



Axel Hahn  
Stefan Häusler  
Stephan große Austing

# Quantitatives Entwicklungs- management

Modellbasierte Analyse von  
Produktentwicklungsprozessen

 Springer Vieweg

---

# Quantitatives Entwicklungsmanagement

---

Axel Hahn • Stefan Häusler  
Stephan große Austing

# Quantitatives Entwicklungsmanagement

Modellbasierte Analyse von  
Produktentwicklungsprozessen

Axel Hahn  
Universität Oldenburg  
Business Engineering  
Oldenburg  
Deutschland

Stephan große Austing  
Big Dutchman International GmbH  
Vechta  
Deutschland

Stefan Häusler  
BTC Embedded Systems AG  
Oldenburg  
Deutschland

ISBN 978-3-642-34509-8  
DOI 10.1007/978-3-642-34510-4

ISBN 978-3-642-34510-4 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg  
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE.  
Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media  
[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)

---

# Vorwort

Die Beherrschung der Komplexität von Entwicklungsvorhaben ist ein Schlüssel für die effiziente Entwicklung und Markteinführung neuer Produkte, also ein wichtiger Beitrag zur Innovation. Voraussetzung ist es, die Produktentwicklung mit all seinen Beteiligten, Technologien, Werkzeugen, Vorgehensmodellen, also das ganze soziotechnische System der Produktentwicklung, besser zu verstehen. Es besteht Bedarf, den Zustand eines Entwicklungsvorhabens zu bewerten, Optimierungspotenziale zu erkennen und Ursachen und Wirkungen für Probleme nachzuvollziehen. Einen Beitrag bilden quantitative Methoden. Sie liefern eine zahlenmäßige Analyse des aktuellen Entwicklungsvorhabens und des Produktentwicklungssystems in seiner Gänze. Dabei ist jede Zahl selbstverständlich kritisch zu bewerten. Der Nutzen kann nur so gut sein, wie die Fragestellung, die zur Herleitung der Zahl geführt hat.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden dringend für die strategische, taktische und operative Steuerung der Produktentwicklung benötigt. Strategisch und taktisch gilt es, für ein Unternehmen oder einen Unternehmensverbund das Entwicklungssystem optimal zu gestalten und operativ leisten quantitative Methoden einen Beitrag zum Projektmanagement. Aber auch normative Anforderungen wie Prozessreifemodelle fordern nachdrücklich quantitative Methoden für die bessere Beherrschung der Produktentwicklung. Die vierte Stufe der Prozessreifestandards Capability Maturity Model Integration (CMMI) oder speziell die Software Software Process Improvement and Capability Determination (ISO/IEC 15504/SPICE), mit der klaren Forderung nach quantitativen Methoden, ist eine aktuelle Herausforderung für viele Unternehmen. Quantitative Methoden helfen zudem die Forschung über Entwicklungssysteme und Erkenntnisse über Ursachen-Wirkung-Mechanismen voranzutreiben.

Auch eine Entwicklung in der Produktentwicklung selbst führt zu diesem Buch, denn es gibt in den letzten Jahren einen klaren Trend, das zu entwickelnde Produkt selbst als System zu behandeln (Schlagwort Systems Engineering). Ein weiterer Faktor ist die steigende Bedeutung der modellgetriebenen Entwicklung. Es entstehen in der Produktentwicklung einheitliche und analysierbare Modelle für eine durchgängige Verwendung über den ganzen Entwurfsprozess hinweg. Damit ist es nun möglich, die Ergebnisse aller Schritte der Produktentwicklung automatisiert auszuwerten.

Dieses Buch will dazu das Handwerkszeug bereitstellen. Es ist als Methodensammlung für ein quantitatives Entwicklungsmanagement zu verstehen. Es werden aktuelle Methoden des quantitativen Entwicklungsmanagement vorgestellt, wie auch Methoden für die modellbasierte Bestimmung von Quantität und Umfang der Entwicklungsergebnisse. Das bessere Verständnis über einzelne Tätigkeiten der Produktentwicklung kann für die Prozessgestaltung genutzt werden. Für die Bewertung von Handlungsoptionen bei der Gestaltung von Entwicklungssystemen wird ein Simulationsansatz für die Produktentwicklung vorgestellt. Das hilft das System besser zu verstehen und es zu optimieren.

Die Autoren beschreiben Arbeitsergebnisse aus der Arbeitsgruppe Business Engineering an der Universität Oldenburg. Es sind die Ergebnisse der Dissertationsarbeiten von Dr.-Ing. Stefan Häusler, Dr.-Ing. Stephan große Austing und Dr.-Ing. Roland Koppe verwendet worden.

Dank sage ich an Sabina El Haoum und Manuela Wüstefeld, die bei der Gestaltung dieses Buches maßgeblich mitgewirkt haben und den Mitarbeitern der Abteilung Business Engineering des Departments für Informatik an der Universität Oldenburg für die Unterstützung.

Ich würde mich freuen, wenn wir mit unseren Arbeiten und diesem Buch einen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen durch effizientere Produktentwicklung leisten.

Oldenburg, im September 2012

Axel Hahn

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	1
1.1	Die Produktentwicklung im Wandel .....	3
1.2	Eingebettete Systeme – Herausforderungen für die Produktentwicklung ...	6
1.3	Systems Engineering.....	9
1.3.1	Vorgehensmodell des Systems Engineering .....	10
1.3.2	Modellgetriebene Produktentwicklung .....	11
1.4	Normative Anforderungen .....	13
1.4.1	CMMI & (Automotive)SPICE .....	13
1.4.2	V-Modell XT.....	15
1.4.3	ISO 9000 Familie .....	16
1.5	Auf dem Weg zum quantitativen Entwicklungsmanagement .....	18
	Literatur.....	19
<b>2</b>	<b>Quantitatives Entwicklungsmanagement</b> .....	21
2.1	Aufgaben des Entwicklungsmanagements .....	22
2.2	Umfangsmessung .....	24
2.2.1	Begriffsdefinition .....	24
2.2.2	Ziele der Umfangsmessung in der Entwicklung .....	29
2.2.3	Messmethoden der Effizienz- und Produktivitätsanalyse .....	30
2.2.4	Messmethoden des F&E-Controllings .....	35
2.2.5	Messmethoden im Projektmanagement .....	38
2.2.6	Metriken für konzeptionelle Modelle .....	44
2.3	Qualitätsmessung .....	45
2.3.1	Begriffsdefinition .....	46
2.3.2	Ziele der Qualitätsmessung in der Entwicklung .....	48
2.3.3	Qualitätsmanagement und Qualitätscontrolling .....	49
2.3.4	Qualitätssicherung in der Produktentwicklung .....	53
2.3.5	Qualitätsmessung im quantitativen Entwicklungsmanagement .....	66
	Literatur.....	69

<b>3</b>	<b>Strukturorientierte Bewertung des Produktumfangs</b> .....	73
3.1	Konzeptionelle Übersicht .....	74
3.2	Abbildung des Produktmodells als Graph .....	78
3.2.1	Modellierung .....	78
3.2.2	Transformation der nativen Daten .....	80
3.3	Definition und Gewichtung der Artefakte .....	83
3.3.1	Definition der Artefaktklassen .....	84
3.3.2	Aufwände der Artefakte erfassen .....	84
3.4	Generierung und Anwendung der Attribute .....	86
3.4.1	Generierung der Attribute .....	86
3.4.2	Messung der Attributwerte .....	87
3.5	Erzeugung eines Produktmodellmaßes .....	90
3.5.1	Regression .....	90
3.5.2	Serialisierung des Produktmodellmaßes .....	93
3.5.3	Anwendung des Produktmodellmaßes .....	93
3.6	Anwendungsbeispiel .....	95
3.6.1	Anwendungskontext .....	95
3.6.2	Anwendung des Vorgehensmodells .....	96
3.6.3	Bewertung des Produktmodellmaßes .....	100
	Literatur .....	101
<b>4</b>	<b>Prozessorientiertes Produktqualitätsmonitoring</b> .....	103
4.1	Konzeptionelle Übersicht .....	104
4.2	Prozessdefinition .....	111
4.3	Qualitätsmetriken und -ziele .....	112
4.4	Qualitätsrelevante Produktdaten .....	115
4.4.1	Konzepte des Produktmetamodells .....	116
4.4.2	Anforderungsmetamodell .....	117
4.4.3	V&V Metamodell .....	120
4.5	Integration Produkt- und Prozesssicht .....	123
4.5.1	Konzeptionelle Ebene .....	124
4.5.2	Instanz Ebene .....	125
4.6	Anwendungsbeispiel .....	127
4.6.1	Anwendungskontext .....	127
4.6.2	Durchführung .....	128
4.6.3	Zusammenfassung .....	139
	Literatur .....	140
<b>5</b>	<b>Prozessgestaltung</b> .....	143
5.1	Methoden zur Einfluss- und Nutzenbewertung .....	144
5.1.1	Leistungsbewertung in der Mechatronik .....	144
5.1.2	Benefit Asset Pricing Model (BAPM) .....	145
5.1.3	Technologiebewertungen .....	146

---

5.2	Ansätze zur Analyse von Prozessen . . . . .	147
5.3	Methodik zur Einflussbewertung . . . . .	150
5.3.1	Definition der Ziele der Einflussanalyse . . . . .	151
5.3.2	Beschreibung des Entwicklungsprozesses . . . . .	151
5.3.3	Anwendung High Level Synthese . . . . .	155
5.3.4	Identifizierung und Beschreibung von Wirkzusammenhängen . . . . .	158
5.4	Simulation der Entwicklungsprozesse . . . . .	162
5.5	Quantitatives Bewerten von Entwicklungssystemen . . . . .	165
	Literatur . . . . .	165
<b>6</b>	<b>Glossar</b> . . . . .	<b>169</b>

Warum ist das Management von Entwicklungsprojekten so schwierig?

Die Anforderungen an das Produkt stehen weitgehend fest – aber das genaue Produkt noch nicht. Vorgehensmodelle und Technologien geben einen Rahmen – aber jedes Entwicklungsprojekt ist anders. Das Unternehmen und auch der Markt benötigen einen verlässlichen Termin für den Produktionsstart – aber der Fortschritt des Entwicklungsvorhabens ist kaum bestimmbar. Es steht eine ganze Bibliothek von Projektmanagementliteratur zur Verfügung – aber was ist der kritische Pfad, die kritischen Komponenten, wo stecken Aufwände und Ursachen für Qualitätsprobleme? Der Kostendruck verlangt Effizienz in der Produktentwicklung – aber wie lässt sich das Ergebnis, der Output, und damit auch die Effizienz bewerten?

„Projekte“ und „scheitern“ scheinen zwei Begriffe zu sein, die wir im Geiste oftmals direkt assoziieren. Natürlich sind Projekte in der Produktentwicklung allen Unkenrufen zum Trotz in der Regel erfolgreich. Das zeigen die Innovationen heutiger Unternehmen; Projekte sind also erfolgreich im Sinne der Markteinführung und die erfolgreiche Markteinführung bestimmt am Ende den Wert einer Produktentwicklung. Ein Produktentwicklungsergebnis ist für das Unternehmen wertvoll, wenn das entwickelte Produkt innovativ ist, den Bedürfnissen der Kunden entspricht und sich kostengünstig produzieren und gewinnbringend verkaufen lässt. Der Wert einer Produktentwicklung ist maßgeblich durch den Erfolg bestimmt, den ein Unternehmen mit dem entwickelten Produkt erreichen kann. Innovativ heißt aus dieser Perspektive, dass die Produkte sich ausreichend gut von Wettbewerbsprodukten differenzieren lassen. Aber reicht das, um die Produktentwicklung selbst zu bewerten oder sogar zu optimieren?

Wie wunderbar wäre es, wenn wir nicht nur eine „gläserne Manufaktur“ wie Volkswagen in Dresden hätten, sondern auch eine gläserne Produktentwicklung. Wir würden gleich auf den ersten Blick erkennen: Wie ist der Fortschritt? Was ist die Qualität der Entwicklungsergebnisse? Wie effizient ist die Produktentwicklung? Welche neue Technologien, Organisationsformen oder Werkzeuge würden die Effizienz steigern? Fragen, die sich für Produktionsprozesse relativ zur Produktentwicklung leicht beantworten lassen, für die

Einmalprozesse in der Produktentwicklung allerdings, sieht das ganz anders aus. Was für Möglichkeiten gibt es, dem zu begegnen?

Machen wir ein Gedankenexperiment: Nehmen wir an, wir hätten zwei identische Produkte durch zwei Teams unabhängig voneinander entwickeln lassen. Die Frage, welches Team besser gearbeitet hat, lässt sich mit Blick auf die Kosten recht einfach beantworten: Natürlich das Team, das kostengünstiger gearbeitet hat. Nun betrachten wir genauer die **Qualität** der beiden Entwicklungen: Wurde der Entwurf jeweils ausreichend getestet? Sind mögliche Fehler ausgeschlossen worden? Sind alle Anforderungen an das Produkt erfüllt? Wie detailliert ist die Entwurfsdokumentation? Ist das Produkt so entwickelt worden, dass das Arbeitsergebnis als Basis für Weiterentwicklungen nutzbar ist? Die Antworten würden helfen, die beiden Teams und die erbrachten Ergebnisse zu bewerten. Wie können aber diese Fragen beantwortet werden? Welches Team arbeitet also bei Betrachtung der Qualität besser?

Neben der Qualität kommt ein weiterer Aspekt hinzu. Denn im Gegensatz zu unserem Gedankenexperiment wird ein Produkt ja kaum zweimal entwickelt und nicht jedes Produkt stellt eine gleich große Herausforderung für die Entwicklung dar. Daher sind neben der Qualität des Produktentwicklungsergebnisses auch die beiden Produkte bezüglich ihres **Umfangs** direkt miteinander zu vergleichen: Welches Team arbeitet also unter Berücksichtigung des Umfangs produktiver? Umfang sei das hier verwendete Maß für den sehr unterschiedlich verwendete Begriff „Produktkomplexität“.

Die Frage nach Qualität und Umfang hilft – trotz aller Gefahren einer subjektiven Bewertung – die beiden Teams und ihre erbrachten Leistungen möglichst objektiv zu analysieren und zu bewerten.

Dies gilt zum einen operativ im Projektmanagement, denn eine objektive Quantifizierung des Umfangs des Entwicklungsfortschrittes und der erreichten Qualität ist hierfür essenziell und hilft die Entwicklung besser zu planen, das Team und weitere Ressourcen zu bestimmen. Insbesondere in unternehmensübergreifenden Produktentwicklungsvorhaben helfen objektive Verfahren Transparenz zu schaffen. Umfang und Qualität der bisherigen Ergebnisse lassen sich besser schätzen und potenzielle Risiken im Projekt sind identifizierbar.

Ferner gilt dies strategisch und taktisch bei der Planung und Gestaltung der Produktentwicklungsumgebung selbst. Quantitative Verfahren liefern die Entscheidungsbasis für die Auswahl neuer Werkzeuge und Verfahren der Produktentwicklung, in dem sie eine objektive Quantifizierung des Einflusses einer Entscheidung für oder gegen ein Vorgehen, eine Methode oder ein Werkzeug anstreben.

Eine Vision, so utopisch sie auch sei, hilft die Ziele eines Vorgehens besser abzustecken. Sie ist gleichzeitig auch Motivation, denn sie zeigt auf, was man erreichen kann und dass sich die nicht unerheblichen Mühen auf dem Weg dahin lohnen. Für dieses Buch möchten wir daher eine Vision des quantitativen Entwicklungsmanagements aufzeigen. Der Leitgedanke der vollständigen Kontrolle über ein extrem komplexes System soll uns führen. Auf dem Weg hin zur Erfüllung dieser Vision stellen wir in diesem Buch Methoden vor, um eine Reihe der oben skizzierten Fragen zu beantworten. Hierzu beschreiben wir eine

Reihe existierender Methoden und nutzen den Trend der modellgetriebenen Entwicklung als neue Chance das Entwicklungssystem zu analysieren, besser zu verstehen und Handlungsoptionen darzustellen.

---

## 1.1 Die Produktentwicklung im Wandel

Die Produktentwicklung unterliegt einem ständigen Wandel. Das erfolgreiche Management dieses Wandels ist ein Baustein, um ein Unternehmen für die Zukunft aufzustellen. Der Wandlungsdruck kommt aus drei Richtungen: Markt, integrierte Produktentwicklung und durch normative Anforderungen.

Entscheidend ist sicherlich der Markt, er bestimmt den letztendlichen Wert des Produktentwicklungsergebnisses. Das Unternehmen hat Innovationen marktgerecht zu steuern. Der Zeitgeist, die Kundenwünsche, die Interessen der Vertriebsketten sind zu berücksichtigen.

---

### CeWe Color AG: Ein Beispiel für eine erfolgreiche Unternehmensanpassung durch neue Produkte

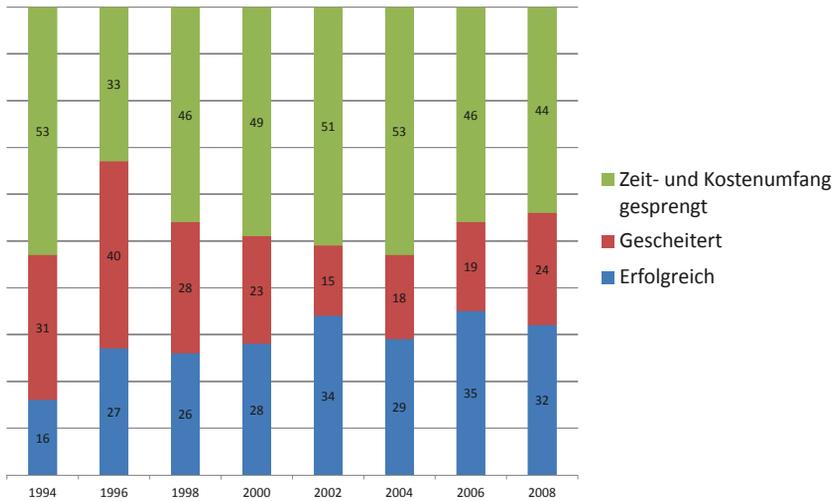
Als Fotofinisher (Filmentwicklung und Produktion von Papierabzügen) war das Unternehmen bis zur Verbreitung der Digitalkamera gut aufgestellt. Über ein etabliertes Vertriebsnetz konnten Kunden ihre Filme abgeben und oftmals am nächsten oder übernächsten Tag in einem Ladenlokal ihre Abzüge in Empfang nehmen. Parallel zur Einführung der Digitalkamera entwickelte und verbreitete sich das Internet.

Das gesamte Geschäftsmodell der CEWE stand zur Disposition. Die Produkte wurden nicht mehr nachgefragt, das Vertriebsnetz wurde mehr oder weniger überflüssig.

1996 bot CEWE das erste Mal die Möglichkeit an, digitale Bilder zu Papier zu bringen. Ein Jahr später konnten via Internet Digitalfotos bestellt werden. Die folgenden Jahre waren schwierig. Die Technologie musste weiter entwickelt und ein Geschäftsmodell für die weitere Einbindung der Vertriebspartner gefunden werden. 2005 führte CEWE das Fotobuch ein und 2010 wurde das zehnmillionste Buch verkauft. Heute verarbeitet CEWE bis zu 17 TB Kundendaten pro Tag und integriert sich in soziale Netzwerke und in die Welt der Smartphones. Letztere verdrängen aktuell die Kompaktkameras vom Markt.

Neben einer Weiterentwicklung des Produktportfolios für den Konsumentenmarkt bietet CEWE Color nun Dienste für den Digitaldruck an. Damit reagiert CEWE auf Kundenwünsche direkt aus Büroanwendungen oder Desktoppublishingsystemen heraus Foto- und klassische Bücher zu erstellen.

Letztere Entwicklung wurde durch direkte Kommunikation mit Kunden auf der Internetplattform von CEWE Color initiiert. Das zeigt neben der Notwendigkeit auf neue Technologien zu reagieren, wie wichtig es ist Kunden in den Entwicklungsprozess



**Abb. 1.1** Ergebnisse des CHAOS-Reports in Prozent. (Standish Group 2009)

zu integrieren. Hierfür hat sich der Begriff Crowdsourcing etabliert. Der Neologismus wurde 2006 durch Howe und Robinson im Magazin Wired geprägt (Howe 2006). So ändern sich die Beziehungen zu Kunden und Markt. Das Beispiel zeigt, wie weit sich Unternehmen anpassen müssen. Völlig neue Produkte und dazugehörige Entstehungsprozesse verlangen enge Kontrolle und Führung.

Bereits in den vergangenen Jahren ließ sich anhand zahlreicher Studien, wie z. B. (Buscher-möhle et al. 2007; Standish Group 2009; Engel et al. 2006) beobachten, dass zwischen 15 % und 40 % aller Entwicklungsprojekte scheitern. Wie die Ergebnisse aus (Standish Group 2009) (dargestellt in Abb. 1.1) illustrieren, ist nur ein Drittel der Entwicklungsprojekte erfolgreich (d. h. Abschluss unter Einhaltung aller finanziellen, zeitlichen und qualitativen Ziele), die übrigen Projekte verfehlen trotz teilweise immensen Anstrengungen ein oder mehrere Teilziele.

Entwicklungsprojekte müssen von engen Zeitfenstern („time to market“) über die Integration verschiedener Fachrichtungen bis zu höchsten Qualitätsansprüchen zahlreiche Anforderungen erfüllen. Hinzu kommen monetäre und personelle Restriktionen, die Notwendigkeit zur Berücksichtigung des gesamten Produktlebenszyklus sowie eine Vielzahl verwendeter Werkzeuge.

Dass die Anforderungen an eine effiziente Organisation von Projekten nicht sinken, lässt sich anhand der Komplexität heutiger Produkte klar verdeutlichen. Ein extremes Beispiel ist sicherlich ein Luftfahrzeug: Hunderte Entwickler an mehreren Standorten, in mehreren Unternehmen, in mehreren Ingenieurdisziplinen müssen effizient und fehlerarm zusammen arbeiten. Ein extrem komplexes System ist zu entwerfen: Gestalt und Materialien sind festzulegen, dutzende Steuergeräte (Electronic Control Units, ECUs) sind

zu konzipieren, Schaltungen zu entwerfen, von Entwurf bis Fertigungsfreigabe sind komplexe Abläufe zu managen. Sicherheit, Funktionalität und Kosten sind nur einige relevante Entwurfsziele. Hier muss der Überblick stimmen. Das Risiko ist hoch. So können eigentlich kleine Fehler, wie z. B. ein Bemaßungsproblem im Kabelbaum des A380 durch die 500 km Kabel an Bord dazu führen, dass der gesamte Konzern EADS ins Trudeln gerät (FAZ 2006).

Auf Grund dieser hohen Komplexität unterläuft die Produktentwicklung selbst einem Wandel. Das Schlagwort ist „Integrierte Produktentwicklung“. Die Notwendigkeit der Integration ist überall zu finden. Teams arbeiten über Unternehmens- und Landesgrenzen hinweg zusammen. Experten aller Ingenieurdisziplinen stimmen sich eng untereinander und mit allen anderen Unternehmensbereichen ab. Dies macht die Produktentwicklung zu einem herausfordernden, dezentralen Prozess, dessen Management eine hohe Bedeutung zukommt. Es werden Verfahren benötigt, um hier den Überblick zu wahren und ein Entgleisen der Entwicklung frühzeitig zu erkennen. Immer wieder eskalieren Projekte in letzter Minute. Möglichkeiten zum Einschreiten und das Ergreifen von Maßnahmen werden mit nahendem Projektende so gut wie nicht möglich.

Ein Beispiel, das in aller Munde war, ist Toll Collect (Bornhöft et al. 2003). In „letzter Minute“ wurden Probleme publik, die eine erhebliche Verzögerung der Einführung einer LKW-Maut in Deutschland zur Folge hatten. Es hat gegenüber dem Projektmanagement und dem Auftraggeber an der notwendigen Klarheit über den Stand des Projektes gefehlt.

Die Produktentwicklung ist ein vorrangig Informationen verarbeitender Prozess, welcher gerade in den frühen Entwicklungsphasen unsichere und mit Annahmen behaftete Anforderungen als Ausgangsbasis hat. Entwickler verfeinern und ändern diese schrittweise entlang mehrerer Entwicklungsphasen, von der Produktidee, bis hin zu den einzelnen domänenspezifischen Entwicklungssträngen wie Hard- und Softwareentwicklung. Parallel entsteht hierzu eine stetig konkretisierte Produktbeschreibung: von der Systemarchitektur über Architekturen der einzelnen Komponenten bis hin zu deren Implementierung. Sie setzen die definierten Anforderungen um.

Die zu beherrschende Informationsmenge ist so stark gestiegen, dass sie mittlerweile nur noch von Fachleuten in einzelnen Disziplinen beherrschbar ist. Ohne Spezialisierung ist ein Erkenntnisgewinn kaum möglich. Und ohne Spezialisten ist die Entwicklung heutiger Industrieprodukte ausgeschlossen. Das gilt für komplexe Produkte wie Flugzeuge oder Autos aber auch für einzelne Komponenten oder Materialien. Dennoch entstehen viele Innovationen heute durch die Kooperation unterschiedlicher Fachrichtungen. Der Erfolg der Produktentwicklung hängt demnach von der Zusammenarbeit der einzelnen Spezialisten ab. Die Mechatronik macht es vor: klassische maschinenbauliche Funktionen wie Stabilität werden durch Elektronik und Informationstechnologie abgelöst. Ein Roboterarm kann leichter gebaut und damit schneller bewegt und trotzdem genau und schwingungsarm positioniert werden, wenn die Elastizität und damit die Federwirkung von Gelenken und Armsegmenten durch Regelungstechnik kompensiert wird. Ähnlich das aktive Fahrwerk: Die klassischen Komponenten Federung und Dämpfung werden durch Sensoren, Elektronik und Aktoren ersetzt oder ergänzt. So lassen sich die Fahreigenschaften verbessern und die Sicherheit erhöhen.

**Abb. 1.2** Siemens SIMATIC embedded Automation Microbox PC 427B. (Quelle SIEMENS)



Der Notwendigkeit der Komplexitätsbeherrschung und der disziplinübergreifenden Entwicklung begegnet man durch eine Fokussierung auf die frühen Phasen der Produktentwicklung. Konzeptionelles und disziplinübergreifendes Arbeiten am virtuellen Produkt löst das Denken in Detailproblemen und -lösungen ab. Methodische Unterstützung – wie VDI 2206, „Entwicklungsmethodik Mechatronik“ (VDI 2004) und systemorientiertes Entwickeln (Systems Engineering) – helfen zudem bei der Komplexitätsbeherrschung.

Neben den Kundenanforderungen steigt der Druck durch normative Anforderungen als letzten Wandlungstreiber. Es gibt normative Anforderungen an das Produkt und an das Entwicklungsprojekt (wie z. B. bei der Entwicklung sicherheitskritischer Elektronik), wie es im Laufe des Kapitels noch angeführt wird.

Um die Komplexität heutiger Produktentwicklungssysteme und die Notwendigkeit der systematischen Organisation und Verbesserung zu verdeutlichen, beschreiben die folgenden Abschnitte die wichtigsten Anforderungen für eine integrierte Produktentwicklung am Beispiel eingebetteter Systeme; gefolgt von einem Lösungsansatz, um den Herausforderungen der heutigen Produktentwicklung zu begegnen: dem Systems Engineering.

---

## 1.2 Eingebettete Systeme – Herausforderungen für die Produktentwicklung

Aus modernen Industrieprodukten sind sie nicht mehr wegzudenken: Eingebettete Systeme. Es geht schlicht um im Produkt integrierte (eingebettete) Computertechnik. Nach USA und Japan ist Deutschland der drittgrößte Markt für eingebettete Systeme. Es wird mit jährlichen Wachstumsraten von bis zu 10 % gerechnet (BITKOM 2008). Der Wertanteil von elektrischen oder elektronischen Produkten nimmt z. B. im Automobil stark zu: bis 2015 auf bis zu einem Drittel (ZVEI 2009). Eingebettete Systeme kommen in vielen Produkten zum Einsatz: von der Waschmaschine, über Werkzeugmaschinen, bis zur Fabriksteuerung oder Unterhaltungselektronik. Das eingebettete System ist dabei nicht immer so eigenständig verbaut wie der in Abb. 1.2 dargestellte Industrie PC. Häufig kom-

men verschiedenste auch einfachere Mikroprozessoren zum Einsatz. Die Leistung älterer Prozessoren reicht für viele Aufgaben aus, obwohl sie heute oftmals als Bestandteil eines gesamten Systems mit auf einem Chip untergebracht werden (Systems on Chip). Das kann z. B. ein Field Programmable Gate Array (FPGA) sein, ein Chip auf dem sich die Schaltungen bei der Produktion des Systems programmieren lassen.

Das Problem der eingebetteten Systeme ist daher auch nicht die Komplexität der einzelnen Komponenten, sondern deren Verknüpfung. Die Anzahl der Kommunikationsbeziehungen, Abhängigkeiten und Randbedingungen zeichnen für die Herausforderungen bei der Entwicklung von eingebettetem System verantwortlich. Am Beispiel der eingebetteten Systeme lassen sich notwendige Entwicklungen in der Produktentwicklung für komplexe Systeme ablesen (ZVEI 2009). Darunter sind im Zusammenhang mit diesem Buch:

**Anforderungsdefinition und -management** Die Qualität der Anforderungen ist entscheidend für die Qualität des entstehenden Produktes. Dieses gilt insbesondere bei der unternehmensübergreifenden Entwicklung. Anforderungen müssen vollständig, konsistent, korrekt, verifizierbar und verständlich sein. Fehler in Anforderungen sind möglichst in frühen Entwicklungsphasen zu erkennen. Verbesserungspotenzial versprechen Methoden zur Formalisierung von Anforderungen (Modellbasiertes Anforderungsmanagement). Aber auch nichtfunktionale Anforderungen bedürfen besonderer Beachtung (Leistungsfähigkeit, Sicherheit), da eingebettete Systeme häufig in sicherheitskritischen Anwendungen zum Einsatz kommen. Verglichen mit der übrigen Informations- und Kommunikationstechnik gelten bei sicherheitskritischer Elektronik besondere Prozessanforderungen hinsichtlich der Verwaltung und Nachverfolgbarkeit von bis zu fünfstelligen Anforderungen. Welche Anforderungen werden durch welche Systemkomponenten umgesetzt, welche sind bereits verifiziert, welche sind geändert worden und warum? Neue Methoden und Werkzeuge zur Anforderungsdefinition und deren Management sind unabdingbar, um dieser Komplexität Herr zu werden.

**Systemanalyse** Wie oben schon angeführt, ist die Analyse ein wichtiger Schritt im Entwurf eines jeden Systems. Die Systemanalyse liefert einen wesentlichen Beitrag zur Berücksichtigung der Randbedingungen und Anforderungen. Sie ist Grundlage für die Systemstrukturierung, da sie insbesondere die Wechselwirkungen im System und mit der Umwelt untersucht. Es besteht Bedarf an Methoden und Werkzeugen zur Quantifizierung nichtfunktionaler Systemeigenschaften, wie Sicherheit (Security im Sinne des Schutzes gegen Eindringlinge und Sabotage, Safety im Sinne des Schutzes gegen Unfälle oder deren Folgen), Robustheit oder Wartbarkeit.

**Modellgetriebene Entwicklung** Die modellgetriebene Entwicklung ist eine Schlüsseltechnologie für die moderne Produktentwicklung. Das gilt insbesondere für eingebettete Systeme. Es gilt möglichst früh im Entwicklungsprozess die Vorstellung von dem System formal als Modell zu fassen. Diese Modelle werden dann im Entwicklungsprozess detailliert. Dabei kommen je nach Ingenieurdisziplin jedoch sehr unterschiedliche Technologien zum



**Abb. 1.3** BMW 5er E12 (1972–1981) und BMW 5er F10 (ab 2010). (BMW Group)

Einsatz. Die modellgetriebene Entwicklung macht es aufgrund der formalen Beschreibung möglich, Ergebnisse über verschiedene Entwicklungsschritte nahtlos weiter zu verwerten (daher „getrieben“). Diese formale Beschreibung erlaubt auch eine qualitative und quantitative Analyse der Produktentwicklungsergebnisse als Basis für die Methoden dieses Buches.

**Prozessautomatisierung** Modelle werden auch für den automatischen Entwurf genutzt. Hierbei werden durch Computerwerkzeuge Modelle in andere überführt. Beispiel hierfür ist das automatische Layout von Schaltungen auf Mikroprozessoren auf Basis funktioneller Beschreibungen. Derartige Technologien sind insbesondere schon im Hard- und Softwarebereich ausgereift. Ohne diese Technologien und der damit einhergehenden Komplexitätsreduktion wären heutige Mikroprozessoren nicht mehr denkbar. Eine Herausforderung ist insbesondere die Interoperabilität der Modelle und der Werkzeuge. Nur so kann ein ganzheitliches Bild von dem Produkt möglichst früh im Prozess erstellt werden.

**Prozessorganisation** Eingebettete Systeme sind ein Paradebeispiel für das notwendige Zusammenspiel von Hardware, Software, Mechanik, Optik usw. Es bedarf Methoden, welche die Eigenheiten der unterschiedlichen Entwicklungsdisziplinen berücksichtigen aber trotzdem einen ganzheitlichen systemischen Ansatz verfolgen. Projektorganisation und -management sind anzupassen. Hier gibt es ein großes Potenzial zur Steigerung der Effizienz und zur Reduktion der Kosten. Allerdings muss das System Produktentwicklung selbst analysiert und optimal konzipiert sein. Quantitative Untersuchungsmethoden des Entwicklungsmanagements leisten hier einen Beitrag.

### Komplexität im Automobilbau

Waren beim BMW 5er Baureihe E12 (Abb. 1.3, links) wenige Optionen wie „Einzelsitze im Fond“ Sonderausstattungsmerkmale, ist fast 40 Jahre später die aktuelle Baureihe F10/F11 (Abb. 1.3, rechts) z. B. mit Sicherheitssystemen wie Head-Up-Display, aktiver Geschwindigkeitsregelung auf Basis von Radartechnik, Warnung vor Spurwechsel und –verlassen oder Nachtsicht mit Personenerkennung zu bestellen.

Sowohl die Anzahl, als auch die gegenseitigen Abhängigkeiten und das Ineinandergreifen von Schnittstellen zwischen den Teilsystemen, steigen stark an. Es ist also in diesem Beispiel nicht mehr nur das mechanische Betätigen des Pedals, welches das Bremssystem eines heutigen Fahrzeugs ansteuert, sondern eine Vielzahl von weiteren autonom agierenden Assistenzsystemen.

Während CAx-Systeme nahezu beliebige Detailschärfen in der Modellbildung und somit komplette Simulationsläufe von bspw. Festigkeits- oder Verformungsprüfungen, Fluidodynamikuntersuchungen und Spritzguss Methoden am Computer ohne jegliche Hardwareprototypen auskommen, kommt mehr und mehr die Frage auf, wie die Datenmengen technisch und methodisch verwaltet werden. Produkt Life Cycle Management (PLM)-Konzepte erhöhen dieses Phänomen um weitere Dimensionen, in dem die Betrachtung des Produktentstehungsprozesses auf den Zeitraum von der Vision bis zum Recycling ausgeweitet wird.

**Komplexitätsmanagement** Das stetige Streben nach mehr Funktion, mehr Komfort, mehr Sicherheit, hat in Verbindung mit der methodischen Evolution in allen Bereichen der Produktentstehung ein Maß an Komplexität für das Produkt selbst als auch sein Entwicklungssystem hervorgebracht. Dadurch kommen neue Herausforderungen im Umgang mit der stetig wachsenden Informationsfülle und Informationsverflechtungen sowie Abhängigkeiten auf.

**Compliance Management** Doch Entwicklungsmanagement ist nicht nur die freie und kreative Wertschöpfung „auf der grünen Wiese“. Wesentliche Einflussgrößen ergeben sich durch eine Reihe von normativen Anforderungen, die in verschiedenen Referenzmodellen, Vorschriften, Normen oder vergleichbaren Regularien abgebildet sind. Oft bestimmt die Konformität des Produktes und der zugehörigen Entwicklungsprozesse mit Normierungen den entscheidenden Wettbewerbsvorteil auf der einen Seite oder verhindert gar die Produktzulassung zur Nutzung auf der anderen Seite.

Abhängig vom Entwicklungsgegenstand und dem Kontext seines Einsatzes lässt sich ein Portfolio von Vorgaben zusammenstellen, die es sowohl für das entstehende Produkt als auch für die zugrunde liegenden Entstehungsprozesse abzubilden und zu erfüllen gilt. Gerade der stark wachsende Anteil von sicherheitsrelevanten Systemen (vgl. Beispiel der Entwicklung des Fahrzeugs) und einzelnen Baugruppen hat, zahlreiche Normen hervorgebracht.

Eine wesentliche und wachsende Aufgabe von Entwicklungsorganisationen wird somit das Compliance Management, also der fest in Unternehmen verankerte Umgang mit normativen Anforderungen.

---

## 1.3 Systems Engineering

Wie begegnet man nun den am Beispiel der eingebetteten Systeme dargestellten Herausforderungen? Es gilt insbesondere der Komplexität des Entwurfs mit allen auftretenden Abhängigkeiten und Randbedingungen Herr zu werden. Dabei sind eingebettete Systeme