

IAV GmbH (Hrsg.)

# Virtuelle Produktentwicklung

Massenkraft des Rollenschlepphebels

+ Federkraft

IAV GmbH Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr (Hrsg.)  
Virtuelle Produktentwicklung

IAV GmbH (Hrsg.)  
Dr. Ernst Beutner,  
Dr. Heiko Neukirchner, Dr. Gerhard Maas

# **Virtuelle Produkt- entwicklung**

Vogel Buchverlag

IAV GmbH Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr (Hrsg.)

An der Erstellung des Buchs waren beteiligt:

Dr. Ernst Beutner, Dr. Heiko Neukirchner / IAV, Dr. Gerhard Maas / IAV,  
Oliver Predelli / IAV, Dr. Karsten Roepke / IAV, Mirko Leesch / IAV,  
Dr. Joerg Mueller / IAV, Michael Guenther / IAV, Dr. Karl-Heinz Hartwig / IAV  
Dr. Jan Blickwede / IAV, Dr. Mamdouh Tousein / IAV, Wolfgang Berg / IAV,  
Heiko Krause / ACTech, Heiko Georgi / IAV, Prof. Dr. Werner Schreiber / VW,  
Prof. Dr. Astrid Schuetz / Uni Bamberg, Prof. Dr. Andrea Kobylka / WHZ Zwickau,  
Dr. Martin Hanke / CADFEM

---

**Weitere Informationen:**

[www.vogel-buchverlag.de](http://www.vogel-buchverlag.de)



<http://twitter.com/vogelbuchverlag>



[www.facebook.com/vogel.buchverlag](http://www.facebook.com/vogel.buchverlag)



[www.vogel-buchverlag.de/rss/buch.rss](http://www.vogel-buchverlag.de/rss/buch.rss)

---

ISBN 978-3-8343-3106-9

1. Auflage. 2013

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten.  
Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form  
(Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen  
Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des  
Verlages reproduziert oder unter Verwendung  
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt  
oder verbreitet werden.

Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich  
genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 2013 by

Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg

## Vorwort

Trotz der in den letzten Jahren deutlich stärker gewordenen Nutzung computerunterstützter Arbeitsweisen wird der Produktentstehungsprozess noch vielfach nach bekannten Abläufen gestaltet. Stetig steigende Anforderungen einerseits (Bild) und der vorhandene Entwicklungsstand von Hard- und Software andererseits verlangen aber eine grundlegende Innovation der Produktentwicklung bzw. der gesamten Produktentstehung, den Übergang zu durchgängig virtuellen Arbeitsweisen.

Da langfristig nur die Unternehmen im Wettbewerb bestehen werden, die neben der Entwicklungskompetenz auch die Fähigkeit zur Produktinnovation und darüber hinaus zur Innovation des Produktentstehungsprozesses besitzen, muss sich der Ingenieur von morgen Grundkenntnisse auf dem Gebiet der «Virtuellen Produktentwicklung» bzw. der «Virtuellen Produktentstehung» aneignen.

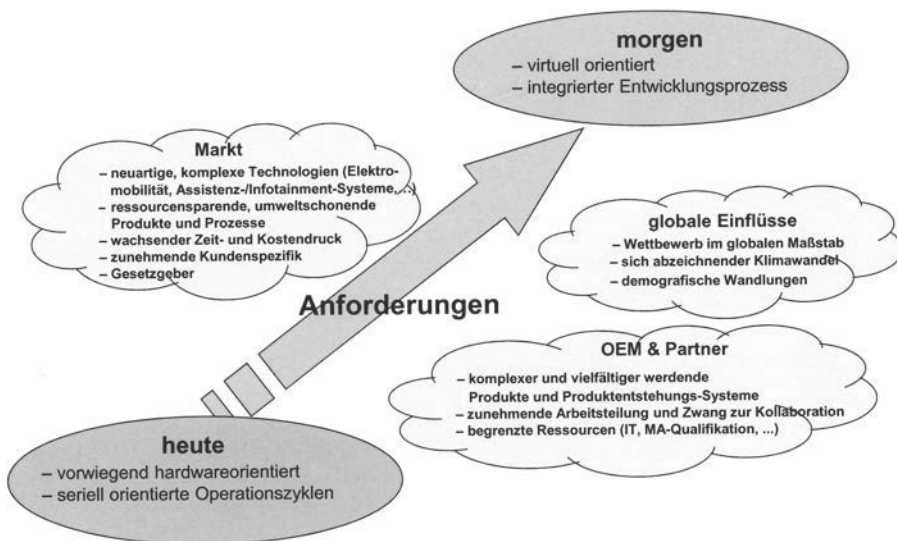


Bild Produktentwicklung im Wandel

Wenn auch über Inhalt und Nutzen der «Virtuellen Produktentwicklung» in der letzten Zeit sehr viel diskutiert wurde, ist heute die Notwendigkeit der schnellstmöglichen Einführung «Virtueller Entwicklungsprozesse» unumstritten. Es geht nicht mehr darum, ob «Virtuelle Produktentwicklung» erforderlich ist, sondern nur noch darum, zu welchem Zeitpunkt welche Schritte gegangen werden, um so schnell und effizient wie möglich den Übergang zu durchgehend virtuellen Arbeitsweisen zu erreichen.

Wurde noch in den vergangenen Jahren darüber diskutiert, wie erfolgreich einzelne Simulationsmodelle laufen und welche gute Übereinstimmung mit der Realität erzielt wurde, so geht es heute darum, komplexe Aufgaben und Prozesse in der Produktentstehung mit virtuellen Methoden durchgängig zu bearbeiten. Nur so sind maximale Synergien und Nutzen für ein Unternehmen und seine Mitarbeiter zu erschließen. Die Beherrschung der virtuellen Prozessketten wird zu einer Kernkompetenz der Unternehmen.

Einen Grundkonsens gibt es heute aber auch darüber, dass «Virtuelle Produktentwicklung» nicht bedeutet, alle Phasen der Entwicklung bis zur Vorserie virtuell durchgängig zu bearbeiten, um gar auf Hardware und reale Versuche ver-

zichten zu können. Die virtuelle Entwicklung wird trotz aller Bedeutung auch niemals die konventionelle Entwicklung vollständig verdrängen. Es geht um das sinnvolle Miteinander beider Methoden.

Hier wird aus der Sicht der Praxis das Verständnis dieser Thematik gefördert, und es werden die aktuellen Schwerpunkte des Aufgabengebietes erläutert. Vor allem Manager und Mitarbeiter in der technischen Entwicklung und Fertigung, Studenten technischer Fachrichtungen an Hoch- und Fachhochschulen sowie alle Personen, die die Anwendung computergestützter Arbeitsweisen interessieren, können von diesem Buch profitieren. Es trägt dazu bei, Werkzeuge und Methoden der computergestützten Ingenieursarbeit, «Virtuelles Engineering», als zukünftiges Handwerkszeug eines Ingenieurs zu verstehen und anwenden zu können.

In Übereinstimmung mit dem globalen Megatrend zur Virtualisierung der Produktentstehung eröffnen sich schließlich umfassende Anwendungen des «Virtuellen Engineering». Der Ingenieur erhält damit auf vielen Gebieten der Produktentstehung völlig neue Perspektiven und Möglichkeiten: bei der Rationalisierung seiner Arbeit, der weltweiten Zusammenarbeit, für eine verstärkte Nutzung vorhandenen Wissens oder zur Stärkung innovativer Tätigkeiten.

Aufgrund der Komplexität und der Dynamik dieses Arbeitsgebietes liefert das Buch, neben dem grundsätzlichen Verständnis für die Zusammenhänge, vor allem einen Überblick der Vielfalt aktueller Anwendungen in der «Virtuellen Produktentwicklung». Standardwerke zu dieser neuartigen Thematik gibt es im Buchhandel kaum, aber eine rasant ansteigende Zahl von Veröffentlichungen in Fachzeitschriften sowie Fachtagungen sind zu verzeichnen.

Hinsichtlich verwendeter Begriffe und Abkürzungen existieren derzeit in der Fachliteratur nur wenige einheitlich verwendete Begriffe. Die Vielzahl der Arbeitsdisziplinen und neuartigen Technologien führte und führt zu einer verwirrenden Vielfalt synonyme Begriffe und Abkürzungen. Für den Leser werden daher zum besseren Verständnis häufig auftretende Begriffe und Abkürzungen im Anhang erläutert.

Die angesprochenen Themen werden im Wesentlichen anhand von Beispielen aus der Aggregateentwicklung des Automobilbaus erläutert. Da die Aggregateentwicklung bisher vielfach von der Mechanikentwicklung dominiert wurde, stehen die Fragen dieses Entwicklungsgebietes im Vordergrund. Darüber hinaus wird der Übergang der bisher von der Mechanik beherrschten Entwicklungsabläufe zu Entwicklungsprozessen mit mechatronischer Aufgabenstellung berücksichtigt und die Bedeutung virtueller Methoden für die Mechanik-, Elektrik-/Elektronik- und Software-Entwicklung aufgezeigt.

Wenn auch in anderen Wirtschaftszweigen im Einzelnen durchaus unterschiedliche Anforderungen an den Einsatz virtueller Technologien existieren, sollten doch die im Buch erläuterten Methoden und Herangehensweisen grundsätzlich für den Fahrzeug-, Maschinen- und Anlagenbau interessant sein.

Dieses Buch konnte nur durch die breite Mitwirkung von Kompetenzträgern entstehen. Unser besonderer Dank für eine gute Zusammenarbeit geht an:

Herrn B. Poettner/VW, Herrn Dr. S. Haasis/Daimler, Herrn H. Staufenberg/Flowmaster, Herrn A. Kiesel/IAMT, Herrn Dr. H. Liebermann, Herrn T. Böhme, Herrn H. Vieweg, Herrn Dr. C. Gruenig, Herrn U. Hofmann (alle IAV).

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	5
<b>1 Produktentwicklungsprozesse im Wandel .....</b>	<b>11</b>
1.1 Auf dem Weg zur «Virtuellen Produktentwicklung» .....	12
1.2 Entwicklungsprozesse von morgen .....	18
1.2.1 Frontloading – neue Möglichkeiten durch «Virtuelles Engineering» .....	27
1.2.2 Integration – Entwicklungsdisziplinen rücken zusammen ....	28
1.2.3 Kostensenkung – Daueraufgabe im ganzheitlichen Produktentstehungsprozess .....	29
1.3 Virtueller Prozess – Treiber und Risiko .....	33
1.3.1 Arbeitsorganisation und Arbeitsteilung in der Veränderung ...	33
1.3.2 Risiken im virtuellen Prozess .....	36
1.4 Schlussfolgerungen und Ausblick .....	39
<b>2 Produkt- und prozessbezogene Daten .....</b>	<b>41</b>
2.1 Informations- und Datenmodelle .....	41
2.1.1 Produktmodelle .....	42
2.1.1.1 Produktmodellierung .....	44
Geometriemodelle .....	44
Modellierungstechniken .....	49
CAD-Modellierung im Kontext virtueller Entwicklung .....	59
2.1.1.2 Reverse Engineering .....	62
2.1.2 Integrierte Datenmodelle .....	67
2.2 Datenmanagement .....	70
2.2.1 Produktlebenszyklus-Management .....	71
2.2.1.1 Produktdaten-Managementsysteme .....	72
2.2.1.2 Anforderungsmanagement .....	78
2.2.1.3 Partnerübergreifendes Projektmanagement .....	80
2.3 Datenvisualisierung .....	83
2.3.1 Digital-Mock-Up .....	85
2.3.2 Virtual Reality .....	89
2.3.3 Augmented Reality .....	96
2.4 Datenqualität .....	99
2.5 Datenaustausch .....	101
2.6 Schlussfolgerungen und Ausblick .....	106
<b>3 Berechnung und Simulation .....</b>	<b>111</b>
3.1 Zur Anwendung von Berechnung und Simulation .....	113
3.2 Kurzcharakteristik ausgewählter Methoden von Berechnung und Simulation .....	116
3.2.1 Analytische Methoden .....	120
3.2.2 Mehrkörpersimulation .....	121
3.2.3 Finite-Elemente-Methoden .....	123

3.2.4	Strömungssimulation .....	126
3.2.5	In-the-loop-Simulation .....	129
3.2.6	Statistische Versuchsplanung .....	132
3.2.7	Neuronale Netze .....	139
3.2.8	Fuzzy-Logic .....	143
3.2.9	Multiphysik .....	146
3.3	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	150
<b>4</b>	<b>Computerunterstützte Entwicklung .....</b>	<b>155</b>
4.1	Simulationsgestützte Mechanikentwicklung .....	155
4.1.1	Funktionsorientierte Aufgabenstellungen .....	156
4.1.1.1	Auslegung Grundmechanik .....	157
4.1.1.2	Abstimmung Ladungswechsel/Arbeitsprozess ....	161
4.1.1.3	Gemischbildung – Verbrennung – Abgasnachbehandlung .....	164
4.1.1.4	Festigkeitsberechnungen .....	169
4.1.1.5	Optimierung Motorakustik .....	174
4.1.1.6	Öl-/Wasserkreisläufe, Thermomanagement, Kraftstoffsysteme .....	176
4.1.1.7	Getriebe- und Antriebsstrangentwicklung .....	179
4.1.1.8	Crash-Simulation in der Fahrzeugentwicklung ....	183
4.1.2	Fertigungsorientierte Aufgabenstellungen .....	187
4.1.2.1	Toleranzsimulation .....	188
4.1.2.2	Gießsimulation .....	191
4.1.2.3	Einbau- und Montagesimulation .....	194
4.2	Entwicklung von Elektrikkomponenten .....	196
4.2.1	Bordnetzentwicklung .....	196
4.3	Entwicklung von Elektronikkomponenten .....	201
4.3.1	Applikation von Steuergeräten .....	201
4.3.1.1	Einführung .....	201
4.3.1.2	Virtuelle Motorapplikation .....	204
4.3.1.3	Datensatzmanagement in der Applikation .....	210
4.3.2	Softwareentwicklung für Motorsteuergeräte .....	213
4.3.3	Echtzeitmotorsimulation .....	222
4.4	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	225
<b>5</b>	<b>Prototyping .....</b>	<b>227</b>
5.1	Rapid Prototyping .....	228
5.2	Konventionelles Prototyping .....	231
5.3	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	232
<b>6</b>	<b>Wissen im Entwicklungsprozess .....</b>	<b>233</b>
6.1	Wissen – auf dem Weg zur Ressource .....	233
6.2	Wissensbasiertes Engineering .....	235
6.2.1	Wissensdatenbanken .....	237
6.2.2	Wissensbasierte Konstruktion .....	239
6.2.3	Expertensysteme .....	241
6.3	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	242



<b>7</b>	<b>Informationstechnik – Schlüsseltechnologie für die virtuelle Entwicklung</b> .....	245
7.1	IT-Infrastruktur .....	246
7.2	CAX-Prozess .....	251
7.3	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	252
<b>8</b>	<b>Der Faktor Mensch in der Virtuellen Produktentwicklung</b> .....	255
8.1	Anforderungen an Mitarbeitende der ViP .....	255
8.2	Zusammenarbeit und Kommunikation in virtuellen Teams .....	256
8.3	Wissensmanagement: Wie lässt sich Wissensaufnahme und -weitergabe optimieren? .....	257
8.4	Belastung und Stressbewältigung .....	259
8.5	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	261
<b>9</b>	<b>Von «ViP» zur «Digitalen Fabrik»</b> .....	263
9.1	Digitalisierung der Produktentstehung – ein globaler Megatrend ...	263
9.2	Etappen der virtuellen Produktentstehung .....	263
9.2.1	ViP .....	263
9.2.2	Digitale Fabrik .....	265
9.3	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	269
<b>10</b>	<b>Beispiele computerunterstützter Entwicklung</b> .....	271
10.1	CAD-Modellierung eines Zylinderkopfs .....	271
10.2	Auslegung Rollenschlepphebeltrieb .....	279
10.3	Mechatronikentwicklung «variable Ventilsteuerung» .....	287
10.4	DoE-Versuchsplan und Auswertung .....	292
10.5	Augmented-Reality-Anwendungen .....	298
10.6	Systematische Synthese und Bewertung von Getriebestrukturen ...	300
10.7	Gießsimulation und Prototyping-Prozess .....	307
10.8	Wissensdatenbank in der Produktentwicklung .....	315
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	319
	<b>Glossar</b> .....	335
	<b>Verwendete Formelzeichen und Indizes</b> .....	348
	<b>Anhang</b> .....	349
1	Häufig angewendete universelle CAX-/PDM-Tools .....	349
2	Häufig angewendete spezifische CAE-Tools .....	352
3	Beispiele für CAE-Software-Plattformen .....	355
	<b>Quellen- und Literaturverzeichnis</b> .....	357
	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	369



# 1 Produktentwicklungsprozesse im Wandel

Die Produktentwicklung ist Teil bzw. Phase im Lebenszyklus eines Produkts (Bild 1.1).

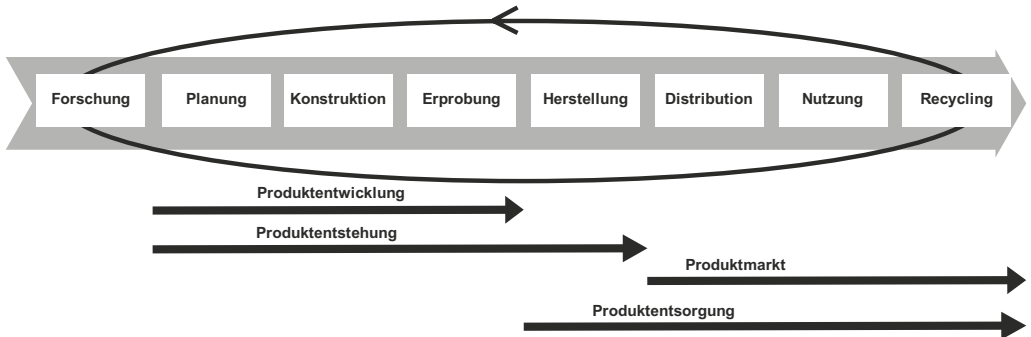


Bild 1.1 Phasen im Lebenszyklus eines Produkts [1.2]

Obwohl die Kosten der Produktentwicklung einen relativ geringen Anteil an den Kosten des gesamten Produktentstehungsprozesses eines Produkts haben, werden nach [1.12] in der Entwicklungsphase ca. 70% der Produktionskosten festgeschrieben. Da nun einerseits die Entwicklungszyklen immer kürzer, andererseits aber die Vielfalt, Komplexität und Änderungsdynamik der Produkte immer größer wird, muss der Entwicklungsprozess selbst so umgestaltet werden, dass in kürzeren Zeiten und früheren Entwicklungsphasen als bisher bereits ein weitgehend optimiertes Produkt zur Verfügung steht. Das Eigenschaftsprofil dieses Produkts muss sich dabei konsequenter denn je am Kundenbedürfnis orientieren und durch ganzheitliche Optimierung von Produkt (Bild 1.2) und zugehörigen Produktentstehungsprozessen umgesetzt werden.

Die bisher dominierende Orientierung auf Produktfunktion und Produktkosten wird von den wachsenden Anforderungen des Marktes bzgl. Einsparung von Material- und Energieressourcen, nach größerer Kundenspezifität sowie nachhaltig umweltfreundlichen Produkten und Produktentstehungsprozessen überlagert. Dabei liefert die Beibehaltung der bisher üblichen Lösungsstrategie, die Summe der besten Teillösungen zu nehmen bzw. die jeweiligen Anforderungen getrennt zu optimieren, nicht zwangsläufig die beste Gesamtlösung. Vielmehr eröffnet die Einführung durchgehender computergestützter Arbeitsweisen erstmalig in der Geschichte der Produktentstehung die Möglichkeit, einen solch komplexen Optimierungsprozess ganzheitlich zu beherrschen.

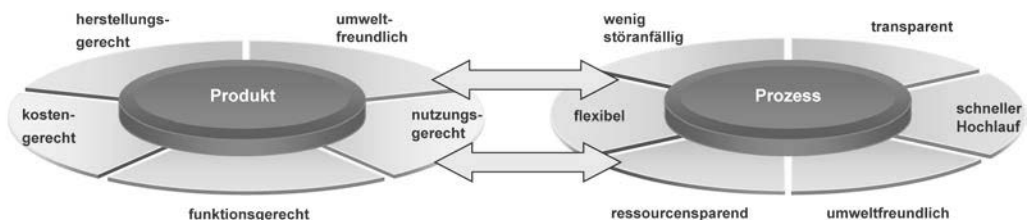


Bild 1.2 Ganzheitliche Produkt- und Prozessoptimierung

Schließlich kann auch eine Beibehaltung der bisher praktizierten hardwareorientierten Entwicklungsmethoden mit deren relativ späten Änderungs- bzw. Krisenmanagement in den zur Verfügung stehenden Zeiten nicht mehr ausreichend reagieren und ist ohnehin deutlich kostenintensiver. Die Forderung nach Neugestaltung bzw. Innovation der Produktentwicklung und darüber hinaus der gesamten Produktentstehung liegt auf der Hand.

## 1.1 Auf dem Weg zur «Virtuellen Produktentwicklung»

Die Produktentwicklung wurde in den letzten Jahrzehnten hinsichtlich ihrer Methoden und Werkzeuge entscheidend durch den Einsatz der Informationstechnologie (IT) beeinflusst. Bild 1.3 zeigt Beispiele für den zeitlichen Einsatz ausgewählter IT-Technologien sowie zugehörige Prototypen bzw. Praxisanwendungen.

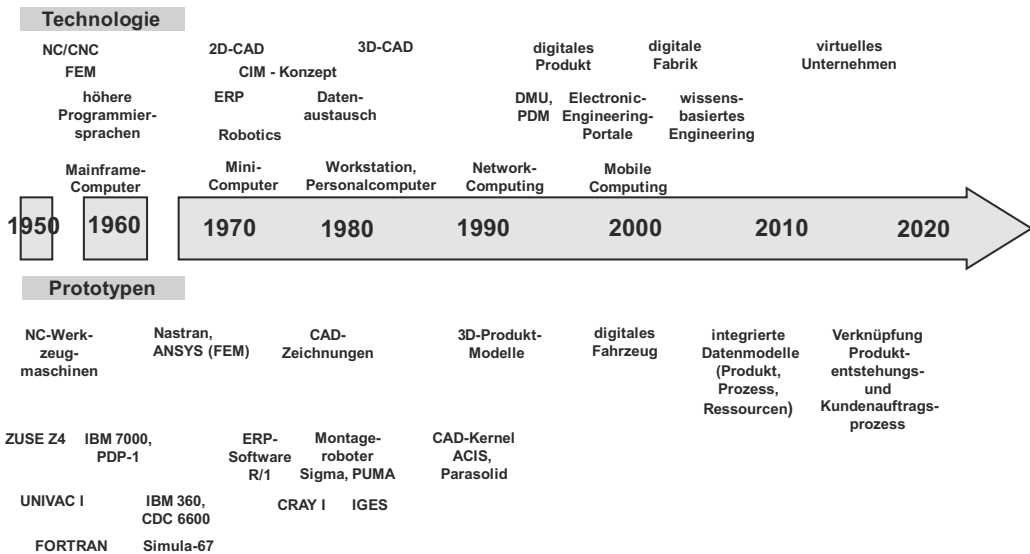


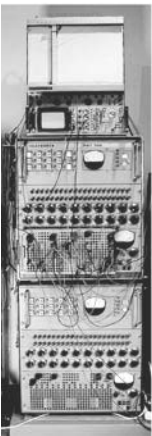
Bild 1.3 IT-Technologien in der Produktentstehung

Noch bis Anfang der 1980er Jahre war die methodische Konstruktion auf dem Zeichenbrett, gestützt von vereinzelt «technischen Berechnungen», die dominierende Arbeitsweise in der technischen Entwicklung. Nachfolgend sind wichtige Etappen des Computereinsatzes in der Produktentwicklung aufgelistet:

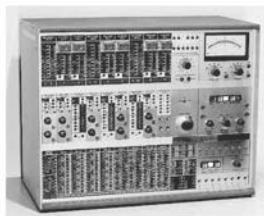
- 1950...1970      Methodische Konstruktion mit Zeichenbrett; Beginn rechnerunterstützter Entwicklungsmethoden in Berechnung, Konstruktion und Fertigung (numerische Steuerungen/NC); Stapelverarbeitung sowie Datenspeicherung in Filesystemen auf Band bzw. Platte.
- 1960...1980      «Technische Berechnungen» mit Hilfe zentral stationierter analoger, digitaler und hybrider Rechentechnik (Bild 1.4); Rechnergestützte Zeichnungserstellung; Timesharing-Systeme; Datenspeicherung in File- und relationalen Datenbanksystemen.

1970...1990	Rechnerunterstützte Konstruktion (CAD) mit digitalen Personalcomputern; Ersatz des Zeichenbretts durch 2D-CAD-Konstruktion.
1985...1995	Computerunterstütztes Engineering (CAE) durch «konstruktionsbegleitende Berechnungen»; Aufbau erster virtueller Prozessketten; Funktionsbewertung einzelner Disziplinen auf Basis von Berechnungsergebnissen.
1990...2000	3D-CAD im Entwicklungsprozess werden als verbindliche Produktdaten anerkannt; Datenspeicherung in objekt-basierten bzw. objekt-relationalen Datenbanksystemen.
1995...2005	Simultaneous Engineering mit Zusammenführung aller Produkt-disziplinen im DMU (Digital-Mock-Up), rechnerunterstütztes Informations- und Produkt-Daten-Management (PDM); Mobile Computing über Funkverbindungen.
2000...2010	«Simulationsgestützte Bauteilentwicklung» zur Optimierung funktions- und fertigungsorientierter Produkteigenschaften über dem gesamten Lebenszyklus; ganzheitliche Betrachtung des Produktentstehungsprozesses; Electronic Engineering Portal; Verstärkte Nutzung von Expertenwissen.
2005...2015	Integration von Unternehmens-Know-how im Produktentstehungsprozess; Wissensbasierte virtuelle Produktentwicklung; Digitale Fabrik; Integrierte Produktdaten- und Prozessmodelle.
2010...2025	Wissensbasierte virtuelle Produktentstehung.

Analogrechner  
Telefunken RAT 700  
( um 1961 )



Hybridrechner  
EAI 180  
( um 1970 )



Digitalrechner  
PDP 8  
( um 1965 )



Quelle: www.technikum29.de

Bild 1.4 Bauarten der elektronischen Rechentechnik

Ab Anfang der 1960er Jahre erfolgte zunächst durch vorwiegend zentral stationierte Analog-, Digital- und Hybrid-Rechentechnik sowie später ab Ende der 1970er Jahre mit den digitalen Workstations und Personalcomputern der flächendeckende Einzug der Computertechnologie. Bild 1.5 zeigt eine Übersicht von charakteristischen Eigenschaften der verschiedenen Bauarten elektronischer Rechentechnik. Spielten zu Beginn des umfassenden Einsatzes der Rechentechnik die Nutzung der Analog- und Hybridrechentechnik eine bedeutende Rolle, so ist etwa ab Anfang der

1970er Jahre der Digitalrechner dominierend. Gründe dafür sind vor allem seine Vorteile bei Genauigkeit, Speicherkapazität und Reproduzierbarkeit von Ergebnissen sowie ein beeindruckender Anstieg der Rechenleistungen. Betrug die Arbeitgeschwindigkeit in den 1950er Jahren noch etwa 1000 Operationen/s, so stieg diese bis Mitte der 1970er Jahre auf ca. 80 Mio. Operationen/s ([www.computerhistory.org](http://www.computerhistory.org)).

Rechner-Typ	Arbeitsweise	Genauigkeit	Anwendungsgebiete	Einsatz	Charakteristika	bekannte Vertreter
<b>Analog-Rechner</b>	kontinuierlich	0,01...0,001	komplexe mathemat. Funktionen und gewöhnliche lineare / nicht-lineare Differentialgleichungen, in gewissen Grenzen partielle Differentialgleichungen, Systeme beschränkter Umfanges (Anzahl der Rechenelemente begrenzt)	spezif. Anwendungen in Prozesssteuerung, Luft- und Raumfahrt	Ein-/Ausgänge der Berechnung stufenlos dargestellt z.B. mit Hilfe von Spannungen oder Strömen, alle Rechenoperationen parallel, besitzen keine Speicher, Ablauf einer Rechnung wird durch Verbindung von Rechenelementen (Summierer, Integrierer, ...) auf einer Programmiertafel erreicht	RAT700, Hitachi-240, EAT TR-10, endim 2000, MEDA 43
<b>Digital-Rechner</b> - Supercomputer - Großrechner - Minicomputer - Mikrocomputer - Kleinstcomputer	diskret	< 0,001	Funktions- und Formelberechnungen, algebraische Gleichungssysteme, partielle Differentialgleichungen, Probleme mit hoher Genauigkeit	in allen Wirtschaftszweigen	alle Daten und Programme werden rechnerintern als Folgen der 2 digitalen Werte "0" und "1" verschlüsselt, heute existierende Rechner (Computer) sind fast ausschließlich Digitalrechner, große Skalierbarkeit und Genauigkeit	Zuse Z3, ENIAC, IBM 360, Robotron 300, CRAY-1
<b>Hybrid-Rechner</b>	kontinuierlich/diskret	...0,001	Rand- und Eigenwertprobleme, Simulation und Optimierung komplexer dynamischer Systeme (Stromnetze, Gasnetze), Online-Simulation für schnelle Regelungen	spezif. Anwendungen in Luft- u. Raumfahrt, Chemie, Energieversorgung, Prozesssteuerung, Navigation	Besitzt sowohl analoge als auch digitale Bestandteile sowie Koppelelektronik zur Umwandlung digitaler in analoge Signale und umgekehrt, vorteilhaft werden mit analogen Elementen schnelle Näherungslösungen berechnet und digital weiterverarbeitet	EAI 180, HRA 7000

Bild 1.5 Eigenschaften elektronischer Rechnerbauarten

Mit dem breiten Einsatz der elektronischen Digitalrechenstechnik begann ein dynamischer Wandel des Produktentwicklungsprozesses. Ein wichtiger Meilenstein in dieser Entwicklung war die Abbildung der 3D-Bauteilgeometrie im Computer. In den 1990er Jahren erfolgte schließlich die Anerkennung der digitalen 3D-Geometriemodelle als verbindliche Entwicklungsdaten. Dies war eine der Grundvoraussetzungen für den verstärkten Einsatz und den Erfolg computergestützter Arbeitsweisen.

Besonders deutlich verändert hat sich in den letzten Jahren die Rolle der Berechnung. Noch bis Mitte der 1980er Jahre dienten die «technischen Berechnungen» vorwiegend zur Bauteil-Grobauslegung, zur Unterstützung von Schadenanalysen, zu Nachrechnungen im Sinne der Rechtfertigung für den eingeschlagenen Entwicklungsweg und zum besseren Verständnis ablaufender Vorgänge und Prozesse in einzelnen Bauteilen oder Baugruppen. Danach begann der schrittweise Übergang zur «konstruktionsbegleitenden Berechnung».

Charakteristisch dafür ist die zeitgleiche und z.T. auch vorausseilende Bereitstellung qualitativ hochwertiger Berechnungsergebnisse zur Bauteilauslegung sowie zur Bewertung und Absicherung der jeweiligen Entwicklungsphase oder auch zum Abschätzen möglicher Versagensfälle. Damit verbunden war der Aufbau erster virtueller Prozessketten.

Etwas ab 2000 beginnt die «simulationsgestützte Bauteilentwicklung». Im Unterschied zur «konstruktionsbegleitenden Berechnung» geht es hier darum, Entwicklungsstufen eines Produkts direkt an die Ergebnisse aus Berechnung und Simulation zu binden. Dabei geht es gegenwärtig bei der berechnungsseitigen bzw. virtuellen Absicherung des Entwicklungsstandes vor allem um die Auswahl von Entwicklungsvarianten auf Basis rechnerischer Untersuchungen.

Zukünftig wird aber der berechnungsseitige Nachweis bzw. die virtuelle Absicherung für die optimale Funktionsfähigkeit und Fertigbarkeit des Produkts als Voraussetzung für die Freigabe einer Entwicklungsstufe angestrebt. Die «simulationsgestützte Bauteilentwicklung» ist damit einer der entscheidenden Schritte auf dem Weg zur «Virtuellen Produktentwicklung» (ViP).

In den letzten Jahren wurden, wie bereits in der Einleitung angedeutet, mit dem Begriff «Virtuelle Produktentwicklung» zum Teil sehr überzogene Erwartungen verknüpft und damit auch kontroverse Diskussionen geführt. Dies ist aber bei neuartigen Technologien durchaus verständlich. Nach GARTNER GROUP [1.15] können für ausgewählte neue Technologien entlang ihres Einführungszeitraums sog. «Phasen der öffentlichen Aufmerksamkeit» definiert werden. Danach ist es bei der Einführung neuer Technologien typisch, dass solche Phasen wie «überzogene Erwartungen» oder «Tal der Enttäuschung» durchlaufen werden, bevor die produktive bzw. eine allseits akzeptierte Einführungsphase erreicht wird. Bild 1.6 zeigt einen nach dieser Art der Darstellung sich ergebenden Hype-Zyklus (auch «Fieberkurve der Aufmerksamkeit» genannt). Aus Sicht des Jahres 2010 wurden hierbei die Begriffe «PDM», «ViP» und «Digitale Fabrik» in den Hype-Zyklus eingefügt. Die «Koordinaten» der genannten Begriffe in der dargestellten Funktion sind durch eigene Erfahrungen des Verfassers und durch die heute in der Literatur überwiegend anzutreffenden Einschätzungen begründet.

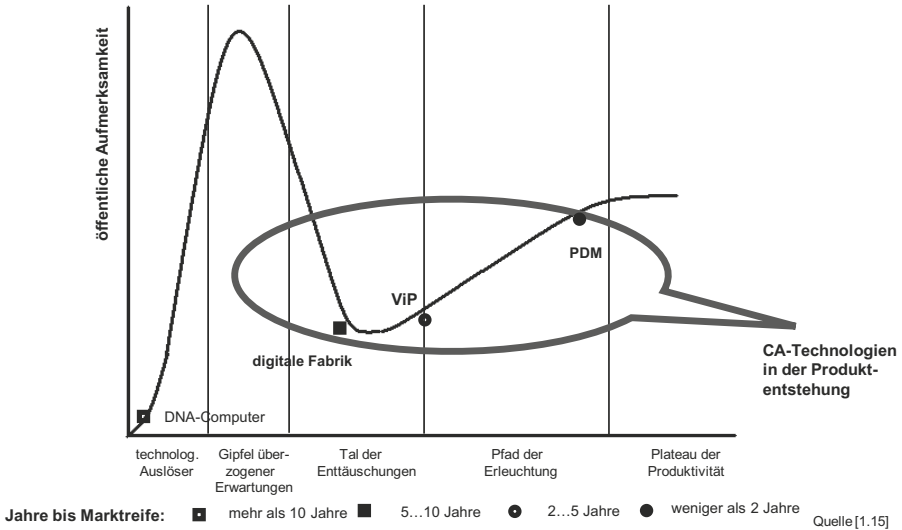


Bild 1.6 ViP in der öffentlichen Aufmerksamkeit

In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass in der Literatur rund um den Begriff «Virtuelle Produktentwicklung» auch andere Synonyme verwendet werden und nicht immer eindeutige bzw. einheitliche Begriffsdefinitionen existieren. Am häufigsten sind hierbei «Virtual Product Development» (VPD), «Integrierte Produktentwicklung» oder auch «Virtuelles bzw. digitales Fahrzeug» anzutreffen. Inhaltliches Anliegen dieser Ausdrücke ist im Kern die Gestaltung eines neuartigen Produktentwicklungsprozesses auf der Basis des durchgehenden Einsatzes «virtueller Technologien». Im Gegensatz dazu wird bei der Einzelanwendung «virtueller Technologien» für computergestützte Ingenieurarbeit in der Produktentwicklung bzw. Produktentstehung meist von «Virtuellem Engineering» oder «Computational Engineering» gesprochen (Bild 1.7). Für «virtuelle Technologien» sind in der Literatur auch die Begriffe «virtuelle Techniken», «IT-Technologien» oder «CA-Techniken» (CA: Computer aided) anzutreffen.

In letzter Zeit tauchen zunehmend die Begriffe «Virtual Prototyping» bzw. «Virtual Prototyping & Simulation» auf. Allgemein geht es hier darum, durch Simulation und Untersuchungen von Systemen mit Hilfe rechnerinterner Datenmodelle das Design sowie das Funktionsverhalten von Produkten virtuell zu optimieren und damit letztlich auch um «Virtuelles Engineering» in der Produktentstehung. In der Mechatronik- aber auch in der Elektronikentwicklung spricht man in diesem Zusammenhang oft vom «Model-Based-Design».

Im Falle der Entwicklung von Steuerungssoftware sind bei letzterem nicht nur die Entwurfs- bzw. Optimierungsuntersuchungen auf Basis digitaler Modelle gemeint, sondern auch der Entwicklungsschritt bis hin zur automatischen Umsetzung des Modells in einen Applikationscode.

«Virtuelle Produktentwicklung» ist aber, wie oben bereits erwähnt, wesentlich mehr als die «simulationsgestützte Bauteilentwicklung». Sie ist im Kern die ganzheitliche Beherrschung und Anwendung «virtueller Technologien» über den gesam-



ten Entwicklungsprozess mit dem Ziel einer weitgehend virtuellen Entwicklung serientauglicher Produkte. Im Entwicklungsprozess selbst wird dies durch die Aufnahme sog. «virtueller Baustufen» in den frühen Phasen der Produktentwicklung deutlich. Wie es gelingt diese virtuellen Baustufen mit den jeweils zugehörigen eigenständigen Freigaben als verbindliche Entwicklungsphasen im Unternehmen einzuführen und welche Qualität die Ergebnisse der virtuellen Baustufen – die virtuellen Prototypen – in Bezug auf die Serienbaustufe haben, ist eine der entscheidenden Etappen auf dem Weg zur virtuellen Entwicklung. Andererseits bedeutet letzteres aber nicht, dass alle Phasen einer Produktentwicklung bis zur Vorserie ausschließlich virtuell bearbeitet werden.

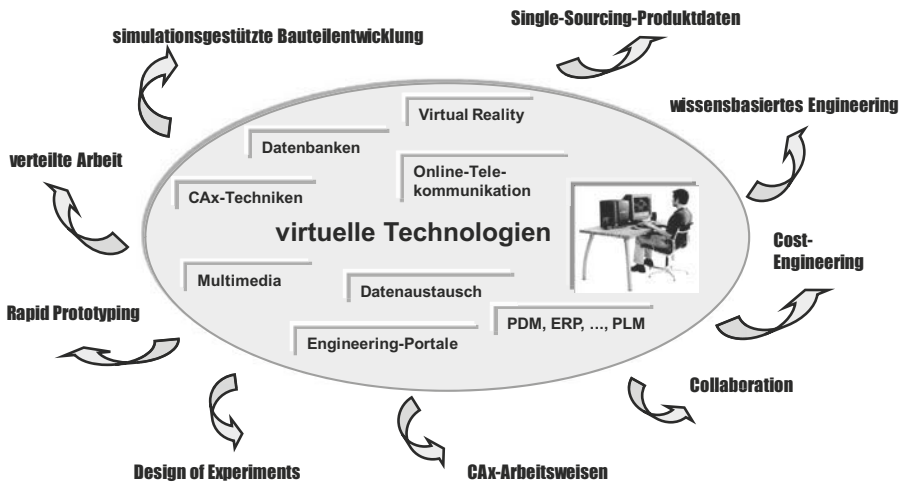


Bild 1.7 Virtuelles Engineering durch Anwendung virtueller Technologien

Versuche sind einerseits zur Verifizierung von Ergebnissen aus Berechnung und Simulation sowie zur Validierung der Berechnungsmodelle unerlässlich. Andererseits werden in den nächsten überschaubaren Zeiträumen aus Aufwandsgründen, aber auch wegen unzureichender Ergebnisqualität, nicht alle Entwicklungsarbeiten virtuell abgesichert werden können. Ohnehin gilt, dass jedes Produkt vor Aufnahme der Serienproduktion eine experimentelle Freigabeuntersuchung mit Hardware-Prototypen absolviert haben muss. Die virtuelle Entwicklung wird trotz ihrer herausragenden Bedeutung die konventionelle Entwicklung nie vollständig verdrängen. Letztlich geht es immer darum, eine technisch und betriebswirtschaftlich sinnvolle Ergänzung beider Entwicklungsmethoden zu finden.

Um in künftigen Entwicklungsprozessen den umfassenden Einsatz virtueller Technologien einzuführen, ist natürlich auch die Existenz einer technischen Basis, d.h. die Implementierung von leistungsfähigen Hard- und Softwareumgebungen, für ViP erforderlich. Diese sind meist kostenintensiv, und die Marktdynamik auf diesem Gebiet ist hoch und wenig transparent. Das bedeutet, das Risiko von Fehlinvestitionen ist groß. Intensive Abstimmung und sorgfältige Steuerung eines kontinuierlichen ViP-Prozesses sowie Konzentration auf Schwerpunkte sind daher auch aus Kostengründen dringend geboten. Wichtigste Zielstellungen für die Einführung von ViP betreffen die unmittelbare Zukunft:

- ❑ der durchgehende Datenfluss produktbezogener Informationen und 3D-Daten in verteilten und heterogenen CAx-Systemumgebungen,
- ❑ die simulationsgestützte Entwicklung in enger Wechselbeziehung mit Versuch und Prototyping,
- ❑ die umfassende Integration von unternehmensrelevantem Wissen in den Entwicklungsprozess,
- ❑ die Prozessverantwortung für den ganzheitlichen Produktentstehungsprozess auf der Basis verbindlicher und an den Einsatz virtueller Methoden angepasster Geschäftsprozesse,
- ❑ die Verbesserung von Performance und Integration der IT-Infrastruktur sowie Einführung elektronischer Arbeitsplattformen.

Nur wenn es gelingt die ganzheitliche Umsetzung der aufgeführten Ziele zu verwirklichen, werden auch die dringend benötigten Effekte und Synergien zur Beherrschung der eingangs genannten Anforderungen an die künftige Produktentwicklung eintreten.

Die Konzentration auf nur einen Aspekt, z.B. die simulationsgestützte Entwicklung, wird zwangsweise nur Teileffekte generieren. Was nützt schon eine Berechnung, wenn die Datenmodelle nicht rechtzeitig und in ausreichender Qualität zur Verfügung stehen oder die Ergebnisse nicht in nachgelagerte Entwicklungsschritte einfließen können, wenn die Berechnung zu lange dauert oder die Geschäftsprozesse eine virtuelle Auslegung nicht anerkennen.

## 1.2 Entwicklungsprozesse von morgen

Durch die breite Einführung virtueller Arbeitsmethoden ist in den letzten Jahren in der Literatur von einer Vielzahl neuartiger Entwicklungsprozesse berichtet worden, z.B. in [1.6, 1.12, 1.28, 1.29, 1.30 und 1.31]. Daraus wird deutlich, dass bzgl. der Gestaltung dieser Prozesse vielfältigste firmenspezifische Ausprägungen bzw. Herangehensweisen existieren. Hinsichtlich einer Formalisierung der Entwicklungsprozesse sind branchenunabhängig die VDI-Richtlinie 2221/1993-05 «Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme» und für mechatronische Systeme, die aus mechanischen und elektrisch-/elektronischen Komponenten in Verbindung mit der Informationstechnik bestehen, die Richtlinie 2206/2004-06 «Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme» richtungweisend.

Orientiert an o.g. Richtlinien werden heute nicht nur firmenspezifisch, sondern innerhalb einer Firma auch in den Entwicklungsdisziplinen Mechanik, Elektrik, Elektronik und Software unterschiedliche Entwicklungsabläufe angewendet. Damit sind trotz der existierenden Schnittstellen «Reibungsverluste» zwischen den Entwicklungsbereichen vorprogrammiert. Zu beachten ist außerdem, dass die in den Richtlinien erwähnten Entwicklungsprozesse als Basisprozesse angesehen werden müssen. In der Praxis entstehen aber durch kurzfristige Störungen unterschiedlichster Art (z.B. Änderung Lastenheft bzw. technische Änderungen, Terminverschiebungen) Zwänge zur Änderung der Basisprozesse. Gefragt ist also immer auch ein flexibles und effizientes Änderungsmanagement für den Entwicklungsablauf.

Obwohl in vielen Branchen die Mechanikentwicklung noch immer bestimmend ist, ist doch absehbar, dass mechatronische Systeme beträchtlich an Bedeutung ge-

winnen, ja sogar die zukünftige Entwicklung dominieren werden. Dies gilt insbesondere für den Automobilbau, wo allein im Antrieb in den nächsten Jahren eine deutliche Zunahme der Produktkomplexität zu erwarten ist.

Neben der weiteren Optimierung des Verbrennungsmotors wird die Elektrifizierung des Antriebsstranges, angefangen vom Start-Stopp-System über Hybridisierungs-lösungen unterschiedlicher Skalierung bis hin zu Batterie- und Brennstoffzellen-Fahrzeugen in den nächsten Jahrzehnten für ein Nebeneinander unterschiedlicher Antriebstechnologien sorgen. Schon heute werden bis zu 70 Steuergeräte in einem Fahrzeug eingebaut. Die Elektrik/Elektronik macht derzeit rund 30% der Wertschöpfung eines Mittelklassefahrzeugs aus und gilt als wesentlicher Treiber für ca. 80...90% aller Innovationen im Automobil. Damit wird klar, Entwicklungsprozesse der Zukunft werden schon deshalb komplexer, weil im Vergleich zu mechanischen Systemen die Anzahl verkoppelter Elemente deutlich steigt und die Anzahl der zusammenwirkenden Fachdisziplinen zunimmt.

Zu berücksichtigen sind auch die durch individuelle Konfektionierung bzw. durch zunehmende Individualisierungswünsche von Kunden steigende Komplexität und die damit verbundenen Herausforderungen an die Entwicklungsgeschwindigkeit. Während in der Vergangenheit nach Auftragsvergabe nur unwesentliche Veränderungen erfolgten, ist es heute zunehmend Praxis noch bis zur endgültigen Montage Änderungen am Produkt vorzunehmen. Die Beherrschung steigender Komplexität in kürzesten Entwicklungszeiten wird zu einem zunehmenden Alleinstellungsmerkmal künftiger Entwicklungsprozesse.

Bild 1.8 zeigt das grundsätzliche Vorgehen bei Mechanik-Entwicklungen nach VDI 2221 und für den Entwurf mechatronischer Systeme nach dem sog. V-Modell aus VDI 2206. In beiden Fällen handelt es sich um ein Vorgehensmodell bzw. einen Ablaufzyklus. Ein solches Vorgehensmodell beschreibt den Ablauf und die Reihenfolge von Aktivitäten, die zum Erreichen eines Ziels – die Entwicklung eines Produkts – notwendig sind. Da die Abwicklung des gesamten Vorhabens beschrieben wird, sind die Aktivitäten relativ grob detailliert. Abhängig von der fortschreitenden Produktreife (Entwicklungsphase) bzw. angepasst an die firmenspezifische Entwicklungssituation kann der Zyklus mehrfach durchlaufen werden, bzw. es erfolgen entsprechende Details sowie Ergänzungen durch untersetzende Teilprozesse z.B. zur Softwareentwicklung nach dem sog. SPICE-Modell [4.1.28].

Zur Durchführung und Unterstützung der vielfältigen Tätigkeiten und Einzelschritte innerhalb der dargestellten Aktivitäten gibt es eine Vielzahl von Methoden, Tools und Hilfsmittel. In der Praxis besteht daher oft eine große Unsicherheit über die Eignung dieser Unterstützungsmittel. Letztlich muss aber jedes Unternehmen selbst die für das eigene personelle, finanzielle und organisatorische Umfeld die am besten geeigneten Methoden auswählen und die Einhaltung selbstgestellter Qualitätsvorgaben organisieren. Das Maß der Erfüllung dieser Vorgaben in der täglichen Arbeit bestimmt, welcher Qualitätslevel eine Firma charakterisiert.

Unabhängige Auditoren überprüfen mindestens einmal pro Jahr, ob eine Firma ihre selbst definierten Qualitätsprozesse einhält. Maßstab für das zugehörige Qualitätsmanagement sind die in der Norm ISO 9001 beschriebenen Festlegungen. Zusätzlich zu diesem zertifizierten Qualitätsmanagement nach ISO 9001 ist es üblich, dass Firmen, die sich als Dienstleister um Aufträge aus der Industrie bemühen, den Reifegrad ihres eigenen Entwicklungsprozesses einem aufwendigen Bewertungs- bzw. Einstufungsverfahren (Assessment) durch den Auftraggeber unterziehen müssen.

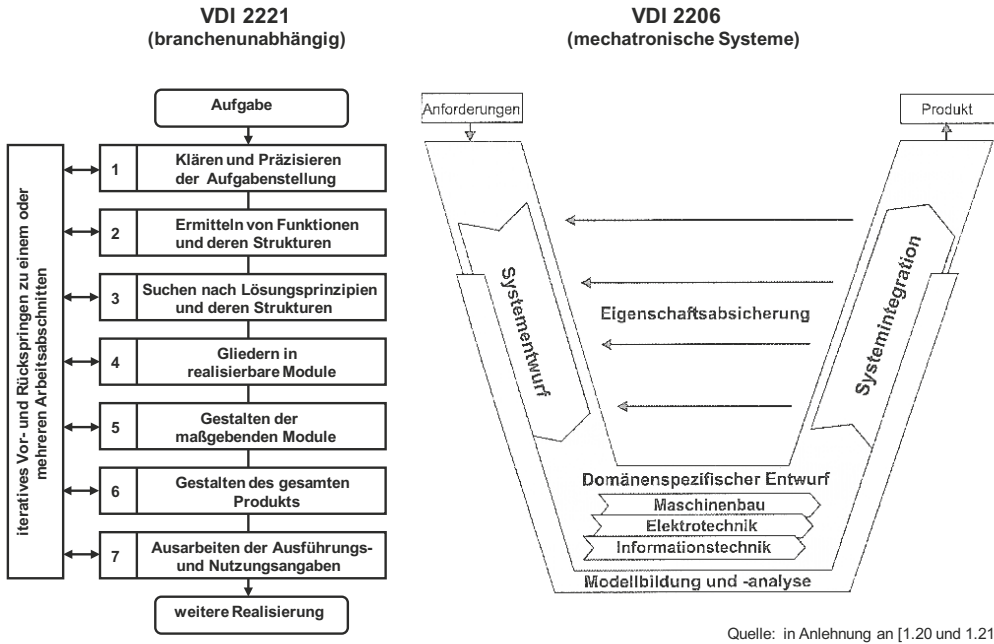


Bild 1.8 VDI-Vorgehensmodelle der Entwicklung

Hinsichtlich seines zeitlichen Ablaufs wird der Gesamtprozess der Entwicklung in einzelne Entwicklungsphasen zerlegt, die allerdings nicht einheitlich definiert sind. Bei den großen Automobilherstellern (OEM) spricht man am häufigsten von der Strategieweise, der Vorentwicklung oder Technologieweise, der Konzeptphase mit der Konzeptentwicklung und Konzeptabsicherung, der Serienentwicklung sowie der Serienvorbereitung bzw. Produktionsabsicherung und dem Serienanlauf (Bild 1.9). Die Übergänge bzw. Schnittstellen zwischen den Entwicklungsphasen, insbesondere zwischen Konzeptphase und Serienentwicklung, unterliegen firmen- und z.T. sogar projektspezifischen Festlegungen bzw. Sichtweisen.

Innerhalb der Serienentwicklung wird der Reifegrad bzw. Entwicklungsstand der Entwicklung üblicherweise kontinuierlich bewertet. Nach [1.26] beschreibt der Reifegrad die Abweichung vom definierten funktionalen Ziel in Abhängigkeit von der Sicherheit der Funktionserfüllung. Als Verfahren zur Bewertung des Reifegrades dienen Schätzungen, z.B. auf Basis von Erfahrungen oder Expertenwissen, virtuelle Untersuchungen wie Auslegungsberechnungen oder Berechnungsnachweise auf Basis detaillierter Berechnungsmodelle sowie Tests mit Prototypen oder seriennahen Teilen bzw. Serienteilen. Über sog. Baustufen (eine mittels Stückliste und Konstruktionsdokumentation exakt nach vorgegebenen Kriterien definierter Reifegrad/Ausführung eines Produkts) mit zugehörigen Freigaben werden zu erreichende Entwicklungsstände verbindlich festgeschrieben. Firmenübergreifend gibt es hier aber keine einheitlich geltenden Freigabedefinitionen.

In der heute noch überwiegend hardwareorientierten Entwicklung erfolgen diese Freigaben meist noch auf Basis von Erprobungsergebnissen mit physikalischen Prototypen. Solche Freigaben beziehen sich auf den Nachweis der Funktionssicherheit, der Lebensdauer, der Einhaltung gesetzlicher bzw. länderspezifischer Bestim-

mungen und der Erfüllung fertigungsspezifischer Vorgaben. Bedingt durch den Aufbau dieser Hardware-Prototypen erfolgt die Produktentwicklung in iterativen, sequentiellen Bearbeitungsschleifen mit «Lernfenstern» nach jedem Modellaufbau und ist damit zeit- und kostenintensiv.

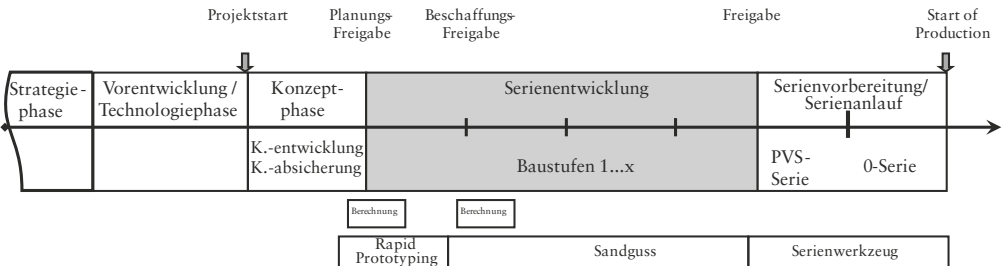


Bild 1.9 Typischer hardwareorientierter Entwicklungsablauf

Künftige Entwicklungsprozesse werden durch Veränderungen sowohl in der Strukturierung bzw. der Ablauffolge der Aktivitäten in den o.g. Vorgehensmodellen als auch in den Entwicklungsmethoden selbst charakterisiert. Zielrichtungen dieser Veränderungen müssen letztendlich die Sicherung einer ganzheitlichen Produkt- und Prozessoptimierung (Bild 1.2) bei gleichzeitiger Reduzierung von Entwicklungsschleifen und der Verringerung physischer Prototypen sein. Nur so lassen sich die steigenden Anforderungen nach dem Bild aus dem Vorwort erfüllen. Aussichtsreiche Lösungsansätze dafür sind:

- ❑ die umfassende Anwendung der Methoden des «Virtuellen Engineerings» verbunden mit einer verstärkten Orientierung auf integrative Methoden bzw. Handlungsweisen und
- ❑ der Einsatz von Wissen als Produktivfaktor.

Der komplexe Einsatz des «Virtuellen Engineerings» spielt dabei sicher eine Schlüsselrolle bzw. ist eine Kerntechnologie für die zukünftige Produktentwicklung. Die Hauptgründe dafür sind:

- ❑ die komplexe Abbildung aller relevanten Produkteigenschaften in digitalen Modellen und die Existenz leistungsfähiger Datenverwaltungssysteme schaffen die Voraussetzungen zur Verwendung einer einheitlichen 3D-Datenbasis für alle Partner im weltweiten Entwicklungsprozess;
- ❑ heute existierende Hard- und Softwaresysteme gestatten in vielen Fällen in dem zur Verfügung stehenden Zeit- und Kostenrahmen (Funktion, Fertigung, Umwelt, Nutzung, Kosten) ausreichend genaue Vorausberechnungen der relevanten Produkteigenschaften und ihrer zugehörigen Produktentstehungsprozesse;
- ❑ leistungsfähige IT-Infrastrukturen und IT-Systeme erlauben eine global verteilte simultane Zusammenarbeit zwischen vernetzten Rechnerarbeitsplätzen inkl. der Bereitstellung aller dafür erforderlichen Daten, Informationen und Wissen in der notwendigen Qualität, zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort der Welt.

Die schnellstmögliche Umsetzung der oben genannten Lösungsansätze in die entsprechenden Entwicklungsprozesse ist von essentieller Bedeutung für jedes Unternehmen.

Ein Ausdruck dieser Umsetzungsbemühungen ist in der Mechanikentwicklung der «Integrierte Entwicklungsprozess» nach Bild 1.10. Dieser Prozess wird nach [1.8] in erster Linie als Zielorientierung bzw. Referenzprozess für den umfassenden Einsatz des virtuellen Engineering und integrativer Methoden bzw. Handlungsweisen in der Produktentwicklung eines Unternehmens angesehen. Er muss auf der Basis der firmenspezifischen Geschäftsprozesse und orientiert an den Vorgehensmodellen der VDI-Richtlinien 2221 und 2206 in ein hierarchisch aufgebautes System von Methoden, Tools und Hilfsmitteln zur Prozessunterstützung und Prozessoptimierung überführt werden.

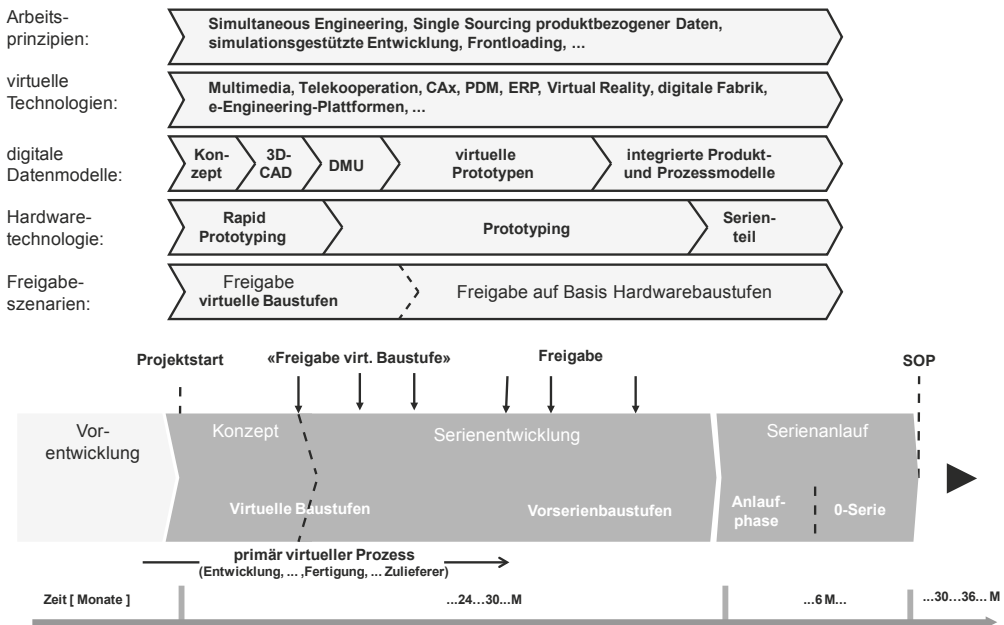


Bild 1.10 Integrierter Entwicklungsprozess

Letztlich muss jedes Unternehmen seine eigenen Strategien zur Umsetzung dieses Prozesses finden (exemplarische Strategien findet man in [1.28, 1.29, 1.30 und 1.31]). Von wenigen Unternehmen abgesehen, dürften dabei die meisten Firmen wohl nicht die Kraft haben, sich mit allen Aspekten des «Integrierten Entwicklungsablaufs» gleichzeitig auseinanderzusetzen. Gefragt sind deshalb Schwerpunkte, um unter den Bedingungen des heutigen Hard- und Software-Entwicklungsstandes das Machbare zu realisieren.

Charakteristische Eigenschaften des «Integrierten Entwicklungsablaufs» sind nach [1.8] die angewendeten Arbeitsprinzipien / virtuellen Technologien, die verwendeten Datenmodelle, die Technologien zur Generierung von Hardware und die verwendeten Freigabeszenarien.

Arbeitsprinzipien bzw. Arbeitsweisen sind eng mit Technologien verknüpft, daher ist eine Trennung nicht immer eindeutig. Beispiele für besonders aktuelle Arbeitsprinzipien sind:

- ❑ **Simultaneous Engineering (SE):**  
Methodik zur integrierten und zeitparallelen Abwicklung von Ingenieur-tätigkeiten aller beteiligten Partner der Produktentstehung. Bei Berücksichtigung unternehmensübergreifender Komponenten wird auch von Cross Enterprise Engineering gesprochen.
- ❑ **Single Sourcing produktbezogener Daten:**  
Orientierung auf konsistente vollständige Datenmodelle und Bereitstellung aller produktbezogenen Daten aus «einer Quelle» (gemeinsame Datenbasis) durch einfache Auffindbarkeit und Wiederverwendbarkeit mit integrierter Visualisierung.
- ❑ **Simulationsgestützte Entwicklung:**  
Entwicklungsstufen eines Produkts werden direkt an die Ergebnisse aus Berechnung und Simulation gebunden.
- ❑ **Frontloading:**  
Verlagerung ergebniskritischer Teilprozesse in möglichst frühe Phasen des Entwicklungs- bzw. Innovationsprozesses.
- ❑ **Integration Mechanik- und Elektronikentwicklung:**  
Nutzung von Synergien bei Lastenhefterstellung, Simulation, Datendurchgängigkeit, ...
- ❑ **Verteilte Arbeit:**  
Arbeitsteilung im globalen Maßstab auf der Basis weltweit vernetzter Arbeitsplätze und Collaboration-Technologien.
- ❑ **Virtualisierung des Produktentstehungsprozesses:**  
Schrittweise Virtualisierung, d.h., umfassende Einführung und durchgehende Anwendung computergestützter Arbeitsweisen, des gesamten Produktentstehungsprozesses.

Exemplarisch für die Vielfalt «virtueller Technologien» stehen:

- ❑ Multimedia (Verarbeitung von Text, Grafik, Foto, Audio-/Video-Sequenzen),
- ❑ Telekooperation (E-Mail, Intranet, Internet, Videoconferencing, Application sharing),
- ❑ Datenbank-Technologien,
- ❑ Visualisierung (Tesselierung, Virtual Reality),
- ❑ CAx-Arbeitsweisen (Bild 1.11),
- ❑ Software zur Erfassung, Verwaltung, Aufbereitung und Bereitstellung von Unternehmensdaten (PDM, ERP, SCM, CRM),
- ❑ Datenaustausch,
- ❑ Electronic-Engineering-Plattformen.

Bei den Datenmodellen (s. Kapitel 2) geht es vor allem um die Durchgängigkeit des Datenflusses produktbezogener 3D-Daten in den verschiedenen Phasen des Entwicklungsprozesses. Diese enthält den Einsatz konsistenter Produktmodelle, die Sicherung der Datenqualität und die Verwendung einer leistungsfähigen Datenverwaltung. Konsistente Produktmodelle umfassen Entwurfs- und Konzeptmodelle, gehen über verschiedenste 3D-Partialmodelle, über Digital-Mock-Up zu virtuellen Prototypen bzw. bis zu integrierten Produkt- und Prozessmodellen.

Wachsende Bedeutung für den integrierten Entwicklungsprozess bekommen leistungsfähige Technologien zur Generierung seriennaher Hardware auf der Basis



virtueller Produktbeschreibungen. Das beginnt bei sog. Rapid Prototyping-Technologien, geht über Prototyping von technischen Prototypen und Werkzeugen mit generativen oder auch konventionellen Technologien bis hin zur Herstellung von Serienteilen (Kapitel 5).

**CAD (Computer Aided Design): rechnerunterstützte Konstruktion**

Nutzung informationstechnischer Lösungen für alle im Konstruktionsprozess anfallenden Arbeiten, im Engeren jedoch die Verwendung sog. CAD-Systeme für geometrisch-gestaltende Arbeiten bei Entwurf, Ausarbeitung und Detaillierung.

**CAE (Computer Aided Engineering): rechnerunterstützte Ingenieurarbeit**

Rechnerunterstützte Anwendung von Berechnungsmethoden und Simulationsverfahren zur virtuellen Auslegung und Absicherung der funktions- und fertigungsorientierten Produkteigenschaften.

**CAM (Computer Aided Manufacturing): rechnerunterstütztes Fertigen**

Umfasst auch CAP und CAQ, im Kern jedoch Umsetzung der in der Arbeitsplanung erstellten Steuerungsdaten in den konkreten Fertigungs-, Montage- und Prüfprozess (z.B. NC-Maschinen, Roboter, Lager-/Transportsysteme).

**CAP (Computer Aided Planning): rechnerunterstützte Planung**

Im engeren Sinne die rechnerunterstützte Arbeitsplanung, d.h., die Festlegung der erforderlichen Fertigungs-, Montage- und Prüfverfahren, Betriebsmittel, Arbeitsfolgen sowie die sich daraus ergebenden Zeiten und Materialien.

**CAQ (Computer Aided Quality Assurance): rechnerunterstützte Qualitätssicherung**

Informationstechnische Lösungen für alle im Rahmen des Qualitätsmanagements anstehenden Aufgaben, vor allem in der Qualitätsprüfung (z.B. Prüfauswertungen, Prüfmittelverwaltung), aber auch in Qualitätsplanung und Qualitätslenkung.

**CAS (Computer Aided Styling): rechnerunterstütztes Styling**

Informationstechnische Lösungen in der Karosserieentwicklung: skizzenhaftes Entwerfen (Freiflächenmodellierung oft auf Basis angepasster CAD-Systeme) aber auch designtypische Mal- und Zeichentechniken sowie Modellpräsentationen.

**CAT (Computer Aided Testing): rechnerunterstütztes Testen**

Rechnerunterstützte Datenerfassung und -auswertung, computergesteuerte Versuchsführung, virtuelle Prüfstände, Simulationen zur Ableitung von Prüfstrategien und Messprogrammen, rechnergestützte Diagnostik.

Bild 1.11 Übersicht: CAx-Arbeitsweisen

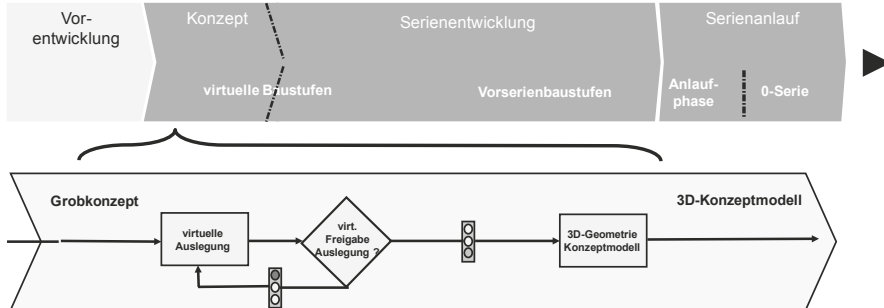
Von besonderer Bedeutung bzgl. der Wirksamkeit virtueller Technologien im integrierten Entwicklungsprozess sind die verwendeten Freigabeszenarien. Hier müssen in den frühen Entwicklungsphasen primär virtuell erzielte Entwicklungsstände als «virtuelle Baustufen» ihre verbindliche Anwendung finden. Ergebnis dieser Baustufen sind «virtuelle Prototypen» mit deutlich verbesserter Entwicklungsqualität gegenüber vergleichbaren bisherigen Baustufen und festgeschrieben durch eine eigenständige «Freigabe virtuelle Baustufe» (synonym dazu: «virtuelle Freigabe», «Freigabe virtueller bzw. digitaler Prototyp», «Freigabe virtuelle Absicherung»).

Bild 1.12 zeigt die sog. «virtuelle Auslegung» als Beispiel für eine virtuelle Baustufe innerhalb vom integrierten Entwicklungsprozess. In der virtuellen Auslegung, bei der in den seltensten Fällen bereits eine detaillierte Geometriebeschreibung des Produkts vorliegt, werden in kurzen Zeiträumen und mit überschaubarem Berechnungsaufwand Aussagen zur Bauteildimensionierung getroffen und damit eine Unterstützung bei der Geometriefindung geleistet sowie durch Untersuchung einer Vielzahl von Produktvarianten der optimale Bauteilentwurf bzw. das Konzeptmodell ausgewählt. Erreicht wird dies durch die Anwendung von Berechnungsmodellen mit eingeschränkter Komplexität bzw. Detailliertheit (z.B. 1-dimensional, kinematisch/kinetisch, lineare Dynamik, quasistatische Zustandsänderung). Die damit erzielte Ergebnisqualität ist trotzdem für viele Anwendungen ausreichend. Nach [1.26] sind Auslegungsberechnungen geeignet, eine Produktreife mit ca. 40% abzuschließen. Bestandteile der «Freigabe virtuelle Auslegung» sind z.B.:

- Technische Benchmarks zur Absicherung der Entwicklungsziele,
- Nachweis durchgeführter Berechnungen gemäß dokumentiertem Auslegungsworkflow,



- Variantenbewertung auf Basis Expertenwissen, Referenzlösungen und verifizierter Berechnungen mit Auswahl der optimalen Konzeptvariante.



**virtuelle Auslegung:**

- Wettbewerbsanalyse
- computerunterstützte Auslegung und Dimensionierung von Bauteilen
- Variantenanalyse zur Findung des optimalen Bauteilentwurfes

**Freigabe «virtuelle Auslegung»:**

- technischer Benchmark der Wettbewerbsprodukte
- Nachweis durchgeführter Berechnungen gemäß Auslegungsworkflow
- Bewertung und Auswahl: optimale Konzeptvariante

Bild 1.12 «Virtuelle Auslegung» im integrierten Entwicklungsprozess

Da sich heute Auslegungstools zeit- und kostengünstig anwenden lassen, können die damit erzielten Ergebnisse im Sinne einer simulationsgestützten Entwicklung in den Entwicklungsprozess einfließen, vorausgesetzt die o.g. verbindliche «Freigabe virtuelle Auslegung» existiert. Wenn nicht, dann haben die Berechnungsergebnisse nur informativen Charakter. Die Durchführung zusätzlicher hardwareorientierter Untersuchungen im Sinne einer Verifizierung ist meist die Folge. Ursache für dieses Dilemma ist, dass die Berechnungsergebnisse auf Grund der begrenzten Modellgüte nur von beschränkter Aussagekraft über die Zusammenhänge zwischen den Auslegungsparametern und dem tatsächlichen Bauteilverhalten sind. Bei der Bewertung der Berechnungsergebnisse im Sinne einer Freigabe spielt daher das Experten-Know-how eine besonders große Rolle. Neuere Veröffentlichungen [1.32] zeigen, wie zukünftig mit Hilfe von Wissens- bzw. Benchmark-Datenbanken (s. auch Abschnitt 6.2.1) die Bewertung von Berechnungen erfolgen könnte.

Fehlendes Expertenwissen zur Bewertung von Berechnungsergebnissen dürfte jedenfalls der entscheidende Grund für heute noch fehlende verbindliche «Freigaben virtueller Baustufen» sein. Im Kern wird damit auch die Anerkennung virtueller Entwicklungsarbeiten als gleichberechtigte Entwicklungsschritte zu den hardwareorientierten Untersuchungen verhindert.

Grundsätzlich wird aber wohl in Zukunft kein physikalischer Prototyp aufgebaut werden, ohne dass vorher eine virtuelle Absicherung erfolgt ist. Virtuellen Baustufen nachgelagert sind heute zumindest noch 2...3 vorwiegend hardwareorientierte Baustufen. Das Ziel in absehbarer Zeit eine Reduzierung von 1...2 Hardwarebaustufen zu erreichen, ist bei der aktuell erreichten Güte von Berechnungsmodellen und der damit verbundenen Qualität der Berechnungsergebnisse realistisch.

Eine bei den Automobilherstellern (OEM) einheitliche Terminologie der Bezeichnung von Baustufen und der zugehörigen Freigabeszenarien, vor allem bzgl. der

Freigabe virtueller Baustufen, ist leider nicht anzutreffen und wird wegen firmenspezifischer Besonderheiten auch zukünftig nicht gleich zu erwarten sein. Die angestrebten Entwicklungszeiten für eine Serienentwicklung bis SOP (Start of Production) bewegen sich üblicherweise zwischen 30...36 Monaten, bei Derivat-Entwicklungen auch deutlich weniger. Es werden für die Zeit von der Konzeptdatenfreigabe bis SOP (auch als «Lead Time» bezeichnet) sogar 18 Monate als erreichbarer Standard angesehen [1.19]. Verkürzungen der Entwicklungszeit bis zu 30% sind vereinzelt heute bereits durch Einsatz virtueller Produktentwicklungen nachgewiesen [1.25].

An dieser Stelle sei noch mal mit aller Deutlichkeit darauf hingewiesen: «Virtuelle Baustufen» bedeuten nicht, dass Bauteilentwicklungen vollständig virtuell ohne Hardware-Bauzustände realisiert werden. Versuchstechnische Arbeiten, verbunden mit Prototyping-Bauteilen, sind immer zur Verifizierung von Ergebnissen der Berechnung sowie zur Validierung der Berechnungsmodelle notwendig. Dabei werden die Anforderungen sowohl an exzellente Prüftechnologien als auch an Motorprüfstände, z.B. bzgl. einer realistischen Abbildung des motorischen Instationärverhaltens, deutlich zunehmen.

Wie schon erwähnt, bedeutet in diesem Zusammenhang auch nicht, dass bei «virtueller Bauteilentwicklung» alle Phasen einer Produktentwicklung bis zur Vorserie ausschließlich virtuell bearbeitet werden, um damit gar auf Hardware und reale Versuche verzichten zu können. Einerseits sind Versuche zur Verifizierung von Ergebnissen aus Berechnung und Simulation und zur Validierung der Berechnungsmodelle unverzichtbar, andererseits werden in den nächsten überschaubaren Zeiträumen aus Zeit- und Aufwandsgründen, aber auch wegen unzureichender Ergebnisqualität der Berechnungen, bei weitem nicht alle Entwicklungsarbeiten virtuell abgesichert werden können.

Auch Dauererprobungen zur Absicherung der gewünschten Funktionsmerkmale, die derzeit üblicherweise im Zeitraum spätestens 1,5 Jahre vor dem Produktionsstart stattfinden, behalten ihre Berechtigung. Die konventionelle Entwicklung wird daher niemals vollständig verdrängt werden. Es geht vielmehr um das sinnvolle Miteinander beider Methoden.

In den späten Baustufen überwiegt auch weiterhin die Hardwareabsicherung, z.B. anhand von Erprobungshandbüchern und Freigabeszenarien. Virtuelle Technologien werden in diesen Phasen allerdings auch wesentlich stärker als bisher zur Unterstützung eingesetzt. Beispiele dafür sind computergestützte Versuchsführungen mit Hilfe der Methode «Design of Experiments» (DOE, s. Abschnitt 3.2.6) bzw. modellbasierte Applikationen sowie die verstärkte Integration von Berechnungsaktivitäten. Letztere führen zu einem vertieften Verständnis der Versuchsergebnisse und erlauben durch Vorausberechnung die verbesserte Vorauswahl von Versuchen bzw. sogar den Ersatz von Hardwareversuchen durch virtuelle Untersuchungen.

Die Verknüpfung der Motorprüftechnologie mit Echtzeitsimulation schafft deutlich verbesserte Entwicklungsumgebungen für Motorenentwicklungen (In-the-Loop-Simulation, s. Abschnitt 3.2.5). Nicht vergessen werden dürfen Methoden und Tools für effiziente und systematische Datenanalysen für heterogene Systemumgebungen. Hier geht es neben der ohnehin angestrebten Rationalisierung der Erfassung und Auswertung von Messergebnissen in viel stärkerem Maße als bisher um die Identifizierung von Trends, das Erkennen von Optimierungspotentialen, aber auch um die systematische Aufbereitung der Versuchsergebnisse zum Zwecke der Generierung von Expertenwissen z.B. für die Bewertung virtueller Untersuchungen.

Nachfolgend wird auf ausgewählte Aspekte der Entwicklungsmethodik etwas näher eingegangen, da diese durch den umfassenden Einsatz virtueller Technologien völlig neue Möglichkeiten zur Optimierung der Produktentstehung eröffnen und so von besonderer Bedeutung für künftige Entwicklungsprozesse sind.

### 1.2.1 Frontloading – neue Möglichkeiten durch «Virtuelles Engineering»

Grundsätzliches Anliegen eines Frontloadingprozesses ist die Verlagerung ergebniskritischer Teilprozesse in möglichst frühe Phasen des Gesamtprozesses. Die damit verbundene frühere Bereitstellung von Prozessergebnissen gestattet frühzeitige Ergebnisoptimierungen und führt damit zur Minimierung späterer, meist kostenaufwendiger Produktänderungen sowie zur Stabilisierung und Verkürzung von Projektabläufen.

Wenn auch Frontloading-Bemühungen schon seit jeher in der Produktentstehung eine Rolle spielten, so ist für die Umsetzung solcher Strategien das Virtuelle Engineering, verbunden mit einem Simultaneous-Engineering-Ansatz, besonders geeignet. Die Möglichkeit funktions- und fertigungsrelevante Produkteigenschaften auf der Basis virtueller Produktmodelle ausreichend genau vorausberechnen zu können, bietet in vielen Fällen eine nie zuvor gekannte Chance zur Vorverlagerung bisher hardwaregebundener Entwicklungsschritte in die frühe bzw. virtuelle Phase. Zusätzlich begünstigt durch die schnellere und umfassendere Datenverfügbarkeit digitaler Produkt- und Prozessdaten wird damit das parallele Abarbeiten von Ingenieur Tätigkeiten aller beteiligten Disziplinen, z.B. aus Entwicklung, Fertigungsplanung und Serienvorbereitung, gestärkt und z.T. überhaupt erst machbar.

Im Vergleich zu den traditionell sequentiellen Entwicklungsabläufen lassen sich durch Frontloading Verkürzungen von bis zu 6 Monaten Entwicklungszeit [1.12] erreichen. Beispiele für solche Frontloadingprozesse sind:

- ❑ traditionell «späte» Entwicklungsaktivitäten im Rahmen von Funktionserprobungen bzgl. der Absicherung und Optimierung von Bauteileigenschaften auf Basis von physikalischen Prototypen (z.B. luftführende Bauteile, Motorkühlung, Bauteil- und Betriebsfestigkeit, Akustik) werden durch virtuelle Untersuchungen in frühen Phasen reduziert bzw. ersetzt;
- ❑ kontinuierliches Freigabe-, Kosten- und Qualitätsmanagement auf Basis «virtueller Entwicklungsstände» anstelle späterer und teurer Hardwarebaustufen;
- ❑ Einbau- und Montagesimulationen zur Sicherung der digitalen Baubarkeit, d.h. z.B. frühzeitige Aufklärung von Kollisionen, Sicherung von Einbauwegen bzw. montagegerechter Konstruktionen und Herstellung von Servicefreundlichkeit. Erfolgt unmittelbar nach der Simulation eine Optimierungskonstruktion, so werden Kosten in der späteren Werkzeugentwicklung und -erstellung minimiert;
- ❑ Simulation von Fertigungsverfahren wie Ur- und Umformen bereits im Entwicklungsprozess dient der Absicherung der Fertigbarkeit von Produkten und vermeidet späteren Änderungsaufwand;
- ❑ Simulation der Elektronik inkl. Steuergeräte-Software minimiert und verkürzt spätere Erprobungen am Motor bzw. im Fahrzeug;
- ❑ Produktionsplanungen (Anlage- und Layoutplanung, Simulation kompletter Fertigungsketten) auf der Grundlage virtueller Prototypen führt zu früherem

Produktionsbeginn und frühzeitigem Aufdecken konstruktionsbedingter Produktionsprobleme.

### 1.2.2 Integration – Entwicklungsdisziplinen rücken zusammen

Die Möglichkeit der Vorausberechnung von Produkt- und Prozesseigenschaften, der schnelle Zugriff auf die digitalen 3D-Produktdaten aller Entwicklungspartner sowie die Möglichkeiten der elektronischen Kommunikation und der Online-Telekooperation auf der Basis vernetzter Arbeitsplätze schafft beste Voraussetzungen zur Förderung und Intensivierung von

- integrativen bzw. ganzheitlich orientierten und kontextbezogenen Denk- und Handlungsweisen,
- Integration – sowohl im Sinne der Zusammenfassung bzw. Bündelung als auch durch verstärktes Einbringen bewährter Methoden, Erfahrungen und Expertenwissen.

Ziel all dieser Bemühungen ist die Stärkung der ganzheitlichen Prozessverantwortung, die umfassendere Nachnutzung von Best-of-Class-Methoden inkl. der Freisetzung von Synergieeffekten. Grundsätzlich können sich dabei die integrativen Strategien vorwiegend auf eine Entwicklungsphase bzw. einen Entwicklungsbereich konzentrieren oder sich auf Handlungsweisen über alle Phasen des Produktlebenszyklus hinweg orientieren.

Wichtigste Voraussetzungen dafür sind neben dem umfassenden Einsatz computergestützter Arbeitsweisen die Intensivierung des strukturübergreifenden Erfahrungsaustausches und die Zusammenarbeit zwischen den Mitarbeitern. Dies enthält auch veränderte Arbeitsteilungen und neue Kooperationsmodelle. Exemplarisch dafür gilt dies für Berechnung und Konstruktion, Berechnung und Versuch, Mechanik- und Elektronikentwicklung sowie Produktentwicklung und Fertigungsplanung bzw. Fertigungsvorbereitung.

Bei letzteren geht es z.B. um den schnellstmöglichen Durchgriff auf die aktuellen 3D-Produktdaten und die Verkürzung von Kommunikationszyklen. Damit wird eine möglichst frühzeitige digitale Absicherung von Herstellbarkeitsnachweisen bzw. der fertigungsgerechten Produktgestaltung angestrebt. Das umfasst z.B. die Untersuchung von Fertigungskonzepten inkl. der Vorrichtungs- und Montageoptimierung, der Werkzeugplanung, aber auch die Produktionsprozessmodellierung bzw. die digitale Planungsabsicherung. Auf der Basis dieser Untersuchungen werden die Produktkonzepte bewertet und gemeinsam mit der Produktentwicklung aus fertigungstechnischer Sicht optimiert. Diese frühe Bewertung von Produkten bzw. produktgetriebener Änderungen verringert kostspielige Änderungen in der Realisierungsphase und führt zur Beschleunigung der Produktionsplanung sowie zu «steilerem» Produktionsanlauf, zu größerer Prozessstabilität und Liefertreue. Beispiele für integrative bzw. ganzheitliche Handlungsweisen sind die:

- ganzheitliche Optimierung von Produkteigenschaften bzgl. Funktion, Fertigung, Nutzung, Umwelt und Kosten unter Beachtung der zugehörigen Produktentstehungsprozesse bzw. der Lebenszyklen;

- ❑ Intensivierung des Simultaneous-Engineering-Ansatzes im interdisziplinären und globalen Rahmen. D.h. die gemeinsame und zeitparallele Abwicklung von Ingenieur Tätigkeiten aller beteiligten Partner der Produktentstehung mit Hilfe virtueller Technologien und Plattformen;
- ❑ durchgehende Projektarbeit mittels Organisation globaler Zusammenarbeit bzw. verteilter Arbeit über alle Zeitzonen hinweg;
- ❑ Aufwands- und Nutzenanalysen unter Berücksichtigung des Produktlebenszyklus,
- ❑ Implementierung leistungsfähiger Schnittstellen zwischen Produktentwicklung sowie Fertigungsplanung und Fertigungsvorbereitung.

Beispiele für die Bemühungen zur Integration von Methoden und Expertenwissen sind die:

- ❑ verstärkte Anwendung von Berechnung und Simulation durch den Konstrukteur selbst, z.B. für die virtuelle Auslegung und Dimensionierung von Bauteilen;
- ❑ Nutzung von Berechnung und Simulation im Versuch zur computergestützten Versuchsführung, zur Bewertung und Optimierung von Versuchsergebnissen oder zur Datenanalyse von Versuchsergebnissen inkl. der Ableitung von Strategien zur Versuchsfortführung;
- ❑ direkte Nutzung von vorhandenem Expertenwissen aus internen und externen Quellen in wissensbasierten Softwarelösungen, z.B. für Konstruktion, Berechnung und Versuch (Abschnitt 6.1).

### 1.2.3 Kostensenkung – Daueraufgabe im ganzheitlichen Produktentstehungsprozess

Kostensenkung wird mehr denn je ein Dauerthema mit höchster Priorität. In der Literatur besteht Übereinstimmung, dass kostengünstige Autos zunehmend an Bedeutung gewinnen, nicht zuletzt durch die neuen Kunden in den BRIC-Märkten (Brasilien, Russland, Indien und China), die nach der neusten Studie «Automotive Landscape 2025» der Roland Berger Unternehmensberatung für ca. 83% des zukünftigen Marktwachstums sorgen.

Natürlich spielen in der Entwicklung schon seit jeher die Fragen der Kostengestaltung eine wichtige Rolle. Empfehlungen dazu geben die VDI-Richtlinien 2225 «Technisch-wirtschaftliches Konstruieren», 2234 «Wirtschaftliche Grundlagen für den Konstrukteur» und 2235 «Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren – Methoden und Hilfen».

Die von den Produkten verursachten Kosten werden dabei nach unterschiedlichen Gesichtspunkten eingeteilt. Eine in der Literatur z.B. übliche Unterteilung in Herstellkosten, Selbstkosten und Lebenslaufkosten ist in Bild 1.13 dargestellt [1.23]. Zu beachten ist hierbei, dass Kosten von der Betrachtungsperspektive (Produzent oder Kunde) abhängen. Während Herstellkosten und Selbstkosten beim Produzent auftreten, werden Lebenslaufkosten dem Produktnutzer zugeordnet.

Eine Minimierung der beim Nutzer entstehenden Kosten muss aber letztlich das vorrangige Ziel jedes Herstellers sein, da damit das Kaufverhalten entscheidend beeinflusst wird. Über die Einbeziehung von Betriebs- und Entsorgungskosten findet auch das Prinzip der Nachhaltigkeit verstärkt Anwendung und fördert somit die

umfassende Kostenoptimierung. Synonym zu den Lebenslaufkosten sind in der Literatur Begriffe wie Lebenszykluskosten (Life-cycle-Costs) oder Produktgesamtkosten anzutreffen.



Bild 1.13 Einteilung der Kosten im Lebenslauf eines Produkts

Diskussionen zur Kostengestaltung in der Produktentwicklung konzentrieren sich bisher vor allem auf die Beeinflussung der Produktplanungs- und Entwicklungskosten. Die Einbeziehung der Herstellkosten eines Produkts (Materialkosten, Fertigungskosten, Montagekosten) in die Bemühungen zur Kostengestaltung bzw. Kostensenkung wurde vom Konstrukteur gern, zumindest in der Vergangenheit, als Aufgabe dem Projektcontrolling oder den Fertigungsspezialisten überlassen.

Beispiele für solche Kostensenkungsbemühungen sind die «Produktkostenoptimierung» (PKO) meist auf Basis bereits hergestellter Hardware oder im Rahmen des Qualitätsmanagements das «TQM» (Total Quality Management), die «FMEA» (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse) aber auch die in den letzten Jahren in den Unternehmen vielfach initiierten «kontinuierlichen Verbesserungsprozesse» (KVP) [1.13].

Neben den genannten Kostensenkungsbemühungen eröffnet nun aber die Digitalisierung der gesamten Produktentstehung ganz neue Möglichkeiten zur Kostengestaltung. Besonders in den frühen Entwicklungsphasen in denen die Kostenbeeinflussung ohnehin am größten ist, aber auch im gesamten Lebenszyklus, gestatten heute leistungsfähige Software-Tools und vernetzte IT-gestützte Systeme, z.B. im Rahmen einer PLM-Strategie (Abschnitt 2.2.1), ein effizientes und durchgängiges Kostenmanagement. Exemplarisch stehen dafür die:

- wesentlich schnellere und effektive Erfassung und Pflege kostenrelevanter Daten und Informationen in allen Phasen des Produktlebenszyklus als bisher. Dies resultiert z.B. aus dem schnelleren Zugang zu Informationen, aus der verbesserten Aktualität und Konsistenz kostenrelevanter Daten, aus der Erschließung weltweit existierender Datenquellen über das Internet sowie aus der Verringerung «menschlicher» Fehler und höherer Effizienz mittels computergestützter Datenpflege;
- schnelle Variantenanalyse auf Basis digitaler Kostenprototypen (Digital-Cost-Mock-Up) über dem gesamten Produktlebenszyklus zwecks optimaler Prozess- und Lieferantenauswahl, Kostenoptimierung im Lebenszyklus oder strategische Entscheidungen bzgl. Investitionen und Standortwahl;