine unterschiedliche Struktur der Modelle kann in diesem Fall durch die Schnittstellen verlustfrei auseinander hergeleitet werden. Der Datenaustausch kann nur in diesem Fall in beide Richtungen verlustfrei stattfinden.

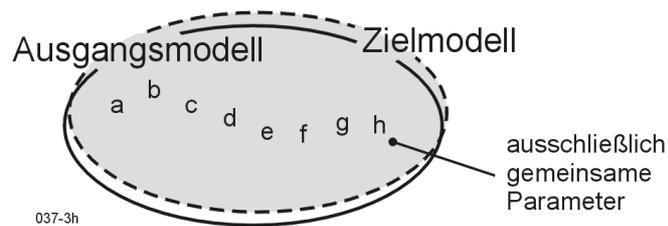


Bild 2-28: Herleitung/Kommunikation verschiedener Modelle mit identischen Parametern

Bild 2-29 zeigt einen Fall, in dem Ausgangs- und Zielmodell seitens ihrer Informationsgehaltes nicht identisch sind. Im dargestellten Fall stellt das Zielmodell eine informationstechnische Teilmenge des Ausgangsmodells dar. Der Datenaustausch von Ausgangs- zu Zielmodell ist verlustbehaftet und kann daher nur in eine Richtung stattfinden. Ein bidirektionaler Datenaustausch wird erschwert.

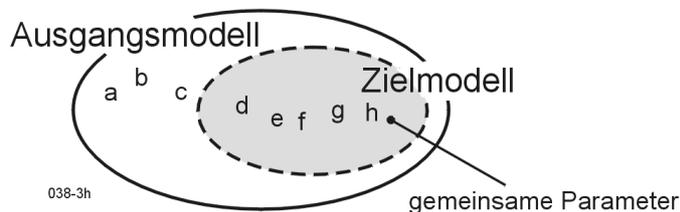


Bild 2-29: Herleitung/Kommunikation verschiedener Modelle mit nicht identischen Parametern

Schwierige aber für die Integration von Gestaltung und Berechnung typische Fälle für den Datenaustausch über Schnittstellen zeigt Bild 2-30. Haben die Modelle deutlich unterschiedlichen Informationsgehalt, ist ein Datenaustausch über Schnittstellen mit reiner Übersetzungsfunktion nicht mehr möglich. Es müssen Zusatzinformationen für die Modellbildung zur Verfügung gestellt werden. Dies führt zu objektgebundenem Datenaustausch im Sinne objektorientierter Schnittstellen und objektorientierter Integration oder zu Datenaustausch mit interpretativem, ergänzendem Eingriff durch primäre Intelligenz, also durch den Menschen.

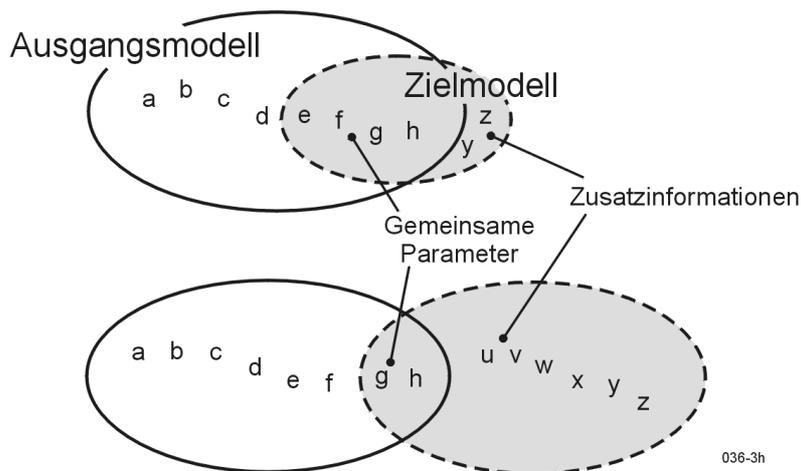


Bild 2-30: Herleitung/Kommunikation verschiedener Modelle mit nicht identischem Informationsgehalt

Das folgende Beispiel verdeutlicht die Vorgänge bei modellorientierter Integration:

Ein Geometriemodell eines Quaders beinhaltet eine Vielzahl von geometrischen Parametern die über die reinen Kantenmaße a , b , c hinausgehen. Wichtige Information für ein Geometriemodell sind auch Eigenschaften wie zum Beispiel Rechtwinkligkeit, Parallelität und sonstige räumliche Anordnungen der Konstruktionselemente zueinander.

Dem Geometriemodell sei nun ein Massenberechnungsmodell gegenübergestellt. Es handelt sich bei dem Modell um die einfache mathematische Formel $m = \rho a b c$. Auch dieses Modell trägt die Werte der Kantenmaße a , b und c , beinhaltet aber als zusätzliche Informationen den Materialkennwert ρ und den quaderspezifischen physikalischen Zusammenhang zwischen Masse m und den Parametern ρ , a , b und c . CAD-Geometrieigenschaften wie Parallelität und Rechtwinkligkeit sind für das Massenberechnungsmodell nicht von Interesse und werden daher nicht mit abgebildet.

Soll eine Schnittstelle beide Modelle automatisiert vollständig und verlustfrei auseinander herleiten können, so muss in der Schnittstelle der spezifische Kontext hinterlegt sein. Die notwendige Schnittstelle ist damit kontext- bzw. objektgebunden. Die Schnittstelle kann dann (im Beispiel) nur noch für Quader eingesetzt werden. Das CAD-Modell eines Prismas würde durch die quaderspezifische Schnittstelle – falls überhaupt möglich – in einen falschen Berechnungszusammenhang übergeleitet. Dies hätte eine falsche Volumenberechnung zur Folge (Bild 2-31).

Eine andere Möglichkeit ist die Arbeit mit integrierten, speziellen Modellen, die alle Informationen für die entsprechenden zu generierenden Teilmodelle in sich vereinen. Bild 2-32 zeigt ein solches integriertes Modell aus dem spezifische Schnittstellen spezifische Teilmodelle ableiten können.

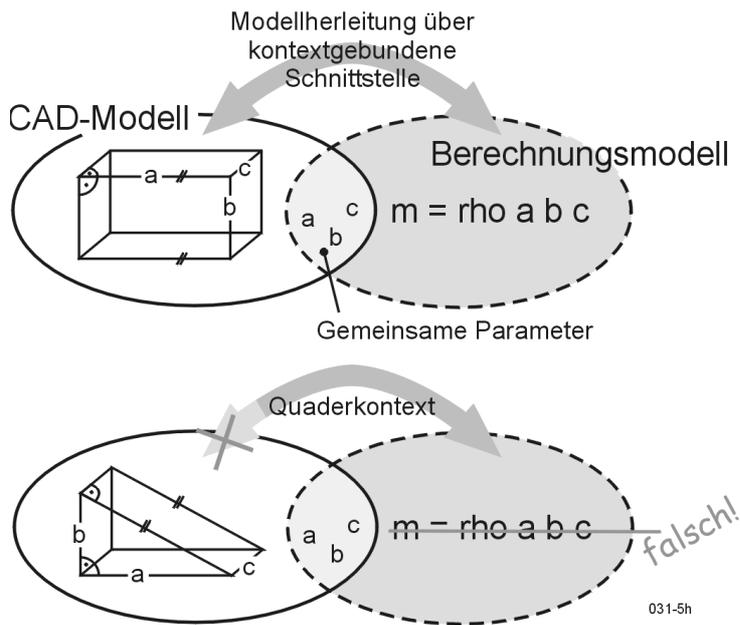


Bild 2-31: Herleitung von Modellen mit verschiedenem Informationsgehalt führt zur Bindung an bestimmte Objekte

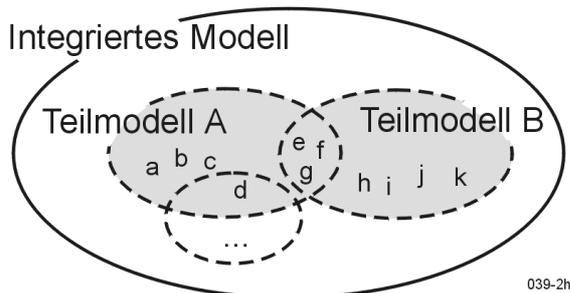


Bild 2-32: Herleitung verschiedener Teilmodelle aus einem integrierten Produktmodell

Damit bieten sich zusammengefasst zwei grundsätzliche Ansätze für modellbasierte Integration von Gestaltung und Berechnung über Schnittstellen (Bild 2-33):

- I. Einsatz von Schnittstellen *ohne* Kenntnis spezieller (in der Schnittstelle hinterlegter) Modellattribute,
- II. Einsatz von Schnittstellen *mit* Kenntnis spezieller (in der Schnittstelle hinterlegter) Modellattribute.

Im Fall I) müssen integrierte Produktmodelle zu Grunde liegen, die alle notwendigen Informationen für alle herzuleitenden Teilmodelle in sich tragen (Bild 2-32). Diese integrierten Modelle können auf zweierlei Weisen angelegt sein:

- I.1 *Spezielle objektgebundene integrierte Modelle*, die entsprechende Zusatzinformationen für Teilmodelle auf Grund Ihres stets ähnlichen Einsatzgebiets automatisch in sich tragen.
- I.2 *Nicht objektgebundene generische integrierte Produktmodelle*, denen für die Herleitung anderer Teilmodelle notwendige Zusatzinformationen individuell zur Laufzeit von Hand hinterlegt werden können (LINDEMANN ET AL. 1996).

Greift die Schnittstelle mit der Hinzufügung von Zusatzinformationen in die Modellbildung ein (Fall II), kann ohne integrierte Modelle gearbeitet werden (s. Bild 2-31). Die Schnittstelle muss den Zusammenhang der ineinander zu überführenden Teilmodelle kennen. Dies kann auf zweierlei Weisen erfolgen:

- II.1 *Mit speziellen objektgebundenen Schnittstellen*, die entsprechende modellspezifische Zusatzinformationen für verwandte Teilmodelle auf Grund des stets ähnlichem Einsatzgebiets automatisch in sich tragen. Dies kann a) über *starre, vorgefertigte Schnittstellen* erfolgen oder b) mit auf spezielle Objekte *trainierten Schnittstellen* (Einsatz von KI Mechanismen mit sekundärer Intelligenz).
- II.2 *Mit nicht objektgebundenen Schnittstellen*, die über interpretative Ressourcen verfügen. Dies bedeutet entweder a) die Einbeziehung der interpretativen, *primären Intelligenz des Konstrukteurs/Entwicklers* (halbautomatische Schnittstellen) oder b) den Einsatz von *KI-Mechanismen mit interpretativer, primärer Intelligenz*.

Die Vorgehensmöglichkeit II.2.b) mit dem notwendigen Einsatz von KI-Mechanismen mit primärer Intelligenz ist auf Grund der auf unabsehbare Zeit nicht verfügbaren Technologien ausschließbar (siehe Abschnitt 2.4).

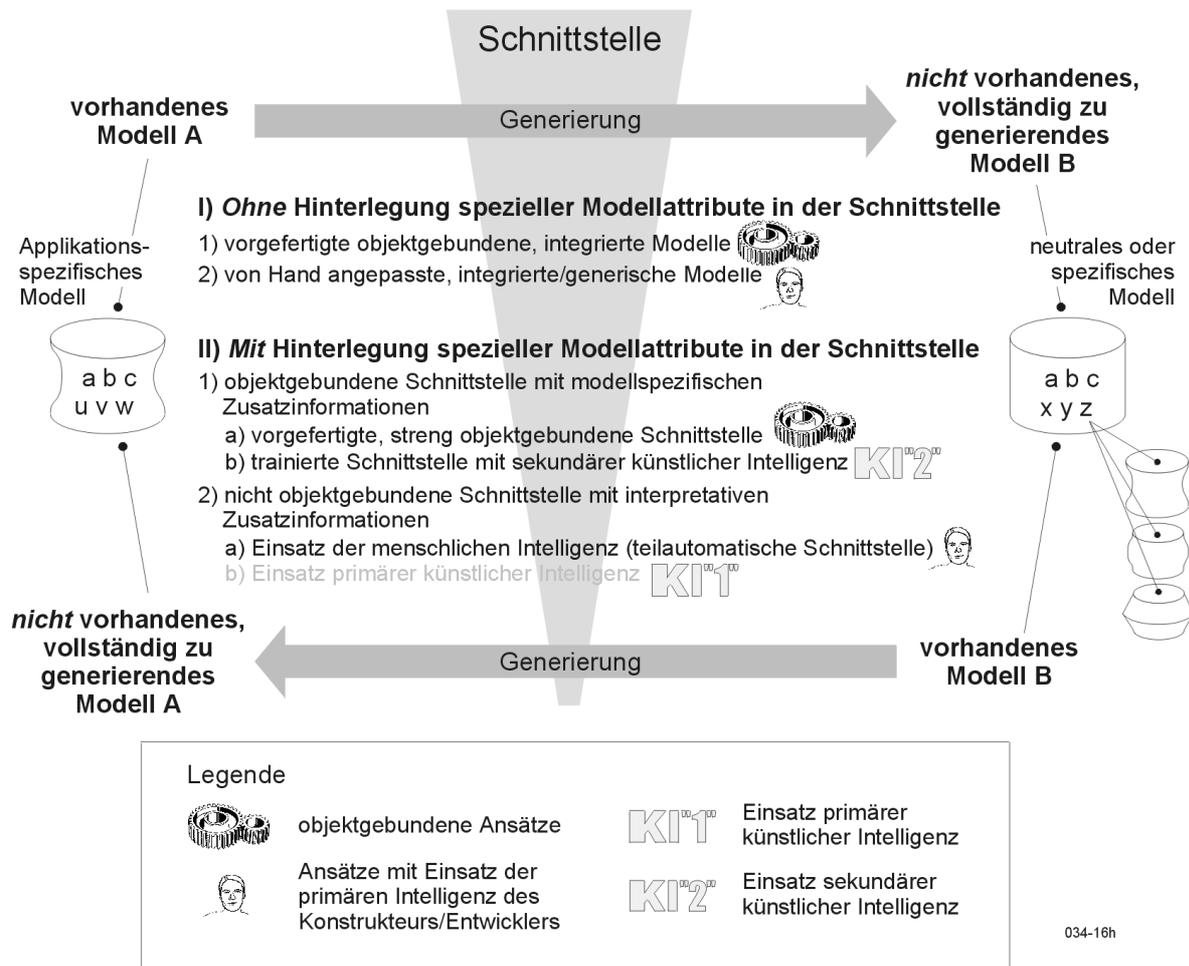


Bild 2-33: Vorgehensmöglichkeiten bei modellorientierter Integration von Gestaltung und Berechnung

2.9.2 Parameterbasierte Schnittstellenkommunikation

Eine andere Form der Integration von Gestaltung und Berechnung über Schnittstellen ist die Verbindung unterschiedlicher Datenmodelle über ausgewählte Parameter, die in beiden Modellen vorhanden sind. Die Modelle werden nicht auseinander hergeleitet, sondern nur die wesentlichen Informationen ausgelesen und in das bereits vorhandene zweite Modell übertragen.

Dabei ist der Zugriff auf die kontextbezogenen richtigen Daten eines Modells nicht trivial. Wenn zum Beispiel ein Durchmesser einer Welle in einem Berechnungsmodell behandelt werden soll, so kann bei einem mehrstufigen CAD-Wellenmodell nicht automatisiert entschieden werden, welcher Durchmesser konkret in der Berechnung gemeint ist. Die Modelle enthalten zwar beide ausreichend Informationen für ihre spezifischen Aufgaben, der gegenseitige automatische Datenzugriff scheitert aber im allgemeinen Fall an fehlenden

Spezifikationen, die aber entweder in der Schnittstelle oder in den Modellen hinterlegt werden können.

Es lassen sich (analog wie der modellbasierten Schnittstellenkommunikation, siehe oben) wieder sechs Lösungsansätze formulieren, die zusammengefasst in Bild 2-34 dargestellt sind.



Bild 2-34: Vorgehensmöglichkeiten bei parameterorientierter Integration von Gestaltung und Berechnung

2.9.3 Kombinierte Anwendung modellorientierter und parameterorientierter Schnittstellenkommunikation

Werden integrierte applikationsunabhängige neutrale Modelle zwischen die beteiligten Applikationen gestellt, aus denen die applikationsspezifischen Teilmodelle extrahiert und generiert werden (modellorientierte Schnittstellenkommunikation), so muss der Datenrückfluss in das integrierte Modell über parameterorientierte Schnittstellenkommunikation erfolgen. Bild 2-35 zeigt diesen kombinierten Einsatz der vorgestellten Schnittstellenkommunikationen.

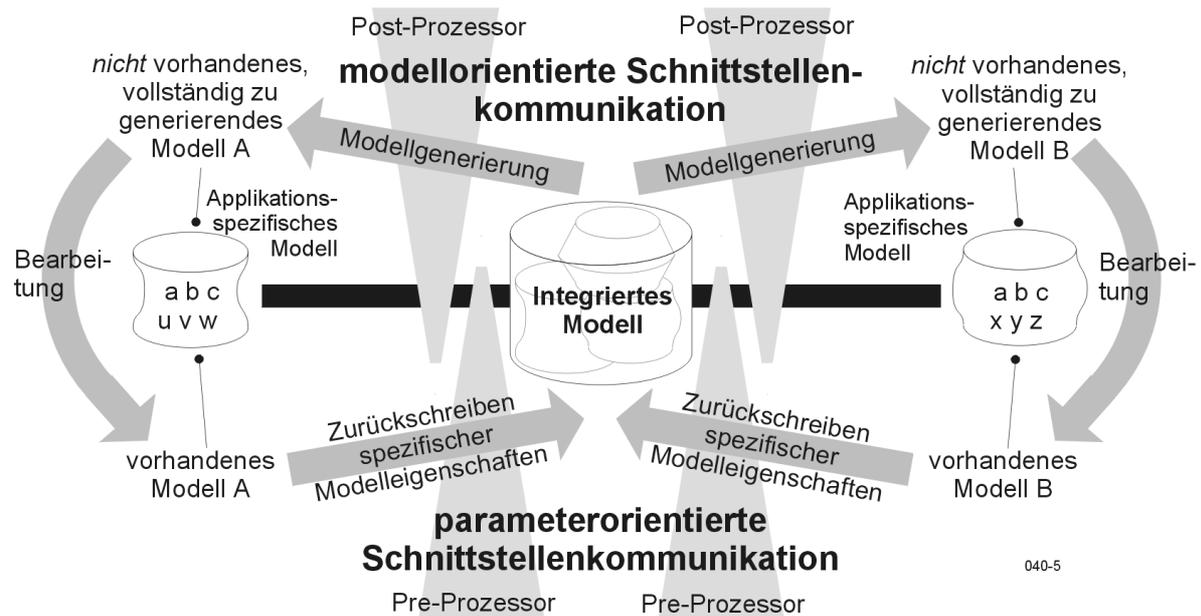


Bild 2-35: Einsatz von Pre- und Post-Prozessoren bei Verwendung integrierter Produktmodelle als zentrales Datenaustauschformat zwischen den beteiligten Applikationen

2.9.4 Zusammenfassung

Für den Transfer von Daten bei der Integration von Gestaltung und Berechnung gibt es zwei grundsätzliche Ansätze für Schnittstellenkommunikation verschiedener Applikationen:

- modellorientierte Schnittstellenkommunikation und
- parameterorientierte Schnittstellenkommunikation.

Die *modellorientierte Schnittstellenkommunikation* leitet aus einem vorhandenen Modell ein vollständiges neues anderes Modell her.

Die *parameterorientierte Schnittstellenkommunikation* verbindet zwei getrennte, eigenständige, bereits vorhandene und nicht unmittelbar zu generierende Teilmodelle bezüglich einzelner, in beiden Modellen vorkommender Parameter.

Sowohl bei der modellorientierten als auch bei der parameterorientierten Schnittstellenkommunikation können die notwendigen Informationen für den vollständigen und korrekten Schnittstellentransfer

- in den Modellen oder

- in der Schnittstelle selbst³⁶

hinterlegt sein.

Vermitteln die Schnittstellen zwischen Modellen mit informationstechnisch nicht kongruentem Inhalt, ist grundsätzlich der *Einsatz primärer Intelligenz* erforderlich. Dieser Einsatz ist für *sekundäre Prozesse*³⁷ *automatisierbar*. Dies führt zu objektgebundener Schnittstellenkommunikation.

Insgesamt wird deutlich, dass das wesentliche Problem für die Integration von Gestaltung und Berechnung in der Abbildung der primären Intelligenzleistungen des Konstrukteurs/Entwicklers liegt, die er beim konventionellen Datenübertrag von Hand erbringt. Der Fokus liegt daher nicht allein auf der Schaffung von Kommunikationsstrukturen von Programmsystemen und Programmverbunden sondern bei der Findung geeigneter Wege zwischen:

- objektgebundenen Speziallösungen und
- der Nutzung der weiterhin vorhandenen primären Intelligenz des systembedienenden Konstrukteurs/Entwicklers.

Forschungsziel der vorliegenden Arbeit ist dabei die Schaffung geeigneter interaktiver ergonomischer Mechanismen, die den Intelligenzeinsatz des Konstrukteurs/Entwicklers schnell und eindeutig in Modell oder Schnittstelle erfassen.

2.10 Zusammenfassung Kapitel 2

Kapitel 2 erarbeitet die Grundlagen für das Verständnis des Forschungsfeldes der Integration von Gestaltung und Berechnung. Die Besinnung auf die dargestellten Grundzüge der Problematik erlaubt zielgerichtete Arbeit bei Integrationsansätzen.

Das Kapitel beobachtet den Konstrukteur/Entwickler bei seiner Arbeit und erarbeitet systematisch sowohl in mikroskopischer (Detailarbeit an einzelnen Parametern) als auch makroskopischer Sicht (ganzheitliche Produktverantwortung) die grundsätzlichen Möglichkeiten zu seiner Unterstützung. Grenzen werden vor allem darin sichtbar, dass ein ganz wesentlicher Anteil der Arbeit beim Berechnen und Gestalten primäre Intelligenzleistung erfordert, die grundsätzlich rechentechnisch nicht ersetzt werden kann.

³⁶ Bei der Klassifizierung von CAD-Schnittstellen führt ANDERL (1993) anwendergeführte Programmierschnittstellen mit entsprechenden Variantenprogrammiersprachen auf. Dies entspricht einer CAD-System-gebundenen Hinterlegung von modellspezifischem Wissen in der Schnittstelle. Bei entsprechender Gestaltung integrierter Systeme können freie Schnittstellen mit objektgebundenen oder interaktiven Methoden geschaffen werden.

³⁷ Prozesse mit identischem Ablauf und abweichenden Parametern

Ein Exkurs in eine integrationsphilosophische Betrachtung von realer Physik und stofflicher Geometrie versus entsprechender Teilmodellbildung deckt die unüberbrückbare Redundanz bei der Integrationsproblematik auf. Unvollständige und stets ungenaue Modellbildung führt dazu, dass Redundanzen grundsätzlich nicht abgeglichen werden können. Dies führt im Falle einer bidirektionalen Integration automatisch und unumgänglich zu ganzheitlichen Modellinkonsistenzen, deren Beherrschung primäre Intelligenz erfordert.

Im Besonderen zeigt sich der Grenzgang zwischen primärer und sekundärer Intelligenz bei der Schnittstellenproblematik. Die Kommunikation verschiedener Modelle beziehungsweise verschiedener Applikationen lässt sich auf Grund vieler grundsätzlich notwendiger Prozesse, die primäre Intelligenz unabdingbar erfordern, nicht auf rein datentechnische, rechner-spezialisierte Betrachtung reduzieren. Ausnahme sind auch hier vollständig objektgebundene Ansätze, die ohne primären Gestaltungsfreiraum ablaufen. Darüber hinausgehende Prozessunterstützung kann nur durch ergonomische Einbindung des Konstrukteurs/Entwicklers realisiert werden, was den Grad der Automatisierung in umgekehrtem Verhältnis senkt.

Kapitel 2 stellt einen wesentlichen Teil der Forschungsarbeit zur Integration von Gestaltung und Berechnung dar. Die beschriebenen Grundlagen stellen das Forschungsfeld strukturiert dar und können möglicherweise zukünftigen Arbeiten Orientierung anbieten.

Im folgenden Kapitel 3 können anhand der geschaffenen Begrifflichkeit der Stand der Technik und themenverwandte Forschungsarbeiten in das Forschungsfeld der Integration von Gestaltung und Berechnung eingeordnet werden.

3 Betrachtung des Stands der Technik und der Forschung unter den Maßgaben der erarbeiteten Grundlagen

Das folgende Kapitel gliedert sich in die Hauptabschnitte "Stand der Technik" und "Stand der Forschung". Da der Abstand zwischen Stand der Technik, wie er im industriellen Alltag heute angewendet wird, und technisch Machbarem tatsächlich sehr klein ist, bewegen sich Forschungsarbeiten auf dem schmalen Grat dazwischen. Die Grenze wird markiert durch den in Kapitel 2 dargestellten grundsätzlichen Unterschied zwischen primären und sekundären Konstruktionsprozessen³⁸.

Forschungsarbeiten gliedern sich vor diesem Hintergrund in objektgebundene³⁹ oder methodenorientierte Ansätze. Die objektgebundenen Arbeiten unterstützen sekundäre Konstruktionsaufgaben und bleiben dadurch diesseits des technisch Machbaren. Eine Umsetzung im allgemein eingesetzten und anerkannten Stand der Technik ist durch diese Konzentration auf Spezialanwendungen schwierig. Methodenorientierte Ansätze binden in der Regel den Konstrukteur/Entwickler in den Prozess ein und schaffen damit prozessualen Zusatzaufwand oder unergonomische Prozesszwänge, was einem Einsatz im Alltag angesichts Akzeptanz und Aufwand/Nutzenabwägung entgegen steht.

Diese Schwierigkeit Forschungsergebnisse in den Stand der Technik zu überführen, spiegelt sich in der großen Zeitspanne wider, aus der Forschungsliteratur gesichtet werden musste. Viele Arbeiten sind auch viele Jahre nach Ihrem Erscheinen nicht zum Stand der Technik geworden. Ihre wichtigen Ergebnisse haben bis heute nicht an Umsetzungsbedarf und Aktualität verloren. Aus diesem Grund findet sich im Stand der Forschung Literatur aus dem gesamten vergangenen Jahrzehnt.

3.1 Ansätze ohne Rechnerintegration

Das im Antrag zum Schwerpunktprogramm formulierte Nicht-Zusammenwirken von Gestaltung und Berechnung spiegelt sich an den aktuellen Vorgehensweisen in der industriellen Praxis. Im Folgenden werden Beobachtungen wiedergegeben, die den Ansatz für die Rechnerintegration beider Disziplinen als notwendige und praxisrelevante Aufgabe darlegen.

³⁸ siehe Abschnitt 2.4

³⁹ im Sprachgebrauch des DFG-Schwerpunktprogrammes: "objektorientierte"

3.1.1 Allgemeine Beobachtungen

Das papierlose Büro als Vision der Gegenwart hat trotz enormer Fortschritte auf dem Rechnersektor noch keine Umsetzung gefunden. Betrachtet man den typischen Arbeitsplatz von Konstrukteuren/Entwicklern, so bestimmen in der Regel unzählige Aktenordner, Papierstapel, Zeitschriften, Kataloge, Bücher, Schmierzettel und Kalendarien das Bild. Sie alle sind Ausdruck einer unverkennbar menschlichen Arbeitsweise, die demnach als alles andere als papierlos bezeichnet werden kann. Geprägt wird das Bild lediglich zusätzlich durch eine mehr oder weniger homogene oder inhomogene Rechnerlandschaft, die auch im Falle einer Homogenität der Hardware eine ähnlich unaufgeräumte innere Softwarestruktur aufweist wie das Papier auf den Schreibtischen. So wird dort nicht selten mit zehn, zwölf oder noch mehr Systemen gearbeitet, die alle nicht zusammenwirken (CAD, Textverarbeitung, Tabellenkalkulation, Stücklistenverwaltung, Lastenheftdatenbank, Terminplanung, Projektplanung, Email, Internetbrowser etc. pp.).

Aber auch die papiergetragenen Ergebnisse müssen Berücksichtigung in der zunehmend rechnerdokumentierten Produktgestaltung finden. Schnittstelle bleibt der Mensch. Seine Arbeitsweise mit handschriftlichen Überlegungen, Notizen und Berechnungen findet mangels geeigneter, ergonomischer Schnittstellen nur schwer Einzug in die Rechnerwelt. (PACHE ET. AL. 2000, 2001)

Die offensichtliche Inhomogenität zwischen Papierwelt und Rechnerwelt setzt sich auch innerhalb der Rechner fort. Eine Prozessoptimierung lässt sich nicht allein durch eine Homogenisierung der Rechnerlandschaft erzielen. Rechner müssen darüber hinaus in der Lage sein die natürliche, intuitive Arbeitsweise des Menschen mit den alltäglichen Ausdrucks- und Hilfsmitteln zu adaptieren, um eine geeignete Hilfestellung für den Gesamtprozess darstellen zu können.

Während meiner Zeit und meiner Projektarbeit in der Industrie hatte ich die Gelegenheit Entwicklungsabteilungen verschiedenster Betriebe und Konzerne zu beobachten. Es zeigte sich, dass die Konstrukteure/Entwickler in der Regel nur auf eine begrenzte Anzahl von Rechnerhilfsmitteln zurückgriffen, mit denen sie vertraut waren. Zum Beispiel hatte der Einsatz von Tabellenkalkulationen einen extrem hohen Stellenwert, weit über die eigentlichen Fähigkeiten und Zieleinsatzgebiete solcher Programme hinaus. Obwohl geeignetere Programme für das Lösen komplexer Gleichungssysteme oder die Darstellung auch nicht-mathematischer Zusammenhänge vorhanden waren, scheuten viele Konstrukteure/Entwickler den Aufwand der Einarbeitung in unbekannte Programme beziehungsweise den Aufwand einer Umgewöhnung. So wurden zum Beispiel auch Balken-Projektzeitpläne auf dem CAD-System gezeichnet, statt sinnvollerweise in einem Projektmanagementwerkzeug, z. B. MS-Project, das im beobachteten Fall auf allen Rechnern der Firma zur Verfügung stand.

3.1.2 Bedeutung der Beobachtungen für rechnerintegrierte Ansätze

Bei der Arbeit am Rechner legen sich Menschen gerne eine beschränkte Anzahl von – wenn auch nur mit Ach und Krach funktionierenden – Hilfswerkzeugen zu und manövrieren sich so durch die Erfordernisse des Alltags. In Ermangelung einer Ergonomie, die einen einfachen Zugang zu rechnerbasierten Prozesshilfsmitteln bieten würde, finden viele integrierte Lösungen keinen Einzug in den Alltag der Produktentwicklung.

Ein neues integriertes Werkzeug, das eingeführt wird, muss sich an der Herausforderung messen lassen erkennbare Arbeitserleichterung und Prozessverbesserung zu sein.

3.2 Stand der Technik

Der Abschnitt stellt die im industriellen Einsatz vorhandenen Rechnerhilfsmittel zur Integration von Gestaltung und Berechnung vor und definiert sie als State of the Art.

3.2.1 CAD-Parametrik

3.2.1.1 Direkte Hinterlegung von Berechnungen

Bild 3-1 zeigt den direkten Zugriff über Formelbeziehungen auf die Variablen der Parametrik am Beispiel des CAD-Systems Pro/ENGINEER[®]. Die Formelbeziehungen werden hier in einfachen ASCII-Dateien hinterlegt, die vom CAD-System zur Laufzeit ausgewertet werden. Durch die Verwendung der einfachen ASCII-Editoren ist eine benutzerführende Rückkopplung von Datei und CAD-Modell nicht möglich. Der Konstrukteur/Entwickler kann jede beliebige Änderung eintippen und beliebig sinnvolle und unsinnige Änderungen vornehmen, die das System erst mit erfolgter oder nicht-erfolgreicher Regeneration des Modells quittiert. Die Fehlersuche gestaltet sich entsprechend schwierig und aufwändig.

Die Integration der Berechnungen innerhalb der CAD-Parametrik ist kontinuierlich, das heißt, sie bleibt im Modell bis zu seiner fertigungsgerechten Fertigstellung erhalten. Die Berechnungen müssen daher Fertigungsansprüchen genügen. Zum Beispiel scheiden schon einfache Kreisflächen- oder Winkelberechnungen zur Hinterlegung in der Parametrik aus, weil fertigungsgerecht sinnvolle Maße unter den Ergebnissen nicht zu erwarten sind – geometrische Größen mit dem Faktor π haben eine nicht fertigungsgerechte Zahl von Stellen hinter dem Komma. Ein manueller Eingriff wird notwendig, was der Auflösung der hinterlegten Berechnungsbeziehung gleich kommt. Auch Maschinenelementeberechnungen mit typischen Mindestmaßen als Ergebnis können nicht mit tatsächlich fertigungsgerechten Maßen in Einklang gebracht werden. Die Berechnungen innerhalb der Parametrik müssen sich also auf einfache, lineare und direkte Relationen verschiedener Maße zueinander beschränken. Solche mathematischen Beziehungen liegen vor, wenn zum Beispiel eine Nut

und eine Lippe zueinander passen sollen oder eine Schraube und eine dazugehörige Bohrung oder wenn ausgewählte Abmessungen bestimmten Größenverhältnissen unterliegen sollen. Weitergehende Berechnungen sind zwar hinterlegbar, führen aber automatisch zu nicht-fertigungsgerechten Modellen, die entweder zu einem späteren Zeitpunkt für die Detaillierung wieder von den parametrischen Berechnungen befreit werden, oder die ausschließlich in den frühen Auslegungsphasen Verwendung finden.

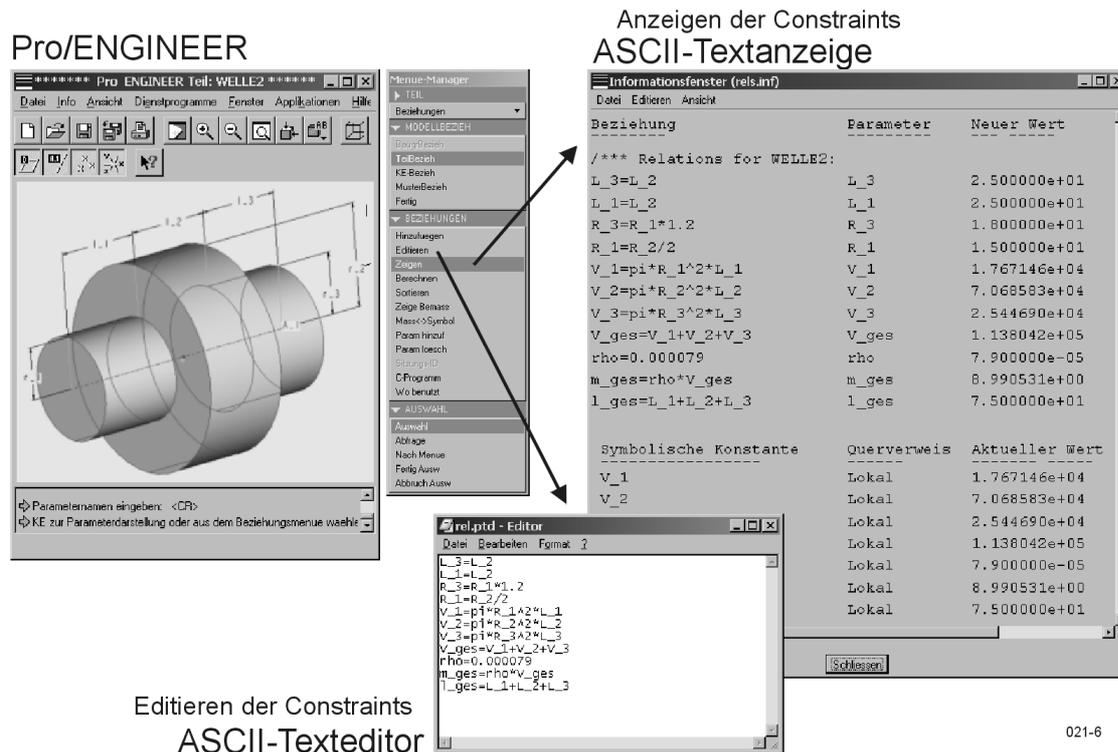


Bild 3-1: Arbeit mit Berechnungen in der Parametrik von Pro/ENGINEER®

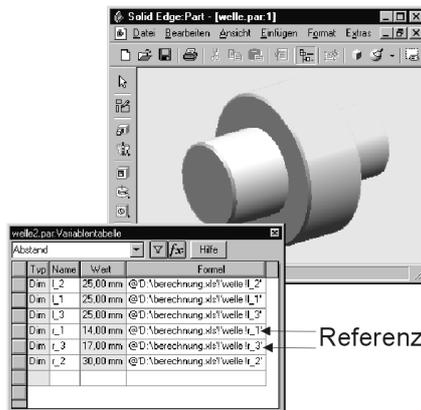
3.2.1.2 Einbindung von Tabellenkalkulationen

Im CAD-System Solid Edge[®] 40, 41 ist es möglich Variablen des parametrischen CAD-Modells mit Zellen aus Tabellenkalkulationen zu verbinden (Bild 3-2). Die Parametrik kann auf diese Weise mit allen mathematischen Möglichkeiten der Tabellenkalkulation komfortabel gesteuert werden. Die Möglichkeiten dieser Form der Berechnungsintegration sind durch die Schnittmenge der Fähigkeiten aus CAD-Parametrik (siehe vorangegangener Abschnitt) und Tabellenkalkulation limitiert.

⁴⁰ Solid Edge[®] ist eingetragenes Markenzeichen der Firma Unigraphics Solutions

⁴¹ Auch andere Systeme bieten diese Möglichkeit. Das System Solid Edge[®] gilt hier als Beispiel.

Solid Edge



MS-Excel

verknüpfung				
	A	B	C	D
1	L_1		25 mm	
2	L_2		25 mm	
3	L_3		25 mm	
4	r_1		14 mm	
5	r_2		30 mm	
6	r_3		17 mm	
7				
8	V_1	15394 mm^3	=PI()*r_1^2*L_1	
9	V_2	70686 mm^3	=PI()*r_2^2*L_2	
10	V_3	22698 mm^3	=PI()*r_3^2*L_3	
11				
12	V_ges	108778 mm^3	=V_1+V_2+V_3	
13				
14	rho_stahl	7,90E-05 kg/mm^3		
15	m_ges	8,693 kg	=rho_stahl*V_ges	
16	L_ges	75 mm	=L_1+L_2+L_3	

Referenzen

019-2

Bild 3-2: Zusammenwirken des CAD-Systems Solid Edge® mit der Tabellenkalkulation Microsoft® Excel®⁴²

Tabellenkalkulationen wie Excel® sind nicht in der Lage mathematische Gleichungen nach beliebigen Parametern aufzulösen. Eine bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung, die zu jedem Zeitpunkt einen freien Zugriff auf jeden Parameter erfordert, ist mit dieser Technik nicht umsetzbar. Die Arbeit mit Excel® erfordert manuelles Umstellen der hinterlegten Gleichungen.

Das in der Tabellenkalkulation implementierte numerische Hilfsmittel "Zielwertsuche" erlaubt es auch abhängige Parameter zielgerichtet zu variieren, indem nach Lösungen für die Steuerparameter gesucht wird. Die Zielwertsuche muss manuell im Einzelfall initialisiert werden. Durch Verknüpfung dieser Funktionalität mit einem parametrischen CAD-System kann dessen grundsätzliche Arbeitsweise der Geometriemanipulation allein über unabhängige Steuerparameter bedingt umgangen werden. Tatsächlich bleibt das CAD-Modell allein über die festgelegten Steuerparameter beeinflussbar. Die mathematischen Fähigkeiten der CAD-Parametrik werden somit nicht tatsächlich erweitert, sondern lediglich durch das sehr komfortable Eingabesystem der Tabellenblätter erweitert.

3.2.1.3 Numerische Zielwertsuche

Das im Januar 2001 auf den Markt gebrachte System GrafiCalc® der Firma Geomate®⁴³ setzt durch den im Abschnitt 3.2.1.2 beschriebenen Workaround mit einer numerischen Zielwertsuche eine bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung um. Das System lässt Veränderungen an beliebigen Parametern des zu Grunde liegenden Geomet-

⁴² Microsoft® und Excel® sind eingetragene Warenzeichen der Firma Microsoft® Corporation

⁴³ GrafiCalc® und Geomate® sind eingetragene Warenzeichen der Firma Geomate® Corporation

rie/Berechnungsmodells zu und beschränkt damit nicht den Zugriff auf spezielle Steuerparameter. Das zu Grunde liegende geometrische Modell ist nach wie vor ein durch Steuerparameter und abhängige Parameter gekennzeichnetes CAD-Modell, das über iterative Variation der Steuerparameter Lösungen sucht, welche abhängige Parameter auf vorgegebene Werte einstellen.

Das System arbeitet mit eigenständigen Geometriemodellen, die über eine dxf-Schnittstelle aus dem CAD importiert werden. Es ist für Auslegungsberechnungen in frühen Phasen konzipiert und kann keine fertigungsgerechten Modelleigenschaften sicherstellen.

Im Wesentlichen entspricht dieses Vorgehen einer Erweiterung einfacher Berechnungsmodelle um eine grafische Ergebnisvisualisierung beziehungsweise Parametereingabe. Der Übertrag ins tatsächliche CAD-Modell erfolgt von Hand beziehungsweise wieder durch Export des gesamten Modells über die dxf-Schnittstelle, was eine Nachbearbeitung jedes Parameters von Hand erfordert (Detaillierung). Bild 3-3 zeigt das System im Zusammenwirken mit dem CAD-System AutoCad[®]. Die numerisch iterative Integration von Gestaltung und Berechnung findet nur innerhalb des Systems GrafiCalc[®] statt und schließt nicht das CAD-System unmittelbar mit ein. (GEOMATE[®] 2001)

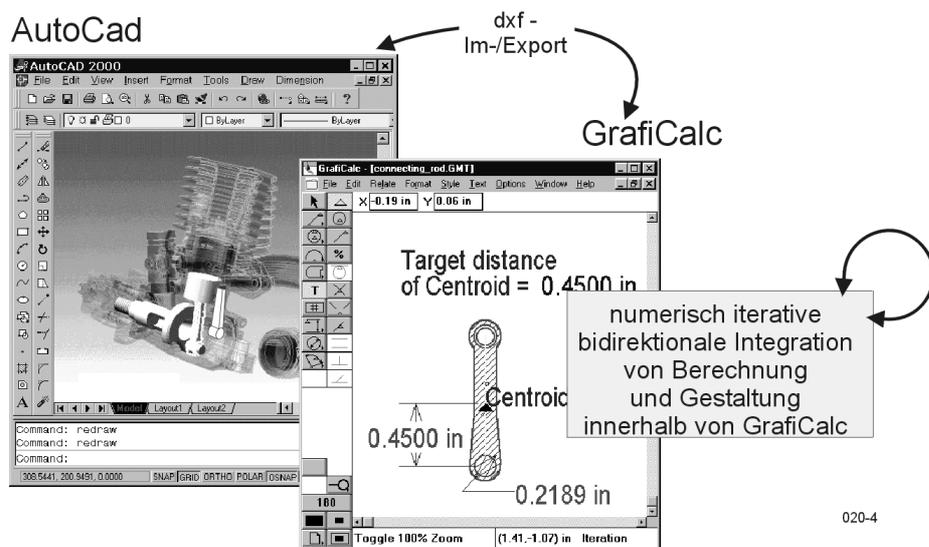


Bild 3-3: Numerisch iterative, bidirektionale Kopplung von Berechnung und grafischer Datenein- und Ausgabe im System GrafiCalc[®]

3.2.2 Kinematikuntersuchungen im CAD

3.2.2.1 Kinematikmodule

Viele CAD-Systeme bieten Kinematik-Module zur Simulation von Bewegungsabläufen an, die in CAD-Oberfläche und -Datenbasis integriert sind oder über Modell-Importfunktionen

unmittelbar angegliedert sind. In den Modulen können einzelne Bauteile durch Gelenke oder Führungen miteinander verbunden werden und direkt in 3D-Ansicht oder in vereinfachten Skizzieransichten untersucht werden. Wird im Rahmen der Simulation ein Bauteil bewegt, so werden alle anderen Bauteile in der entsprechenden neuen Lage dargestellt. In jeder Bewegungsphase können alle relevanten Strecken und Winkel gemessen werden. Diese Art der Bewegungssimulation erspart die aufwändige Erstellung eigenständiger Bewegungsmodelle außerhalb der CAD-Geometrie.

Kinematik-Module erlauben die Simulation des Bewegungsablaufs von sogenannten Koppelgetrieben. Die Extrempositionen wie Tot-, Umkehr- und Endlagen werden am Bildschirm dargestellt und können für analytische Untersuchungen aufbereitet und exportiert werden. Auf Grundlage der Bewegungsanalysen kann der Konstrukteur/Entwickler sowohl Lageveränderungen der Dreh-, Halte- und Antriebspunkte als auch geometrische Veränderungen der einzelnen Bauteile vornehmen. Die erneute Simulation des Bewegungsablaufes zeigt direkt die Veränderung und kann zur Findung einer optimierten Lösung beitragen. Die Lösung einer getriebetechnischen Aufgabenstellung erfolgt daraus in mehreren Schritten, die gezielte Verbesserung der Lösungsvariante durch iterative Analyse.

Kinematik-Module stellen Bewegungsabläufe von Knotenpunkten als Koppelkurve dar. Dabei können Geschwindigkeiten und Beschleunigungen als Grafik über der Zeitachse angezeigt werden. Die Berechnung erfolgt mathematisch numerisch und ist in der Schrittweite variabel. Die Distanzen der einzelnen Punkte der Kurven zueinander geben Aufschluss über Beschleunigungs- und Stillstandsbereiche des Systems. Dadurch sind CAD-Kinematik-Module mächtige Werkzeuge zur Analyse und Optimierung von Bewegungsabläufen. Die je nach Anwendung äußerst komplexen Koppelkurven können in der Regel für weitere analytische Betrachtungen aufbereitet und exportiert werden.

Wichtige Unterstützung erhält der Konstrukteur/Entwickler bei der Überprüfung der Montagefähigkeit (Fügebewegungen) und bei der Überprüfung eines störungsfreien, sicheren Betriebes von Baugruppen anhand von Kollisionsüberprüfungen. Wenn der Anwender Einzelteile innerhalb von Baugruppen verschiebt oder rotiert, werden automatisch Kollisionen entdeckt und je nach Kinematik-Modul zum Beispiel die involvierten Flächen markiert. Mit Hilfe von integrierten Analysemechanismen können Erstkontakte zwischen Teilen in Bewegungsabläufen ermittelt werden, ebenso wie zum Beispiel minimale oder maximale Abstände.

Bewegte Bildfolgen erleichtern die Analyse von Bewegungsabläufen in komplexen Hebelsystemen. Durch Hintereinanderschalten von Einzelbildern lassen sich zeitliche Abläufe von kinematischen Bewegungen fließend simulieren.

Eine detaillierte Vorstellung spezifischer Kinematikmodule spezifischer CAD-Systeme sprengt an dieser Stelle den Rahmen der Arbeit. Die hier im Überblick beschriebenen

Möglichkeiten sind bei verschiedenen CAD-Modulen unterschiedlich ausgeprägt beziehungsweise spezialisiert, die unidirektionale Arbeitsweise ist jedoch stets gleich.

Zusammenfassend gilt: Die Integration von Gestaltung und Berechnung ist bei der Kinematikuntersuchung unidirektional. Es ist nicht möglich (veränderte) Bewegungskurven vorzugeben und daraus automatisiert auf der Basis von mathematisch/physikalischen Zusammenhängen eine (veränderte) Geometrie zu erzeugen.

3.2.2.2 Inverse Kinematik

Auf der Basis von Systemen mit mehreren Freiheitsgraden arbeiten die Verfahren der sogenannten inversen Kinematik mit vorgegebenen Bewegungskurven. Sie dienen der Berechnung von Roboter gelenkwinkeln für das Erreichen vorgegebener Raumkoordinaten. Die Geometrie des Roboterarms wird hierbei nicht variiert, ein gestalterischer Eingriff liegt hierbei also nicht vor. Es handelt sich demnach nicht um eine Integration von Gestaltung und Berechnung.

3.2.2.3 Mehrkörpersimulation

Nicht verwechselt werden darf die Kinematikanalyse mit der Mehrkörpersimulation (MKS), bei der kinematisch/kinetische Abläufe anhand von Differenzialgleichungen modelliert und untersucht werden. MKS untersucht dynamische Vorgänge weit über die Betrachtung der reinen Bewegungsabläufe hinaus. Die einfache Kinematikanalyse betrachtet Bewegungsabläufe statisch, das heißt quasi stroboskopisch in verschiedenen Ruhelagen, während MKS die Effekte dynamischer massenbehafteter/elastischer/gedämpfter Vorgänge untersucht. Die Modellierung von Mehrkörpersystemen ist hochgradig aufwändig und bedarf in der Regel einer Verifikation durch Versuche und Messungen an realen Objekten. Die Integration von MKS in die Geometriegestaltung ist auf Grund der notwendigen mathematischen Modellbildung mit Reduzierung auf Punktmassen und Feder/Dämpferelemente nur bedingt und für sehr einfache und spezielle Fälle umsetzbar. Bewegungssimulationen mit einer hohen Anzahl von Freiheitsgraden erfordern Modellvereinfachungen wie sinngemäße Reduktion der Freiheitsgrade, Steifigkeitsannahmen und Linearisierung, die nicht automatisierbar sind. Die richtige Modellierung der Randbedingungen und Anfangszustände bedürfen der erfahrenen Hand eines MKS-Spezialisten.

3.2.3 FEM (Finite-Elemente-Methode)

Der Datenaustausch zwischen CAD- und FEM-Systemen erfolgt in der Regel über systemneutrale Geometriedatenschnittstellen wie IGES (Initial Graphics Exchange Specification) oder STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data ANDERL&TRIPPNER 2000). Nach dem reinen Geometriedatenaustausch über diese Schnittstellen sind in den FEM-

Systemen die Randbedingungen, die Belastungen, die Vermaschung (Ergänzungen für den Netz-Generator) und Werkstoffkennwerte einzugeben (MÜLLER 1989). Bild 3-4 zeigt die unabhängigen Systeme CAD und FEM, die über ein neutrales Datenformat mit Pre- und Postprozessoren zum Datenexport und -import verbunden sind und über jeweils eigene Datenbasen verfügen. Der Datenaustausch wird in der Regel nur unidirektional in der Richtung vom CAD- zum FEM-Modell durchgeführt, da FEM Daten nicht-parametrisch und daher nicht in ein gleichwertig parametrisches CAD-Modell zurück übersetzbar sind. CAD-Modelle, die automatisiert aus FEM-Modellen generiert werden, können nur als Anhaltspunkt für die Detaillierung der ursprünglichen Modelle oder den vollständigen Neuaufbau eines sinnvoll parametrisierten CAD-Modells dienen.

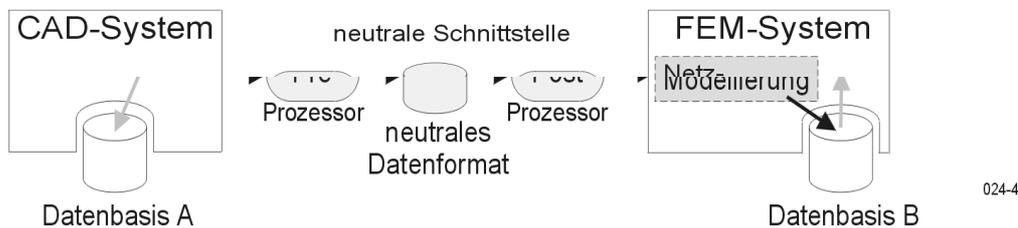


Bild 3-4: Unidirektionaler Datenaustausch zwischen CAD- und FEM-Systemen über eine neutrale Datenschnittstelle mit Pre- und Postprozessor

Bei Einsatz von Variantenprogrammen in CAD-Systemen besteht die Möglichkeit diese Daten programmgestützt zu erzeugen, sodass das komplette Eingabe-File automatisiert für das FEM-System zur Verfügung gestellt werden kann. Dies führt zu einer spezifischen Schnittstelle, die an die ausgewählten CAD und FEM Systeme sowie an die speziell eingerichteten Bauteile/Baugruppen gebunden ist. Bei häufigem Einsatz bedeutet dies einen deutlichen Zeitvorteil gegenüber der reinen Geometrieübertragung mit Hilfe systemneutraler Schnittstellen. Nach KLEIN (1990) kann durch solche spezifischen Schnittstellen bei reiner Variantenbetrachtung ca. 40 Prozent der Gesamtbearbeitungszeit von FEM-Aufgaben eingespart werden. (Bild 3-5)

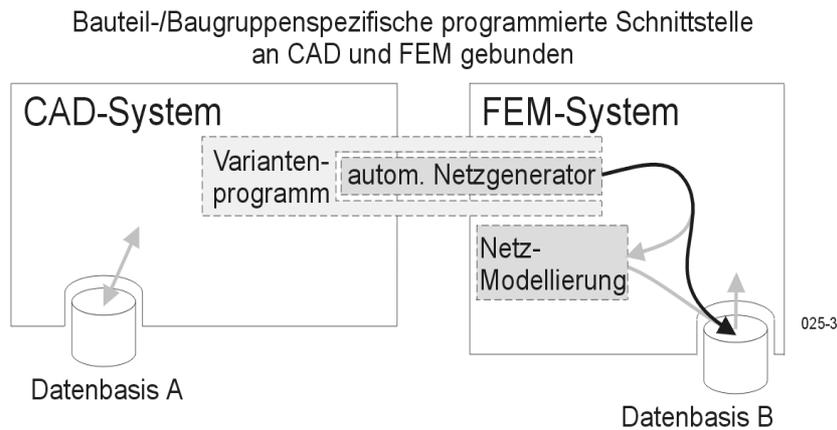


Bild 3-5: Datenaustausch zwischen CAD- und FEM-System über ein bauteil-/baugruppenspezifisch programmiertes, CAD/FEM- gebundenes Variantenprogramm mit automatischem Netzgenerator

Immer mehr Hersteller von CAD-Systemen bieten auch selbst FEM-Systeme und damit CAD-integrierte FEM-Module an. Der Datenaustausch erfolgt auf diese Weise reibungslos. Obwohl durch die Integration nach außen hin die eigene Datenbasis des FEM-Moduls in den Hintergrund tritt, greifen beide Programmteile, CAD und FEM, dennoch auf eigene Modelle zurück, die voneinander getrennt und nicht bidirektional miteinander verbunden sind. Bild 3-6 zeigt ein integriertes System mit der verdeckten Datenbasis des FEM-Moduls. Sehr einfach können mit solchen Systemen aus dem CAD-Modell immer wieder neue FEM-Modelle generiert werden. Auch hier ist ein Datenrückfluss über Datenschnittstellen nur sehr bedingt praktikabel. Variationen der Bauteilgeometrie führt der Konstrukteur/Entwickler am CAD-Modell durch und initialisiert daraus neue Berechnungen mit einhergehender neuer Generierung eines FEM-Modells.

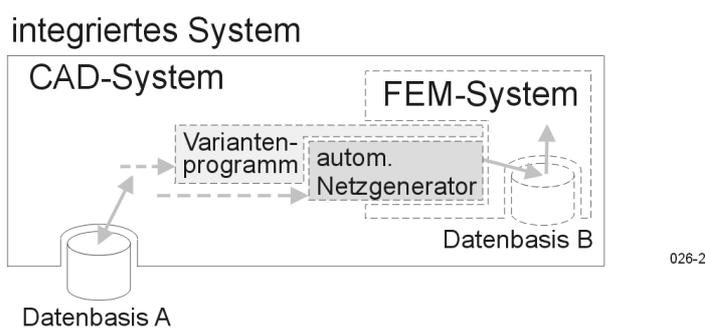


Bild 3-6: Integriertes CAD- und FEM-System

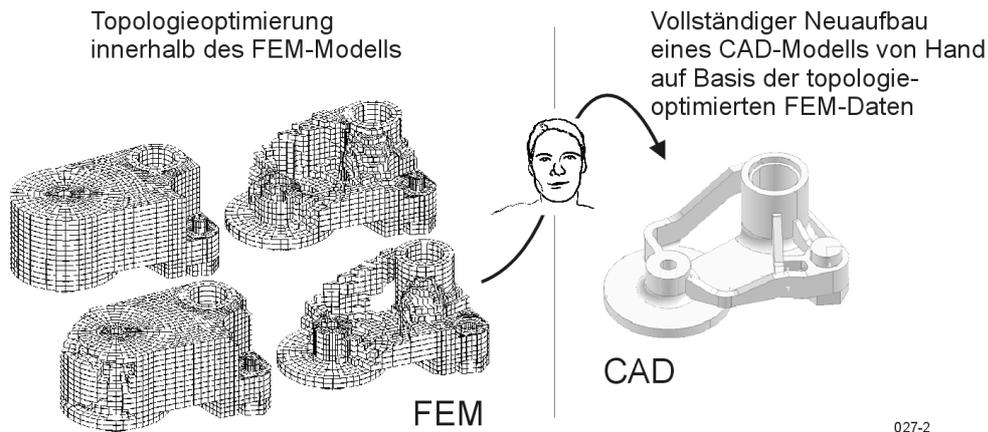
Die Übernahme langwieriger, sich wiederholender und fehleranfälliger Aufgaben bei der Generierung und Interpretation von FEM-Datensätzen kann mittels Expertensystemen automatisiert werden. Darüber hinausgehend können solche Systeme auch Strukturvarianten vergleichen, um zum Beispiel Unterstützung bei den Analysen von FEM-Ergebnissen zu bieten. (BREITFELD 1999, S. 96).

BOSHOF (1997) erarbeitet einen Ansatz zum Datenrückfluss in das parametrische CAD-Ausgangsmodell. Dazu werden Netzstrukturen den CAD-Elementen zugeordnet. Bei einer Netzverschiebung können automatisiert die entsprechenden Parameter des Ausgangsmodells angepasst werden. Dieser Forschungsansatz hat aktuell in der industriellen Praxis noch keine Umsetzung gefunden. Dort ist die Integration von CAD und FEM auch bei zunehmender Systemverschmelzung unidirektional. Durch den Einsatz hoch leistungsfähiger Rechner mit entsprechend schneller Generierung und Berechnung der FEM-Modelle kann eine reine Variation auf CAD-Modellseite sehr schnell Berücksichtigung im FEM-Modell finden. Bei Modellen geringer Komplexität kann eine sehr schnelle Neuberechnung erfolgen, was dann eine Variation auf der Seite der FEM-Modelle mit einem notwendigen Datenrückfluss bedingt entbehrlich macht. Der Konstrukteur/Entwickler arbeitet am CAD-Modell und gewinnt durch die simultane Netzgenerierung den *Eindruck* am FEM Modell und damit bidirektional zu arbeiten.

Eine Vielzahl von Forschungsarbeiten beschäftigt sich mit der prozessualen Parallelschaltung von Gestaltung und FEM-Berechnung ohne jedoch spezielle Integrationsansätze zu entwickeln. Die Schwerpunkte liegen bei diesen Arbeiten auf der korrekten FEM-Modellbildung und Verifikation (Beispiel: KURZAWA 1993). Andere Arbeiten rücken die Prozessoren zur automatisierten Netzgenerierung und Schwerpunktsetzung auf spezielle Objekte in den Mittelpunkt ihrer Untersuchungen. LÖW (1993) entwickelt ein entsprechendes unidirektional wirkendes System zur Stahlbaukonstruktion von Fahrzeugkranen. BOSHOF (1997) betrachtet bidirektionalen Datenaustausch auf der Basis beidseitig topologisch gleicher Modelle.

3.2.4 Topologieoptimierung

Bei der Topologieoptimierung werden auf der Basis von FEM-Berechnungen geometrische Optimierungen an Bauteilen durchgeführt. Modellbereiche mit sehr hohen Belastungsspannungen werden automatisiert im FEM-Modell verstärkt, Bereiche mit niedrigen Spannungen werden zurückgenommen. Dieser Vorgang findet vollständig innerhalb des FEM-Modells statt. Da das FEM-Modell im erweiterten Sinne eine Geometrierepräsentation darstellt, kann bedingt von einer Integration von Gestaltung und Berechnung innerhalb dieses Modells gesprochen werden. Genau genommen findet aber kein bidirektionaler Datenaustausch mit einem tatsächlichen CAD-Modell statt. Der Datenaustausch zwischen CAD und FEM ist wegen der in Abschnitt 2.9.1 beschriebenen Unterschiedlichkeit der Modelle unidirektional und bedarf beim Rücktransfer ins CAD einer Ausgestaltung und Detaillierung durch die Hand des Konstrukteurs/Entwicklers (Bild 3-7). ASBECK (1996) verwendet die FE-Solids aus der Topologieoptimierung für die Erzeugung von RP-Modellen.



027-2

Bild 3-7: Bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung innerhalb der Topologieoptimierung, unidirektionaler Transfer des Berechnungsergebnisses ins CAD unter Eingriff des Konstrukteurs/Entwicklers

3.2.5 Toleranzanalyse

Moderne parametrische CAD Systeme stellen Programmmodule zur integrierten Toleranzanalyse zur Verfügung, deren Funktionalität und Benutzerfreundlichkeit vor allem seit der breiten Einführung parametrischen 3D-CADs stetig weiterentwickelt wurden. Bis zum heutigen Zeitpunkt beschränken sich kommerzielle Systeme jedoch auf die reine Analyse von durch den Konstrukteur/Entwickler vorgegebenen Form- und Lagetoleranzen und bieten damit nur unidirektionale Prozessunterstützung (YIN 1998, S. 2). Eine Toleranzsynthese auf der Basis bauteil-funktionsorientierter Vorgaben ist im kommerziellen Einsatz nicht oder nur für sehr einfache Toleranzketten zu finden. Hier herrscht anhaltend hoher Forschungsbedarf, wie die zeitliche Reihe der Arbeiten von BÖWER (1992), SCHMITT (1993), KOLLER (1996), ZHAO (1996) und YIN (1998) bezeugt.

Die Forschungsarbeiten sind den methodenorientierten Ansätzen zuzuordnen. Sie fallen trotz ihres Charakters als integrierte geometriebasierte Berechnungssysteme auf Grund der nicht tatsächlich topologisch sowie auslegungsbezogenen Gestaltbeeinflussung aus dem Forschungsfeld der Integration von Gestaltung und Berechnung heraus und werden daher auch im Stand der Forschung nicht näher betrachtet. Entsprechende Forschungsarbeiten zur Toleranzanalyse und -synthese sind aus diesem Grund aus dem Schwerpunktprogramm zur Integration von Gestaltung und Berechnung der DFG ausgeschlossen worden (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1995, S. 7). Diese Entscheidung lässt sich am einfachsten nachvollziehen, indem man sich vor Augen führt, dass eine Veränderung von Toleranzen das CAD-Modell geometrisch nicht verändert, sondern ausschließlich auf die Zeichnungsbemaßung Einfluss übt.

3.3 Stand der Forschung

Dieser Abschnitt stellt einen repräsentativen Querschnitt von Forschungsarbeiten aus dem Bereich der Integration von Gestaltung und Berechnung vor. Viele der Arbeiten sind Bestandteil des Schwerpunktprogramms "Innovative rechnerunterstützte Konstruktionsprozesse: Integration von Gestaltung und Berechnung 1995-2001" der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Die Arbeiten gliedern sich in objektgebundene (im Sprachgebrauch des DFG-Schwerpunktprogramms „objektorientierte“) und methodenorientierte (allgemein einsetzbare) Verfahren mit der jeweiligen, in Kapitel 2 dieser Arbeit beschriebenen, diesbezüglich spezifischen Schwerpunktsetzung der Rechnerunterstützung auf überwiegend kontextgebundene Wiederholtätigkeiten (objektgebundene Ansätze) und auf freie Modellierung unter Steuerung durch den Konstrukteur/Entwickler (methodenorientierte Ansätze).

3.3.1 Objektgebundene Ansätze

RIEST (1999) entwickelt ein objektgebundenes integriertes System zur Auslegung von Kalandern (Walzanlagen). Zum einen werden innerhalb des Programmverbundsystems FVM-Berechnungen (Finite Volumen Methode, Programm CFX4) und FEM-Berechnungen (Finite Elemente Methode, Programm ANSYS) durchgeführt. Die Programme kommunizieren im Verbund via STEP-Datenfiles unidirektional mit dem parametrischen CAD-Modell. Zum anderen wird eine bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung auf der Basis vorgefertigter, in der Konstruktionsumgebung bereitgestellter Konstruktionsobjekte umgesetzt. (RIEST 1999, S. 41) Dieser Ansatz entspricht der Arbeit mit intelligenten Features (siehe Abschnitt 2.6.4 "Feature basiertes CAD") und wird im ausgewählten Spezialgebiet der Kalenderentwicklung angewendet.

An der Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau (FZG) der TU München entsteht ein integriertes System zur rechnerbasierten Getriebeentwicklung (HÖHN ET AL. 1999 und 2000, DYLA ET AL. 2000). Die Arbeit konzentriert sich auf die Schaffung und Anwendung eines STEP Datenmodells, über das ein Prozessmanagementsystem spezialisierte Berechnungsprogramme und CAD integriert steuert. Anhand des Beispielproduktes Getriebe werden die grundsätzlichen rechentechnischen Möglichkeiten eines erweiterten STEP Ansatzes für die Integration von Gestaltung und Berechnung betrachtet. Es entsteht eine objektgebundene sequenzielle Integration, die den Konstrukteur/Entwickler bei wiederholten und rekursiven objekttypischen Auslegungsarbeiten unterstützt.

BEHR (1995) geht davon aus, dass in der Industrie am weitesten häufigsten Anpassungs- und Variantenkonstruktionen betrachtet werden. Vor diesem Hintergrund liegt die Zielsetzung seiner Arbeit darin, für den Routineentwurf und damit für objektgebundene Anwendungsfälle neue Wege der rechnerunterstützten Produktentwicklung aufzuzeigen. Der Kerngedanke der Arbeit liegt darin, dass ein übergeordnetes Steuerprogramm, in dem der gesamte

produktorientierte Konstruktionsprozess abgebildet ist, aufgabenorientierte, autonome Wissensmodule aktiviert. Der Datenaustausch wird über einen gemeinsamen Datenbereich, das sogenannte Blackboard, vorgenommen. Auf diese Weise wird die Integration von Berechnung und Erfahrung in einem Rechnersystem erreicht. (BEHR 1995, S. 114 ff.) Als Beispiel wurde die Konstruktion eines Spindel-Lager-Systems in Werkzeugmaschinen gewählt.

Ziel der Arbeit von KUNTZ (1996) ist die Erstellung eines modular aufgebauten Konstruktionswerkzeuges für die rechnerunterstützte Synthese und Variantenkonstruktion von Planetengetrieben. Das entworfene Programm-System ist der manuellen Vorgehensweise des Konstrukteurs/Entwicklers bei der Dimensionierung von Planetengetrieben angepasst und wird durch Module mit zusätzlichen Funktionen ergänzt. Zu den Berechnungen zählen die günstigste Übersetzungsaufteilung in einem Planetengetriebe mit Stufenplaneten, die optimale Übersetzungsaufteilung, die Zahnradvordimensionierung und daraus die Ermittlung von Zähnezahl und Modul sowie Drehzahl-, Drehmoment-, Wirkungsgrad- und Leistungsberechnung. Dazu Ermittlung von Lagerkräften. Die Umsetzung des Gestaltungsmoduls basiert auf einem objektorientierten Ansatz, der durch die Definition von Objekten und Methoden realisiert wird.

3.3.2 Methodenorientierte Ansätze

WÖLFLE (1998) entwickelt in seiner Arbeit ein integriertes System, in dem aus einem CAD-System heraus Berechnungsaufgaben mit Hilfe von virtuellen Berechnungskompetenzzentren gelöst werden können: Zum einen können Berechnungsmethoden, die über das Internet für spezielle Objekte und ihre Auslegung zur Verfügung gestellt, aufgerufen und durch den Konstrukteur/Entwickler selbstständig abgearbeitet werden. Zum anderen bietet das System die Möglichkeit rechnerunterstützt integrierte Dokumente zu erstellen, mit denen über das Internet Anfragen an weltweit verteilte Spezialisten gestellt werden können. Diese Berechnungsspezialisten können die problemspezifisch systematisierten Anforderungslisten (incl. der angehängten spezifischen Geometriemolldaten) abarbeiten und die Ergebnisse an den Absender zurückschicken, der diese wiederum integriert verarbeiten kann. Die selbstständige Abarbeitung der aufrufbaren Berechnungsmethoden erfolgt mit einer rein menschgesteuerten Integration von Berechnung und Gestaltung. Die Berechnungsmethode fragt über Dialogboxen ihre benötigten Eingangsparameter ab, die der Konstrukteur/Entwickler komfortabel über Mausklicks im CAD-Modell identifizieren kann. Nach Durchführung der Berechnungsmethode können auf gleiche Weise über die hergestellten Assoziationen Ergebnisparameter ins CAD-Modell zurückgespielt werden. Dies ermöglicht eine sofortige visuelle Verifikation (WÖLFLE 1998, S. 123 ff.). Nach Beendigung der Berechnungsmethode wird die internetbasierte Verbindung aufgelöst. Optimierungen können während des Bestehens der Verbindung iterativ erarbeitet werden.

BISWAS (1996) setzt eine durchgängige Rechnerunterstützung für die Entwicklung umgeformter gewebeverstärkter Thermoplastbauteile um. Diese spezialisierte Integrationsbestrebung ist grundsätzlich für beliebige umgeformte gewebeverstärkte Bauteile einsetzbar und daher methodenorientiert. Die Integration einer Umformprozesssimulation führt zu nichtparametrischen FEM-Modellen, die in durchgängiger Kette für stereolithografische Umsetzungen der Bauteile und daraus abgießbare Umformwerkzeuge verwendet werden können. Die Integration von Gestaltung und Berechnung ist unidirektional und führt nicht zurück ins parametrische Gestaltmodell. Die Kopplung mit dem CAD und dem darin entstandenen parametrischen Bauteilmodell erfolgt über geeignete FEM-Netzgeneratoren (BISWAS 1996, S. 111-117; siehe dazu auch Abschnitt 3.2.3 "Finite Elemente Methode").

Ein abgegrenztes Forschungsfeld innerhalb der Integration von Berechnung und Gestaltung liegt in der reinen Bereitstellung von nicht datentechnisch integrierten Berechnungsverfahren in ausgewählten, objektgebundenen Konstruktionsprozessen. Im Mittelpunkt steht die Arbeit am parametrischen CAD. Durch Analyse des CAD-Modells können dem Konstrukteur/Entwickler geeignete Berechnungsverfahren vom System anhand einschlägiger Merkmale vorgeschlagen werden. Es handelt sich um die Schaffung wissensbasierter Expertensysteme (HEIDEN 1992).

SCHULZ (1996) konzentriert sich in seiner Arbeit auf die Rechnerunterstützung der frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses und entwickelt ein System zur Unterstützung des funktionsorientierten Grobentwurfs. Ab der Konzeptfindungsphase wird die zeitgleich startende Gestaltfindung durch Methoden zur Bauteildimensionierung und Variantenbeurteilung unterstützt, wodurch schneller zu einem detaillierungswürdigen Vorschlag gelangt werden kann (SCHULZ 1996, S. 3). Der in seiner Arbeit entwickelte Systemprototyp kann heterogene Modelle (geometrisch, funktional, physikalisch) verarbeiten und unterstützt die frühen Phasen durch integrierte Bewertungsmethoden und Auswahlalgorithmen. Am Beispiel von „intelligenten“ Normteilen wird darüber hinaus demonstriert, in wie weit sich Modelle durch implementierte Verhaltenslogik automatisiert selbst steuern können. In diesem Punkt versucht das System den Konstrukteur/Entwickler von algorithmisierbaren Aufgaben zu befreien und so mehr Freiraum für Kreativität erfordernde Aufgaben zu schaffen.

Eine Reihe von Arbeiten befassen sich mit allgemeinen Fragen zur Systemkommunikation im Gestaltungs- und Berechnungsumfeld. STEGER (1998) integriert Berechnungen durch eine Formalisierung und einheitliche Beschreibung von Ein- und Ausgabedaten. Die Modellintegration erfolgt über die Verknüpfung von Parametern der einzelnen Methoden mit den Parametern der CAD-Objekte. Die Verknüpfungen lassen sich bearbeiten, wodurch ein objektneutraler und flexibler Einsatz ermöglicht wird (STEGER 1998, S. 104). PETERS (1998) beschreibt ein Kommunikationssystem, welches voneinander unabhängige Konstruktionswerkzeuge flexibel und benutzerkonfigurierbar lose miteinander koppelt. Ziel ist die Gewährleistung eines durchgängigen Nachrichten- und Datenflusses. Über ein standar-

disiertes Nachrichtenprotokoll wird ein Großteil in der Praxis auftretender werkzeugbezogener Konstruktionsereignisse abgedeckt. PETERS konzentriert sich auf eine Untersuchung relevanter Daten- beziehungsweise Nachrichteninhalte sowie definierten Eingangs- und Ausgangsschnittstellen für den Datenaustausch (PETERS 1998, S. 123). In der Arbeit von KOPSCH (1998) wird ein System zur durchgängigen Unterstützung des Entwicklungsprozesses auch in seinen frühen Phasen vorgestellt. KOPSCH arbeitet auf der Basis eines semantischen Netzes, mit dessen Hilfe Beziehungen zwischen Konstruktionsobjekten beliebiger Abstraktion hergestellt werden können. Durch ein Modul zur semantischen Modellierung wird der Konstrukteur/Entwickler beim Aufbau von Auslegungs- und CAD-Modellen unterstützt. Bauteilverknüpfungen werden in dem objektgebundenen System automatisch erzeugt und müssen nicht vollständig von Hand aufgebaut werden (KOPSCH 1998, S. 53).

Ein Konzept zum speziellen Umgang mit Anforderungen im Konstruktionsprozess beschreibt HUMPERT (1995). Er entwickelt ein eigenständiges objektorientiertes Modell zur Abbildung und prozessdurchgängigen Verarbeitung von Anforderungen. Anforderungsinformationen werden von den frühen Phasen an formalisiert und während des gesamten Prozesses bis hin zu den späten Phasen zunehmend präzisiert. Aufgestellte Erfüllungsbeziehungen zwischen den Entwicklungsergebnissen und den vernetzten Anforderungen ermöglichen zeitunabhängige Überprüfungszyklen, in denen der Erfüllungsgrad der gelisteten Anforderungen ermittelt wird. Die Entwicklungsergebnisse fließen über eine Beurteilung durch den Konstrukteur/Entwickler in das Anforderungsmodell. Ein automatisierter Abgleich mit dem Geometriemodell ist in der Arbeit von HUMPERT nicht implementiert.

REDER (1995) widmet sich der Modellierung attributiver Unschärfe im CAD. Im Bereich Architektur werden geometrische Alternativen in der Attributbelegung im CAD mittels sogenannter "Fuzzy Objects" abgebildet und dienen dem Nutzer im Sinne eines "Sich-Informieren-Könnens". Entscheidungsprozesse durch den Menschen, die einen impliziten Umgang mit Entscheidungsunschärfen bedeuten, indem im Entwurfsprozess früh zwischen Alternativen entschieden wird, werden als Fuzzy Attribute im CAD-Modell abgebildet und halten damit Entscheidungsalternativen bis in spätere Phasen offen (REDER 1995, S. 98). Auch ABUOSHA (1993) widmet sich dieser Thematik der Verarbeitung unsicheren Wissens mittels Methoden der Fuzzy Logic im CAD. In Anlehnung an den Problemlösungsprozess im CAD wird eine erweiterte Methode zur systematischen Verarbeitung von unsicherem Wissen basierend auf der Fuzzy Logic beschrieben.

3.4 Zusammenfassung Kapitel 3

Die Gliederung des Kapitels in die Abschnitte "Stand der Technik" und "Stand der Forschung" ist gleichzeitig strenger Bewertungsmaßstab für die Forschungsansätze zur Integration von Gestaltung und Berechnung. In dem Augenblick, in dem Forschungsansätze

tatsächliche Unterstützung für reale industrielle Produktentwicklungsprozesse darstellen könnten, könnten sie von den Software- und Systemhäusern relativ schnell umgesetzt und angeboten werden. Werden sie im industriellen Alltag nicht akzeptiert, können sie nicht zum Stand der Technik aufsteigen. Durch die Orientierung an den Grundlagen aus Kapitel 2 werden die Ursachen der Schwierigkeiten zum Wechsel zum State of the Art erklärt.

Der Ansatz einer kontinuierlich bidirektionalen Integration von Gestaltung und Berechnung der vorliegenden Arbeit muss sich dieser Einordnung ebenso unterziehen und wird im Kapitel 5.4.3 "Praxisrelevanz" durchgeführt.

Kapitel 4 stellt das in der vorliegenden Forschungsarbeit erarbeitete Konzept zur kontinuierlich bidirektionalen Integration von Gestaltung und Berechnung vor.

4 Konzept für ein System zur phasenübergreifenden bidirektionalen Integration von Berechnung und Gestaltung

Die vorliegende Arbeit will grundsätzliche Möglichkeiten schaffen während aller Prozessphasen Berechnungsvorschriften im Rechner interaktiv abzubilden und mit der Geometrie fest zu verbinden. Aufgabe des Konstrukteurs/Entwicklers im Produktentwicklungsprozess ist es Produktparameter zu instanzieren und in ihren Werten zunehmend im Laufe des Prozesses zu determinieren und zu optimieren (siehe Abschnitt 2.8, "Integriertes Gestalten und Berechnen in der Prozesssicht").

Dies ist als Teil der bei der Konstruktion festgelegten Produktlogik zu verstehen, die die zu Grunde liegenden Zusammenhänge zwischen Anforderungen, Normen und Richtlinien und den daraus abgeleiteten Produktmerkmalen beschreibt. Vor allem die Unterstützung der frühen Prozessphasen, in denen noch keine Gestaltung vorgenommen wird, erfordert Methoden zur Abbildung von Berechnungsvorschriften, die später mit der konkreten Gestalt verknüpft werden können. Hierunter ist beispielsweise die Abbildung und Durchführung überschlüssiger Berechnungen zu verstehen, deren Ergebnisse zugleich Grundlage und Richtlinie für die nachfolgende Geometriemodellierung darstellen, die über den bidirektionalen Datenaustausch dem Konstrukteur/Entwickler bei der Gestaltung zur Verfügung stehen sollen.

Ausgangsbasis sind die in Kap. 2.5 beschriebenen Möglichkeiten der CAD-Parametrik Formelzusammenhänge direkt im CAD-Modell abzubilden. Zugang zu dem Konzept der vorliegenden Arbeit lässt sich am einfachsten durch die Darstellung der Potenziale und der Defizite dieser einfachsten Form der Integration von Gestaltung und Berechnung finden:

Wesentliche hervorzuhebende Eigenschaft bei der Arbeit mit Berechnungen in der CAD-Parametrik ist es Berechnungsvorschriften integriert mit der Gestalt abzulegen und kontinuierlich wirken zu lassen. Dies birgt erhebliche Vorteile dadurch, dass einmal durchgeführte Berechnungen als Konstruktions-Know-how im Modell erhalten bleiben.

Deutliches Defizit besteht in der unidirektionalen Wirkungsweise der hinterlegten Berechnungsvorschriften, die an Steuerparameter gebunden sind. Deren Abhängigen entziehen sich einem direkten Zugriff durch den Konstrukteur/Entwickler (siehe auch Kap. 2.6.2.1, "Unidirektionale Wirkungsweise von CAD-Parametrik").

Erst in späten Phasen wird im CAD gearbeitet. Die Abbildung von Berechnungen in der CAD-Parametrik kann daher auch erst in späten Phasen einsetzen. Überschlüssige Berechnungen aus frühen Phasen, in denen noch kein Gestaltmodell vorliegt, finden auf diese

Weise keine Verknüpfung zur späteren Gestalt. Abhängigkeiten zu spezifisch frühen Anforderungen können nicht abgebildet werden.

Weitere Schwierigkeiten und Einschränkungen ergeben sich aus dem letztendlichen Anspruch eines CAD-Modells auf fertigungsgerechte Ausprägungen. Berechnungsergebnisse sind unmittelbar selten fertigungsgerecht und bedürfen einer Anpassung im Sinne von Rücksichtnahme auf Normen, Halbzeuge, Werkzeuge, Kompatibilitäten und Sicherheiten.

In diesem Kapitel 4 "Konzept" wird das Vorhaben der vorliegenden Arbeit vorgestellt die beschriebenen Potenziale nutzbar zu machen und die Defizite durch geeignete Methoden aufzuheben. Die Beschreibung gliedert sich wie folgt:

- Kap. 4.1: Entwicklung von Methoden für **bidirektional wirkende Berechnungsvorschriften** und damit Aufhebung der Bindung an Steuerparameter und gesteuerte Parameter sowie Entwicklung von Methoden zur Abbildung von Berechnungsvorschriften in frühen Phasen ohne vorliegendes Gestaltmodell und zur anschließenden konsistenten Integration in entstehende Gestaltmodelle. Ziel ist die Einsetzbarkeit der Berechnungsintegration **von frühen Phasen an durchgängig** bis hin zum fertiggestellten fertigungsgerechten CAD-Modell.
- Kap. 4.2: Abbildung von **unscharfen Prozessen**, die beim konventionellen Datenübertrag zwischen Gestaltung und Berechnung von Hand durch den Konstrukteur/Entwickler stattfinden. Dadurch kann eine Erweiterung des Einsatzgebietes über CAD-Parametrik-typische einfache geometrische Bindungen hinaus auf komplexe Maschinenelementeberechnungen im physikalischen (nichtgeometrischen) und geometrischen Zusammenhang erreicht werden.

In diesem zweistufigen Ansatz findet sich das Ziel der Arbeit eine phasenübergreifende (kontinuierliche) Unterstützung des integrierten Berechnungs- und Gestaltungsprozesses von der frühen Entwurfsphase bis hin zum fertigungsgerechten Produktmodell zu erreichen.

4.1 Phasenübergreifende Bidirektionalität

Bidirektionales, phasenübergreifendes (kontinuierliches) Zusammenwirken von Gestaltung und Berechnung kennzeichnet sich dadurch, dass sich jede Parameterveränderung auf der Berechnungsseite unmittelbar in Veränderungen der Gestaltparameter zeigt und umgekehrt. Das bedeutet, dass verschiedene voneinander abhängige Parameter auf beiden Seiten sich gegenseitig steuern können müssen. Die Hinterlegung von Berechnungsvorschriften unmittelbar in der CAD-Parametrik ist für diese geforderte Funktionalität nicht geeignet, da stets Steuerparameter festgelegt sind, die abhängige Parameter steuern, jedoch selbst umgekehrt sich nicht steuern lassen (siehe Abschnitt 2.6.2.1, „Unidirektionale Wirkungsweise von CAD-Parametrik“). Diese Einschränkung muss für ein vollständig bidirektional

wirkendes, integriertes System überwunden werden. Diese Problematik wird im Folgenden näher erörtert und beschrieben.

4.1.1 Rekursionen und Zirkelbezüge

Die Berechnungstätigkeit im Konstruktions-/Entwicklungsprozess ist zu einem großen Anteil durch arithmetisch einfache Maschinenelementeberechnungen geprägt (vgl. Absatz 5.4.3.1). Die dafür notwendigen Formeln werden in konventionellen Prozessen außerhalb der CAD-Gestaltung nicht zusammenhängend abgebildet. Für eine Berechnung sammelt der Konstrukteur/Entwickler aus dem CAD-Modell die notwendigen Eingangsparameter und berechnet ein Ergebnis, das zurück ins CAD-Modell fließt. Dabei können sich durch die geometrisch ganzheitlich konsistente Beschaffenheit des CAD-Modells (siehe Absatz 2.8.2.3) Eingangsparameter unmittelbar verändern, was wiederum das Ergebnis verändert – was wiederum die Eingangsparameter verändert. Dies kann sich über verschiedene physikalische Teilbetrachtungen (Maschinenelementeberechnungen) erstrecken und ein tatsächlich rekursiv instabiles System bedeuten. Aus dieser Betrachtung heraus lassen sich folgende konzeptionelle Forderungen und damit auch Lösungsansätze ableiten:

- Alle Berechnungen müssen zusammengeführt und in *einem* Gleichungssystem abgebildet werden. Geometrische sowie nicht-geometrische Parameter müssen in diesem System gleichbehandelt werden.
- Das entstehende Gleichungssystem muss nach jedem Parameter aufgelöst werden können. Dazu bietet sich an vorhandene leistungsstarke mathematische Solver einzubinden und einzusetzen.

Der folgende Abschnitt beschreibt die veränderte Situation bei der Arbeit mit frei auflösbaren Gleichungssystemen im Vergleich zur Arbeit mit unidirektional eindeutig aufgelösten Gleichungen. Genau hier liegt die erste – einfach zu beschreibende aber im Lösungsansatz hochkomplexe und nur schwer beherrschbare – Herausforderung der vorliegenden Forschungsarbeit.

4.1.2 Ganzheitliche Berechnung in einem Gleichungssystem

Im Folgenden wird dargestellt, welche prozessualen Folgen eine ganzheitliche und vollständig bidirektionale Zusammenführung aller Berechnungen in einem einheitlichen Gleichungssystem mit sich bringt. Die notwendige veränderte Denkweise beim Umgang mit einem durchgängig durch alle Phasen und Modellebenen gültigen und wirkenden Gleichungssystem sowie die sich daraus ergebenden Schwierigkeiten und die prozessuale Aufwandserhöhung werden beschrieben, ebenso wie die sich aus der Erweiterung öffnenden Potenziale durch die Arbeit mit unterbestimmten mathematischen Gleichungen.

4.1.2.1 Prozessuale Aufwandserhöhung

Parametrische CAD-Systeme verfügen über einfache mathematische Fähigkeiten, die eindeutig aufgelöste mathematische Formeln berechnen können (siehe Absatz 2.6.2, „Berechnungen in der CAD-Parametrik“). Bild 4-1 zeigt eine solche Gleichung. Sie ist eindeutig nach dem Parameter a aufgelöst, der als gesteuerter Parameter automatisch aus den rechts des Gleichheitszeichens stehenden steuernden Parametern neu berechnet wird. Wird ein steuernder Parameter rechts des Gleichheitszeichens verändert, wird die Neuberechnung des gesteuerten Parameters automatisch veranlasst: Er ist automatisch zur Berechnung freigegeben.

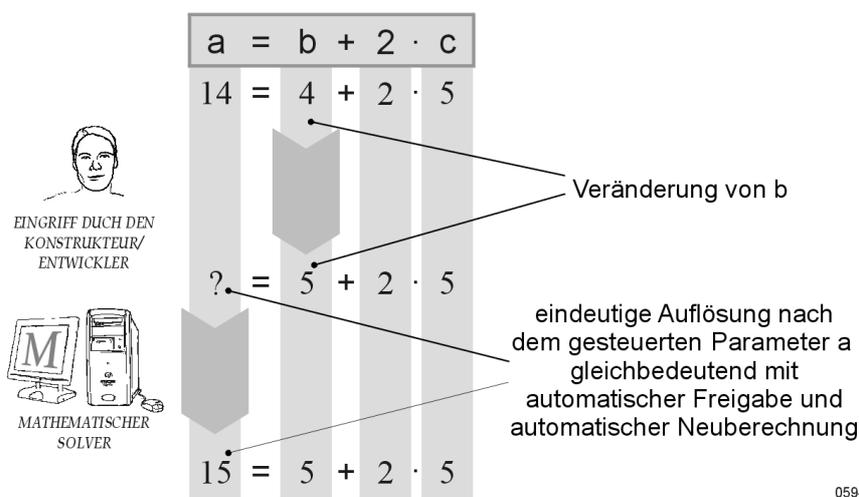


Bild 4-1: Automatische Freigabe von gesteuerten Parametern bei eindeutig aufgelösten Gleichungen in der CAD-Parametrik

Ein Eingriff auf abhängige, durch in der Parametrik abgebildete Gleichungen gebundene Parameter, ist in konventionellen CAD-Systemen nicht möglich. Das liegt daran, dass von den implementierten einfachen Gleichungslösern zum einen Gleichungen nicht automatisiert umgestellt werden können, und dass zum anderen eine Gleichungsumstellung die Auswahl eines beliebigen Parameters zur Neuberechnung voraussetzt. Diese Auswahl erfordert einen manuellen Eingriff des Konstrukteurs/Entwicklers. Bild 4-2 zeigt den veränderten Prozess an einem einfachen Beispiel. Es sind zwei Schritte hinzugekommen, die in einem entsprechenden, bidirektional wirkenden System abgebildet werden müssen. Deutlich stellt sich der notwendige, unmittelbar zusätzliche Einsatz primärer Intelligenz durch den Konstrukteur/Entwickler sowie die notwendige Erweiterung der Leistungsfähigkeit des Solvers um die Fähigkeit zur Gleichungsuminterpretation dar. Ein entsprechendes System muss die ergonomischen und rechentechnischen Voraussetzungen für eine entsprechende Beherrschung der neuen komplexen Zusammenhänge bieten.

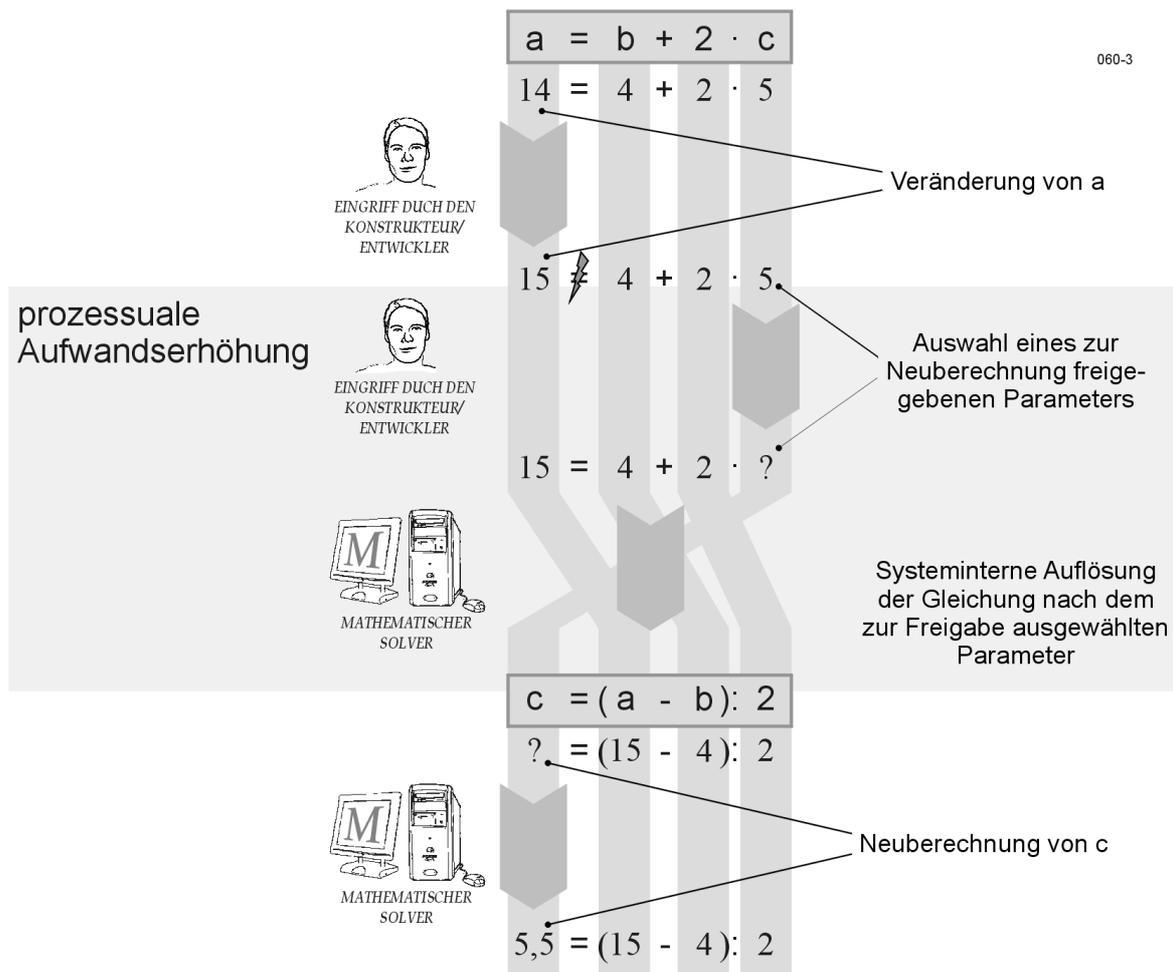


Bild 4-2: Der Konstrukteur/Entwickler muss für eine durchgängig bidirektionale Berechnung die Abhängigkeiten bei jeder Berechnung individuell festlegen

Abschnitt 2.8.1 erläutert, dass Parameter von geometrischen Modellen im Augenblick ihrer Instanzierung einen Wert erhalten müssen, also vorläufig determiniert werden. Bei der reinen Arbeit mit einem Geometriemodell und der integrierten Steuerparametrik wird dadurch ausschließlich mit mathematisch bestimmten Gleichungen gearbeitet, die bei Parametervariation ihre gesteuerten Parameter automatisch neu berechnen. Bei bidirektional auflösbaren Gleichungen entsteht im Augenblick der Parametervariation eine mathematische Überbestimmtheit, die erst durch die manuelle Auswahl eines freizugebenden, abhängigen Parameters wieder aufgelöst werden kann (siehe Bild 4-2 zweite und dritte Zeile). Eine Parametervariation bedeutet daher die Notwendigkeit der Lösung einer einfachen mathematischen Überbestimmtheit.

Wird die Berechnung nun auf nichtgeometrische Parameter ausgedehnt, die im Augenblick ihrer Instanzierung noch keinen Wert tragen müssen (siehe ebenfalls Abschnitt 2.8.1), so ist es auch im Zusammenhang mit einem vollständig determinierten Geometriemodell möglich, dass mathematisch unterbestimmte Gleichungssysteme bearbeitet werden. Wer-

den geometrische Parameter rein rechnerisch außerhalb des CAD-Systems in einer physikalisch/mathematischen Gleichung instanziiert, so können Gleichungssysteme mit n Parametern mit bis zu n -facher, also vollständiger Unterbestimmtheit angelegt werden. Aufgabe des Konstrukteur/Entwicklers ist es im Verlaufe des Entwicklungsprozesses solche Zusammenhänge zu instanzieren und in einen mathematisch bestimmten sowie physikalisch optimierten Zustand zu überführen. Ein integriertes System, das den Umgang mit mathematisch unterbestimmten Gleichungssystemen unterstützt, kann damit deutliche prozessuale Hilfe und Unterstützung bieten.

4.1.3 Mathematischer Solver

Mathematica[®]⁴⁴ ist ein Softwaresystem, das für weite Bereiche der Mathematik einsetzbar ist. Es sollen die Fähigkeiten von Mathematica[®] genutzt werden Gleichungssysteme mit einer unbeschränkten Zahl von Gleichungen und Unbekannten zu lösen. Bild 4-3 zeigt Beispiele für den Einsatz von Mathematica[®] zur Lösung von beispielhaften Gleichungssystemen, die im realen Einsatz mit weitestgehend beliebigen Rechenoperationen beliebige Komplexität erreichen dürfen. Im Falle der nicht-symbolischen Auflösbarkeit kann Mathematica[®] numerische Lösungen ermitteln.

Mathematica[®] ist vorbereitet für einen Betrieb als eingebettetes System, d. h. es kann von anderen Programmen heraus aufgerufen werden und mit ihnen über Ein- und Ausgabefiles kommunizieren. Es soll dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten System als Berechnungswerkzeug zur Verfügung gestellt werden. Nähere Informationen über Mathematica[®] und die konkrete Systemintegration enthält das Kapitel 5 "Umsetzung des Konzeptes".

⁴⁴ Mathematica[®] ist eingetragenes Markenzeichen der Firma Wolfram Research, Inc.

einfaches, nicht aufgelöstes
Gleichungssystem

$$|7 = a + 2| \Leftrightarrow |a = 5|$$

```

Beispiele für Gleichungslösungen mit Mathematica.nb
In[1]:= Solve[7 == a + 2, a]
Out[1]= {{a -> 5.}}
  
```

Gleichungssystem mit 2 Unbekannten

$$\begin{cases} 7 = a + b \\ 17 = 2a + 3b \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} a = 4 \\ b = 3 \end{cases}$$

```

Beispiele für Gleichungslösungen mit Mathematica.nb
In[3]:= Solve[{7 == a + b, 17 == 2 a + 3 b}, {a, b}]
Out[3]= {{a -> 4., b -> 3.}}
  
```

Gleichungssystem mit 3 Unbekannten

$$\begin{cases} c = a + b \\ 24 - 2a = 3b + c \\ 5a - c = 13 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} a = 4 \\ b = 3 \\ c = 7 \end{cases}$$

```

Beispiele für Gleichungslösungen mit Mathematica.nb
In[5]:= Solve[{c == a + b, 24 - 2 a == 3 b + c, 5 a - c == 13},
{a, b, c}]
Out[5]= {{a -> 4., b -> 3., c -> 7.}}
  
```

quadratische Gleichung

$$\begin{cases} 3a = a + b^2 \\ a + b = 5 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} a = 6 \pm \sqrt{11} \\ b = -1 \pm \sqrt{11} \end{cases}$$

```

Beispiele für Gleichungslösungen mit Mathematica.nb
In[8]:= Solve[{3 a == a + b^2, a + b == 5}, {a, b}]
Out[8]= {{a -> 6 - Sqrt[11], b -> -1 + Sqrt[11]},
{a -> 6 + Sqrt[11], b -> -1 - Sqrt[11]}}
  
```

061-4

Bild 4-3: Beispiele für den Einsatz von Mathematica® zum Lösen von Gleichungssystemen (vgl. auch Bild 2-19)

4.1.4 Anforderungen

Prozessual steht in den frühen Phasen die Abbildung von Anforderungen im Vordergrund, die dann im Verlaufe des Produktentwicklungsprozesses zunehmend über physikalische Effekte in geometrische Instanzen und Ausprägungen überführt werden. Die Anforderungen sind dabei indirekte Parameter des angestrebten Objekts, die über Formelzusammenhänge mit der Geometrie in Verbindung gesetzt werden. In Bild 2-23, "Vorgehensplan für das Gestalten und Berechnen", werden die Anforderungen als "grundlegend quantifizierte direkte Parameter" bezeichnet, die es funktional qualitativ und quantitativ umzusetzen gilt und die für das Entwicklungsziel von herausragender Bedeutung sind. Am Ende der Entwicklungstätigkeit müssen sich alle Eigenschaften der Konstruktion an diesen Parametern messen lassen.

Aus diesen Gründen ist es konzeptionell wichtig diese Parameter für den Prozess im Besonderen zu behandeln und speziell als Anforderungen auszuweisen. Anforderungsobjekte können sowohl Festforderungen als auch Mindestforderungen darstellen und dienen als gesonderte Schaltzentrale zur bewussten Steuerung der im Prozess entstehenden Parameter. Sie sind fix und müssen vom Konstrukteur/Entwickler und vom System stets im Vordergrund mit besonderer Beachtung verarbeitet werden.

Anforderungen und mathematisch/technische Gleichungen lassen sich jeweils in Festanforderungen und Kontrollanforderungen bzw. Gleichungen und Ungleichungen untergliedern. Bild 4-4 zeigt die vier zu unterscheidenden Bereiche der Berechnung als Grundlage

für die kontinuierliche, bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung. Die Bereiche II und IV liefern bei Einbeziehung in die Werteermittlung Lösungsräume, die sich auch mit Hilfe eines mathematischen Solvers nur sehr schwer zielorientiert zur Lösungsfindung einsetzen lassen. Sie eignen sich eher zur Ergebniskontrolle als zur aktiven Werteermittlung. In konventionellen Berechnungsprozessen finden Ungleichungen in der Regel nur in Einzelgleichungen alltägliche Anwendung (zum Beispiel Berechnung eines *Minstdurchmessers* etc.). Systeme aus mehreren Ungleichungen führen zu nur schwierig handhabbaren Ergebnissen (siehe auch nächster Abschnitt 4.1.5 "Referenzobjekte").

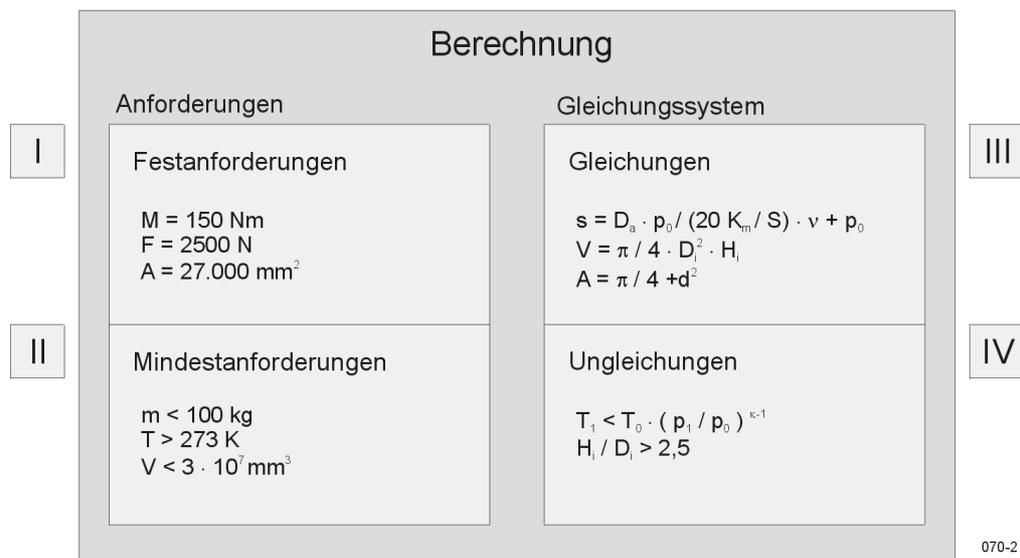


Bild 4-4: Berechnungsspezifische Anforderungen teilen sich auf in Anforderungsliste und Gleichungssystem mit weiterer Unterteilung in Fest- und Kontrollanforderungen bzw. Gleichungen und Ungleichungen (Bereiche I-IV vgl. Bild 4-6)

4.1.5 Referenzobjekte

Um dem Konstrukteur/Entwickler einen Überblick über seine Arbeit zu verschaffen ist es notwendig alle Parameter gesammelt und übersichtlich mit ihrem zu jedem Zeitpunkt aktuellen Wert darzustellen. Diese angestrebte Übersicht entspricht der Darstellung von Parameterwerten beim Debuggen (analytischer, schrittweiser Testdurchlauf) von Softwareprogrammen. Dargestellt werden sollen alle Parameter aus der Berechnung, die zu diesem Zwecke aus den Formelbuchstaben aller beteiligten Gleichungen extrahiert werden. Beim Aufstellen der Gleichungen ist die Durchgängigkeit der Formelbuchstaben über alle im Konstrukt enthaltenen Berechnungen hinweg wichtig.

Diese Referenzobjekte können dann auch für die Verknüpfung von Berechnung und Gestaltung verwendet werden. Ein Klick auf das Referenzobjekt mit anschließendem Klick auf einen Geometrieparameter im CAD kann die Verbindung instanzieren und etablieren. In

frühen Phasen, in denen noch keine CAD-Geometrie angelegt ist, können geometrische Parameter bereits in den Referenzobjekten abgelegt und erst zu späterem Zeitpunkt verknüpft werden. Ebenso können modellierte Parameter erst zu späterem Zeitpunkt in Berechnungen eingebunden werden. Die Arbeit mit Referenzobjekten schafft die notwendige Handlungsfreiheit für den phasenübergreifenden Systemeinsatz.

Die Referenzobjekte können mit entsprechenden Methoden ausgestattet werden, die einen freien Zugriff auf die dahinter stehenden Parameter ermöglicht. Die Wertveränderung eines Parameters kann somit die Neuevaluierung des gesamten Berechnungssystems initiieren. Ebenso können Analysen und Simulationen als Methoden an die Referenzobjekte angehängt werden. Das Konzept der Referenzobjekte schafft somit eine zentrale Schaltstation für den Konstrukteur/Entwickler.

Wichtige Eigenschaft der Referenzobjekte ist die Möglichkeit geometrische Parameter ohne Wertbelegung zu instanzieren. Dieser Schritt ist bei der Arbeit im CAD als solcher ausgeschlossen und bedarf stets einer Wertbelegung (siehe Abschnitt 2.8.1.1). Der Handlungsspielraum des Konstrukteurs/Entwicklers ist somit erweitert; seine zielgerichtete Arbeit hin zu einem instanziierten, determinierten und schließlich optimierten System ist damit um einen wichtigen logischen Schritt erweitert. Bild 4-5 zeigt den Einsatz von Referenzobjekten als Bindeglied und Schaltzentrale zwischen Berechnung und Gestaltung.

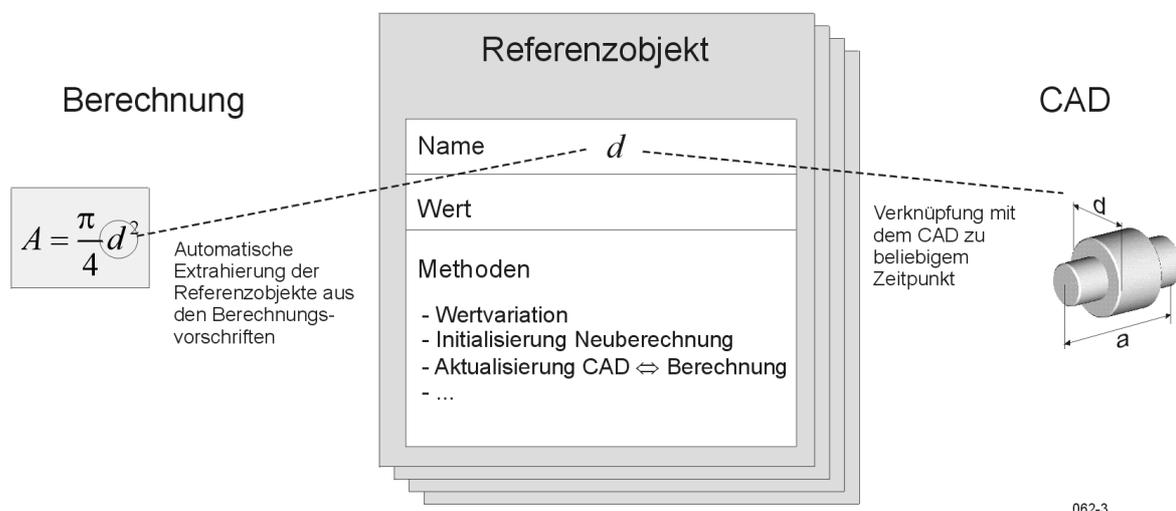


Bild 4-5: Einsatz von Referenzobjekten als Bindeglied zwischen Berechnung und Gestaltung als methodenhinterlegte Schaltzentrale

Es ist notwendig für alle Parameter aus Anforderungsliste und Gleichungssystem ein Referenzobjekt zu schaffen. Dabei können die Parameter aus einem beliebigen der vier Bereiche der Anforderungen stammen, aber auch in mehreren Bereichen gleichzeitig und auch mehrfach auftreten. Die Referenzobjekte lassen sich demnach nach Bild 4-6 klassifizieren.

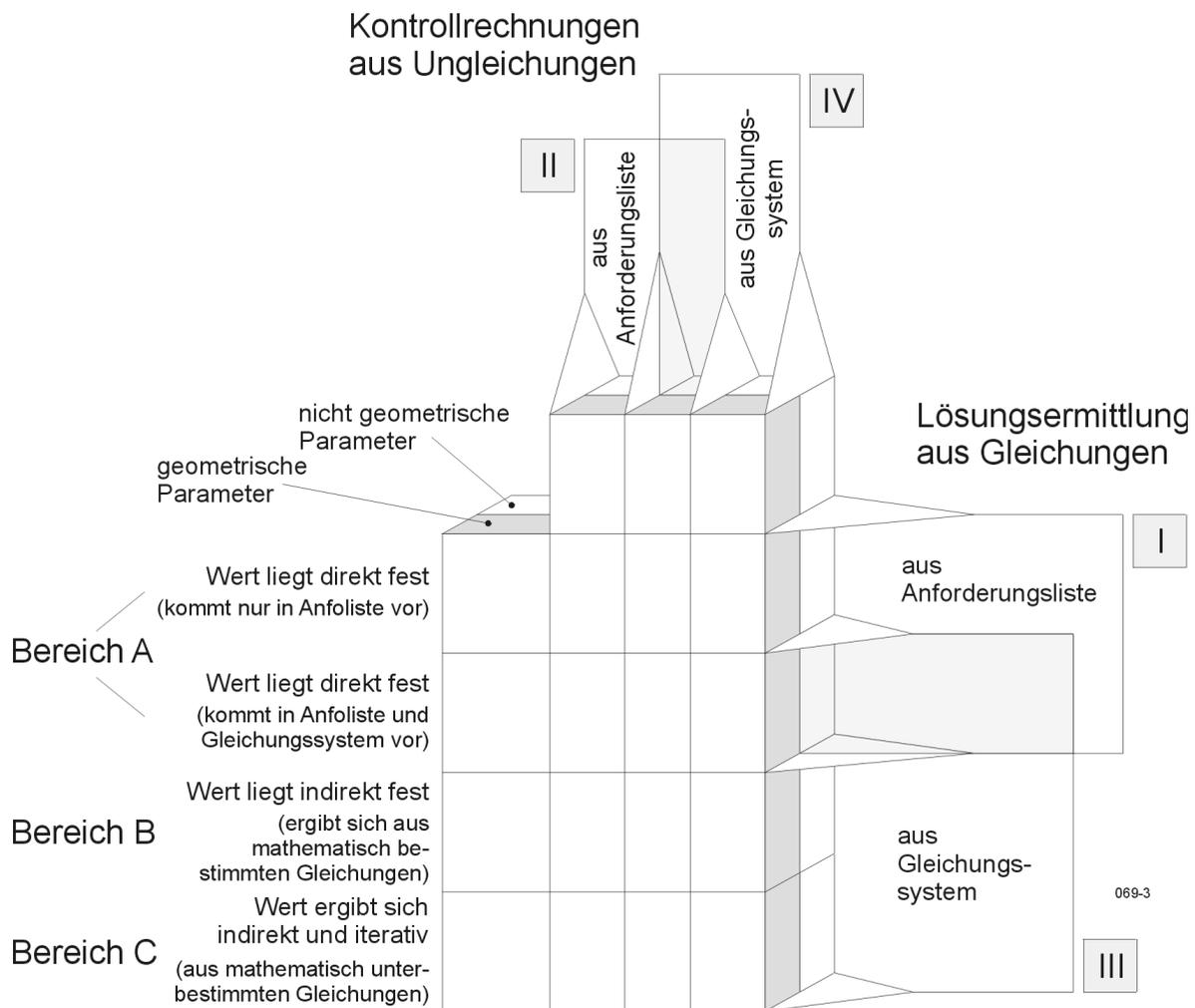


Bild 4-6: Klassifizierung der Referenzobjekte (Bereiche röm. I bis röm. IV vgl. Bild 4-4)

Anhand dieser Klassifizierung lassen sich die verschiedenen Aktionsbereiche des integrierten Konstruktionsarbeitsplatzes erläutern, in denen der Konstrukteur/Entwickler unterstützt werden kann. Die Verknüpfung der Referenzobjekte mit dem Geometriemodell erweitert das Geometriemodell um die Abbildung und Verknüpfung mit der Anforderungsliste (s. Bild 4-6, Bereich A). Die Evaluierung mathematisch bestimmter Teilgleichungssysteme übernimmt der integrierte Konstruktionsarbeitsplatz durch Einbindung der Mathematik-Software Mathematica[®] (Bereich B). Unterbestimmte Gleichungen werden interaktiv mit dem Konstrukteur/Entwickler durch schrittweise Festlegung noch unbestimmter Parameter gelöst (Bereich C) wobei Mathematica[®] zuletzt die dann bestimmten Gleichungen auflöst. Jeder der Parameter wird über die Verknüpfung mit den Kontrollanforderungen bzw. den Ungleichungen in der Einhaltung seines zulässigen Wertebereiches zu jedem Zeitpunkt überprüft.

Die Behandlung von Ungleichungen und Ungleichungssystemen ist äußerst komplex. Als Ergebnis liefern gelöste Ungleichungssysteme stets n -dimensionale Lösungsräume ($n =$

Anz. d. beteiligten Parameter). Diese Thematik ist hochgradig komplex, wie die Arbeit von ZIEBEIL (2000) unter dem Titel „Ein Ansatz zum Konstruieren mit Lösungsräumen“ darlegt. Die Behandlung von Ungleichungen wird im vorliegenden Projekt begrenzt auf die Kontrolle der Einhaltung der Gültigkeit der Gleichungen. Sie tragen zur Parameterfindung nicht bei, sondern liefern nur im Falle ihrer Nichteinhaltung eine Fehlermeldung an den Konstrukteur/Entwickler mit einer Auflistung aller beteiligten Parameter.

Mathematica[®] ist in der Lage die mathematisch bestimmten Gleichungssysteme beliebig aufzulösen. Es kann jeder beliebige Parameter verändert werden und die Auswirkung auf die anderen Parameter beobachtet werden. Die direkte Kopplung von CAD und Berechnung ermöglicht die Einflussnahme auf alle Parameter von beliebiger Stelle aus. So können Parameter im CAD-System geändert werden oder auch in INKA. Auswirkungen auf geometrische und nicht-geometrische Parameter werden vom System berechnet und dem Konstrukteur/Entwickler unmittelbar visualisiert.

4.1.6 Umgang mit mathematisch/physikalischen Gleichungssystemen im Verbund mit der Geometriemodellierung

Um die freie Auflösbarkeit von mathematisch/physikalischen Formelzusammenhängen zu ermöglichen ist der Umgang mit mathematisch unter- sowie überbestimmten Gleichungssystemen notwendig.

4.1.6.1 Unterbestimmtheiten

Durch den Einsatz von Referenzobjekten wird die Möglichkeit geschaffen mit mathematisch unterbestimmten Gleichungssystemen zu arbeiten. Abschnitt 2.8.1, "Vorgehensplan für das Gestalten und Berechnen" beschreibt den Umgang mit unbestimmten Parametern als natürlichen Prozessschritt, der in einem System mit der Möglichkeit zur Instanzierung von Geometrieparametern ohne Wertbelegung Berücksichtigung findet. Damit öffnet sich das Gestaltungssystem den frühen Prozessphasen, in denen noch keine Gestalt vorliegt, erste geometrische Eigenschaften aber bereits in der überschlägigen Vorstellung des Konstrukteurs/Entwicklers unausgeprägte Gestalt annehmen. Diese Vorstellungen können mit Hilfe von Referenzobjekten der Rechnerverarbeitung zugänglich gemacht werden.

Der mathematische Solver Mathematica[®] ist in der Lage mathematisch unterbestimmte Gleichungssysteme zu behandeln und Teillösungen zu ermitteln. Bild 4-7 zeigt ein Beispiel für den Umgang von Mathematica[®] mit einem teilbestimmten Gleichungssystem. Es handelt sich um ein Gleichungssystem mit 4 Unbekannten und 3 Gleichungen, das also einfach unterbestimmt ist. Die Variablen a und b sind jedoch bereits durch die ersten beiden Gleichungen als Teilgleichungssystem bestimmt. Mathematica[®] erkennt dieses bestimmte

Teilgleichungssystem und liefert automatisch wie im Bild gezeigt die entsprechende Lösung.

teilbestimmtes (unterbestimmtes)
Gleichungssystem mit 4 Unbekannten

$$\begin{array}{l} 5 = a + b \\ 1 = 2a - b \\ c = a + d \end{array} \Leftrightarrow \begin{array}{l} a = 2 \\ b = 3 \\ c = ? \\ d = ? \end{array} \text{ bzw. } \begin{array}{l} a = 2 \\ b = 3 \\ c = 2 + d \end{array}$$

063-2

Bild 4-7: Beispiel für ein teilbestimmtes Gleichungssystem: Mathematica[®] liefert die Teillösungen

Beim Einsatz in einem System zur integrierten Berechnung und Gestaltung kann dadurch dem Konstrukteur/Entwickler der Fortschrittsgrad seiner Tätigkeit vor Augen geführt werden. Zu Beginn seiner Arbeit mit dem integrierten System kann er eine Vielzahl von Parametern nun auch im Rechner instanzieren ohne sie zunächst zu bestimmen. Das mathematisch/physikalische Gleichungssystem aus geometrischen und physikalischen Parametern muss er erst im Laufe seiner Entwicklungstätigkeit zunehmend in einen bestimmten Zustand überführen, wobei ihn der integrierte Konstruktionsarbeitsplatz mit Mathematica[®] unterstützt. Die unbestimmten Parameter können als solche dargestellt werden und zeigen dem Konstrukteur/Entwickler die Bereiche, in denen er arbeiten muss.

4.1.6.2 Bestimmtheiten

Wenn der Konstrukteur/Entwickler alle Parameter bestimmt hat, kann Mathematica[®] das Gleichungssystem vollständig lösen und für alle Parameter die interdependenten Werte berechnen. Das System zeigt die Werte gesammelt an und bietet nun den Arbeitsbereich zur Optimierung der Werte.

4.1.6.3 Überbestimmtheiten

Wird ein Parameter aus einem bestimmten Gleichungssystem variiert, so führt dies zunächst zu einem überbestimmten Gleichungssystem. Das System muss die Möglichkeit geben diese Überbestimmtheit aufzulösen. Dies kann zunächst nur durch einen interaktiven Eingriff des Entwicklers ermöglicht werden (siehe Bild 4-2). Denkbar ist die Initialisierung sekundärer Prozesse, in denen vom System immer wieder die gleichen Eingriffe des Konstrukteurs/Entwicklers (Auflösung der Überbestimmtheit durch Auswahl eines abhängigen Parameters zur Neuberechnung) wiederholt werden. Durch die stets wiederkehrende gleiche Auflösung der Überbestimmtheit können auf diese Weise schrittweise Optimierungen schnell und zielgerichtet durchgeführt werden.

4.1.7 Zeitliche Durchgängigkeit

Die Referenzobjekte (siehe Bild 4-5) sind ein wesentlicher Baustein zur Integration von Berechnungen in sehr frühe Phasen des Produktentwicklungsprozesses. Sukzessiv können beim späteren Entstehen des Geometriemodells Verknüpfungen zwischen Berechnungsparametern und CAD-Parametern aufgebaut werden und von dem Augenblick an bidirektionalen Datenfluss zwischen beiden Seiten ermöglichen.

Die zeitlich durchgängige Wirkung der Berechnungsvorschriften kann dadurch erreicht werden, dass bei jeder Parameterveränderung – egal ob auf der Seite der Berechnung oder im Geometriemodell – eine vollständige Neuberechnung aller Parameter mit einer anschließenden vollständigen Regeneration des Gesamtmodells initialisiert wird.

Diese Art der Berechnungseinbindung unterscheidet sich grundlegend von der sequenziellen Integration von Berechnung und Gestaltung, bei der eine neue Ausführung der Berechnung nur nach spezieller Aufforderung durch den Konstrukteur/Entwickler durchgeführt wird. Resultierend aus der zwischenzeitlich nicht abgeglichenen redundanten Datenhaltung werden bei der sequenziellen Integration alle betroffenen Parameter des Berechnungsmodells beziehungsweise des Gestaltmodells vollständig durch die Parameterwerte aus dem Datentransfer überschrieben. Bei der kontinuierlichen Integration wird Redundanz jederzeit vollständig abgeglichen und damit handhabbar. Durch Verlinkung von Parametern kann Redundanz sogar ausgeschlossen werden, womit die Teilmodelle zunehmend vollständig verschmelzen.

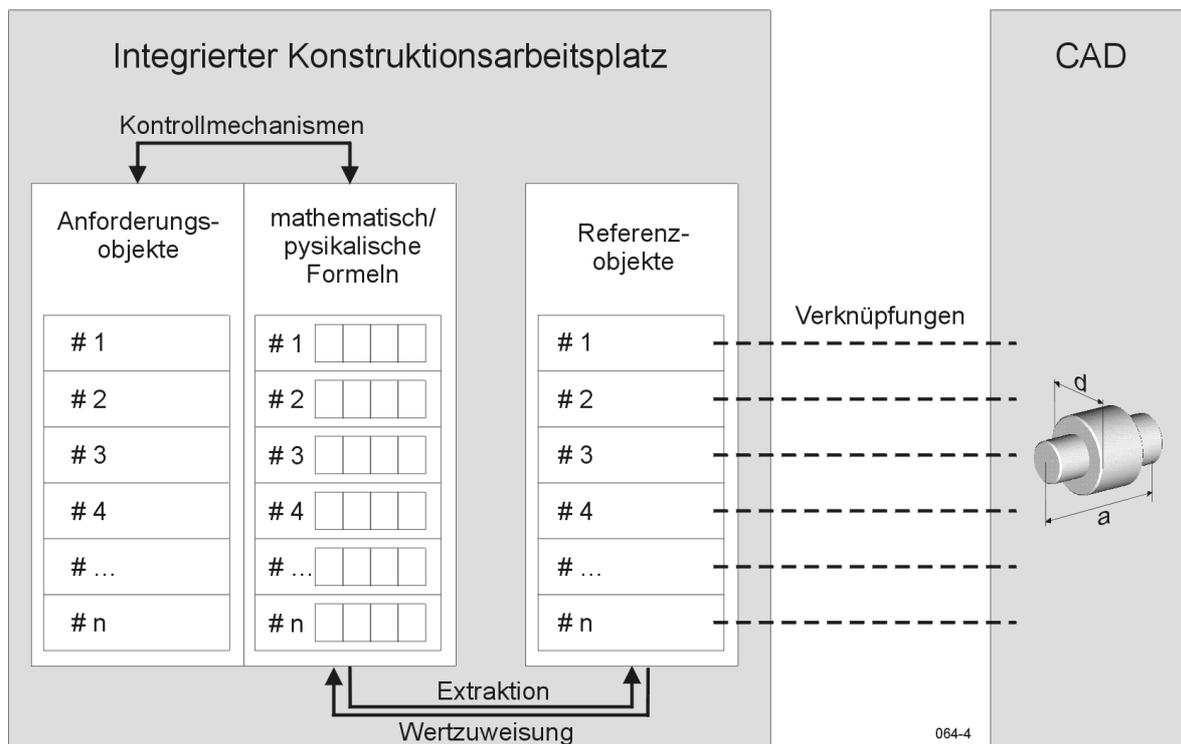


Bild 4-8: Konzept für den integrierten Konstruktionsarbeitsplatz in Verknüpfung mit einem parametrischen Geometriemodellierer (CAD-System) für die phasenübergreifende, bidirektionale Integration von Berechnung und Gestaltung

Bild 4-8 zeigt das resultierende Konzept für den integrierten Konstruktionsarbeitsplatz zur Umsetzung einer kontinuierlichen Integration von Berechnung und Gestaltung. Die gesonderte Abbildung und Behandlung von Anforderungsobjekten kann die Kontrolle und damit zielgerichtete Ausprägung der Referenzobjekte zu jedem Zeitpunkt sicherstellen. Bild 4-9 zeigt als Prinzipbeispiel zur Verdeutlichung der phasenübergreifenden und phasenunabhängigen Arbeitsweise mit dem System das (stark vereinfachte) Szenario der Konstruktion eines Druckkessels. Der einfache (und zunächst deutlich unvollständige) Entwicklungsauftrag lautet: "Entwickeln Sie einen Druckkessel mit einem Volumen von $0,5 \text{ m}^3$!". In der Grafik ist außen eine mögliche Arbeitsfolge dargestellt, die Pfeile im Inneren zeigen eine beliebige andere Vorgehensweise.

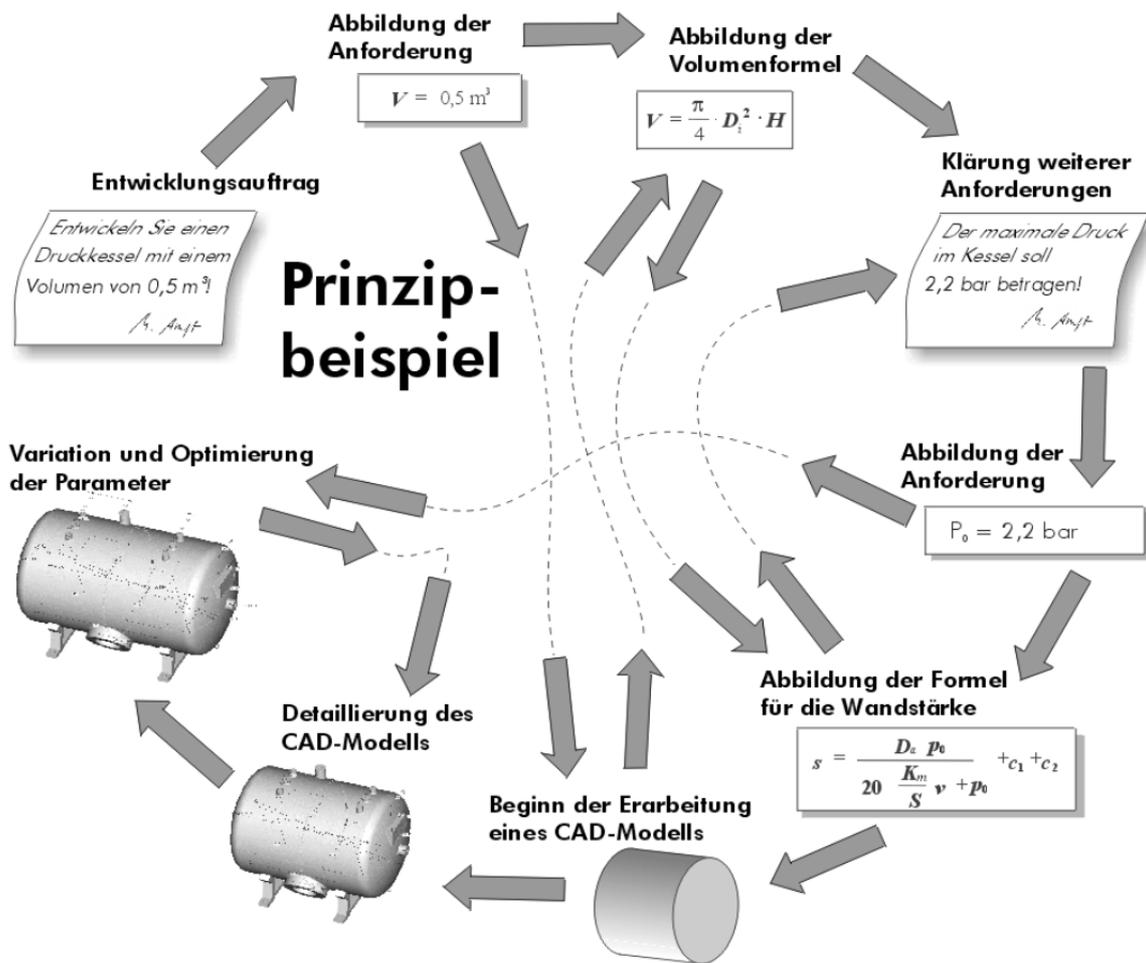


Bild 4-9: Prinzipbeispiel zur Verdeutlichung der phasenübergreifenden und phasenunabhängigen Arbeitsweise mit dem System (AMFT&LINDEMANN 2000)

4.2 Unschärfe

Das in den Absätzen 4.1 und 4.1.7 beschriebene Konzept einer phasenübergreifenden, bidirektionalen Integration von Berechnung und Gestaltung ist in sich vollständig, trägt jedoch die in Grundlagenkapitel in Absatz 2.4.3.3 beschriebene Schwierigkeit in sich, dass eine nachträgliche Beeinflussung berechneter Ergebnisse rekursiv in die Berechnung fließt und damit auf andere Parameter des Geometriemodells wirkt. Diese Rekursion ist im Detail in dem beschriebenen Konzept nicht ganzheitlich beeinflussbar, das bedeutet es ist nicht möglich das Geometriemodell letztendlich vollständig fertigungsgerecht zu gestalten. Dies liegt daran, dass der Datentransfer im von Hand durch den Konstrukteur/Entwickler geführten Berechnungs- und Gestaltungsprozess stets mit Unschärfen belegt ist.

Der Datentransfer zwischen Gestaltung und Berechnung wird im Konstruktionsprozess durch viele Faktoren mit Unschärfe belegt. Diese Faktoren dienen dem Prozess und sind

nicht als negativ oder schädlich zu betrachten. Bild 4-10 zeigt eine Auflistung der Faktoren, die ein exaktes, also scharfes Rechenergebnis beim Übertrag in ein Fertigungsmodell betreffen können.

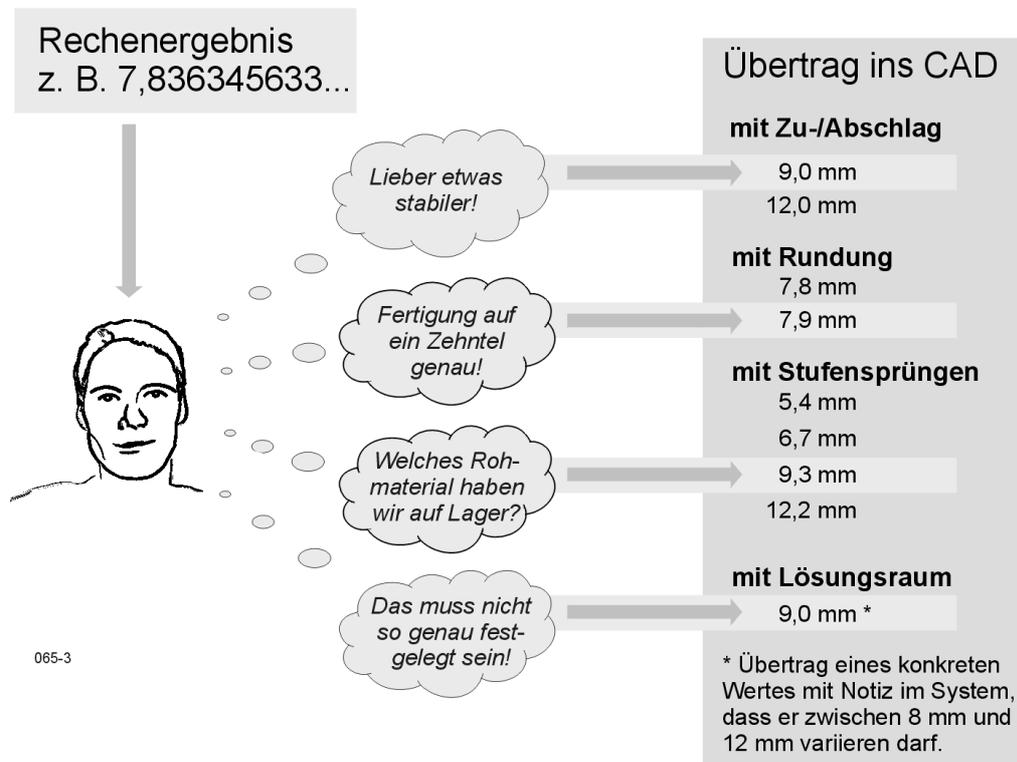


Bild 4-10: Bei konventioneller Arbeitsweise finden viele Formen von unscharfen Überträgen statt. Lösungsräume (siehe letzte Gedankenblase im Bild) werden gar nur im Kopf gespeichert und nicht übertragen.

Die Kausalitäten der Übertragungsmechanismen bleiben im konventionellen Entwicklungsprozess allein im Kopf des Konstrukteurs/Entwicklers erhalten. Ziel ist es diese Kausalitäten im Rechner abzubilden und im System diese Arbeitsweise zu adaptieren.

4.2.1 Ansatz für einen unscharfen bidirektionalen Datenfluss

Bild 4-11 zeigt das angestrebte System. Die aus dem Rechenverfahren resultierenden exakten (scharfen) Werte werden mittels verschiedener Unschärfemechanismen mit dem Fertigungsmodell verknüpft. Diese Übertragungsmethoden ermöglichen typische Parameteranpassungen, die der Konstrukteur/Entwickler sonst beim Datenübertrag von Hand vornimmt (siehe Bild 4-10), im Rechner abzubilden. Kontrollmechanismen und eine zweite Berechnungsebene stellen den korrekten technischen Zusammenhang zwischen scharfen und unscharfen Werten sicher. Durch die Einführung einer zweiten Berechnungsebene können die Anforderungen über die Gleichungen mit den unscharf übertragenen Werten

auf Konformität überprüft werden ohne die exakten Rechenergebnisse rekursiv zu überschreiben. Die Kontrollmechanismen können etwaige Anforderungsverletzungen den verursachenden unscharfen Überträgen zuordnen und eine interaktive Korrektur fordern.

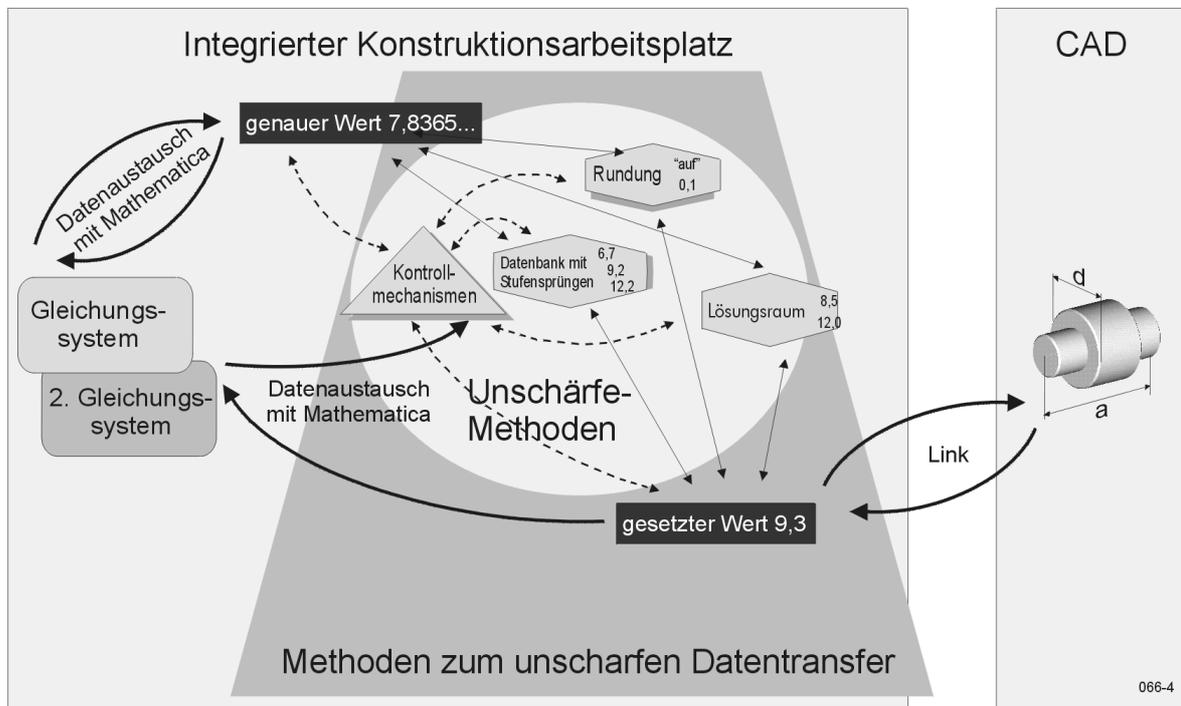


Bild 4-11: Die Methoden zum ungenauen Datentransfer

Das Konzept erfordert, dass jede geometrische Variable (d.h. Variablen, die mit einem Maß aus ProE verknüpft wurden) jeweils zwei Werte vorhält:

- den berechneten (genauen) Wert der Variablen im Gleichungssystem
- den gesetzten (abweichenden) Wert der Variablen (z. B. von der Berechnung abweichender Wert des Maßes in ProE)

Verknüpft werden diese beiden voneinander differierenden aber direkt zusammenhängenden Werte durch verschiedene Methoden. Implementiert werden:

- Methoden zur Rundung von Werten
- Methoden, mit denen Parametern Lösungsräume zugewiesen werden können, innerhalb derer ein Wert variieren kann, ohne in seinen Auswirkungen auf das ganze System untersucht zu werden
- Methoden zur Verknüpfung mit Datenbanken, die Stufensprünge dokumentieren, z. B. von Rohteilabmessungen, an die die Bauteilabmessungen angepasst werden sollen.
- Kontrollmechanismen (Abgleich von Modellparametern mit Anforderungen)

- Datenrückflussmechanismen (Auflösung unscharfer Verbindungen bei Datenrückfluss vom CAD ins Berechnungsmodell).

Bild 4-11 zeigt die Verbindung zwischen Berechnungsergebnis des Gleichungssystems und dem CAD-Modell nach Einführung der Unschärfemethoden. Hauptbestandteil der Unschärfemethoden sind die Kontrollmechanismen, die die Bidirektionalität der Kopplung zwischen genauem Wert und gesetztem Wert ermöglichen. Diese Mechanismen sollen unter Zugriff auf die anderen implementierten Unschärfemethoden im Falle von Neuberechnung oder geometrischer Neugestaltung beide Seiten (Berechnung und CAD-Modell) den Vorgaben entsprechend nachführen.

Die Kontrollmechanismen finden im Besonderen Anwendung bei der Definition von Lösungsräumen für Parameter:

- Ändert der Benutzer den gesetzten Wert (z. B. durch direkte Eingabe im CAD-System), so wird überprüft, ob dieser Wert innerhalb eines optional vorgegebenen Intervalls liegt. Ist dies nicht der Fall, so wird der Benutzer darüber informiert und eine erneute Evaluierung des Gleichungssystems mit dem gesetzten Wert eingeleitet.
- Ändert sich der Parameterwert durch eine Evaluierungssequenz von INKA⁴⁵ (Freigabe - Änderung - Neuberechnung), so wird ebenfalls überprüft, ob das CAD-Maß noch innerhalb des vorgegebenen Lösungsraumes liegt. Ist dies nicht der Fall, wird der Benutzer ebenfalls davon in Kenntnis gesetzt und das CAD-Modell mit dem errechneten genauen Wert angepasst. Der Benutzer kann dann einen neuen Lösungsraum setzen oder andere Unschärfemethoden für den Parameter auswählen.

Lösungsräume sollen auch für nichtgeometrische Parameter Anwendung finden. Da die oberen/unteren Schranken für jeden Wert unabhängig gesetzt werden, kann der Konstrukteur/Entwickler auf diese Weise gezielt den Spielraum festlegen, den das Gleichungssystem für Evaluierungen bietet.

Automatische Freigabe von Parametern: Wird ein Wert über seinen Freiraum hinaus geändert, so muss diese Veränderung in die Berechnung einfließen. Bei jeder Parameteränderung müssen abhängige Parameter zur Berechnung freigegeben werden. Durch die Implementierung von Unschärfen kann INKA in Probeevaluierungen versuchen eine Kombination von abhängigen Werten zu finden, die sich nur innerhalb der für die jeweils vorgegebenen Grenzen verändern. Ist dies möglich, so kann das System ohne Eingriff des Konstrukteurs/Entwicklers vollständig neu evaluiert werden. Es ist in solch einem Fall nicht notwendig explizit abhängige Parameter zu bestimmen, die für die Berechnung freigegeben werden. Dieser Umstand trägt wesentlich zur Vereinfachung der Handhabung des erweiterten, integrierten Produktmodells bei. Verlässt ein Parameter das vorgegebene Inter-

⁴⁵ INKA = Integrierter Konstruktions Arbeitsplatz (AMBROSY 1996, ABMANN 2000)

vall, so wird ein neuer genauer Wert berechnet, der entweder direkt in die Referenzparameterliste (und somit ins CAD) übertragen wird oder der erneut vom Konstrukteur/Entwickler mit Unschärfemethoden belegt wird.

Ein automatisierter Datenrückfluss vom CAD in die Berechnung erfordert, dass die Unschärfemechanismen eines veränderten Parameters außer Kraft gesetzt werden müssen (Löschung), sobald Eingriffe auf der CAD-Seite erfolgen. Der Parameter fließt in seiner neuen Ausprägung direkt (ohne unscharfe Veränderung) zurück in die Berechnung und löst eine Neuberechnung des gesamten Gleichungssystems und eine anschließende Regenerierung des CAD-Modells aus. Die nur indirekt veränderten Parameter können ihren unscharfen Übertrag aus den neuen Rechenergebnissen ins CAD-Modell behalten.

4.2.2 Abgrenzung

In der Literatur findet sich die informationstechnische Begrifflichkeit der Unschärfe im Wesentlichen in den Bereichen Werteunsicherheit und Entscheidungsunsicherheit. Bei der Werteunsicherheit werden nicht eindeutige Entscheidungen mit Hilfe der Fuzzy Logik abgebildet (BREIING&KNOSALA 1997, KLAWONN 1992). Bei der Entscheidungsunsicherheit werden unsichere oder unbekannte Eingangsparameter mittels Verfahren wie Intervallarithmetik (MARX 1998, KUTTERER 1994) oder mittels neuronaler Netze (CARL 2000) in exakte Ergebnisse umgerechnet. Die Begrifflichkeit der Unschärfe, wie sie im hier beschriebenen Ansatz verwendet wird, ist eine Ausdehnung der Bedeutung auf den informationstechnischen *Prozess*. Der Prozess des Datenübertrags ist unscharf, sowohl seine Eingangs- als auch seine Ausgangsparameter sind scharf. Der Datenübertrag ist unscharf – nicht seine Parameter.

Im Folgenden wird dieser unscharfe Schnittstellen-Datenübertrag mit den anderen Ansätzen Fuzzy Logic (F), Neuronale Netze (N) und Intervallarithmetik (I) vor dem Hintergrund der Integration von Gestaltung und Berechnung detailliert verglichen:

Bei der Integration von Gestaltung und Berechnung sind drei Handlungsfelder zu betrachten: 1.) *Berechnung*, 2.) *Datentransfer* und 3.) *Gestaltung*. Bei den oben genannten Unschärfef Verfahren (F, N, I) handelt es sich um Methoden der Werteermittlung. Sie sind deutlich im Bereich 1.) *Berechnung*, also dem linken Trapez aus Bild 4-12 positioniert. Die phasenübergreifende Integration der vorliegenden Arbeit konzentriert sich auf den Bereich 2.) *Datentransfer*, also auf das mittlere Trapez - die Schnittstelle zwischen CAD und Berechnung. Das Konzept verwendet ein konventionelles Berechnungsverfahren.

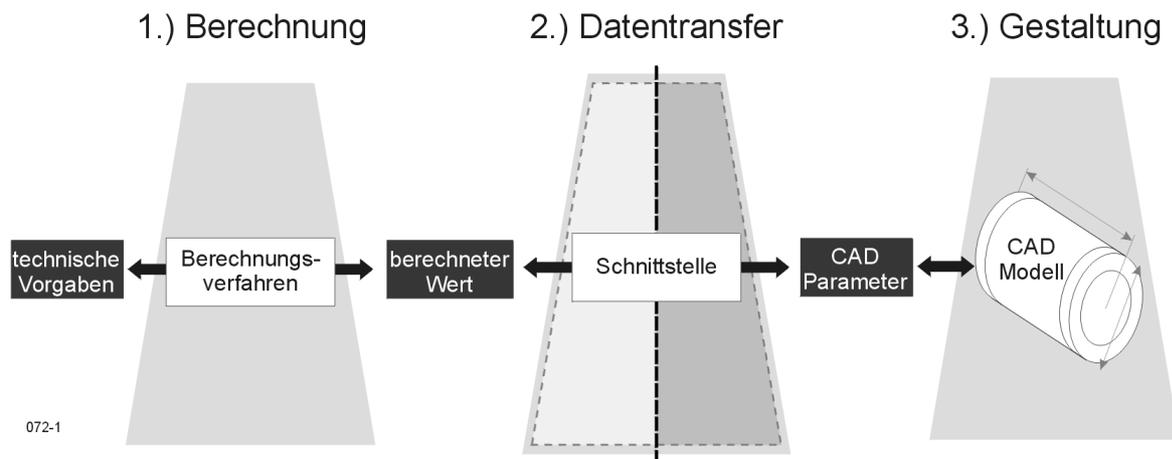


Bild 4-12: Die drei wesentlichen zu betrachtenden Bereiche bei der Integration von Gestaltung und Berechnung.

Bild 4-13 stellt die Positionierung der Unschärfe-Verfahren (F, N, I) im Bereich 1.) Berechnung dar. Die Verfahren sind in der Lage aus unscharfen Vorgaben heraus Berechnungen durchzuführen und Bauteilparameter zu bestimmen. Je nach Verfahren entstehen exakte Aussagen (scharfe Werte) oder auch Wertebereiche / ungefähre Angaben für die Zielparameter (unscharfe Werte).

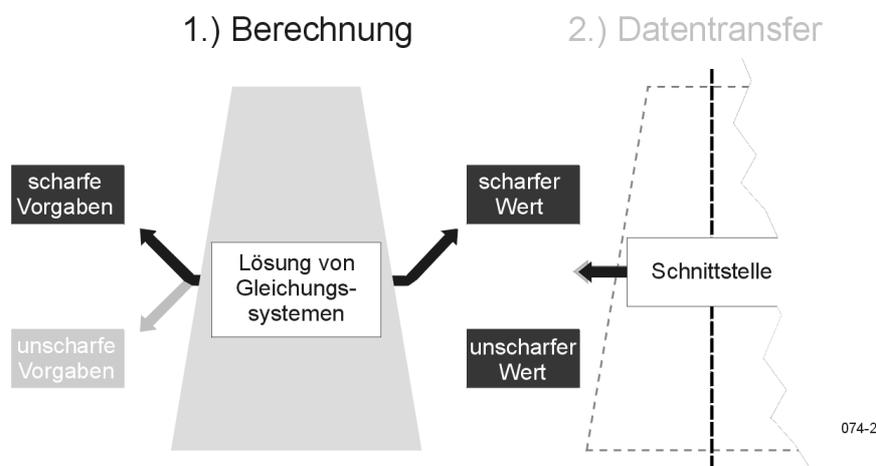


Bild 4-13: Die Unschärfe-Berechnungsverfahren mit Ein- und Ausgangsparametern

Das in dieser Arbeit entwickelte Konzept wendet einfache Gleichungslösung an, wie sie bei der normalen Auslegungsberechnung von Maschinenelementen vorkommt. Bild 4-14 zeigt, dass ausschließlich mathematisch exakte Werte (scharfe Werte) als Ergebnis entstehen.⁴⁶

⁴⁶ Als Eingabeparameter sind auch unscharfe Parameter wie z. B. Mindestanforderungen angedeutet, diese stellen aber nur Kontrollfunktion für die Gleichungslösung dar

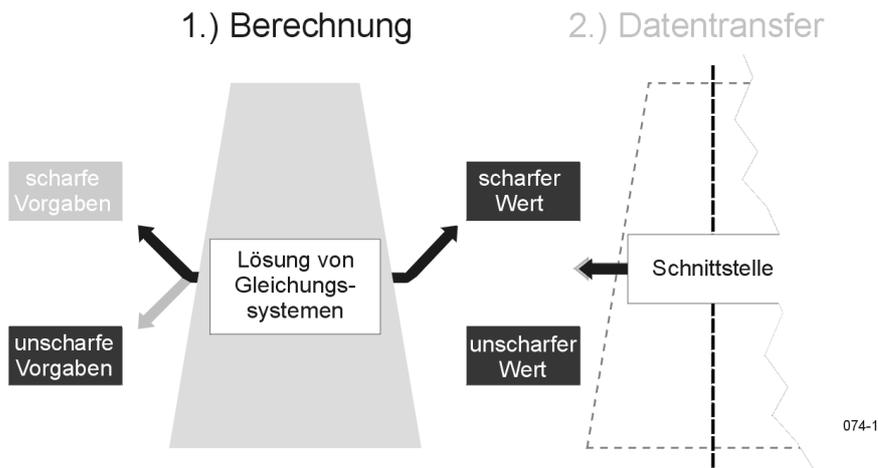


Bild 4-14: Das im Konzept angestrebte, konventionelle Rechenverfahren der algebraischen Gleichungslösung

Bild 4-15 zeigt die Problematik, derer sich die Arbeit annimmt: Werden Berechnungsergebnisse direkt ins CAD übertragen, so kann in der Regel nur ein Ersatz-Modell entstehen, das nicht dem Fertigungsmodell entspricht. Exakt berechnete Werte führen zum Beispiel zu fertigungstechnisch unsinnigen, nicht verfügbaren Blechstärken, zu ungeraden Maßen und nicht fertigungsgerechten Abmessungen. Nur ein unscharfer Übertrag mit Rundung auf zum Beispiel ganze Millimeter, mit Anpassung an Fertigungsmittel und Rohteile und mit frei gewählten Sicherheitsaufschlägen kann zu fertigungsgerechten Produktmodellen führen. Bild 4-15 zeigt in der oberen Hälfte das Konzept von Unschärfen in der Schnittstelle. Die untere Hälfte zeigt den Übertrag sowohl scharfer als auch unscharfer Werte in nicht fertigungsgerechte Ersatzmodelle (Berechnungs-/Hilfsmodelle) (ABUOSHA 1993).

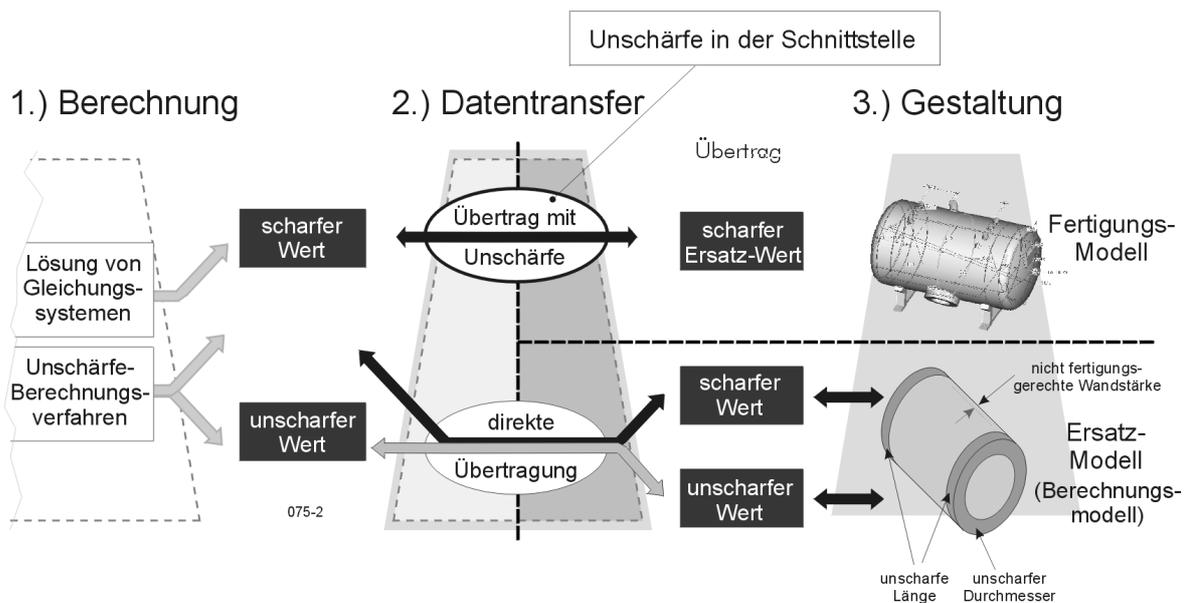


Bild 4-15: Der Ansatz des unscharfen Datenübertrages im Vergleich zu konventionellem Datenübertrag

Einen besonderen Ansatz zum Umgang mit unscharfen Vorgaben liefert ZIEBEIL (2000). Die Arbeit beschäftigt sich mit der Lösung mathematischer Ungleichungssysteme und bemüht sich n-dimensionale Lösungsräume geometrisch/3-dimensional zu interpretieren. Ziel ist der effiziente Umgang mit Ungleichungssystemen zur Ergebnisfindung. Die Thematik ist ausgesprochen komplex und sprengt den Rahmen des Konzeptes für eine phasenübergreifende (kontinuierliche) Integration von Gestaltung und Berechnung. Daher beschränkt sich die vorliegende Arbeit auf die Verwendung von Ungleichungen für Ergebniskontrollrechnungen.

4.3 Zusammenfassung Kapitel 4

Kapitel 4 beschreibt das Konzept einer phasenübergreifenden (kontinuierlichen) Integration von Gestaltung und Berechnung in zwei Abschnitten:

Ausgehend von den Möglichkeiten und Beschränkungen/Grenzen konventioneller CAD-Parametrik werden in Abschnitt 4.1 die notwendigen Grundlagen für einen bidirektionalen Datenaustausch zwischen Berechnung und Gestaltung beschrieben. Wesentlich ist hier jeden geometrischen wie auch nicht-geometrischen Parameter für Variationen frei zugänglich zu machen und die Beschränkung auf Steuerparameter und gesteuerte Parameter, wie sie konventionelle CAD-Parametrik bietet, aufzuheben. Durch die Schaffung von Referenzobjekten wird eine phasenübergreifende Prozessunterstützung realisiert.

Abschnitt 4.2 beschreibt das Konzept zum unscharfen Datenübertrag zwischen Berechnung und Gestaltung. Dieser Ansatz beruht auf der Beobachtung, dass beim Ergebnisübertrag von Hand durch den Konstrukteur/Entwickler in der Regel erhebliche Anpassungen der Werte vorgenommen werden. Das Konzept sieht vor diese Anpassungsmechanismen im Rechner abzubilden und skizziert die notwendigen Maßnahmen für den Erhalt eines bidirektionalen Datenflusses und für die Aufrechterhaltung der Kontrolle der Anforderungskonformität. Der Ansatz eines unscharfen Datenübertrages ist bei der phasenübergreifenden (kontinuierlichen) Integration von Berechnung und Gestaltung unabdingbar, wenn fertigungsgerechte CAD-Modelle angestrebt werden.

Der unscharfe Datenübertrag, also die Arbeit mit Unschärfen in der Schnittstelle, bedeutet die Verarbeitung scharfer (exakter) Werte zu angepassten, neuen, scharfen (exakten) Werten. Die notwendigen Methoden zum unscharfen Datenübertrag unterscheiden sich daher grundlegend von Methoden zur Verarbeitung unscharfer Eingaben und unscharfer Ergebnisse wie zum Beispiel Fuzzy Logic, neuronale Netze, Intervallarithmetik oder die Navigation in Lösungsräumen.

5 Umsetzung des Konzeptes

Das Kapitel beschreibt die prototypische Umsetzung des beschriebenen Konzeptes, die am Lehrstuhl für Produktentwicklung erarbeitet und erprobt wurde.

5.1 Der Integrierte Konstruktionsarbeitsplatz Inka als Grundlage

Den Umsetzungsarbeiten der vorliegenden Arbeit liegt der Integrierte Konstruktionsarbeitsplatz INKA zu Grunde. Es handelt sich um ein System, das am Lehrstuhl für Produktentwicklung entwickelt wurde (AMBROSY 1997, LINDEMANN ET. AL. 1996) und auf die ganzheitliche und durchgängige Unterstützung im Besonderen der frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses ausgerichtet ist. Dafür stehen dem Anwender entsprechende Werkzeuge zur Verfügung, die ihn beim Prozess der Produktdefinition unterstützen. Es können Anforderungen mit Hilfe eines entsprechenden Werkzeuges in einer Datenbank abgelegt und nach benutzerdefinierten Kriterien strukturiert werden, z. B. hinsichtlich Schnittstellenanforderungen oder technischen Anforderungen. Die Gewährleistung der Konsistenz und die Vermeidung der wiederholten Dateneingabe übernimmt dabei das System.

Zwischen den produktdefinierenden Daten (z. B. Anforderungen, Produktdefinitionen oder der Gestalt) werden während des Prozesses der Produktdefinition im Produktmodell inhaltliche und logische Zusammenhänge interaktiv im semantischen Netz abgebildet. Die Erzeugung dieses Netzes erfolgt über Symbole, die Repräsentanten der Daten, in einer grafisch orientierten Benutzeroberfläche. Mögliche Verknüpfungsarten zwischen den Datenobjekten sind beispielsweise Zusammenhänge, die Bedingungen ausdrücken, Strukturen aufzeigen oder den Zustand eines Bauteils beschreiben, also Verknüpfungen mit der Bedeutung „...unter der Bedingung, dass ...“, „...gehört zu...“, oder „...hat als Zustand...“.

Der Prozess der Produktdefinition kann am Konstruktionsarbeitsplatz durchgängig auf unterschiedlichen Abstraktionsstufen in einem semantischen Netz abgebildet werden. So können beispielsweise Funktionen und konkrete Geometrie, also Informationen aus frühen bzw. späten Phasen, in direktem Zusammenhang modelliert werden. Das Modell und damit auch der Datenzugriff sind damit nicht nach Produktentwicklungsphasen gegliedert.

Die abgebildeten Daten und deren Zusammenhänge können im weiteren Verlauf bezüglich der Verknüpfungsarten oder der Datenmerkmale analysiert werden. Somit ist es möglich inhaltliche Zusammenhänge und logische Ursache-Wirkungs-Ketten für eine bessere

Nachvollziehbarkeit des Produktentwicklungsprozesses und der damit verbundenen Entwicklungsprozesslogik aufzuzeigen. Die problem- und aufgabenangepasste Reduzierung des Datenumfanges sichert die Informationsflussoptimierung während der Produktentwicklung. Der Anwender kann dabei auf die für ihn relevanten Daten zugreifen und sie für Varianten oder Anpassungskonstruktionen wiederverwenden.

INKA integriert auf Prozess- Modell- und Systemebene (siehe Bild 5-1, ABMANN 2000, S. 131).

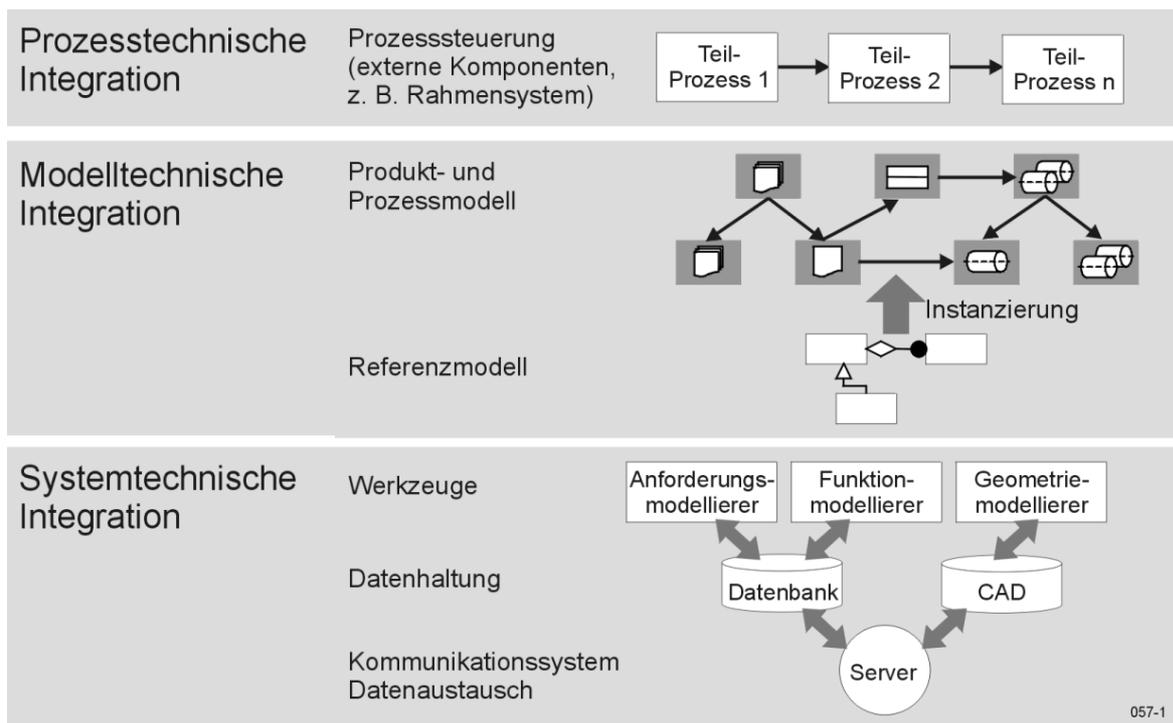


Bild 5-1: Der Integrierte Konstruktionsarbeitsplatz INKA (nach ABMANN 2000, S. 131)

5.1.1 Plattform

Die Plattform des Integrierten Konstruktionsarbeitsplatzes INKA ist UNIX. Da die Anbindung der anderen Applikationen über das Internet über ein Client-Server-System erfolgt, ist deren Plattform individuell frei wählbar. Es kann prinzipiell mit jeder Plattform kommuniziert werden. Die Applikationen sind im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls unter UNIX installiert worden. Das Verbundsystem wurde in der Regel auf mehreren kommunizierenden Rechnern betrieben.

5.1.2 Die ausgewählten Applikationen

Als CAD-System wurde Pro/ENGINEER[®] ⁴⁷ ausgewählt. Der Integrierte Konstruktionsarbeitsplatz INKA bietet die Benutzeroberfläche für das Gesamtsystem. Als mathematischer Solver wurde Mathematica[®] eingebunden. Das Datenbanksystem ONTOS[®] wurde zur Verwaltung des erweiterten Produktmodells in INKA eingebunden. Alle Applikationen kommunizieren über eine Client-Server-Verbindung und können somit auf verschiedenen Rechnern und auch auf verschiedenen Plattformen betrieben werden.

5.1.3 Das erweiterte Produktmodell / die Datenbasis

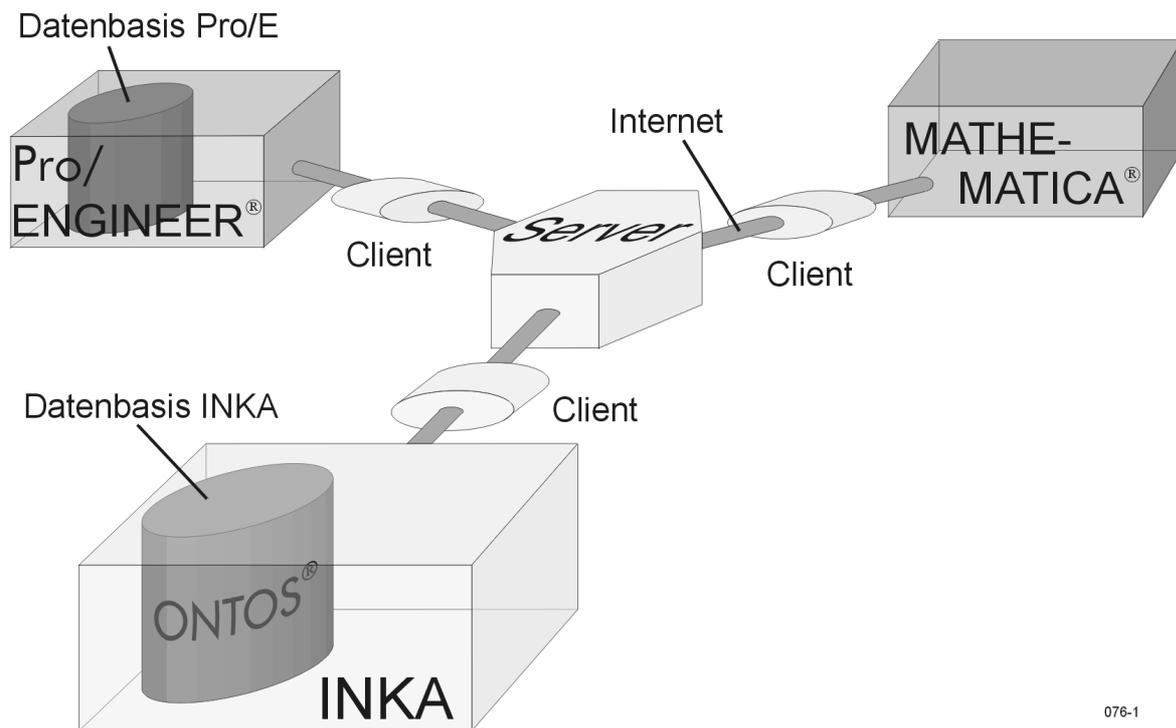
Das erweiterte, verteilte Produktmodell besteht aus dem unveränderten CAD-Modell und einer Erweiterung mittels einer ONTOS[®]-Datenbank. INKA integriert beide Datenbasen und hat Zugriff auf alle Parameter. Die Datenhaltung erfolgt über das gesamte erweiterte Produktmodell hinweg redundanzfrei.

Das CAD-System bleibt unangetastet und eigenständig und kann ohne die anderen Programme alleine mit dem CAD-Modell aufgerufen werden. Das CAD-Modell ist eigenständiger Bestandteil des erweiterten Produktmodells. Berechnungen werden in ONTOS[®] gespeichert und vom Integrierten Konstruktionsarbeitsplatz INKA verwaltet und mit dem CAD-Modell verbunden. In Bild 5-2 sind die beiden Datenbasen innerhalb von INKA und Pro/ENGINEER[®] grafisch als Zylinder dargestellt.

5.1.4 Client-Server-Kopplung der Systemelemente

Bild 5-2 zeigt das Verbundsystem aus INKA, Pro/ENGINEER[®] und Mathematica[®]. INKA koordiniert über einen Server und programmspezifische Clients die Teilsysteme und Datenbasen via Internet.

⁴⁷ Pro/ENGINEER[®] ist eingetragenes Markenzeichen der Firma Parametric Technologies Corp. (PTC)



076-1

Bild 5-2: Das Client-Server-Konzept des entstandenen Systems

5.2 Umsetzung des Konzeptes der phasenübergreifenden (kontinuierlichen) bidirektionalen Integration

Die Umsetzung des Konzeptes der phasenübergreifenden (kontinuierlichen) bidirektionalen Integration lässt sich am einfachsten anhand eines Beispiel-Entwicklungsszenarios beschreiben. Im folgenden Szenario werden keine unscharfen Überträge dargestellt. Diese werden aus Gründen der Übersichtlichkeit in Abschnitt 5.3 "Umsetzung des Unschärfekonzeptes" gesondert dargestellt.

Das Systemkonzept zielt auf die frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses, in denen noch kein Geometriemodell vorhanden ist und mit der Abbildung erster Anforderungen begonnen wird. Der sukzessive Aufbau des integrierten Produktmodells (Gestaltmodell mit integrierter Berechnung) bedeutet eine Offenheit des Systems für beliebige Produkte. Diese Nicht-Objektgebundenheit des Konzeptes wurde dadurch belegt, dass alle am System durchgeführten Beispiel-Entwicklungsszenarien deutlich unterschiedliche Produkte zum Gegenstand hatten. Bild 5-3 zeigt die behandelten Beispielprodukte. Die Umsetzung der phasenübergreifenden (kontinuierlichen) bidirektionalen Integration von Berechnung und Gestaltung wird im Folgenden am Beispiel eines Raketentriebwerks vorgestellt.

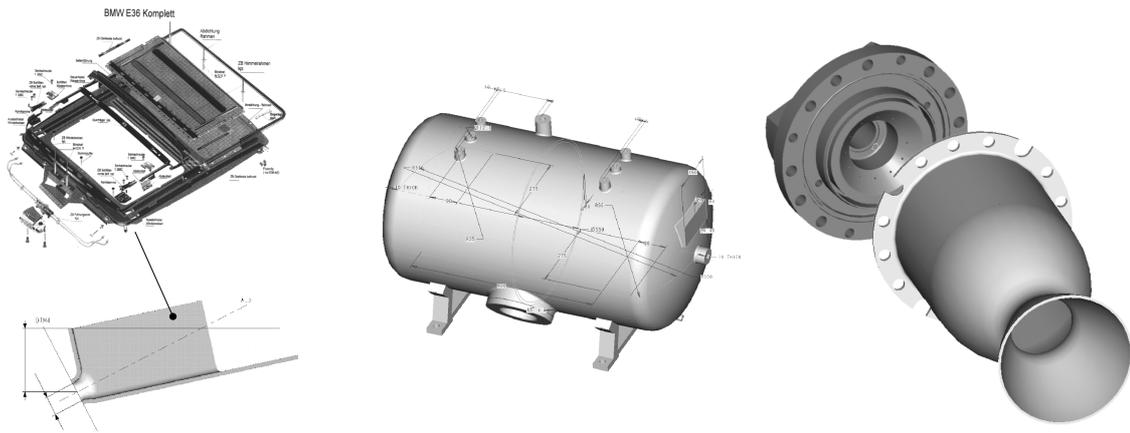


Bild 5-3: Beispielprodukte: PKW-Stahlschiebedach, Druckluftkessel, Raketentriebwerk

Bild 5-4 zeigt das entstandene Programmsystem mit dem Haupteingabefenster und dem verknüpften, integrierten CAD-Modell in Pro/ENGINEER. Bei dem Beispielprodukt handelt es sich um ein Raketentriebwerk, dessen technische Spezifikationen mit dem System erarbeitet werden (Gestalt, Schub, Massenfluss, Festigkeit, etc.). Unter den Ziffern 1 bis 5 werden die wesentlichen Hauptelemente des Systems näher bezeichnet.

Im Folgenden wird die Arbeit mit dem System beschrieben.

5.2.1 Abbildung von Anforderungen und mathematisch/physikalischen Gleichungen

Der Konstrukteur/Entwickler beginnt z. B. mit der Eingabe von ersten Anforderungen an das Produkt und ersten mathematisch/physikalischen Grundgleichungen. Dazu bietet der Integrierte Konstruktionsarbeitsplatz entsprechende Eingabewerkzeuge. Bild 5-5 und Bild 5-6 zeigen die Dialogboxen für die Eingabe von Gleichungen und Anforderungen. Das System analysiert jede Eingabe und extrahiert die Referenzobjekte, die es in die Referenzobjektliste (siehe Bild 5-4 Feld 3) einträgt. Dabei zeigt das System bereits durch den Konstrukteur/Entwickler getätigte Wertebelegungen oder sich aus den Zwangsbedingungen ergebende Wertebelegungen an. Jede Eingabe im System initialisiert eine Evaluierung und damit eine Berechnung aller sich aus Zwangsbedingungen indirekt ergebenden Parameter.

5.2.2 Verknüpfung mit dem CAD

Der Konstrukteur/Entwickler beginnt ein CAD-Modell zu erstellen und kann dieses zu jedem Zeitpunkt ab dem ersten Gestaltelement mit den Referenzobjekten verknüpfen. Dies geschieht durch Anklicken des betreffenden Referenzobjekts in der Dialogbox aus Bild 5-7 durch Anklicken des Feldes "Link mit Pro/E". Es erscheint die Dialogbox aus Bild 5-8, mit

deren Hilfe das entsprechende CAD-Modell aufgerufen wird, von dem dann ein Maß angeklickt wird. Das Parameterreferenzobjekt erhält den Haken und steht in redundanzfreier Verbindung mit dem CAD-Modell. Bei jeder Aktion in INKA schaut das System ins CAD-Modell und gleicht den Wert mit der Berechnung ab.

The screenshot displays two windows from the INKA software. The top window, titled 'Erweitertes Produktmodell: Nozzle', contains a 'Gleichungssystem' (Equation System) with the following equations:

$$\begin{aligned} Te / Tbk &= (pe / pbk)^{((kappa - 1) / kappa)} \\ cp &= kappa / (kappa - 1) R \\ R &= R0 / M \\ S &= mpunkt \cdot ceff \\ ceff &= ve + Ae / mpunkt (pe - pa) \\ mpunkt &= (At \cdot pbk) / (SQR(R \cdot Tbk) \cdot (SQR(kappa) \cdot (2 / (kappa + 1))^{((kappa - 1) / kappa)})) \\ pe &= pa \\ Lstern &= Abk / At \cdot lbk \\ Ae &= 3.141/4 \cdot de^2 \\ Abk &= 3.141/4 \cdot dbk^2 \\ At &= 3.141/4 \cdot dt^2 \end{aligned}$$

Below the equations are 'Anforderungen' (Requirements) for variables: kappa = 1.4, M = 77.61, R0 = 8314, and S >= 4e+03. A 'Variablen' (Variables) table on the right lists values for M, R0, cp, R, S, mpunkt, ceff, Lstern, ve, Ae, de, pe, pa, At, and dt. A message box (4) at the bottom left of the top window displays solver warnings: 'Warning: Inverse functions are being used. Values may be lost for multivalued inverses.' and 'Warning: Inverse functions are being used by the solver.' The bottom window, 'Pro/ENGINEER part: NOZZLE', shows a 3D CAD model of a nozzle (5). A dashed line labeled 'Links' (3) points from the 'dt' variable in the top window to a dimension on the nozzle model in the bottom window. A legend at the bottom of the CAD window states: 'Model will be displayed in wireframe display.' and 'Shaded model will be displayed'.

1 mathematisch/physikalische Gleichungen

2 mathematisch/physikalische Anforderungen

3 Parameterreferenzobjekte

4 Dialogfenster für Meldungen des mathematischen Solvers

5 verknüpftes CAD-Modell

077-1

Bild 5-4: Das Programmsystem: Entwicklung eines Raketentriebwerks auf INKA

Das erweiterte Produktmodell wird vom Konstrukteur/Entwickler zunehmend vervollständigt. Immer neue Zwangsbedingungen aus den Gleichungen und Anforderungen werden vom System ganzheitlich abgestimmt. Ziel dieser Vorgehensweise ist es das anfänglich mathematisch stark unterbestimmte Gleichungssystem (d. h. viele Parameter sind angelegt aber noch nicht festgelegt) in den mathematisch bestimmten Zustand zu überführen (alle Parameter des Systems festgelegt und aufeinander abgestimmt).

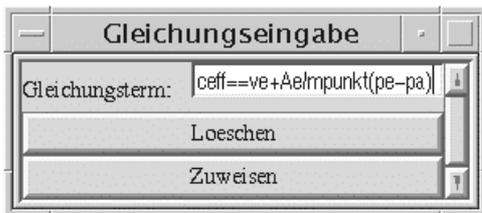


Bild 5-5: Gleichungseingabe



Bild 5-6: Anforderungseingabe

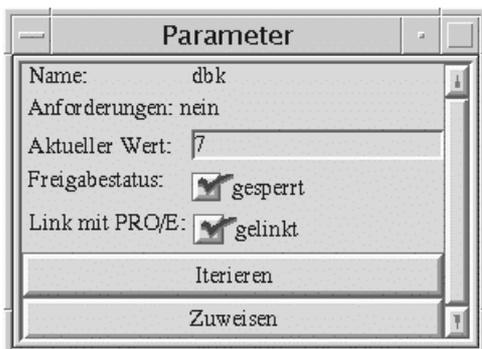


Bild 5-7: Referenzparameter



Bild 5-8: Link zum CAD-System

5.2.3 Parametervariation

Variation von Parametern kann nur erfolgen, wenn abhängige Parameter mitverändert werden. Es stehen in der Regel mehrere Parameter als abhängige Parameter zur Mitveränderung zur Auswahl (Beispiel: Die Formel $V = a \cdot b \cdot c$ verlangt bei Veränderung von V eine Neuberechnung von a , b oder c). Das System hilft dem Konstrukteur/Entwickler Abhän-

gigkeiten unter den Parametern zu erkennen und bei einer Variation eines Parameters die entsprechenden Freigaben zur Neuberechnung ausgewählter Parameter durchzuführen. Dies beginnt mit der Freigabe des zu variierenden Parameters, der zunächst in der Referenzobjektliste und allen Gleichungen grafisch rot unterlegt dargestellt wird. Sukzessive wählt der Konstrukteur/Entwickler aus den jeweiligen Gleichungen mit rot gekennzeichneten Elementen in Abhängigkeit stehende Parameter aus und gibt sie frei. Auch diese können in anderen Gleichungen wieder in Abhängigkeiten stehen und werden in diesem Falle auch rot hinterlegt. Wenn alle Abhängigkeiten ausreichend freigegeben wurden, haben alle zunächst Rot hinterlegten Parameter die Hintergrundfarbe auf Grau gewechselt: Das System lässt dann eine Variation der Parameter zu.

5.2.4 Parameteroptimierung

Um eine zielgerichtete Parametervariation durchführen zu können, wurde ein Optimierungshilfsmittel entwickelt. Ein Parameter kann mit diesem Hilfsmittel schrittweise auf einen Zielwert hin variiert werden. Die Reaktion der in Abhängigkeit freigegebenen Parameter wird dann in Graphen dargestellt. Bild 5-9 zeigt ein solches Optimierungsdiagramm.

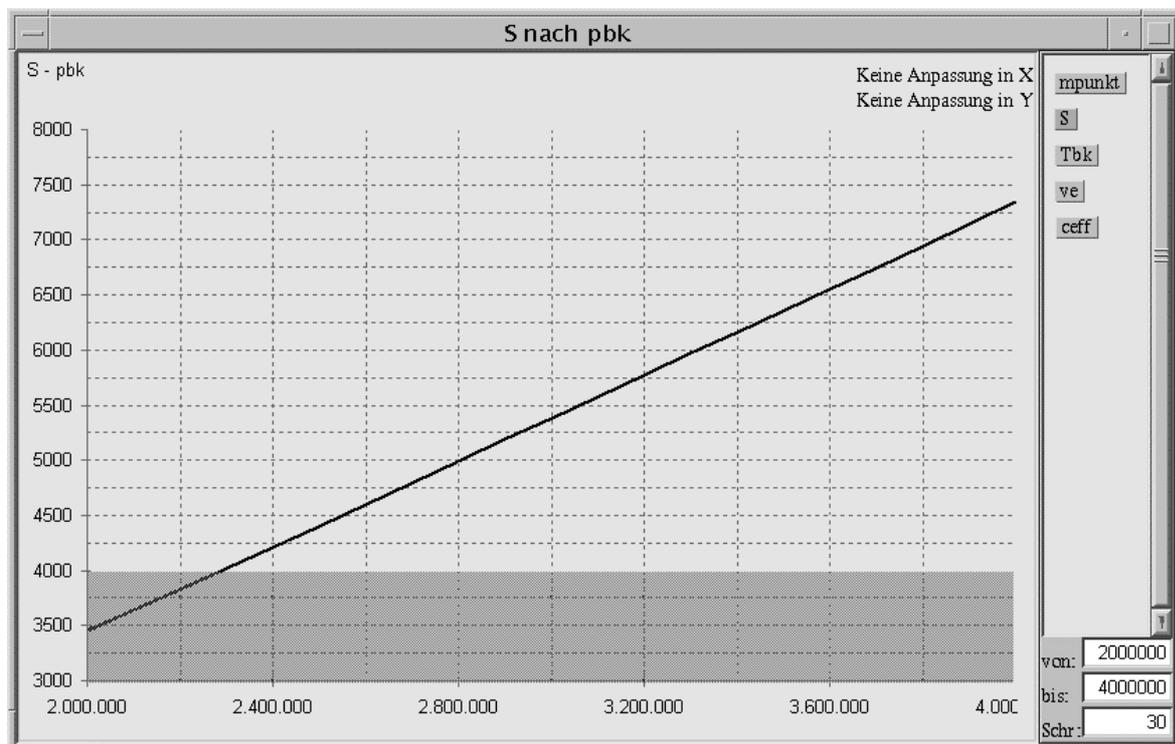


Bild 5-9: Optimierung: S (Schub) nach p_{bk} (Druck in der Brennkammer)

Bei jeder Anpassung des Systems wird stets eine Überprüfung der Anforderungskonformität und der mathematischen Integrität durchgeführt. Werden Anforderungen verletzt, so

wird der Konstrukteur/Entwickler darauf per Dialogbox hingewiesen und der letzte Arbeitsschritt rückgängig gemacht. In Bild 5-9 wird gezeigt, wie die durch Anforderungen definierten Gültigkeitsbereiche der dargestellten Parameter in den Diagrammen dargestellt werden. Die Anforderung an das Triebwerk im dargestellten Beispiel lautet, dass der Schub nicht unter 4000 N fallen darf. Der Bereich unterhalb 4000 N ist im Diagramm rot unterlegt. Der Konstrukteur/Entwickler erkennt damit den Bereich, innerhalb dessen er in diesem Falle den Parameter p_{bk} variieren kann, ohne die Anforderungen zu verletzen. Durch Klick auf die Liste der von p_{bk} abhängigen Parameter an der Seite des Diagramms, werden die entsprechenden Diagramme berechnet und angezeigt.

5.3 Umsetzung des Unschärfekonzepts

Der im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Prototyp wurde nach seiner Fertigstellung um Methoden zum unscharfen Datenübertrag erweitert. Sie stellen eine Erweiterung dar und beeinflussen die dargestellte Funktionsweise nicht.

Die Benutzerschnittstelle wurde im Feld der Referenzobjekte (siehe Bild 5-4, Feld 3) um eine zweite Spalte für Wertbelegung und um einen Button zur Festlegung der Unschärfe-Verbindungsart zwischen exaktem und gesetztem Wert erweitert. Bild 5-10 zeigt die erweiterte Darstellung der Referenzobjekte. Der durchgehende Pfeil zwischen den in beiden Spalten identischen Werten symbolisiert den direkten Übertrag des in der linken Spalte stehenden errechneten exakten Wertes.

R0	=	8314	↔	8314
cp	=	375	↔	375

Bild 5-10: Die erweiterte Darstellung der Referenzobjekte

Durch Mausklick auf den durchgängigen Pfeil wird im entwickelten Systemprototypen eine Unschärfemethode ausgewählt. Je nach ausgewählter Methode erscheint ein anderes Symbol auf dem Button. Bild 5-11 zeigt die Symbole, die dem Konstrukteur/Entwickler direkt Information über die Art des Übertrags in das Fertigungsmodell geben.

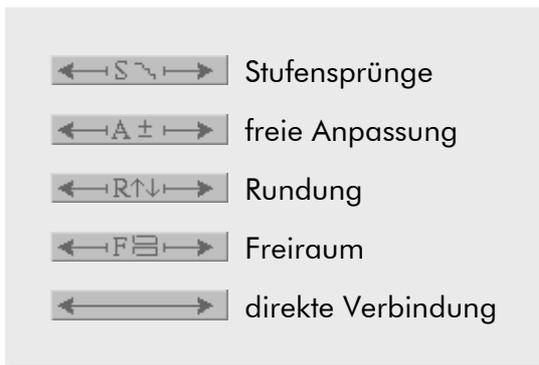


Bild 5-11: Symbole mit Information über die ausgewählte Unschärfe des Parameterübertrags

5.3.1 Rundung

Für eine Durchführung von Rundungen wurde der Dialog aus Bild 5-12 programmiert. Die Dialogbox zeigt den Namen des Parameters und seinen exakten Wert. Durch Festlegung der Rundungsparameter errechnet sich der durch die Unschärfemethode entstehende gesetzte Wert des Parameters, der dem Konstrukteur/Entwickler im unteren Bereich der Dialogbox angezeigt wird.



Bild 5-12: Dialogbox zur Festlegung der Parameter der Unschärfemethode "Rundung"

Nach Zuweisung der gewählten Unschärfemethode stellt sich der Parameter im System mit dem neuen Symbol auf dem Unschärfebutton und mit seinem neuen gesetzten Wert dar (Bild 5-13).



Bild 5-13: Darstellung eines Parameters mit exaktem und mit durch Rundung gesetztem Wert

5.3.2 Stufensprünge

Um Parameter an die Stufensprünge von z. B. Norm-Rohteilen oder Norm-Maschinenelementen oder z. B. an lagerhaltige Halbzeuge oder an Werkzeugabmessungen anpassen zu können, wurde als Unschärfemethode ein Dialog konzipiert, in dem den Referenzobjekten Stufensprünge als Unschärfemethode zugewiesen werden können. Es entstand die Dialogbox aus Bild 5-14, in der eine Datenbank ausgewählt werden kann. Bei den Datenbanken handelt es sich bei unserem prototypischen System zum momentanen Zeitpunkt noch um Text-Files, die von uns von Hand generiert wurden. Denkbar ist die Einbindung beliebiger anderer Formate. Bild 5-15 zeigt das Referenzobjekt, wie es sich im Hauptfenster anschließend darstellt.

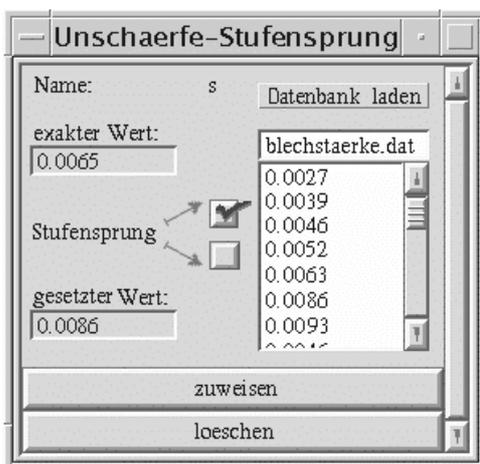


Bild 5-14: Dialogbox zur Festlegung der Datenbank und der Sprungrichtung für Stufensprünge



Bild 5-15: Darstellung eines Parameters mit exaktem und mittels Stufensprung gesetztem Wert

5.3.3 Freiräume

Wenn der Konstrukteur/Entwickler ermessen kann, dass ein Parameter um einen Betrag x größer oder kleiner sein kann, ohne das Bauteil in seiner Funktion zu beeinträchtigen, so kann er in einer Dialogbox dem Parameter eine Ober- und eine Untergrenze zuweisen, innerhalb derer sich der Parameter aus der Berechnung resultierend verändern darf, ohne dass der Konstrukteur/Entwickler bewusst eingreifen muss. Das entsprechende Dialogfenster lässt die Ober- und Untergrenze in absolutem und relativem Maß festlegen. Relative Maße werden vom System in absolute Maße umgerechnet.

Die Methode der Zuweisung eines Lösungsraumes bedeutet einen scharfen Übertrag des berechneten Parameters. Ziel der Zuweisung eines Lösungsraums ist es im Falle einer Pa-

rametervariation automatisierte Freigaben abhängiger Parameter vorzunehmen. Wird ein Parameter variiert, wird unter den abhängigen Parametern nach Freiräumen gesucht, innerhalb derer vom Solver ohne explizite Freigabe neue Lösungen gesucht werden.

Methoden zur automatisierten Parameterfreigabe wurden wegen der programmiertechnischen Komplexität nicht im Prototypen umgesetzt. Die Möglichkeiten für automatisierte Freigaben sind nicht eindeutig und daher nicht durch einfache Entscheidungsmethoden steuerbar (BALACHANDRAN 1993). Die implementierten Methoden dienen daher im Prototypen ausschließlich der Memorisierung von konstruktiven Spielräumen.

5.3.4 Zweite Berechnungsebene

Ziel des unscharfen Datenübertrags ist es einzelne Parameter fertigungsgerecht anzupassen, ohne rekursiv andere Parameter zu beeinflussen (und nicht-fertigungsgerecht werden zu lassen). Bei der phasenübergreifenden (kontinuierlichen) Integration von Berechnung und Gestaltung sind Unschärfemethoden im Datenübertrag unverzichtbar.

Dennoch ist es notwendig die Anforderungskonformität der ins fertigungsgerechte CAD-Modell übertragenen Werte zu überprüfen. Dafür müssen die mathematisch/physikalischen Gleichungen mit den übertragenen Werten nachgerechnet werden ohne die eigentlich zu Grunde liegende Berechnung zu überschreiben. Dies erfordert die Einführung einer zweiten Berechnungsebene, die im Hintergrund die Gleichungen mit den über die Unschärfemethoden gesetzten Werten einzeln durchrechnet und die in den Anforderungen behandelten Parameter in ihren Abweichungen berechnet. Dem Konstrukteur/Entwickler werden die in der zweiten Berechnungsebene errechneten abweichenden Werte im Anforderungsfeld angezeigt (siehe Bild 5-16). Er kann durch den Wertevergleich entscheiden, ob die Abweichungen zulässig sind.

5.3.5 Löschung des unscharfen Übertrags bei Parametervariation im CAD-Modell

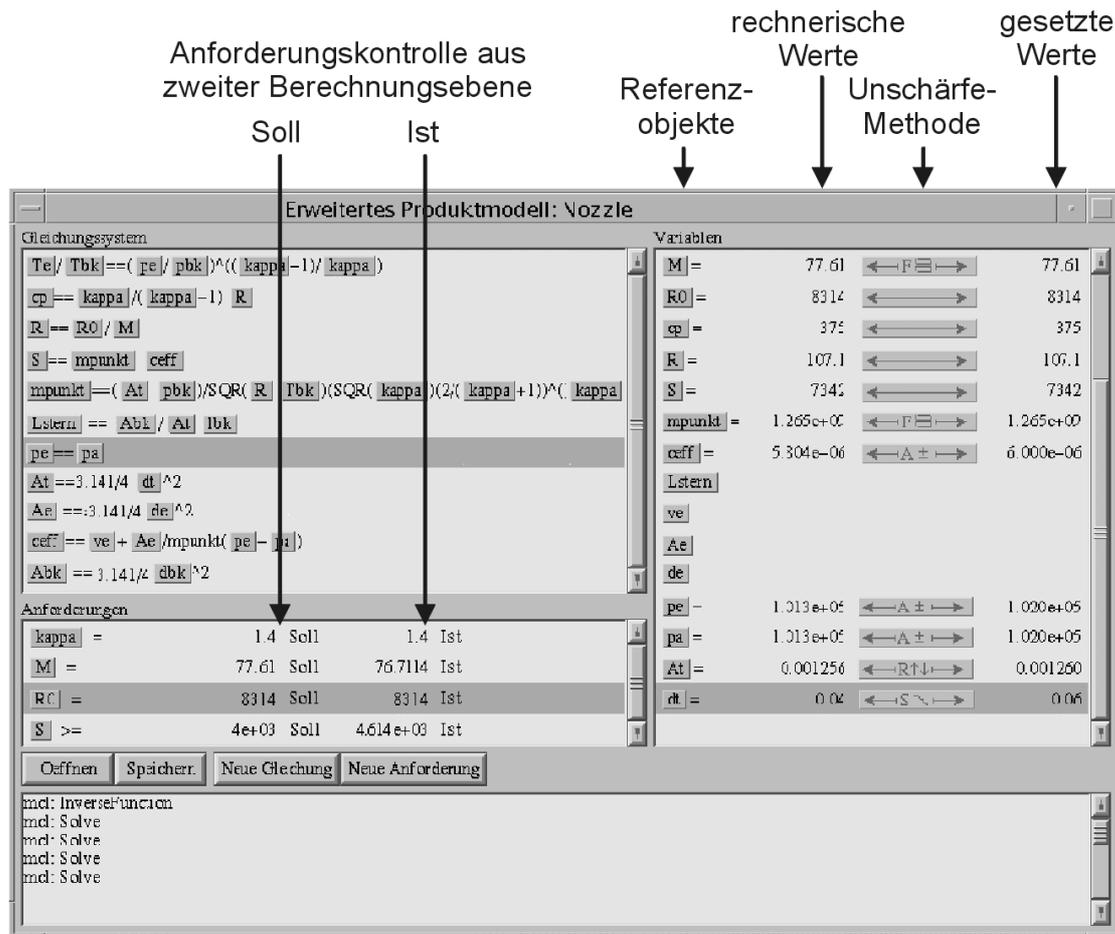
Wird ein Parameter im CAD-Modell verändert, muss eine für den Parameter gesetzte Unschärfe-Methode gelöscht werden. Der neue Wert fließt direkt in die Berechnung ein und veranlasst die Neuberechnung des gesamten Gleichungssystems. Die unscharfen Überträge anderer Parameter können aufrecht erhalten bleiben, da jeder weitere Datentransfer nach der Neuberechnung des Gleichungssystems in Richtung des CAD-Modells erfolgt, also in die Richtung, in die die Unschärfemethoden wirken.

5.3.6 Betrachtung des Gesamtsystems

Bei der ersten Erprobung der neu geschaffenen Dialoge konnte festgestellt werden, dass der Aufwand zur Abbildung der Unschärfen vertretbar ist. Die Darstellung von errechneten

tem und gesetztem Wert im Hauptfenster des Integrierten Konstruktionsarbeitsplatzes macht dem Konstrukteur/Entwickler bewusst, welche Mechanismen hinter seinen unscharfen Überträgen ins CAD-Modell stecken.

Das Hauptfenster zeigt sich mit den Ergänzungen in der Spalte der Referenzobjekte wie in Bild 5-16. Wird nun von den Referenzobjekten ins CAD-System gelinkt, so werden die Werte aus der rechten Spalte ins CAD-Modell übertragen. Die linke Spalte repräsentiert die Parameter der Berechnung.



079-1

Bild 5-16: Das Hauptfenster mit der Darstellung des unscharfen Übertrages ins CAD-System (vgl. Bild 5-4)

5.4 Evaluation des Gesamtkonzepts

5.4.1 Komplexität der beherrschbaren Modelle

Es wurden Erfahrungen mit Produktmodellen mit bis zu 40 Gleichungen und 70 Parametern gesammelt. Der Umgang mit diesen Systemen erwies sich bis zu dieser Zahl an Gleichungen als benutzerfreundlich und beherrschbar. Der Aufwand und die Anforderungen an die Sorgfalt machen die Handhabbarkeit von deutlich komplexeren Modellen fraglich. Voraussetzung ist stets eine saubere und einwandfreie Abbildung der Formeln und Parameter und die richtige Verknüpfung zum CAD-Modell. Vor allem die Bedeutung der einzelnen Parameter muss dem Konstrukteur/Entwickler stets bekannt sein. Blind irgendwelche Formeln aus einem Maschinenelementebuch abzuschreiben, ohne die Bedeutung der einzelnen Formelbuchstaben zu kennen, bringt den Konstrukteur/Entwickler und das System nicht weiter. Der Konstrukteur/Entwickler muss z. B. wissen: " p_{bk} ist der Druck in der Brennkammer", " d_t ist der Durchmesser des Düsenhalses, also die engste Stelle der Düse". Der Konstrukteur/Entwickler muss vermeiden, dass in verschiedenen Formeln identische Parameter unterschiedliche Bezeichnungen tragen. Beispiel: Eine Ausgangstemperatur wird in verschiedenen Formeln als T_0 oder T_1 bezeichnet, eine Endtemperatur als T_1 oder T_2 .

5.4.2 Grenzen des Systems bei mathematischen Sonderfällen

Die Integration von Mathematica[®] beschränkt sich in der vorliegenden Arbeit auf die symbolische Lösung von Gleichungen. Viele Gleichungssysteme lassen sich aber nur numerisch lösen. Beispiel: $x = e^x$. Darüber hinaus können viele mathematische Eventualitäten die Arbeit an dem System erschweren. Beispiel: Die Gleichungen $V = a b c$ und $z = a + b$ lassen sich als Gleichungspaar über das implementierte Freigabesystem nicht variieren, da bei Variation von a unter Freigabe von b sich zwar beide Gleichungen einzeln neu berechnen lassen, der Parameter b aber zwei verschiedene Ergebnisse erhält.

Der Fähigkeit zum Umgang mit solchen Sonderfällen, wie sich noch viele weitere konstruieren lassen, und eine numerische Gleichungslösung sind durch spezielle Methoden implementierbar, die Entwicklung solcher Spezialmethoden hätte gegen den Grundlagencharakter der Forschungsarbeit gesprochen und nur wenige zusätzliche Erkenntnisse bei hohem Aufwand geliefert. Die Ansätze für solche Methoden sind relativ einfach zu erdenken, wurden aber im Prototyp wegen anderer wichtiger Arbeitspakete nicht programmiert und erprobt.

5.4.3 Praxisrelevanz

5.4.3.1 Umfrage in der Industrie: Angewandte Berechnungsarten

Die vorliegende Arbeit setzt sich zum Ziel dieses beschriebene Vorgehen im Produktentwicklungsprozess durch eine Integration von Berechnung und Gestaltung zu unterstützen, mit dem Fokus auf typische Maschinenelementeberechnungen auf der Basis von technischen und physikalischen Formeln. Diese Art der Berechnungen macht in der allgemeinen Produktentwicklung den größten Anteil aus. Für eine Verifikation dieser Aussage wurde unter Entwicklungsingenieuren eine Umfrage durchgeführt, in der sie aufgefordert wurden zu quantifizieren, welche Arten von Berechnungen wie sehr bei ihrer täglichen Arbeit zum Einsatz kommen.

Bild 5-17 zeigt den Fragebogen, der in der stichprobenartigen Erhebung 33 Konstrukteuren/Entwicklern aus der Automobilindustrie, Automobil-Zulieferindustrie und aus der Investitionsgüterindustrie vorgelegt wurde⁴⁸. (Der vollständige Fragebogen mit Anschreiben befindet sich im Anhang dieser Arbeit).

		sehr oft	oft	gelegentlich	selten	sehr selten	nie
		1	2	3	4	5	6
Arten der Berechnung * **							
Addition, Subtraktion	Bsp. $a + b, a - b$	1	2	3	4	5	6
Multiplikation, Division	$a \cdot b, a / b$	1	2	3	4	5	6
Potenzrechnen	a^x, e^x, \dots	1	2	3	4	5	6
Trigonometrisches Rechnen	$\sin x, \cos x, \arctan x, \dots$	1	2	3	4	5	6
Logarithmisches Rechnen	$\log_a x, \ln x, \dots$	1	2	3	4	5	6
Matrizenrechnung	$\begin{vmatrix} a & c \\ b & d \end{vmatrix} \begin{vmatrix} e & g \\ f & h \end{vmatrix}$	1	2	3	4	5	6
Differenzieren	$f'(x) = d f(x) / dx$	1	2	3	4	5	6
Integration	$F(x) = \int f(x) dx$	1	2	3	4	5	6
lineare Differentialrechnung	$f(x)+f'(x)+f''(x) = a$	1	2	3	4	5	6
nichtlineare Differentialrechnung	$f(x) \cdot f'(x)^2 + x \cdot f''(x) + \dots = y$	1	2	3	4	5	6
Logik	$a \vee b \wedge c$	1	2	3	4	5	6
Statistik	$\Sigma(a^2b^2)$	1	2	3	4	5	6
Mengenlehre	$A \subset B$	1	2	3	4	5	6
Finite Elemente Berechnungen		1	2	3	4	5	6
Topologieoptimierung		1	2	3	4	5	6
		1	2	3	4	5	6

* Einige Arten von Berechnungen schließen andere Arten ein (beim Differenzieren wird auch z. B. addiert und multipliziert). Gemeint sind stets in sich abgeschlossene Operationen zur Erreichung eines Ergebnisses oder eines wesentlichen, die Konstruktion betreffenden Zwischenergebnisses.

** Die Zeitdauer der einzelnen abgeschlossenen Operationen ist unrelevant.

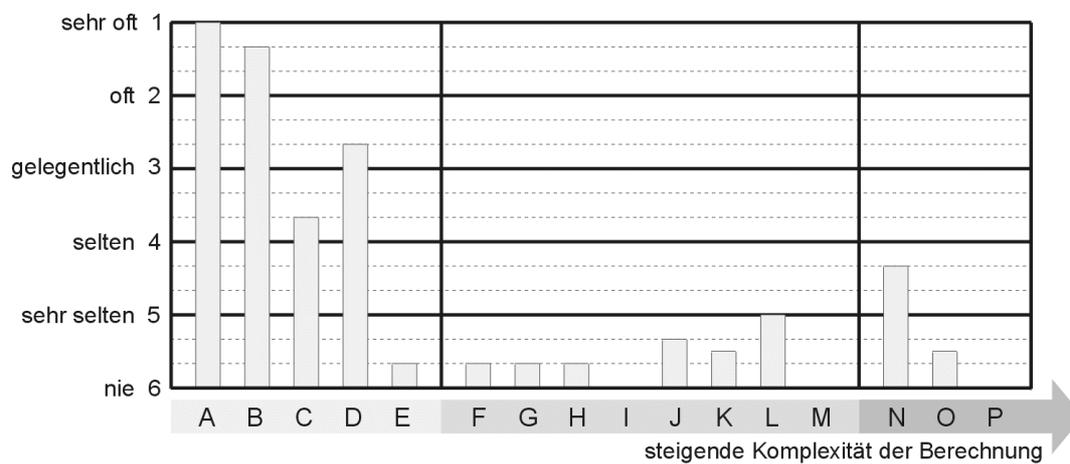
009-1

Bild 5-17: Fragebogen zu den angewendeten Arten der Berechnung (siehe auch im Anhang)

Das Ergebnis der Umfrage wird in Bild 5-18 dargestellt. Der Schwerpunkt der Tätigkeiten liegt demnach deutlich im Bereich der nicht-komplexen, einfachen maschinenelemente-

⁴⁸ Die Umfrage dokumentiert stichprobenartig ein Meinungsbild und stellt nicht den Anspruch einer wissenschaftlichen, repräsentativen Erhebung. Hier bietet sich der Ansatz eine repräsentative, empirische Untersuchung im Rahmen einer Grundlagenforschung durchzuführen.

typischen Berechnungsarten. Nur wenige beschäftigten sich sehr vereinzelt mit speziellen Berechnungen höherer Komplexität. Dies zeigt, dass das berechnungsmethodisch wenig komplexe und wenig spezialisierte Einsatzfeld des in dieser Arbeit vorgestellten Konzeptes der phasenübergreifenden (kontinuierlichen) bidirektionalen Integration von Berechnung und Gestaltung ins Hauptaufgabenfeld des industriellen Alltags fällt.



- A - Addition, Subtraktion
- B - Multiplikation, Division
- C - Potenzrechnen
- D - Trigonometrisches Rechnen
- E - Logarithmisches Rechnen

- F - Matrizenrechnung
- G - Differenzieren
- H - Integration
- I - lineare Differentialrechnung
- J - nichtlineare Differentialrechnung
- K - Logik
- L - Statistik
- M - Mengenlehre

- N - Finite Elemente Berechnungen
- O - Topologieoptimierung
- P - sonstiges

008-2

Bild 5-18: Ergebnis der Umfrage zu den angewendeten Berechnungsarten in konventionellen Produktentwicklungsprozessen

5.4.3.2 Umfrage in der Industrie: Hilfsmittel zur Durchführung von Berechnungen

Das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept bietet dem Konstrukteur/Entwickler die Verfügbarkeit eines mathematischen Solvers zur Auflösung von Gleichungssystemen an. Im zweiten Teil der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Umfrage unter 33 Konstrukteuren/Entwicklern wurde zusätzlich nach den angewendeten Berechnungshilfsmitteln im industriellen Alltag gefragt, um zu evaluieren, inwieweit der Zugang zu einem Solver als Innovation am Arbeitsplatz gewertet werden kann.

In der Umfrage wurde nach Berechnungshilfsmittel jedweder Art gefragt: Rechnerbasierte, aber auch papierbasierte, memobasierte sowie konstruktiv ausgebildete Hilfsmittel wie Rechenstäbe oder Bewegungsmodelle und Prototypen zur Berechnungsverifikation.

Der Fragebogen (siehe Bild 5-19 und im Anhang) listet in aufsteigender Folge zunehmend komplexere Berechnungshilfsmittel auf. Die befragten Konstrukteure/Entwickler sollten entscheiden, wie häufig sie die entsprechenden Hilfsmittel einsetzen – ähnlich dem Schulnotensystem von 1 = 'sehr oft' über 'oft', 'gelegentlich', 'selten' bis hin zu 6 = nie.

		sehr oft	oft	gelegentlich	selten	sehr selten	nie
		1	2	3	4	5	6
Hilfsmittel zur Berechnung							
Schätzendes Kopfrechnen		1	2	3	4	5	6
Exaktes Kopfrechnen		1	2	3	4	5	6
Rechnen mit den Fingern		1	2	3	4	5	6
Mechanische Hilfsmittel (z. B. Rechenschieber, Abakus etc.)		1	2	3	4	5	6
Blatt Papier und Stift		1	2	3	4	5	6
Tabellenbücher		1	2	3	4	5	6
Taschenrechner		1	2	3	4	5	6
Tabellenkalkulation (z. B. Excel) - <i>leeres</i> Blatt		1	2	3	4	5	6
Tabellenkalkulation (z. B. Excel) - <i>fertiges, selbst angelegtes</i> Formular		1	2	3	4	5	6
Tabellenkalkulation (z. B. Excel) - <i>fertiges, fremd angelegtes</i> Formular		1	2	3	4	5	6
CAD-System (Parametrik)		1	2	3	4	5	6
Mathem. Solver (z. B. Mathematica, Maple) - <i>ohne</i> angelegte Berechnung		1	2	3	4	5	6
Mathem. Solver (z. B. Mathematica, Maple) - <i>mit selbst</i> angelegter Berechnung		1	2	3	4	5	6
Mathem. Solver (z. B. Mathematica, Maple) - <i>mit fremd</i> angelegter Berechnung		1	2	3	4	5	6
Selbst programmierte Prozeduren <i>ohne</i> Einsatz von mathem. Programmbiblioth.		1	2	3	4	5	6
Selbst programmierte Prozeduren <i>mit</i> Einsatz von mathem. Programmbiblioth.		1	2	3	4	5	6
Spez. Berechnungssoftware (FEM, Topologieoptimierer, Mehrgelenk-Getriebe simul. etc.)		1	2	3	4	5	6
Mechan. Hilfsmittel (Geometriemodelle für Mehrgelenkgetriebe, Funktionsprototypen. etc.)		1	2	3	4	5	6
		1	2	3	4	5	6

007-1

Bild 5-19: Fragebogen Hilfsmittel zur Berechnung (siehe auch im Anhang)

Viele in sich geschlossene Berechnungen bei der alltäglichen Konstruktionsarbeit eines Entwicklers/Konstrukteurs sind von geringer Komplexität und werden mit entsprechend einfachen Hilfsmitteln gelöst. Bei komplexeren mathematischen Zusammenhängen werden oft Tabellenkalkulationen (zum Beispiel Excel[®]) eingesetzt. Allgemein kann mit diesem Rechnerwerkzeug sehr gut umgegangen werden, weshalb es oft auch für Aufgaben eingesetzt wird, für die es nur unter erhöhtem Aufwand und damit nur bedingt geeignet ist.

Berechnungsspezialisten setzen für abgegrenzte Berechnungsfragen komplexe Berechnungshilfsmittel wie FEM und Topologieoptimierung ein, benutzen darüber hinaus aber ebenso die einfachen Hilfsmittel für Neben- oder Zwischenrechnungen.

Auffällig zeigte sich in der Umfrage, dass Berechnungshilfsmittel aus dem Komplexitätsbereich zwischen Tabellenkalkulation und hochspezialisierter Software wie FEM und Topologieoptimierung im industriellen Alltag keinen beziehungsweise wenig Einsatz finden. Mathematische Solver mit ihren gegenüber Tabellenkalkulationen extrem überlegenen mathematischen Fähigkeiten wurden innerhalb der Umfrage kein einziges Mal benannt.

Eine nähere Recherche ergab, dass im Falle eines Automobilzulieferers eine entsprechende Software zwar durchaus dem geeigneten Konstrukteur/Entwickler ohne überdurchschnittlichen Aufwand zur Verfügung hätte gestellt werden können, tatsächlich aber an den einzelnen Arbeitsplätzen gar nicht installiert und somit zugriffsbereit war.

Im Umfrageergebnis (siehe Bild 5-20) lässt sich auch ablesen, dass Papier und Bleistift neben dem Taschenrechner das wichtigste und am häufigsten eingesetzte Hilfsmittel für den Berechnungs- und Konstruktionsprozess darstellen. Dies stützt die in Absatz 3.1.1 beschriebene Beobachtung, dass das papiergebundene Büro und damit der in vielen Bereichen papiergebundene Entwicklungsprozess auf Grund der natürlichen Arbeits- und Denkweise des Menschen und mangels ergonomischer Rechner/Menschschnittstellen noch auf unbestimmte Zeit Bestand haben wird.

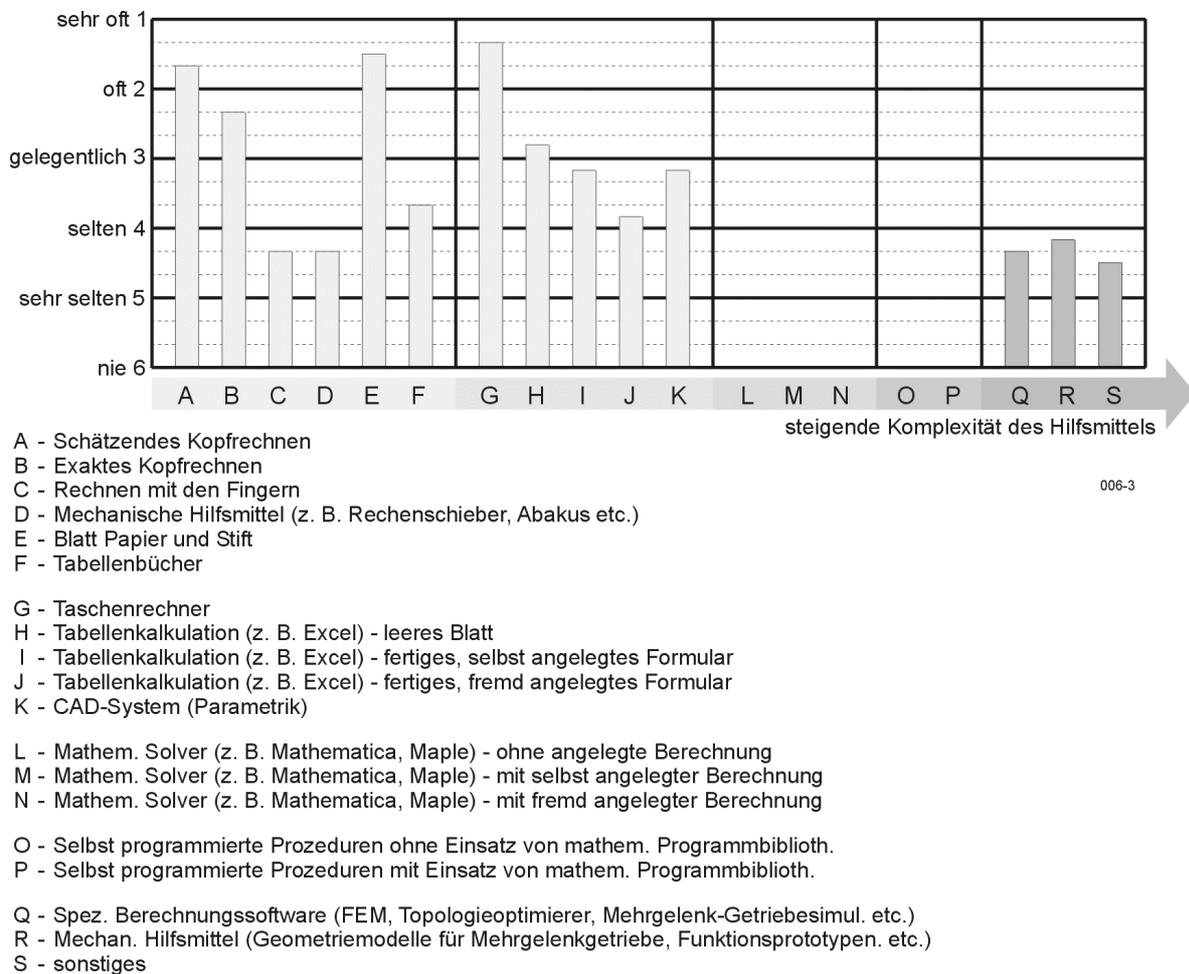


Bild 5-20: Ergebnis der Umfrage zu den eingesetzten Berechnungshilfsmitteln in konventionellen Produktentwicklungsprozessen

5.4.4 Vergleich der kontinuierlichen und der sequenziellen Integration

Eine kontinuierliche bidirektionale Integration von Berechnung und Gestaltung erfordert einen hohen Aufwand bei der Modellbildung. Dem gegenüber steht als Nutzen die ganzheitliche Modellverifikation durch das System, die jede Parametervariation in ihren Auswirkungen auf alle abhängigen Parameter darstellt.

Die kontinuierliche bidirektionale Integration, wie sie in der vorliegenden Arbeit umgesetzt wurde, fordert ein hochintegriertes redundanzfreies System, welches Berechnung und Gestaltung als Einheit behandelt. Das komplexe Produktmodell ist hochreaktiv, da jede Parametervariation ganzheitlich und simultan Einfluss auf alle geometrischen und physikalischen Eigenschaften nimmt. Die Gleichbehandlung von geometrischen und nichtgeometrischen Parametern öffnet dem Konstrukteur/Entwickler eine ganzheitliche Sicht auf das Modell. Auch bei der Abbildung einfacher Formelberechnungen entstehen hochkomplexe und hochreaktive Produktmodelle. Mechanismen zu deren Handhabbarkeit und Optimierung stellen die besondere Herausforderung dieser Integrationsform dar.

Die sequenzielle bidirektionale Integration setzt den Schwerpunkt auf die Schnittstellen und Prozessoren, die für den Datenaustausch notwendig sind. Unter Verwendung eines einheitlichen, im Idealfall systemneutralen Produktmodells lassen sich bestehende Berechnungs- und Gestaltungssysteme beliebiger Komplexität gut miteinander verbinden. Der Datenaustausch und Abgleich mit dem Produktmodell erfolgt erst auf Wunsch des Anwenders und führt zu einer intentionalen Trägheit im System, die eine Überschaubarkeit der Aktionen ermöglicht.

Bei der Arbeit mit dem System zeigt sich, dass der Aufwand für die Modellbildung bei einer phasenübergreifenden (kontinuierlichen) bidirektionalen Integration von Berechnung und Gestaltung erheblich ist. Die Komplexität der entstehenden Produktmodelle ist hoch.

Die folgende Tabelle (Bild 5-21) gibt einen vergleichenden Überblick über die wesentlichen Eigenschaften der beiden beschriebenen Integrationsformen.

080-2	kontinuierliche bidirektionale Integration	sequenzielle bidirektionale Integration
Schwerpunkt der Integration	Produktmodell Konzentration auf ein integriertes Produktmodell, in dem geometrische und nichtgeometrische Parameter gemeinsam und redundanzfrei verwaltet werden und über integriert abgebildete Berechnungsvorschriften ganzheitlich aufeinander Einfluss nehmen.	Schnittstelle Konzentration auf den Datentransfer und die Schnittstellen zwischen verschiedenen Applikationen. Daran angeknüpft ist ein Produktmodell, welches als zentraler Datenspeicher fungiert und über PDM gesteuert wird.
Ganzheitlichkeit	kontinuierlich Die Ganzheitlichkeit der Betrachtung bleibt bei jedem Arbeitsschritt im integrierten Modell erhalten. Jede Parametervariation zeigt unmittelbar seine Auswirkung auf das gesamte Modell. Es existiert nur eine Sicht auf das Gesamtmodell.	sequenziell Die Ganzheitlichkeit der Betrachtung obliegt dem Konstrukteur, der in iterativen Schritten Gestalt und Berechnung aufeinander abstimmt und wiederholt Auslegungs- und Nachweisrechnungen initiiert. Der Konstrukteur arbeitet getrennt am CAD-Modell und an den Berechnungsmodellen.
Datenfluss	bidirektional Jede Variation sowohl auf Seite der Geometrieparameter als auch auf Seite der nichtgeometrischen Parameter zieht eine vollständige Regenerierung des integrierten Gesamtmodells nach sich. Daten fließen in beide Richtungen bis der Vorgang abgeschlossen ist.	unidirektional Auf Initiierung des Konstrukteurs findet ein unidirektionaler Übertrag von rein geometrischen Parametern statt, die entweder als Eingabedaten in die Berechnung fließen oder als Ergebnisse der Berechnung in das CAD-Modell. Eine Rekursion findet im Augenblick des Datenaustausches nicht statt, sondern muss durch Neuaufgabe der Berechnung initiiert werden.
Kopplung der Systeme	fest Das Berechnungswerkzeug wird zum integralen Bestandteil des Systems.	lose Durch geeignete Schnittstellendefinition können beliebige Berechnungssysteme eingebunden werden.
Komplexität des Produktmodells	sehr hoch Der Aufbau des integrierten Produktmodells kann in beliebiger Detaillierungstiefe vorgenommen werden. Die Zahl der Abhängigkeiten steigt mit jedem in die Berechnung einfließenden Parameter exponentiell.	konventionell Es können konventionelle CAD-Modelle und konventionelle Berechnungsprogramme verwendet werden. Die Modelle bleiben eigenständig und müssen nur über Schnittstellen zugänglich gemacht werden.
Verhalten des Systems bei der Werteänderung	hochreaktiv Eine kleine Veränderung eines einzelnen Parameters kann sich durch das gesamte Modell hindurchziehen, indem Parameter beeinflusst werden, von denen wiederum weitere Parameter abhängen. Selbst Veränderungen in der zehnten Nachkommastelle können sich durch das ganze Modell ziehen. (siehe: Komplexität des Produktmodells) Das Modell muss in seiner Gesamtheit zu jedem Zeitpunkt widerspruchsfrei sein.	träge Veränderungen in der Geometrie oder in der Berechnung fließen nur bei Initialisierung des Datentransfers in die anderen Teilmodelle. Eine rekursive Beeinflussung kann nur durch wiederholte Anwendung der Berechnungsschritte erreicht werden. Das System reagiert damit träge auf Veränderungen. Der Konstrukteur führt das System in einem zunehmend ausgeglichenen Zustand und kann entscheiden, wann eine ausreichende Übereinstimmung von physikalischen Eigenschaften und Gestalt erreicht wurde.
mögliche Komplexität der Berechnungen	sehr niedrig Für die Auflösung aller Parameterbeziehungen in beliebige Richtung ist die Anwendung einfacher Gleichungsmathematik Voraussetzung. Numerisch bidirektionale Berechnungen sind nur in Sonderfällen denkbar und sinnvoll einsetzbar.	beliebig hoch Die Komplexität der durchgeführten Berechnungen obliegt der Berechnungssoftware und ist – losgelöst von der Integrationsproblematik – beliebig. Berührungspunkt zur Gestaltung sind nur die geometrischen Eingabe- und Ergebnisdatensätze.

Bild 5-21: Vergleich der Integrationsformen (AMFT ET. AL. 2001)

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zum Abschluss der Arbeit sollen in diesem Kapitel noch einmal die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst werden. Daran anschließend wird ein Ausblick auf weitere mögliche Forschungsthemen gegeben.

6.1 Zusammenfassung

Die Arbeit befasst sich in ihrem ersten Teil mit der Erforschung der Grundlagen für die Integration von Gestaltung und Berechnung. Es wird ausführlich dargestellt, wie bei der Ablösung des Datenübertrages von Hand (zwischen Berechnung und Gestaltung) dem Prozess die primäre Intelligenz des Konstrukteurs/Entwicklers entzogen wird. Als logische Folge können in Ermangelung der Existenz primärer künstlicher Intelligenz ausschließlich sekundäre Prozesse automatisiert werden. Das bedeutet entweder eine Festlegung auf objektgebundene Systeme, deren automatisierte Algorithmen Wiederholvorgänge abbilden, oder als Alternative Systeme, die für interaktiv steuernde primäre Intelligenz (des systembedienenden Konstrukteurs/Entwicklers) geöffnet sind.

Unterschieden wird zwischen kontinuierlichen und sequenziellen Integrationsansätzen. Die sequenziellen Ansätze trennen die Gestalt und die angewendeten Berechnungsalgorithmen nach dem Datenübertrag und bieten somit dem Konstrukteur/Entwickler den notwendigen Freiraum für die fertigungsgerechte Ausgestaltung des Produktes. Bei der kontinuierlichen Integration bleiben die Berechnungsalgorithmen wirksam und erschweren den freien Zugriff des Konstrukteurs/Entwicklers auf die Parameter des Produktmodells und damit den Zugang von steuernder primärer Intelligenz.

Die stoffliche Umsetzung einer Geometrie führt automatisch zu einer vollständigen Physik, also zu einem existierenden und mit seiner Umwelt wechselwirkenden Produkt. Die physikalische Wechselwirkung beschreibt dieses existierende Produkt vollständig, das heißt auch seine Geometrie. In der Schöpfung sind Physik und stoffliche Geometrie untrennbar miteinander verknüpft und demnach vollständig gleichzusetzen. Der Versuch beide Seiten in Modellen abzubilden führt demnach zu Redundanzen. Die Unvollständigkeit der Modellbildung auf beiden Seiten schließt eine bidirektionale Verbindung beider Seiten integrationsphilosophisch durch unabgleichbare Redundanzen aus. Jeder Versuch einer bidirektionalen kontinuierlichen Integration muss sich daher – im Bewusstsein von Unvollkommenheit der Modellbildung und damit unscharfer Redundanz – im Bereich von Teilbe-

trachtungen bewegen. Die primäre Intelligenz des Konstrukteurs/Entwicklers bleibt für den Prozess unabdingbar.

Die Arbeit stellt dar, dass die Integration von Gestaltung und Berechnung ein sehr komplexes Themengebiet ist. Der Fokus muss über die reine Betrachtung der Problematik rechen-technischen Datenübertrages hinaus erweitert werden. Sind Verbindungen zwischen Berechnung und Gestaltungen etabliert, ist der reine Datenfluss informationstechnische Standardaufgabe. Die korrekte Verbindung der Teilmodelle bleibt primäre Intelligenzhandlung ebenso wie alle topologischen, das heißt gestaltändernden oder generierenden, Eingriffe, die der Konstruktionskunst des Konstrukteurs/Entwicklers bedürfen.

Wichtige Aufgabe von integrierenden Systemen ist die Unterstützung der ganzheitlichen Prozessführung unter der Aufsicht und dem steten vollständigen Überblick des Konstrukteurs/Entwicklers. Systeme die nach dem Prinzip "deus ex machina" dem Konstrukteur/Entwickler den Überblick mehr verwehren als öffnen, können den anspruchsvollen und verantwortungsvollen Aufgaben der Produktentwicklung nicht dienen.

Der zweite Teil der Arbeit widmet sich der Konzeption und Umsetzung eines Systems zur phasenübergreifenden (kontinuierlichen) Integration von Berechnung und Gestaltung. Es wird ein System vorgestellt, das Berechnung und Gestalt in einem integrierten Produktmodell kontinuierlich miteinander verknüpft und zu jedem Zeitpunkt bidirektional wirksam ablegt. Der Konstrukteur/Entwickler kann auf jeden Parameter, ob auf der Berechnungsseite oder im CAD-Modell frei zugreifen und die Veränderungen des Gesamtmodells steuern und beobachten. Es entsteht ein hochreaktives Produktmodell, das auf kleine Veränderungen eines beliebigen Parameters empfindlich mit allen abhängigen Parametern reagiert. Die Entwicklung fertigungsgerechter Produktmodelle, in denen Parameter abschließend nach fertigungsgerechten (nicht unmittelbar physikalischen) Maßgaben aufeinander abgestimmt werden, ist unter direkter Einbindung der Berechnungen im Modell nicht möglich. Aus diesem Grund wurden die Vorgänge beim Ergebnisübertrag von Hand sowie bei der fertigungsgerechten Ausgestaltung durch den Konstrukteur/Entwickler in entsprechenden Prozeduren nachgebildet.

Das entstandene System bietet durch seine allgemeine Einsetzbarkeit eine Perspektive für eine allgemein einsetzbare hilfreiche Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses. De facto handelt es sich um die Verfügbarmachung des mathematischen Solvers Mathematica[®] am parametrischen CAD-Arbeitsplatz. Die prozessuale Aufwandserhöhung ist jedoch nicht zu unterschätzen und wird bis auf weiteres einer Öffnung für den allgemeinen Einsatz im Weg stehen.

6.2 Ausblick

Die Vision am Eingang dieser Arbeit zeichnet eine Sciencefiction von einem Dialog zwischen dem steuernden Menschen und dem intellektuell gleichgestellten aber ungleich leistungsfähigeren Rechner. Obwohl die Arbeit deutlich erarbeitet, dass diese Vision bis auf weiteres unerreichbar bleibt, bringt sie dennoch den Ansatz der phasenübergreifenden (kontinuierlichen) Integration von Gestaltung und Berechnung auf den Weg. Auch wenn der gewählte Ansatz der Integration eines mathematischen Gleichungslösers in den Kinderschuh steht, so kann er für die großen Systemhäuser Anregung sein über eine professionelle Umsetzung nachzudenken. Die Verfügbarkeit eines mathematischen Gleichungslösers am Arbeitsplatz des Konstrukteurs/Entwicklers in Verbindung mit den parametrischen Fähigkeiten des CAD ist dann ein wesentlicher Fortschritt für den Produktentwicklungsprozess.

7 Literaturverzeichnis

- ABUOSBA, M.:
Verarbeitung von unsicherem Wissen in CAD-Prozessen.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik-Berlin, Band 135)
Zugl. Berlin: TU, Diss. 1993.
- AMBROSY, S.:
Methoden und Werkzeuge für die integrierte Produktentwicklung.
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 26)
Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- AMFT, M.; LINDEMANN, U.:
Rechnergestützte Integration von Gestaltung und Berechnung im Konstruktionsprozess.
Konstruktion 52 (2000) 10, S. 78-82.
- AMFT, M.; DYLA, A.; LINDEMANN, U.; B.-R. HÖHN, :
Bidirektionale Integration von Berechnung und Gestaltung.
Konstruktion 53 (2001) 10, S. 77-81.
- ANDERL, R.:
CAD-Schnittstellen, Methoden und Werkzeuge zur CA-Integration.
München: Hanser 1993.
- ANDERL, R., TRIPPNER, D.:
STEP, Standard for the Exchange of Produkt Model Data, Eine Einführung in die Entwicklung, Implementierung und industrielle Nutzung der Normenreihe ISO 10303 (STEP).
Stuttgart: Teubner 2000.
- ANDRZEJ T.; FLORIAN A.:
Architekturkonzepte integrierter CAx-Systeme.
Proceedings of the International Conference on Computer Integrated Manufacturing (CIM '96),
Zakopane, Poland, May 14 - 17, 1996, Vol III, pp.183-190.
- ARKANI-HAMED, N.; DIMOPOULOS, S.; DVALI, G.:
Die unsichtbaren Dimensionen des Universums.
Spektrum der Wissenschaft (2000) 10, S. 44 ff.
- ASBECK, J.:
Automatisierter Entwurf mechanisch optimaler Bauteile durch Integration von CAD und Strukturoptimierung.
Aachen: Shaker 1997.
Zugl. Aachen: TH, Diss. 1996.
- ABMANN, G.:
Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 37)
Zugl. München: TU, Diss. 2000.

- BALACHANDRAN, M.:
Knowledge-Based Optimum Design.
Topics in Engineering Vol. 10.
Southampton: Computational Mechanics Publications 1993.
- BEHR, B.:
Werkzeuge für die rechnerunterstützte Konstruktion auf der Basis autonomer Wissensdarstellungsformen.
Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.
Aachen: Shaker 1996.
Zugl. Aachen: TH, Diss. 1995.
- BEITZ, W.; LUCZAK, H.; MÜLLER, T.; SPRINGER, J.; LANGNER, T; RÜCKERT, K.:
Ergonomische und konstruktionsmethodische Gestaltung rechnerunterstützter Konstruktionstätigkeiten.
In: Mackensen, R. (Hrsg.): Konstruktionshandeln – Nicht-technische Determinanten des Konstruierens bei zunehmendem CAD-Einsatz.
München: Hanser 1997.
- BICHLMAIER, C.:
Methoden zu Gestaltung integrierter Entwicklungsprozesse.
München: Utz 2000.
Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- BISWAS, A.:
Durchgängige Rechnerunterstützung für die Produktentwicklung umgeformter gewebeverstärkter Thermoplastbauteile.
Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV).
Aachen: Augustinus Buchhandlung 1996.
Zugl. Aachen: TH, Diss. 1996.
- BOSHOFF, F.:
Integration von FEM-Berechnungen in den CAD-gestützten Konstruktionsprozess durch bidirektionalen automatischen Geometrieaustausch.
Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie.
Aachen: Shaker 1997.
Zugl. Aachen: TH, Diss. 1997.
- BÖWER, G.:
Untersuchung der konzeptionellen Erweiterungsmöglichkeiten von CAD-Systemen am Beispiel der rechnerunterstützten Bemaßungsanalyse und Toleranzberechnung.
Institut für Konstruktionslehre, Bericht Nr. 42, 1993.
Braunschweig: TU, Diss. 1993.
- BREIING, A.; KNOSALA, R.:
Bewerten technischer Systeme, Theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen.
Berlin: Springer 1997.
- BREITFELD, T.,:
Entwicklung von Expertensystemen zur Unterstützung konstruktionsbegleitender Finite-Elemente Berechnungen.
Stuttgart: Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen 1999.
Zugl. Stuttgart: Univ., Diss. 1999.

- BREUER, R.; KÖNNEKER, C.:
Es geht ans Eingemachte. Interview zum Thema Hirn- und KI-Forschung mit Gerhard Roth (Hirnforscher) und Gerhard Vollmer (Wissenschaftsphilosoph).
Spektrum der Wissenschaft (2000) 10, S. 72-74.
- BÜHLMANN, T.:
Parametrik in der Produktdatenmodellierung.
Zürich: ETH, Diss. 1996.
- CARL, A.:
Konstruktive Berechnungsmodelle auf Basis neuronaler Netze.
Fachbereich 11 - Maschinenbau und Produktionstechnik, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb und Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik.
Berlin: IPK 2000.
Zugl. Berlin: TU, Diss. 2000.
- CLICKFISH (HRSG.):
[entnommen am 09.01.2002, URL: <http://www.clickfish.com/clickfish/guidearea/computertechnik/programmierung/kintelligenz/wasist.html>].
- DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT:
Antrag auf Einrichtung eines neuen DFG Schwerpunktprogramms SPP 732, "Innovative rechnerunterstützte Konstruktionsprozesse: Integration von Gestaltung und Berechnung".
Fachreferat II D 1.
Bonn: DFG 1995.
- DOBLIES, M.:
Globales Produktdatenmanagement zur Verbesserung der Produktentwicklung.
Berlin: Fraunhofer-IPK 1998. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin.
Zugl. Berlin: TU, Diss. 1998.
- DÖRNER, D.:
Problemlösen als Informationsverarbeitung.
2. Aufl. Stuttgart: Kohlhammer 1979.
- DYLA, A; HÖHN, B.-R.; STEINGRÖVER, K.:
Integrierte Entwicklung von Getrieben: Praxisanwendungen und Visionen".
Proceedings VDI Tagung "Produkte entwickeln im realen Umfeld - was bringen Werkzeuge wie 3D-CAD/CAM, EDM/PDM und Virtualisierung?" in München (2000).
Düsseldorf: VDI 2000, S. 115-135. (VDI-Berichte Nr. 1569)
- DYLLA, N.:
Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren
München: Hanser 1991.
Zugl. München: TU, Diss. 1991.
- EHRENSPIEL, K.:
Integrierte Produktentwicklung, Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion.
München: Hanser 1995.
- FELDHUSEN, J.:
Systemkonzept für die durchgängige und flexible Rechnerunterstützung des Konstruktionsprozesses.
Institut für Maschinenkonstruktion - Konstruktionstechnik, Schriftenreihe Konstruktionstechnik Nr. 16.
Berlin: TU, Diss. 1989.

- FRANKENBERGER, E.:
Arbeitsteilige Produktentwicklung.
Düsseldorf: VDI 1997. Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 1 Nr. 291.
Zugl. Darmstadt: TU, Diss. 1997.
- FÜHLES-UBACH, S.:
Analysen zur Unschärfe in Datenbank- Retrievalsystemen – unter besonderer Berücksichtigung der Redundanz.
Philosophische Fakultät I der Humboldt-Universität zu Berlin.
Berlin: Univ., Diss. 1997.
- FUHRBACH, U.:
Innovation Aktuell - KI
[entnommen am 01.11.2001, URL: <http://www.innovation-aktuell.de/fb990422.htm>].
- GADE, D.:
Anwendung der Finite-Elemente-Methode zur integrativen Berechnung von Mikrostrukturinformationen in der Umformtechnik.
Aachen: Shaker 1999.
Zugl. Aachen: TH, Diss. 1999.
- GEN, M.; CHENG, R.:
Genetic Algorithms and Engineering Design.
Wiley Series in Engineering Design and Automation.
New York: John Wiley & Sons, Inc. 1997.
- GEOMATE®:
Produktbeschreibung.
[entnommen am 01.08.2001, URL: <http://www.www-modellierung.de/>]
- GRABOWSKI, H.; ANDERL, R.; POLLY, A.:
Integriertes Produktmodell.
Berlin: Beuth 1993.
- GÜNTHER, J.:
Individuelle Einflüsse auf den Konstruktionsprozess.
Aachen: Shaker 1998.
- HADERER, G.:
Integration von Gestaltung und Berechnung mittels CORBA.
Fachbereich 11 - Maschinenbau und Produktionstechnik.
Berlin: TU, Diss. 2000.
- HAGEN, P.; VEERKAMP, P.:
Intelligent CAD Systems III, Practical Experience and Evaluation.
Berlin: Springer 1991.
- HAMMEL, J.; STRAUB, A.:
CAD-Baustein einer integrierten Lösung.
Heidelberg: Hüthig 1988.
- HEIDEN, T.:
Rechnerunterstützte Auswahl, Konfiguration und Berechnung von Antriebselementen mit einem wissensbasierten CAD-System am Beispiel von drehstarrten biegeelastischen Kupplungen.
Düsseldorf: VDI 1992. (Fortschritt- Berichte VDI Reihe 20 Nr. 70)
Zugl. Berlin: TU, Diss. 1992.

- HESSE, M.:
Beitrag zur Koppelung von CAD-Systemen mit Berechnungsprogrammen.
Institut für Fördertechnik, Getriebetechnik und Baumaschinen.
Stuttgart: Univ., Diss. 1996.
- HÖHN, B.-R.; STEINGRÖVER, K; DYLA, A.:
Rechnerbasierte Produktentwicklung – Das systemneutrale Produktmodell als Ergebnis von innovativem CAE.
Konstruktion 52 (2000) 1/2, S. 36-40.
- HÖHN, B.-R.; STEINGRÖVER, K; DYLA, A.:
Rechnerunterstützte Getriebeentwicklung.
Konstruktion 51 (1999) 1/2, S. 17-203.
- HORN, T.:
Entwicklung eines Verfahrens zur interaktiven Definition und Erkennung benutzerdefinierter Features.
Aachen: Shaker, 1998.
Zugl. Essen: Univ., Diss. 1997.
- HOSCHEK, J.; DANKWORT, W. (HRSG.):
Parametric and Variational Design.
Stuttgart: Teubner 1994.
- HUMPERT, A.:
Methodische Anforderungsverarbeitung auf Basis eines objektorientierten Anforderungsmodells.
Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe, 1995.
Zugl. Paderborn: Univ., Diss. 1995.
- KASPER, K.:
Spracherkennung mit rekurrenten neuronalen Netzwerken.
Aachen: Shaker 2000.
- KICKERMANN, H.:
Rechnerunterstützte Verarbeitung von Anforderungen im methodischen Konstruktionsprozess.
Institut für Konstruktionslehre, Bericht Nr. 44, 1995.
Braunschweig: TU, Diss. 1995.
- KLAWONN, F.:
Modellierung von Unsicherheit aus der Sicht der Logik.
Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund.
Braunschweig: TU, Diss. 1992.
- KLEIN, B.: FEM:
Grundlagen und Anwendung der Finite-Elemente-Methode.
Wiesbaden: Vieweg 1990.
- KOLLER, F.:
CAD-gestützte Toleranzrechnung basierend auf der Auswertung von Kontaktkräften in einem Mehrkörpersimulationsmodell.
Düsseldorf: VDI 1996. (Fortschritt- Berichte VDI Reihe 20 Nr. 219)
Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- KOLLER, R.:
Expertensysteme in der Konstruktion.
Konstruktion 43 (1991), S. 339-343.

- KOPSCH, J.:
Unterstützung der Konstruktionstätigkeiten mit einem aktiven Semantischen Netz.
Institut für Maschinenelemente, Fakultät für Konstruktions- und Fertigungstechnik.
Stuttgart: Univ., Diss. 1998.
- KUNTZ, P.:
Rechnerunterstützte Synthese und Variantenkonstruktion von Planetengetrieben.
Institut für Maschinenelemente und Fördertechnik, Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik.
Braunschweig: TU, Diss. 1996.
- KURZAWA, T.:
Gestaltung und Berechnung von nichtschaltbaren reibschlüssigen Flanschkupplungen.
Berlin: Fachbereich Konstruktion und Fertigung der TU Berlin 1993.
Zugl. Berlin: TU, Diss. 1993.
- KURZWEIL, R.:
Homo s@piens, Leben im 21. Jahrhundert, Was bleibt vom Menschen?
Köln: Kiepenheuer & Witsch 1999. – Roman
- KUTTERER, H.:
Intervallarithmetische Behandlung endlicher Unschärfen linearer Ausgleichsmodelle.
München: Bayrische Akademie der Wissenschaften / Beck 1994.
Zugl. Karlsruhe: TH, Diss. 1994.
- LAWRENCE, A.:
Verarbeitung unsicherer Information im Konstruktionsprozess - dargestellt am Beispiel der Lösung von Bewegungsaufgaben.
Institut für Konstruktions- und Füge­technik, Fachgebiet Maschinenelemente und Getriebetechnik.
Hamburg: Univ. der Bundeswehr, Diss. 1996.
- LINDEMANN, U.:
Methoden der Produktentwicklung Teil IV+V.
München: TU, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Umdruck zur Vorlesung Methoden der Produktentwicklung 1999.
- LINDEMANN, U.; AMBROSY, S.; ABMANN, G.:
Generische Produktmodellierung zur Adaption von Anwendungssystemen.
In: Informationsverarbeitung in der Konstruktion 96, München.
Düsseldorf: VDI 1996, S. 457-468. (VDI-Berichte 1289)
- LINDEMANN, U.; AMFT, M. (1997a):
Rechnergestützte Methoden zur bidirektionalen Integration von Berechnung und Gestaltung im Konstruktionsprozess.
DFG Forschungsantrag Li 699/3-2.
München: Lehrstuhl für Produktentwicklung 1997.
- LINDEMANN, U.; AMFT, M. (1997b):
Nachtrag zu DFG Fortsetzungsantrag Li 699/3-2 vom 28.01.1997.
München: Lehrstuhl für Produktentwicklung 1997.
- LINDEMANN, U.; AMFT, M. (1997c):
Bidirektionale Integration von Berechnung und Gestaltung im Konstruktionsprozess: Unschärfen in der Schnittstelle.
DFG Zwischenbericht Li 699/3-1.
München: Lehrstuhl für Produktentwicklung 1997.

- LINDEMANN, U.; AMFT, M. (1998a):
Rechnergestützte Methoden zur bidirektionalen Integration von Berechnung und Gestaltung im Konstruktionsprozess.
DFG Forschungsantrag Li 699/3-3.
München: Lehrstuhl für Produktentwicklung 1998.
- LINDEMANN, U.; AMFT, M. (1998b):
Bidirektionale Integration von Berechnung und Gestaltung im Konstruktionsprozess: Unschärfen in der Schnittstelle.
DFG Zwischenbericht Li 699/3-2.
München: Lehrstuhl für Produktentwicklung 1998.
- LINDEMANN, U.; AMFT, M. (1999a):
Bidirektionale Integration von Berechnung und Gestaltung im Konstruktionsprozess: Unschärfen in der Schnittstelle.
DFG Forschungsantrag Li 699/8-1.
München: Lehrstuhl für Produktentwicklung 1999.
- LINDEMANN, U.; AMFT, M. (1999b):
Nachtrag DFG Forschungsantrag Li 699/8-1 vom 19.01.1999.
München: Lehrstuhl für Produktentwicklung 1999.
- LINDEMANN, U.; AMFT, M. (1999c):
Bidirektionale Integration von Berechnung und Gestaltung im Konstruktionsprozess: Unschärfen in der Schnittstelle.
DFG Abschlussbericht Li 699/3.
München: Lehrstuhl für Produktentwicklung 1999.
- LINDEMANN, U.; AMFT, M. (2000a):
Bidirektionale Integration von Berechnung und Gestaltung im Konstruktionsprozess: Unschärfen in der Schnittstelle.
DFG Forschungsantrag Li 699/8-2.
München: Lehrstuhl für Produktentwicklung 2000.
- LINDEMANN, U.; AMFT, M. (2000b):
Bidirektionale Integration von Berechnung und Gestaltung im Konstruktionsprozess: Unschärfen in der Schnittstelle.
DFG Zwischenbericht Li 699/8-1.
München: Lehrstuhl für Produktentwicklung 2000.
- LINDEMANN, U.; KLEEDÖRFER, R.:
Erfolgreiche Produkte durch integrierte Produktentwicklung. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Mit Schwung zum Aufschwung, Münchner Kolloquium '97.
Landberg / Lech: Moderne Industrie 1997, S. 115-136.
- LÖFFEL, CHR.:
Integration von Berechnungswerkzeugen in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozess.
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Fakultät für Maschinenbau.
Erlangen-Nürnberg: Univ., Diss. 1997.
- LÖW, H.:
Automatisierung der Berechnung und Konstruktion des Stahlbaus von Fahrzeugkranen auf der Basis von FE- CAD-Methoden.
Lehrstuhl für Förderwesen, Fakultät für Maschinenwesen.
München: TU, Diss. 1993.

- LÜTGERT, A.:
KIM, Ein Beitrag zur systemneutralen CAD-Integration kinematischer Analyseverfahren.
Düsseldorf: VDI 1996. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 20 Nr. 2222)
Zugl. Hannover: Univ., Diss. 1996.
- MARX, P.:
Durchgängige, bauteilübergreifende Auslegung von Maschinenelementen mit unscharfen Vorgaben.
Fakultät Konstruktions- und Fertigungstechnik, Institut für Maschinenelemente.
Stuttgart: Univ., Diss. 1998.
- MEESE, L.:
Rechnerunterstützte Prozesskette von Entwurf, Konstruktion und Fertigung geometrisch komplexer Bauteile aus Konstruktionsbeton.
Institut für Konstruktion und Entwurf II, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen.
Stuttgart: Univ., Diss. 1998.
- MICHAELI, M.:
Entwicklung eines integrierten Ansatzes zur fertigungsgerechten Konstruktion von Features für Kunststoffspritzgussteile: Innovative rechnerunterstützte Konstruktionsprozesse; Integration von Gestaltung und Berechnung
Aachen: TH, Diss. 2000.
- MÜLLER, G.:
Finite Elemente. Einführung in das Arbeiten mit ANSYS an nachvollziehbaren Beispielen.
Heidelberg: Hüthig 1989.
- NIEMIERSKI, S.:
Parametergesteuerte Karosserie – Generierung im PKW – Vorentwurf.
Fachbereich 12 (Verkehrswesen).
Berlin: TU, Diss. 1988.
- OCKERT, D.:
Rechnerunterstütztes Konstruieren, Eine Einführung für den Bereich der Mechanischen Konstruktion.
München: Oldenbourg 1993.
- OPRZYNSKI, J.:
Verbesserung der Datenintegration von CAD-Systemen für den Chemieanlagenbau basierend auf einem relationalen Datenbank-Management-System.
Düsseldorf: VDI 1991. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 20 Nr. 55)
- PACHE, M.; LINDEMANN, U.; RÖMER, A.; HACKER, W. (2000):
The use of sketches, physical models and CAD in early stages of the engineering design process.
In: Proc. of the 5th World Conference on Integrated Design and Process Technology (IDPT 2000),
Dallas (USA), 04.-08.06.2000. Society for Design and Process Science (SDPS) 2000, 9 pages.
(CD-ROM)
- PACHE, M.; LINDEMANN, U.; RÖMER, A.; HACKER, W. (2001):
Skizzieren mit dem CAD-System?
CAD-CAM Report 20 (2001) 3, S. 98-103.
- PAHL, G.; BEITZ, W.:
Konstruktionslehre, Methoden und Anwendung.
4. neubearbeitete Auflage.
Berlin: Springer 1997.
- PAULUS, E.:
Sprachsignalverarbeitung. Analyse, Erkennung, Synthese.
Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag 1998.

- PETERS, M.:
Kommunikationssystem rechnerunterstützter Konstruktionswerkzeuge.
Institut für Konstruktionslehre, Bericht Nr. 51, 1998.
Braunschweig: TU, Diss. 1998.
- PFEIFFER, F.:
Einführung in die Dynamik.
Stuttgart: Teubner 1989.
- REDER, B.:
Modellierung attributiver Unschärfe in CAD-Systemen.
Fakultät für Informatik und Mathematik, Hochschule für Architektur und Bauwesen.
Weimar: HAB, Diss. 1995.
- REPETZKI, S.:
Entwicklungsschritte zum ingenieurgerechten Konstruktionsarbeitsplatz.
Aachen: Shaker 1997. (Berichte aus der Produktionstechnik, Band 24)
Zugl. Aachen: TH, Diss. 1997.
- SCHMITT, M.:
Rechnerunterstützte Tolerierung der Produktgestalt von mechanischen Bauteilen auf der Basis eines integrierten Produktmodellierers.
Düsseldorf: VDI 1993. (Fortschritt- Berichte VDI Reihe 20 Nr. 108)
- SCHULZ, A.:
Systeme zur Rechnerunterstützung des funktionsorientierten Grobentwurfs.
Institut für Konstruktionslehre, Bericht Nr. 49, 1996.
Braunschweig: TU, Diss. 1996.
- SENDER, U.:
CAD & Office Integration: OLE für Design und Modellierung – Eine neue Technologie für CA-Software.
Berlin: Springer 1995.
- SPECK, H.-J.:
Methode zur entwicklungsbegleitenden Ergebnisdokumentation bei der Produktdatenmodellentwicklung.
Aachen: Shaker 1998. (Berichte aus der Produktionstechnik, Band 24)
Zugl. Darmstadt: TU, Diss. 1997.
- SPUR, G.; KRAUSE, F.-L. (1997):
Das virtuelle Produkt - Management der CAD-Technik.
München: Hanser 1997.
- STEGER, W.:
Integration von Berechnungsmethoden in rechnerunterstützte Konstruktionssysteme.
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD des Instituts für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion.
Dresden: TU, Diss. 1998.
- SUSEN, A.:
Spracherkennung. Kosten, Nutzen, Einsatzmöglichkeiten.
Berlin: VDE 1999.
- THIELEMANN, M.:
Entwicklung intelligenter Konstruktionssysteme, Grundlagen und Beispiele.
Malmsheim: Expert 1995.

- TSVALOS, H.:
Grundrissplanung mit den Methoden der Künstlichen Intelligenz.
Institut für Gesundheitswissenschaften, Fachgebiet "Entwerfen, Bauten des Gesundheitswesens".
Berlin: TU, Diss. 1997.
- VDI-RICHTLINIE 2221
Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.
Düsseldorf: VDI 1993.
- VERBAND DER TECHNISCHEN ÜBERWACHUNGSVEREINE (HRSG.):
AD-Merkblätter. Taschenbuchausgabe.
Köln: Heymanns, Berlin: Beuth 1994.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (HRSG.)
Verkürzte Entwicklungsprozesse durch Integration von Gestaltung und Berechnung, Potenziale und Erfahrungen '99, Stuttgart.
Düsseldorf: VDI 1999. (VDI-Berichte 1487)
- WEINBRENNER, V.:
Produktlogik als Hilfsmittel zum Automatisieren von Varianten- und Anpassungskonstruktionen.
München: Hanser 1993. (Konstruktionstechnik München, Band 11)
Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- WEISSBARTH, T.:
The Variational and Parametric Design Approach in the CAD/CAM/CAE Product EMS of Intergraph.
In: Parametric and Variational Design.
Stuttgart: Teubner 1994.
- WÖLFLE, F.:
Virtuelle Berechnungskompetenzzentren als Dienstleister zur Integration von Gestaltung und Berechnung.
Düsseldorf: VDI 1998. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 20 Nr. 274)
Zugl. Berlin: TU, Diss. 1998.
- WOLFRAM, S.:
Das Mathematica[®] Buch, Die offizielle Dokumentation.
Bonn: Addison Wesley Longman, 1997.
- YIN, X.:
Rechnerintegrierte wissensbasierte Form- und Lagetolerierung.
Paderborn: Laboratorium für Konstruktionslehre 1998.
Zugl. Paderborn: Univ., Diss. 1998.
- ZHAO, K.:
Entwicklung eines räumlichen Toleranzmodells zur Optimierung der Produktqualität.
Stuttgart: Institut für Maschinenelemente 1996.
Zugl. Stuttgart: Univ., Diss. 1996.
- ZIEBEIL, P.:
Ein Ansatz zum Konstruieren mit Lösungsräumen.
Fachbereich 11, Maschinenbau und Produktionstechnik, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik.
Berlin: IPK 2000.
Zugl. Berlin: TU, Diss. 2000.

8 Anhang

8.1 Umfrage Formular

 PRODUKTENTWICKLUNG product development	 TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
---	--

PRODUKTENTWICKLUNG TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN 85747 GARCHING	Telefon +49 89 289-151 31 Telefax +49 89 289-151 44 sekr @ pe.mw.tum.de http://www.pe.mw.tum.de	Bearbeiter: Dipl.-Ing. M. Amft Telefon +49 89 289-151 52 amft @ pe.mw.tum.de
---	--	--

München, 10.01.2000

An CAD-Konstrukteure/innen
Fragebogen zum Thema: Berechnung im Konstruktionsprozess

Sehr geehrte(r) CAD-Konstrukteur(in)!

Der angehängte Fragebogen stellt Fragen zu begleitenden und grundlegenden Berechnungen beim Konstruieren mit CAD-Systemen.

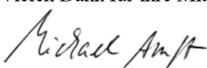
- Betrachtet wird der gesamte Konstruktionsprozess von ersten Überschlags- und Auslegungsberechnungen bis hin zu den späten Phasen mit dem vollständigen Produktmodell und Fertigungszeichnungen.
- Gefragt wird nach Berechnungsoperationen, die zur Bestimmung eines beliebigen Parameters des Produktmodells beitragen. Diese Berechnungsoperationen können dabei sehr komplex sein oder auch simples Eins-und-Eins-Zusammenzählen beim Zählen von z. B. Schraublöchern oder beim Addieren von Längen.

Ziel dieser Untersuchung ist es, festzustellen:

- Welche Arten von Berechnungen werden
- mit welchen Hilfsmitteln
- wie oft eingesetzt?

Das Ergebnis fließt in eine wissenschaftliche Arbeit ein, die nach einer optimierten Rechner-/Softwareumgebung für CAD-Konstrukteure/innen forscht.

Vielen Dank für ihre Mithilfe!



Die Ergebnisse dieses Fragebogens werden streng vertraulich behandelt und ausschließlich zu Forschungszwecken verwendet. Es ist nicht möglich, die gemachten Angaben einzelnen Personen zuzuordnen.

Bitte kreuzen Sie die zutreffende Ziffer hinter jeder Aussage an. Beantworten Sie die Aussagen offen und ehrlich und nicht so, wie Sie denken, dass es von Ihnen erwartet oder gewünscht wird.

Bild 8-1: Umfrage Blatt 1 von 2





Berechnung im Konstruktionsprozess

sehr oft	oft	gelegentlich	selten	sehr selten	nie
1	2	3	4	5	6

Arten der Berechnung * **

	Bsp.	
Addition, Subtraktion	$a + b, a - b$	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Multiplikation, Division	$a \cdot b, a / b$	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Potenzrechnen	a^x, e^x, \dots	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Trigonometrisches Rechnen	$\sin x, \cos x, \arctan x, \dots$	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Logarithmisches Rechnen	$\log_a x, \ln x, \dots$	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Matrizenrechnung	$\begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix}, \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Differenzieren	$f'(x) = d f(x) / dx$	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Integration	$F(x) = \int f(x) dx$	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
lineare Differentialrechnung	$f(x) + f'(x) + f''(x) = a$	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
nichtlineare Differentialrechnung	$f(x) \cdot f'(x)^2 + x \cdot f''(x) + \dots = y$	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Logik	$a \vee b \wedge c$	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Statistik	$\Sigma(a^2 b^2)$	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Mengenlehre	$A \subset B$	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Finite Elemente Berechnungen		1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Topologieoptimierung		1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6

Hilfsmittel zur Berechnung

Schätzendes Kopfrechnen	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Exaktes Kopfrechnen	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Rechnen mit den Fingern	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Mechanische Hilfsmittel (z. B. Rechenschieber, Abakus etc.)	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Blatt Papier und Stift	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Tabellenbücher	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Taschenrechner	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Tabellenkalkulation (z. B. Excel) - leeres Blatt	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Tabellenkalkulation (z. B. Excel) - fertiges, selbst angelegtes Formular	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Tabellenkalkulation (z. B. Excel) - fertiges, fremd angelegtes Formular	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
CAD-System (Parametrik)	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Mathem. Solver (z. B. Mathematica, Maple) - ohne angelegte Berechnung	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Mathem. Solver (z. B. Mathematica, Maple) - mit selbst angelegter Berechnung	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Mathem. Solver (z. B. Mathematica, Maple) - mit fremd angelegter Berechnung	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Selbst programmierte Prozeduren ohne Einsatz von mathem. Programmbiblioth.	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Selbst programmierte Prozeduren mit Einsatz von mathem. Programmbiblioth.	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Spez. Berechnungssoftware (FEM, Topologieoptimierer, Mehrgelenk-Getriebesimul. etc.)	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
Mechan. Hilfsmittel (Geometriemodelle für Mehrgelenkgetriebe, Funktionsprototypen. etc.)	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6

Zahl der Mitarbeiter Ihrer Firma:

<input type="checkbox"/> 1 - 10	<input type="checkbox"/> 11 - 40	<input type="checkbox"/> 41 - 400	<input type="checkbox"/> 401 - 4000	<input type="checkbox"/> > 4000
---------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------	---------------------------------

Durchschnittliche Produkt-Stückzahlen:

<input type="checkbox"/> 1 - 2 Stck.	<input type="checkbox"/> 3 - 20 Stck.	<input type="checkbox"/> 21 - 100 Stck.	<input type="checkbox"/> 101 - 4000 Stck.	<input type="checkbox"/> > 4000 Stck.
--------------------------------------	---------------------------------------	---	---	---------------------------------------

* Einige Arten von Berechnungen schließen andere Arten ein (beim Differenzieren wird auch z. B. addiert und multipliziert). Gemeint sind stets in sich abgeschlossene Operationen zur Erreichung eines Ergebnisses oder eines wesentlichen, die Konstruktion betreffenden Zwischenergebnisses.

** Die Zeitdauer der einzelnen abgeschlossenen Operationen ist unrelevant.

Bild 8-2: Umfrage Blatt 2 von 2

8.2 Dissertationsverzeichnis des Lehrstuhls für Produktentwicklung

Technische Universität München, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching

Dissertationen betreut von

Prof. Dr.-Ing. W. Rodenacker,
Prof. Dr.-Ing. K. Ehrlenspiel und
Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann

- D1 COLLIN, H.:
Entwicklung eines Einwalzenkalenders nach einer systematischen Konstruktionsmethode.
München: TU, Diss. 1969.
- D2 OTT, J.:
Untersuchungen und Vorrichtungen zum Offen-End-Spinnen.
München: TU, Diss. 1971.
- D3 STEINWACHS, H.:
Informationsgewinnung an bandförmigen Produkten für die Konstruktion der Produktmaschine.
München: TU, Diss. 1971.
- D4 SCHMETTOW, D.:
Entwicklung eines Rehabilitationsgerätes für Schwerstkörperbehinderte.
München: TU, Diss. 1972.
- D5 LUBITZSCH, W.:
Die Entwicklung eines Maschinensystems zur Verarbeitung von chemischen Endlosfasern.
München: TU, Diss. 1974.
- D6 SCHEITENBERGER, H.:
Entwurf und Optimierung eines Getriebesystems für einen Rotationsquerschneider mit allgemeingültigen Methoden.
München: TU, Diss. 1974.
- D7 BAUMGARTH, R.:
Die Vereinfachung von Geräten zur Konstanthaltung physikalischer Größen.
München: TU, Diss. 1976.
- D8 MAUDERER, E.:
Beitrag zum konstruktionsmethodischen Vorgehen durchgeführt am Beispiel eines Hochleistungsschalter-Antriebs.
München: TU, Diss. 1976.
- D9 SCHÄFER, J.:
Die Anwendung des methodischen Konstruierens auf verfahrenstechnische Aufgabenstellungen.
München: TU, Diss. 1977.

- D10 WEBER, J.:
Extruder mit Feststoffpumpe – Ein Beitrag zum Methodischen Konstruieren.
München: TU, Diss. 1978.
- D11 HEISIG, R.:
Längencodierer mit Hilfsbewegung.
München: TU, Diss. 1979.
- D12 KIEWERT, A.:
Systematische Erarbeitung von Hilfsmitteln zum kostenarmen Konstruieren.
München: TU, Diss. 1979.
- D13 LINDEMANN, U.:
Systemtechnische Betrachtung des Konstruktionsprozesses unter besonderer Berücksichtigung der Herstellkostenbeeinflussung beim Festlegen der Gestalt.
Düsseldorf: VDI-Verlag 1980. (Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften Reihe 1, Nr. 60)
Zugl.: München: TU, Diss. 1980.
- D14 NJOYA, G.:
Untersuchungen zur Kinematik im Wälzlager bei synchron umlaufenden Innen- und Außenringen.
Hannover: Universität, Diss. 1980.
- D15 HENKEL, G.:
Theoretische und experimentelle Untersuchungen ebener konzentrisch gewellter Kreisringmembranen.
Hannover: Universität, Diss. 1980.
- D16 BALKEN, J.:
Systematische Entwicklung von Gleichlaufgelenken.
München: TU, Diss. 1981.
- D17 PETRA, H.:
Systematik, Erweiterung und Einschränkung von Lastausgleichslösungen für Standgetriebe mit zwei Leistungswegen – Ein Beitrag zum methodischen Konstruieren.
München: TU, Diss. 1981.
- D18 BAUMANN, G.:
Ein Kosteninformationssystem für die Gestaltungsphase im Betriebsmittelbau.
München: TU, Diss. 1982.
- D19 FISCHER, D.:
Kostenanalyse von Stirnzahnrädern. Erarbeitung und Vergleich von Hilfsmitteln zur Kostenfrüherkennung.
München: TU, Diss. 1983.
- D20 AUGUSTIN, W.:
Sicherheitstechnik und Konstruktionsmethodiken – Sicherheitsgerechtes Konstruieren.
Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz 1985.
Zugl.: München: TU, Diss. 1984.
- D21 RUTZ, A.:
Konstruieren als gedanklicher Prozeß.
München: TU, Diss. 1985.

- D22 SAUERMAN, H. J.:
Eine Produktkostenplanung für Unternehmen des Maschinenbaues.
München: TU, Diss. 1986.
- D23 HAFNER, J.:
Entscheidungshilfen für das kostengünstige Konstruieren von Schweiß- und Gußgehäusen.
München: TU, Diss. 1987.
- D24 JOHN, T.:
Systematische Entwicklung von homokinetischen Wellenkupplungen.
München: TU, Diss. 1987.
- D25 FIGEL, K.:
Optimieren beim Konstruieren.
München: Hanser 1988.
Zugl.: München: TU, Diss. 1988 u. d. T.: Figel, K.: Integration automatisierter Optimierungsverfahren in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozeß.

Reihe Konstruktionstechnik München

- D26 TROPSCHUH, P. F.:
Rechnerunterstützung für das Projektieren mit Hilfe eines wissensbasierten Systems.
München: Hanser 1989. (Konstruktionstechnik München, Band 1)
Zugl.: München: TU, Diss. 1988 u. d. T.: Tropschuh, P. F.: Rechnerunterstützung für das Projektieren am Beispiel Schiffsgetriebe.
- D27 PICKEL, H.:
Kostenmodelle als Hilfsmittel zum Kostengünstigen Konstruieren.
München: Hanser 1989. (Konstruktionstechnik München, Band 2)
Zugl.: München: TU, Diss. 1988.
- D28 KITTSTEINER, H.-J.:
Die Auswahl und Gestaltung von kostengünstigen Welle-Nabe-Verbindungen.
München: Hanser 1990. (Konstruktionstechnik München, Band 3)
Zugl.: München: TU, Diss. 1989.
- D29 HILLEBRAND, A.:
Ein Kosteninformationssystem für die Neukonstruktion mit der Möglichkeit zum Anschluß an ein CAD-System.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 4)
Zugl.: München: TU, Diss. 1990.
- D30 DYLLA, N.:
Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 5)
Zugl.: München: TU, Diss. 1990.
- D31 MÜLLER, R.:
Datenbankgestützte Teilverwaltung und Wiederholteilsuche.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 6)
Zugl.: München: TU, Diss. 1990.

- D32 NEESE, J.:
Methodik einer wissensbasierten Schadenanalyse am Beispiel Wälzlagerungen.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 7)
Zugl.: München: TU, Diss. 1991.
- D33 SCHAAL, S.:
Integrierte Wissensverarbeitung mit CAD – Am Beispiel der konstruktionsbegleitenden Kalkulation.
München: Hanser 1992. (Konstruktionstechnik München, Band 8)
Zugl.: München: TU, Diss. 1991.
- D34 BRAUNSPERGER, M.:
Qualitätssicherung im Entwicklungsablauf – Konzept einer präventiven Qualitätssicherung für die Automobilindustrie.
München: Hanser 1993. (Konstruktionstechnik München, Band 9)
Zugl.: München: TU, Diss. 1992.
- D35 FEICHTER, E.:
Systematischer Entwicklungsprozeß am Beispiel von elastischen Radialversatzkupplungen.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 10)
Zugl.: München: TU, Diss. 1992.
- D36 WEINBRENNER, V.:
Produktlogik als Hilfsmittel zum Automatisieren von Varianten- und Anpassungskonstruktionen.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 11)
Zugl.: München: TU, Diss. 1993.
- D37 WACH, J. J.:
Problemspezifische Hilfsmittel für die Integrierte Produktentwicklung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 12)
Zugl.: München: TU, Diss. 1993.
- D38 LENK, E.:
Zur Problematik der technischen Bewertung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 13)
Zugl.: München: TU, Diss. 1993.
- D39 STUFFER, R.:
Planung und Steuerung der Integrierten Produktentwicklung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 14)
Zugl.: München: TU, Diss. 1993.
- D40 SCHIEBELER, R.:
Kostengünstig Konstruieren mit einer rechnergestützten Konstruktionsberatung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 15)
Zugl.: München: TU, Diss. 1993.
- D41 BRUCKNER, J.:
Kostengünstige Wärmebehandlung durch Entscheidungsunterstützung in Konstruktion und Härterei.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 16)
Zugl.: München: TU, Diss. 1993.

- D42 WELLNIAK, R.:
Das Produktmodell im rechnerintegrierten Konstruktionsarbeitsplatz.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 17)
Zugl.: München: TU, Diss. 1994.
- D43 SCHLÜTER, A.:
Gestaltung von Schnappverbindungen für montagegerechte Produkte.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 18)
Zugl.: München: TU, Diss. 1994.
- D44 WOLFRAM, M.:
Feature-basiertes Konstruieren und Kalkulieren.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 19)
Zugl.: München: TU, Diss. 1994.
- D45 STOLZ, P.:
Aufbau technischer Informationssysteme in Konstruktion und Entwicklung am Beispiel eines elektronischen Zeichnungsarchives.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 20)
Zugl.: München: TU, Diss. 1994.
- D46 STOLL, G.:
Montagegerechte Produkte mit feature-basiertem CAD.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 21)
Zugl.: München: TU, Diss. 1994.
- D47 STEINER, J. M.:
Rechnergestütztes Kostensenken im praktischen Einsatz.
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 22)
Zugl.: München: TU, Diss. 1995.
- D48 HUBER, T.:
Senken von Montagezeiten und -kosten im Getriebebau.
München: Hanser 1995. (Konstruktionstechnik München, Band 23)
Zugl.: München: TU, Diss. 1995.
- D49 DANNER, S.:
Ganzheitliches Anforderungsmanagement mit QFD – ein Beitrag zur Optimierung markt-orientierter Entwicklungsprozesse.
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 24)
Zugl.: München: TU, Diss. 1996.
- D50 MERAT, P.:
Rechnergestützte Auftragsabwicklung an einem Praxisbeispiel.
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 25)
Zugl.: München: TU, Diss. 1996 u. d. T.: MERAT, P.: Rechnergestütztes Produktleitsystem
- D51 AMBROSY, S.:
Methoden und Werkzeuge für die integrierte Produktentwicklung.
Aachen: Shaker 1997. (Konstruktionstechnik München, Band 26)
Zugl.: München: TU, Diss. 1996.
- D52 GIAPOULIS, A.:
Modelle für effektive Konstruktionsprozesse.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 27)
Zugl.: München: TU, Diss. 1996.

- D53 STEINMEIER, E.:
Realisierung eines systemtechnischen Produktmodells – Einsatz in der Pkw-Entwicklung
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 28)
Zugl.: München: TU, Diss. 1998.
- D54 KLEEDÖRFER, R.:
Prozeß- und Änderungsmanagement der Integrierten Produktentwicklung.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 29)
Zugl.: München: TU, Diss. 1998.
- D55 GÜNTHER, J.:
Individuelle Einflüsse auf den Konstruktionsprozeß.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 30)
Zugl.: München: TU, Diss. 1998.
- D56 BIERSACK, H.:
Methode für Kraftleinleitungsstellenkonstruktion in Blechstrukturen.
München: TU, Diss. 1998.
- D57 IRLINGER, R.:
Methoden und Werkzeuge zur nachvollziehbaren Dokumentation in der Produktentwicklung.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 31)
Zugl.: München: TU, Diss. 1999.
- D58 EILETZ, R.:
Zielkonfliktmanagement bei der Entwicklung komplexer Produkte – am Bsp. PKW-Entwicklung.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 32)
Zugl.: München: TU, Diss. 1999.
- D59 STÖBER, R.:
Zielkostenmanagement in integrierten Produkterstellungsprozessen.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 33)
Zugl.: München: TU, Diss. 1999.
- D60 PHLEPS, U.:
Recyclinggerechte Produktdefinition – Methodische Unterstützung für Upgrading und Verwertung.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 34)
Zugl.: München: TU, Diss. 1999.
- D61 BERNARD, R.:
Early Evaluation of Product Properties within the Integrated Product Development.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 35)
Zugl.: München: TU, Diss. 1999.
- D62 ZANKER, W.:
Situative Anpassung und Neukombination von Entwicklungsmethoden.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 36)
Zugl.: München: TU, Diss. 1999.

Reihe Produktentwicklung München

- D63 ALLMANSBERGER, G.:
Erweiterung der Konstruktionsmethodik zur Unterstützung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung.
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Bd. 37)
Zugl.: München: TU, Diss. 2000.
- D64 ABMANN, G.:
Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung.
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 38)
Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D65 BICHLMAIER, C.:
Methoden zur flexiblen Gestaltung von integrierten Entwicklungsprozessen.
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 39)
Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D66 DEMERS, M. T.
Methoden zur dynamischen Planung und Steuerung von Produktentwicklungsprozessen.
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 40)
Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D67 STETTER, R.:
Method Implementation in Integrated Product Development.
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 41)
Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D68 VIERTLBÖCK, M.:
Modell der Methoden- und Hilfsmiteleinführung im Bereich der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 42)
Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D69 COLLIN, H.:
Management von Produkt-Informationen in kleinen und mittelständischen Unternehmen.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 43)
Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D70 REISCHL, C.:
Simulation von Produktkosten in der Entwicklungsphase.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 44)
Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D71 GAUL, H.-D.:
Verteilte Produktentwicklung - Perspektiven und Modell zur Optimierung.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 45)
Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D72 GIERHARDT, H.:
Global verteilte Produktentwicklungsprojekte – Ein Vorgehensmodell auf der operativen Ebene.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 46)
Zugl. München: TU, Diss. 2001.

- D73 SCHOEN, S.:
Gestaltung und Unterstützung von Community of Practice.
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 47)
Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D74 BENDER, B.:
Zielorientiertes Kooperationsmanagement.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 48)
Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D75 SCHWANKL, L.:
Analyse und Dokumentation in den frühen Phasen der Produktentwicklung.
München: TU, Diss. 2002. (Produktentwicklung München, Band 49)
- D76 WULF, J.:
Elementarmethoden zur Lösungssuche.
München: TU, Diss. 2002. (Produktentwicklung München, Band 50)
- D77 MÖRTL, M.:
Entwicklungsmanagement für langlebige, upgradinggerechte Produkte.
München: TU, Diss. 2002. (Produktentwicklung München, Band 51)
- D78 GERST, M.:
Strategische Produktentscheidungen in der integrierten Produktentwicklung.
München: TU, Diss. 2002. (Produktentwicklung München, Band 52)