

1 Einleitung

Interdisziplinarität und Integration sind zwei der bestimmenden Trends der aktuellen Produktentwicklung. Von dem idealerweise engen Zusammenwirken dieser beiden Ansätze verspricht man sich Verbesserungen bezüglich der Entwicklungszeiten und -kosten, der Qualität, der Nachhaltigkeit etc. Während noch vor wenigen Jahren parallele Prozesse mitunter mühsam unter dem Begriff des *Simultaneous Engineering* organisatorisch verknüpft und koordiniert wurden, existieren mittlerweile Softwaresysteme – hier im Speziellen PLM- und CAD-Systeme – die unterschiedlichste Aufgaben intern abbilden können und somit neben einer Beschleunigung der Prozessschritte auch einen deutlichen Ergonomiezuwachs mit sich bringen. Die Verflechtung des Know-Hows unterschiedlicher Fachbereiche ist somit in einer viel komprimierteren Form möglich und ermöglicht auch nicht speziell ausgebildeten oder geschulten Mitarbeitern die Anwendung fachübergreifender Kenntnisse.

Zentraler Bestandteil der virtuellen Produktentwicklung ist in der Regel ein virtuelles Produktmodell, eingebettet in ein leistungsfähiges CAE-System, welches entsprechende Module integriert anbietet und/oder Schnittstellen zur Verfügung stellt, mit dessen Hilfe weiterführende Prozesse angestoßen werden können [Va09]. Die Entwicklung der CAD-Modelle von reinen Geometrierepräsentanten zu höherwertigen „Datencontainern“ begann bereits in den 90er Jahren und wurde durch die sich schnell fortschreitenden Kapazitäten und Möglichkeiten der IT-Landschaft unterstützt bzw. ermöglicht [Ab90] [VDI09]. Dementsprechend wurde in Interessengruppen weiter auf den Ausbau der angesprochenen Entwicklung gedrängt und die umfassende Einbindung in den Produktentwicklungsprozess forciert. Zu nennen sind hier u.a. die Anstrengungen der *International Federation for Information Processing*¹ [MäTo96] [MäTo97]. Unabhängig davon bildete sich in der Folge ein holistischer Blick auf den Entwicklungsprozess aus – nicht zuletzt gefordert durch steigenden Konkurrenzdruck und die damit verknüpften Nebenwirkungen wie Verkürzung der Entwicklungszeiten, Kostenreduzierung und Qualitätssteigerung – der weitere Fortschritte auch im CAD-Bereich obligatorisch machte. Der Begriff der *Wissensintegration* wurde dabei schnell zu einem wichtigen Themengebiet.

Ebenso erlangte die numerische Simulation mit steigenden Rechnerkapazitäten immer mehr an Bedeutung. Während in den Anfängen in sich geschlossene Applikationen vorherrschten, die auf Geometrieschnittstellen oder rudimentäre Modellierungsmodule zurückgriffen, existiert heutzutage ein integratives Verständnis für das virtuelle Produktmodell, welches auch die Aufgaben und Fragestellungen der Anwender erweitert. So ist es aktuell üblich, bereits konstruktionsbegleitende Simulationen durchzuführen, um frühzeitig Schwachstellen identifizieren zu können und eine höhere Durchdringung der Nutzung virtueller Prototypen

¹ International Federation for Information Processing: Internationale Organisation für Informations- und Kommunikationstechnologien und -wissenschaften, die bereits seit 1960 existiert. Die Organisation teilt sich in Technische Komitees auf, wovon TC-5 sich u.a. mit dem Bereich CAD auseinandersetzt.

zu erreichen. Für die Umsetzung werden häufig vollständig in die CAE-Umgebung integrierte Simulationslösungen verwendet. Gleichzeitig bieten auch Berechnungsdienstleister ihre Kompetenzen und Kapazitäten an. Das moderne Hochgeschwindigkeits-Datennetz ermöglicht dabei eine Form des Outsourcings, welches komplett über das Web abgewickelt wird: Die Simulationsaufgabe mit Modellen und Simulationsdaten wird online per Browser vorbereitet, beim Anbieter berechnet und die Ergebnisse online oder per Download zur Auswertung zur Verfügung gestellt [Si14b].

1.1 Motivation

Betrachtet man eine typische Abfolge der rechnergestützten Entwicklung technischer Komponenten und lässt die operativen Schritte außen vor, so kann sie erfahrungsgemäß grob wie folgt gegliedert werden: Konzeption, Auslegung, Modellierung, Simulation/Test, Optimierung/Anpassung, Dokumentation und Fertigung. Der Nebenzzyklus in Abb. 1-1 zeigt die Einordnung dieser gekoppelten Schritte in den Kontext des Produktlebenszyklus in Anlehnung an [Sc13a]. Häufig werden nur einzelne dieser Schritte gezielt unter dem Gedanken des *Design-to-X*² gekoppelt, so dass zeitliche Verzögerungen durch Rückfragen und Iterationen vorprogrammiert sind. Man spricht in diesem Zusammenhang von sogenannten Insellösungen, die meist nur speziell für diese eine Anwendung gültig sind [Fr03]. Eine übliche Praxis ist es außerdem, für die einzelnen Entwicklungsschritte neue angepasste digitale Produktmodelle – und damit Redundanz – zu erzeugen [AbSt04]. Schafft man es jedoch, mehrere Bereiche daten- und wissenstechnisch zusammenzufassen, so kann eine Integration der im Kern der Entwicklung befindlichen Inhalte realisiert werden.

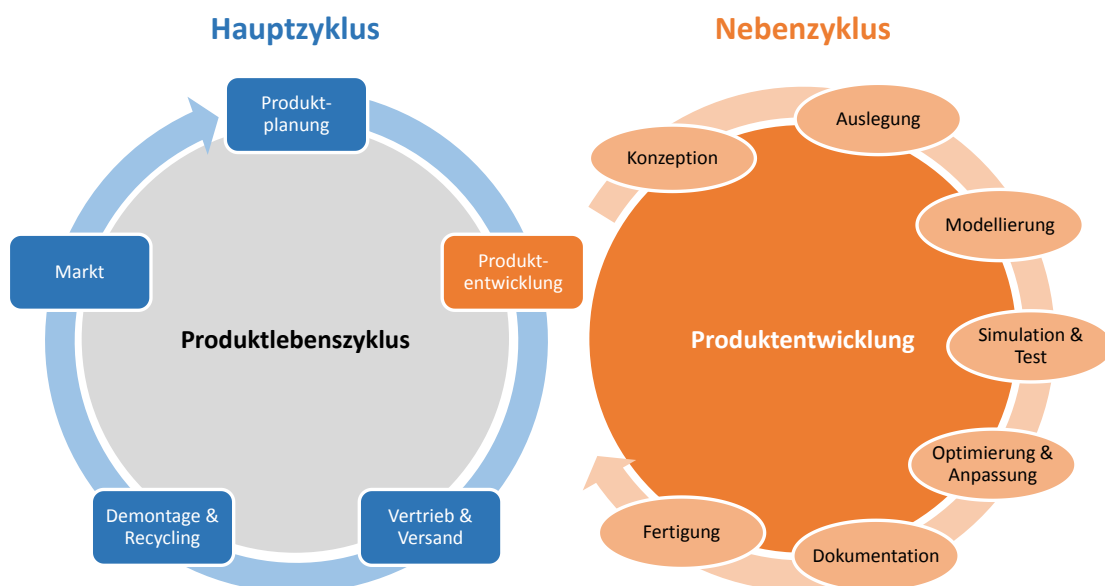


Abb. 1-1: Einordnung der Produktentwicklung in den Produktlebenszyklus (nach [Sc13a])

² Design-to-X: Berücksichtigung verschiedener Gerechtheiten im Konstruktionsprozess, z. B. Design-to-Cost, -Manufacturing, -Market, -Environment, -Usability etc.

Das zielgerichtete Verknüpfen moderner disziplinübergreifender Methoden der Produktentwicklung eröffnet dabei neue Anwendungsfelder, welche spezifischen Restriktionen unterworfen sind. Diese gilt es jeweils zu identifizieren und zu konsolidieren, um eine belastbare und produktive Prozesskette aufzubauen. Mit Blick auf die integrierte numerische Simulation als einem Bestandteil dieser CAE-Prozesskette, lässt sich u. a. die Disziplin der konstruktionsgleitenden Simulation ableiten. Dabei geht es darum, dem Konstrukteur oder Entwicklungsingenieur Methoden und Werkzeuge an die Hand zu geben, die ihn bereits im Vorfeld des finalen Designs und damit verbundener Tests und Detailsimulationen in die Lage versetzen, das Produkt zu optimieren. Insbesondere der Aufbau des virtuellen Produktmodells bedarf hier einer vorausschauenden Arbeitsweise, da mit Bezug auf eine begleitende Simulation nicht jedes Design bzw. Modelldetail zulässig ist. Es müssen also Maßnahmen und Techniken entwickelt werden, die es erlauben, simulationsgerechte Produktmodelle zu erzeugen. Diese können sowohl allgemeingültige als auch produktabhängige Methoden beinhalten. Generell sollte es daher von hoher Priorität sein, die Anwender für simulationstechnische Belange seitens des Produktmodells zu sensibilisieren. Der Hintergrund liegt darin begründet, dass im Designprozess des virtuellen Modells keine Grenzen existieren; im CAD-System ist beinahe alles möglich. In der Regel wirken sich dahingehend der offene Umgang mit den Informationen/Anforderungen und die Einbeziehung in disziplinübergreifende Themen motivierend aus.

Gleichzeitig eröffnen sich zusätzliche Möglichkeiten, die eine Beschleunigung und Qualitätssteigerung des Prozesses mit sich bringen. In diesem Zusammenhang ist das mittlerweile etablierte Gebiet des KBE zu nennen, mit dessen Methodik mächtige Werkzeuge unter Verwendung des Benutzerwissens generiert werden können, um verschiedenste Aufgaben und Ziele umzusetzen.

1.2 Zielsetzung

Die Gültigkeit der soeben getätigten Aussagen bedarf einer praktischen Bestätigung, um die tatsächlichen Potenziale bewerten zu können. Gegenstand der vorliegenden Dissertation ist es demnach, Methoden zu erarbeiten, die der Tatsache, dass die in der modernen Produktentwicklung vorhandenen komplexen Verflechtungen nicht zufriedenstellend im Sinne des *Design-to-X* gekoppelt werden, entgegenwirken. Die dazu verwendeten und bereits mit Wissen angereicherten virtuellen Produktmodelle werden in dieser Abhandlung als Datenbasis für gekoppelte Simulationsprozesse angesehen. Folglich ergeben sich Verwendungen in integrierten Entwicklungsumgebungen oder äquivalenter Expertensoftware, um ein möglichst hochwertiges Ergebnis zu erzielen.

Der Weg zu simulationsorientierten Produktmodellen führt zunächst über die Analyse möglicher Problemfelder, die im Zusammenwirken mit strukturmechanischen numerischen Simulationen auftreten. Diese führt zu einer Auflistung alltäglicher Herausforderungen, welche es möglichst systemneutral zu lösen gilt. Dazu gehören neben allgemeinen Einflussfakto-

ren wie der personellen und der IT-Infrastruktur auch technische Aspekte wie Vernetzung, Modellrobustheit und Datenverwaltung. Als Grundlage der Untersuchungen dienen verschiedene Forschungs- und Industrieprojekte, an denen die Lösungen erarbeitet und umgesetzt werden und so ihre praktische Relevanz demonstrieren. Im Zusammenwirken mit Methoden des KBE können zusätzliche Anforderungen bezüglich Fertigung und prozesstechnischer Randbedingungen zielgerichtet implementiert werden.

Im Folgenden wird in Kapitel 2 zunächst ein Überblick über ausgewählte themenbezogene Aspekte der modernen rechnerunterstützten Produktentwicklung gegeben. Dazu gehören neben Grundlagen der rechnerinternen Abbildung der Produktmodelle ebenso die Hintergründe zu Berechnung und Optimierung. Abgeschlossen wird das Kapitel mit dem Thema der Wissensintegration in Entwicklungsprozessen. In Kapitel 3 werden Problemfelder herausgearbeitet, die bei der Arbeit mit integriert genutzten Produktmodellen auftreten. Diese bilden die Grundlage für die in Kapitel 4 vorgestellten Ansätze auf Basis von „Best-Practice“-Lösungsansätzen, welche bei der Bearbeitung verschiedener Projekte erarbeitet wurden, bevor die Ergebnisse in Kapitel 6 zusammengefasst werden.



2 Anwendung des CAE in der Produktentwicklung

Ein modernes Produkt, sei es aus dem Low- oder High-Tech-Sektor, wird aktuell mit großer Wahrscheinlichkeit durch Einsatz rechnerunterstützter Methoden entwickelt und datentechnisch verwaltet. Dieser Umstand wurde bereits von SPUR und KRAUSE in ihrem 1997 erschienen Standardwerk *Das virtuelle Produkt* thematisiert [SpKr97]. Als notwendige Voraussetzung wurde hier der damals stattfindende Übergang zum 3D-Modell mit zusätzlichen semantischen Informationen genannt. Im Zusammenspiel mit einer offensichtlich fortschreitenden Entwicklung der allgemeinen digitalen Infrastruktur wurde eine virtuelle Arbeitsweise prognostiziert, die heutzutage unter dem Begriff *integrierte Produktentwicklung* (IPE) zusammengefasst wird. Darunter ist die gesamtheitliche Betrachtung des Entwicklungsprozesses mit Hilfe virtueller Werkzeuge zu verstehen. In dieselbe Richtung geht die bereits 1994 veröffentlichte VDI-Richtlinie 2216 zu *Einführungsstrategien und Wirtschaftlichkeit von CAD-Systemen* [VDI94].

2.1 Begrifflichkeit und Entwicklung des CAE

Mit dem Aufkommen der integrierten Produktentwicklung wurde der Begriff des CAE geprägt, der jedoch je nach Lokalisierung verschiedene Bedeutungen haben kann [Ab90]. Im englischsprachigen Raum wird CAE häufig als Computer-Aided Electronics verstanden; also als rechnerunterstützte Entwicklung elektronischer Komponenten. Die in Deutschland und anderen Ländern gebräuchliche Bedeutung liegt jedoch im Computer-Aided Engineering. Des- sen ursprünglich treibende Kraft war die Methode des Numerical Control (NC) im Rahmen der automatisierten Fertigung durch Verarbeitung numerischer Werte mit Hilfe von Lochkarten (1950), die einzelne Bearbeitungssequenzen abbildeten. Im weiteren Verlauf wurde dieser Ansatz in Richtung Computerized Numerical Control (CNC) verbessert, welches im Gegensatz zu NC die Möglichkeit bot, Maschinenbefehle innerhalb eines Rechners in einem geschlossenen Programmcode zur automatisierten Fertigung abzubilden [DIN96]. Zeitgleich wurden weitere Anwendungsfelder erschlossen, wozu zunächst numerische Simulationen im Sinne der FEM zu zählen sind (1960). Erst danach (1970ff.) förderte man die digitale Darstellung von Objekten am Bildschirm, woraus sich zunächst 2D-CAD und später dann 3D-CAD in der heutigen Anwendungsvielfalt entwickelte [Va09] (vgl. Abb. 2-1). Treibende Faktoren waren auch hier gestiegene Marktanforderungen nach kürzeren Entwicklungszeiten und höherer Produkt- und Prozessqualität.

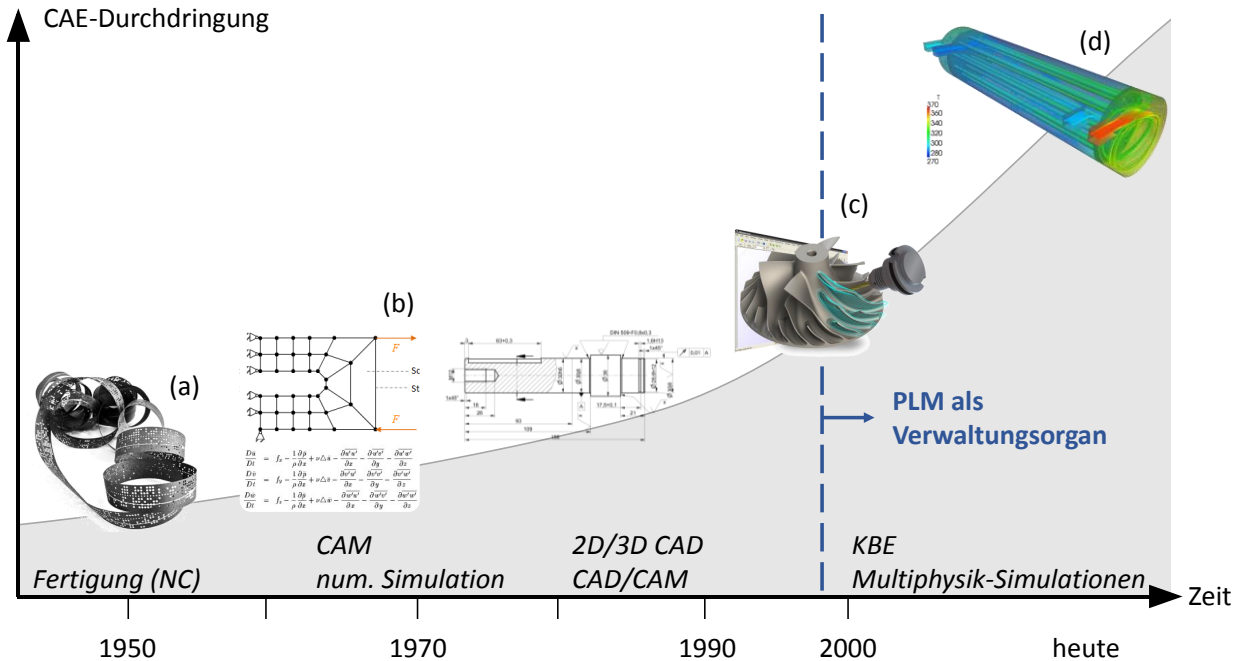


Abb. 2-1: Entwicklung der CAE-Durchdringung in der Produktentwicklung

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, gehörten zu einem üblichen Entwicklungsprozess mitunter umfangreiche physikalische Tests bis zum Versagen der Prüflinge. Das Zerstören kompletter Flugzeuge und Kraftfahrzeuge zur Überprüfung des Verhaltens im Unglücksfall sind hier sicherlich sehr gut nachvollziehbare Beispiele dafür, was die Mankos in Form von Aufwand und Kosten angeht. Mit dem Potenzial der rechnergestützten Entwicklung/Optimierung kann die Anzahl solcher Versuche drastisch reduziert werden und in Einzelfällen sogar gänzlich durch virtuelle Tests substituiert werden. Als Folge der dargestellten Forderungen und verfügbaren Möglichkeiten bildete sich für das CAE bedeutungsgemäß ein Schwerpunkt in den Bereichen Berechnung und Simulation heraus, der eng mit dem geometriegebenden CAD-Prozess verknüpft ist; das CAD-Modell dient als Basis für nachgelagerte Entwicklungsprozesse. Ebenso findet eine Einbindung in weitere datentechnische Prozesse statt. Diese Interpretation steht im Einklang der Vorstellung einer integrierten Produktentwicklung, wie sie in [EhMe13] thematisiert wird und gilt ebenso für die weiteren Ausführungen in dieser Arbeit. Eine Abkehr vom konventionellen sequenziellen Prozess hin zu einem simultanen Ansatz, bei dem verschiedene Entwicklungsstufen abgestimmt und zeitgleich ablaufen, wird durch das CAE begünstigt und gefördert; es entstehen bidirektionale Abhängigkeiten.

Die Bandbreite der CAE-Anwendungen, die den Entwicklungsteams dabei zur Verfügung steht, hat bislang einen Umfang erreicht, der eine Großzahl der primär und sekundär bedeutsamen Anforderungen abdeckt. Unter primären Anforderungen können diejenigen verstanden werden, die den Entwicklungsprozess von Funktion und Belastbarkeit unmittelbar vorantreiben und somit die Wertschöpfung direkt beeinflussen. So hat sich z. B. die Finite Elemente Methode (FEM) mit den verschiedenen Anwendungsbereichen zum wichtigsten Werkzeug zur

Bewertung der strukturellen Eigenschaften eines Produkts entwickelt [Kl12]. In dieselbe Kategorie kann die Mehrkörpersimulation (MKS) eingeordnet werden. Bei beiden Werkzeugen werden Lasten und Randbedingungen direkt mit dem virtuellen Modell verknüpft. Diese Werkzeuge sind mittlerweile nicht ausschließlich auf die Bedürfnisse der Berechnungsspezialisten zugeschnitten, sondern sollen durch Vereinfachungen und ergonomische Bedienmöglichkeiten auch dem Konstrukteur bereits die Möglichkeit bieten, die erdachten Lösungen frühzeitig zu prüfen. Die Werkzeuge zur Erfüllung der sekundären Anforderungen dienen verständnisgemäß der expliziten Optimierung einzelner Problembereiche sowie der datentechnischen Verwaltung und werden parallel zum Entwicklungsprozess eingesetzt. Abhängig vom Produkt variieren die Abläufe und Zielstellungen in der Regel. Eine disziplinbezogene Unterteilung in die primären und sekundären Anforderungen ist somit weder durchgängig noch allgemeingültig möglich.

Bereits ZETSCHKE hat die Vielzahl der in den Entwicklungsprozess eingebundenen Softwaresysteme in seiner Dissertation im Jahr 2000 angeführt und angemerkt, dass eine Verknüpfung der einzelnen Bereiche quasi nicht stattfindet, wodurch allgemein eine redundante Datenhaltung entsteht [Ze00]. Um dem entgegenzuwirken und die Globalisierung der virtuellen Produktentwicklung zu unterstützen, wurde gegen Ende der 1990er Jahre das umfassende Konzept des Product-Lifecycle-Managements (PLM) zur Daten- und Workflow-Verwaltung eingeführt, welches ohne moderne Rechnerinfrastruktur nicht umsetzbar ist. Konsequenterweise hat sich mit fortschreitender Durchdringung des Entwicklungsprozesses mit Simulationen verschiedener Typen eine Untersparte herausgebildet, die gezielt die Verwaltung der Simulationsdaten im PLM-Kontext abbildet: Das Simulation-Data-Management. Nähere Einzelheiten dazu werden in den Abschnitten 2.4 und 2.5 behandelt.

Anhand der vorgestellten Hintergründe und Festlegungen liegt eine generelle Interpretation des Konzepts des CAE vor. Welche grundlegenden datentechnischen Voraussetzungen hierfür notwendig werden und welche Verknüpfungen daraus entstehen können, wird in den folgenden Unterkapiteln dargestellt.

2.2 Rechnerunterstütztes Konstruieren

Der moderne Produktentwicklungsprozess fußt auf rechnerunterstützten Konstruktions- und Entwicklungsteilprozessen. Insbesondere die oben beschriebene Entwicklung hin zu 3D-CAE-Entwicklungsumgebungen lässt die eigentliche Datenbasis, das virtuelle Produktmodell, in den Vordergrund treten [An10]. Dazu soll zunächst eine Begriffsdefinition diskutiert werden, die für ein gemeinsames Verständnis der weiteren Ausführungen und der inhaltlichen Abgrenzung als hilfreich angesehen wird. Der Begriff des *Produktmodells* existiert bereits seit über 20 Jahren [Bu96]. Eine klare Definition ist bisher meist im Zusammenhang mit PLM zu finden:



- *„Definition: Produktmodell ist der Sammelbegriff für eine formal festgelegte virtuelle Beschreibung in abstrakter Form von Produkten während des Entwicklungsprozesses“ [ET13].*
- *„Produktmodell: Ein Produktmodell ist die formale Beschreibung aller Informationen zu einem Produkt über alle Phasen des Lebenszyklus hinweg“ [NN08].*
- *„Ein Produktmodell ist die Abbildung eines Produktes in ein formales Modell. Es ist das Resultat des Produktentwicklungsprozesses, in dem alle relevanten Eigenschaften eines Produktes herausgearbeitet und im Produktmodell dokumentiert werden. Das Produktmodell entsteht durch Instanziierung des Produktdatenmodells“ [Sp98].*

Allen Definitionsversuchen ist gemeinsam, dass die Sichtweise auf das Produktmodell den vollständigen Produktlebenszyklus umfasst. Somit werden – theoretisch – alle mit dem Produkt in Verbindung stehenden Informationen und Daten erfasst und können zu jeder Zeit entsprechend zugeordnet werden, was auch mit dem Begriff *integriertes Produktmodell* beschrieben wird [An09]. Dies entspricht weitestgehend der Vision von ABRAMOVICI und STEKOLSCHIK von einer einheitlichen Produktmodell-Referenz: „... zeigt die Vision einer einheitlichen Digitalen Produktmodell-Referenz auf die alle Applikationen in der Produktentwicklung und –entstehung zugreifen. Diese digitale Produktmodell-Referenz sollte dabei auch Grundlage sowohl für Änderungen im Produktentstehungsprozess als auch für künftige Anpassungskonstruktionen dienen [sic]“ [AbSt04]. Dass dieses Problem einer geeigneten allgemeingültigen Schnittstelle bisher nicht annähernd zufriedenstellend gelöst wurde, liegt unter anderem an den bis dato massiv gestiegenen Ansprüchen an ein solches neutrales und leistungsfähiges Format; konkurrierende Anforderungen der unterschiedlichen Branchen erschweren zusätzlich die Realisierung eines Konsenses. Weitere Details dazu werden in Kapitel 2.4 vorgestellt.

Im weiteren thematischen Schwerpunkt dieser Arbeit, welcher in der Phase der Produktentwicklung einzuordnen ist, gilt eine leichte Spezialisierung des Begriffs; die Formulierung des *digitalen Produktmodells*. Dabei wird der Fokus auf die Geometrie beschreibenden und semantischen Eigenschaften gelegt, während unter *Produkt* die zu entwickelnde technische Komponente verstanden wird. Zusätzliche Informationen wie Stammdaten und Parameter des Product Lifecycle Managements werden nicht berücksichtigt. Somit wird in der Folge von einem „Datencontainer“ ausgegangen, dem unterschiedliche Rollen während der Produktentwicklungszeit zugeteilt werden (s. Abb. 2-2).

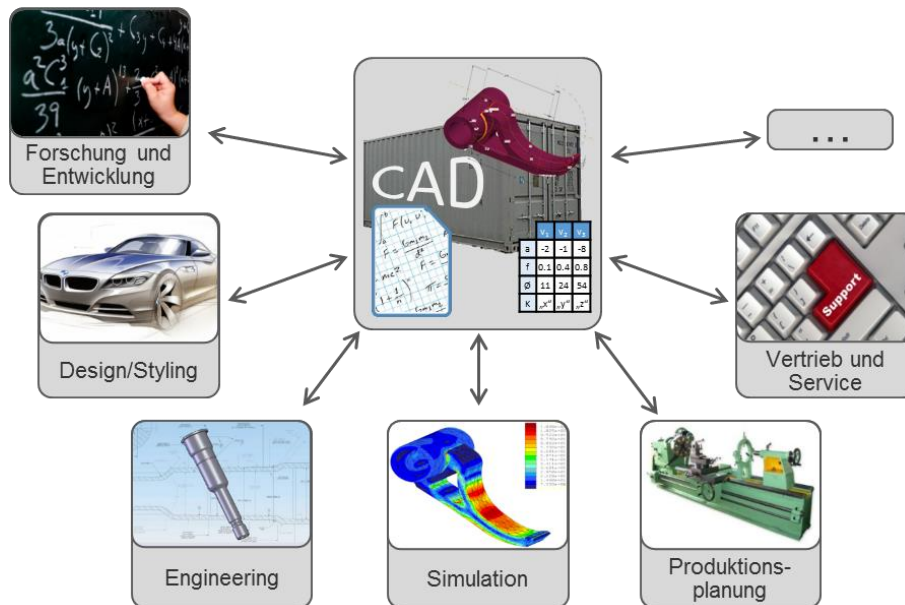


Abb. 2-2: Vision eines disziplinübergreifenden digitalen Produktmodells

Entsprechend der Rollen hält das so definierte Produktmodell verschiedene Daten vor, die zu unterschiedlichen Informationszwecken aufbereitet werden. Sie lassen sich nach ANDERL in folgenden Untertypen kategorisieren [An10]:

- Daten der *Produktdefinition*: Bilden den Grundstock der Informationen. Neben Daten zum Produkt selbst – wie z. B. Auslegungsdaten – werden hier auch die Metadaten für Datenverwaltungssysteme festgelegt.
- Daten der *Produktrepräsentation*: Beinhalten die Datenstruktur des 3D-Modells. Typische Strukturen sind B-Rep, CSG oder auch Feature-Strukturen und einfache Textdateien (s. Kapitel 2.2.2).
- Daten der *Produktpräsentation*: Stellen die visuelle Art der Präsentation der Produktdaten dar, wie Sie dem Anwender/Kunden zur Verfügung stehen.

In der folgenden Abb. 2-3 sind diese Zusammenhänge grafisch aufbereitet. Hieran lässt sich erkennen, welche Informationen in das Produktmodell hineinfließen, und welche Informationen daraus interpretiert und extrahiert werden, um sie anschaulich für Dritte verfügbar zu machen.

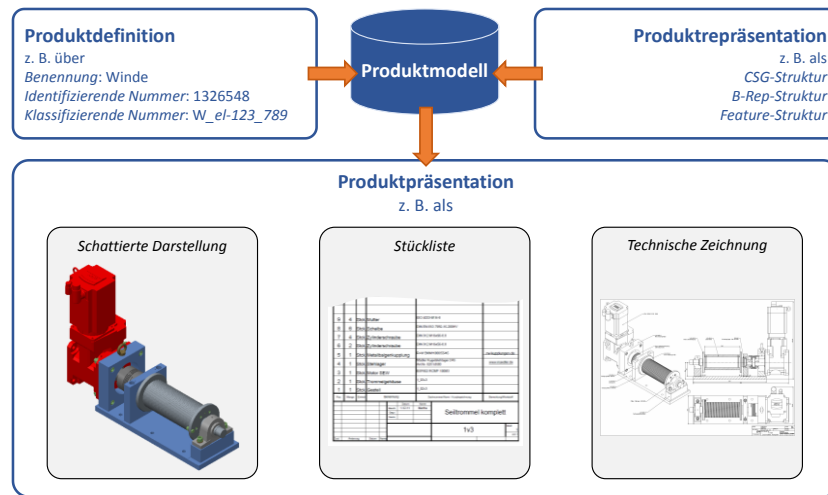


Abb. 2-3: Zusammenhänge der Produktinformationen (nach [An10])

Zugleich stellt sich die Frage nach der Modellqualität. Lässt sich diese allgemeingültig definieren und wenn ja, ist es ggf. sinnvoll, diese Definition für verschiedene Anwendungsszenarien anzupassen? STEKOLSCHIK setzt sich in seiner Dissertation u. a. mit Fragen zum Qualitätsmanagement von Produktmodellen auseinander, speziell im Bereich des PLM. Aus mehreren Definitionsansätzen zur Qualität im Allgemeinen wird für die Produktmodelle im Speziellen eine angepasste Definition hergeleitet [St06b]. So verschmelzen die Ansätze des VDA zum Thema geometrische und organisatorische Qualität mit denen von MEISSNER [ME00], der eine Erweiterung des Qualitätsgedanken in Bezug auf die Verwendbarkeit für CAD-Modellkunden³ mitberücksichtigt. Als Messgröße führt er die Zeit ein, die benötigt wird, um Anpassungen vorzunehmen; je kürzer die Zeit, umso höher die Qualität. Aus diesen Ansätzen extrahiert Stekolschik folgende griffige Definition:

„Die CAD-Modellqualität ist ein Maß für die Fähigkeit des CAD-Modells, eine oder mehrere Anforderungen von CAD-Modellkunden zu erfüllen.“ [St06b]

Daraus lässt sich erahnen, welche Bedeutung die Modellqualität für den rechnerunterstützten Konstruktionsprozess hat. Ähnliche Überlegungen lassen sich für fachspezifische Anwendungen anstellen. Für die Simulation gelten andere und zusätzliche Anforderungen an das Produktmodell als z. B. für die Fertigung. Diese gilt es jeweils zu identifizieren und mit geeigneten Mitteln im Produktmodell umzusetzen und abzusichern. Wie dies im speziellen Anwendungsfall geschehen kann, wird Bestandteil der folgenden Kapitel 3 und 4 sein, wobei der Hauptfokus auf der Verwendung der Modelle in der numerischen Simulation liegt.

³ CAD-Modellkunden: Umfasst die Gruppe aller Nutzer der CAD-Modelle, die z. B. auch weitere Bearbeitungsschritte an diesen durchführen (Simulation, Arbeitsvorbereitung, Dokumentation, etc.). Die Modellkunden existieren sowohl unternehmensintern, als auch -extern.



2.2.1 Ein kurzer Abriss zur Geschichte des CAD

„Ein Bild sagt mehr als tausend Worte“. Diesem Ausspruch kann unabhängig von Situation und Anwendung Universalität unterstellt werden. Auch wenn der Ursprung nicht zweifelsfrei belegt ist, so liegt doch die Quintessenz darin, dass allein Text bzw. Daten nicht immer den optimalen Weg darstellen, um beteiligten Personen gewisse Informationen zu übermitteln. Überträgt man diese grundlegende Idee auf die Ingenieurwissenschaften, so stößt man dort alsbald auf Pläne, Diagramme und Zeichnungen, die letztendlich eine ähnliche Absicht verfolgen: Die kompakte Dokumentation komplexer Inhalte zum Zwecke einer symbolorientierten Kommunikation. Dies entspricht einer dokumentbezogenen Arbeitskultur [An10].

Mit dem verstärkten Einsatz von Computern an ausgewählten Arbeitsplätzen begann in den 1970er Jahren der Wandel zu digital darstellbaren Dokumenten und später den virtuellen Produkten, was einen Wechsel der Arbeitskultur bedeutete. Die Werkzeuge zur Beschreibung der abzubildenden Formen und Körper waren bereits aus der mathematischen Disziplin der Geometrie und deren Unterdisziplinen bekannt. Sie wurden mit zusätzlichen technischen Funktionen in entsprechende Software integriert, um einen computerunterstützten Darstellungsprozess zu ermöglichen, für den sich seit einigen Jahrzehnten die Abkürzung CAD etabliert hat. Als klassischste praktische Anwendung können die unterschiedlichen Projektionsarten zur Abbildung volumetrischer Gebilde in der 2D-Ebene angeführt werden, die für die Erzeugung technischer Zeichnungen benötigt werden. Weitere Anwendungsbereiche sind z. B. die Anlagenplanung oder aber in der Elektrotechnik die Erzeugung von Schaltplänen. Die Werkzeuge wurden bis dato stetig weiterentwickelt und weisen eine immer größere Durchdringung der Arbeitsprozesse auf [An10], wie u.a. Studien von VAJNA & WEBER oder auch Erhebungen seitens des VDMA⁴ belegen [Va09]. Diese Entwicklung spiegelt sich in der bereits um 1990 von ABELN getätigten Einordnung des frühen CAD als Hilfsmittel zur Darstellung von (Konstruktions-)Ergebnissen wieder. Gleichzeitig beschrieb er das Potenzial zu einem mächtigen Werkzeug für die Konzeptionierung, Konstruktion und Detaillierung [Ab90]. Mittlerweile ist der Begriff des CAD – in seinem heutigen Verständnis – unabdingbar mit dem Konzept des CAE verknüpft, da es mit seinen Geometrie- und Produktdaten die dort praktizierte durchgängige Nutzung der virtuellen Produktmodelle erst ermöglicht.

2.2.2 Rechnerinterne Darstellung volumetrischer Geometriemodelle

In den Anfängen der rechnerinternen Darstellung lag eine Beschränkung auf zweidimensionale Darstellungen vor. Innerhalb des neuen Betätigungsfeldes des *geometrischen Modellierens* (CAGD) befasste man sich somit zunächst mit der mathematisch genauen Beschreibbarkeit der geometrischen Form und Gestalt ebener Objekte [Gr89]. Das Ergebnis derartiger Abbil-

⁴ Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.: Industrieverband mittelständischer Industrieunternehmen, die die gesamte Prozesskette abdecken. Wichtiger Stützpfeiler ist die Unterstützung und Förderung der industriellen Forschung. [VD13]