

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme

VDI 2206

Ausg. deutsch/englisch
Issue German/English

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.

The German version of this guideline shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.

Inhalt

Vorbemerkung	2
1 Einleitung	3
1.1 Motivation	3
1.2 Zielsetzung	8
1.3 Zielgruppe	8
1.4 Einordnung der Richtlinie	8
1.5 Aufbau der Richtlinie	9
2 Einführung in die Entwicklung mechatronischer Systeme	9
2.1 Charakterisierung des Begriffs Mechatronik	9
2.2 Aufbau mechatronischer Systeme	14
2.2.1 Grundstruktur	14
2.2.2 Modularisierung und Hierarchisierung	16
2.3 Nutzenpotenzial der Mechatronik	18
2.4 Besonderheiten bei der Entwicklung	22
3 Entwicklungsmethodik Mechatronik	26
3.1 Vorgehen	26
3.1.1 Problemlösungszyklus als Mikrozyklus	27
3.1.2 V-Modell als Makrozyklus	29
3.1.3 Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte	32
3.1.4 Integrativer Entwurf von Produkt und Produktionssystem	41
3.2 Modellbasierter Systementwurf	46
3.2.1 Modellbildung	50
3.2.2 Modellanalyse	54
3.3 Werkzeuge	56
3.4 Organisation	67
3.4.1 Zusammenstellen eines Projektteams	67
3.4.2 Umsetzung technischer Ergebnisse	69

Contents

Preliminary note	2
1 Introduction	3
1.1 Motivation	3
1.2 Goal setting	8
1.3 Target group	8
1.4 Classification of the guideline	8
1.5 Structure of the guideline	9
2 Introduction to the development of mechatronic systems	9
2.1 Characterization of the term mechatronics	9
2.2 Structure of mechatronic systems	14
2.2.1 Basic structure	14
2.2.2 Modularization and hierarchization	16
2.3 Beneficial potential of mechatronics	18
2.4 Special aspects of the development	22
3 Development methodology of mechatronics	26
3.1 Procedure	26
3.1.1 Problem-solving cycle as a micro-cycle	27
3.1.2 V model as a macro-cycle	29
3.1.3 Process modules for recurrent working steps	32
3.1.4 Integrative design of product and production system	41
3.2 Model-based system design	46
3.2.1 Modeling	50
3.2.2 Model analysis	54
3.3 Tools	56
3.4 Organization	67
3.4.1 Putting together a project team	67
3.4.2 Implementation of technical results	69

Seite	Page
4 Anwendungsbeispiele	72
4.1 Von der mechanischen zur mechatronischen Bremse in zwölf Dekaden	73
4.1.1 Erste mechanische Kraftfahrzeugbremsanlage.	73
4.1.2 Verbesserung der mechanischen Wirk- und Übertragungsprinzipien .	74
4.1.3 Funktionale Integration der Elektronik	74
4.1.4 Funktionale und räumliche Integration der Sensorik und Aktorik .	76
4.1.5 Neue Funktionen einer mechatronischen Bremsanlage.	78
4.2 Entwurf der Antriebseinheit einer einfachen Lackieranlage	81
4.2.1 Ausgewählte Anforderungen	83
4.2.2 Systementwurf.	83
4.2.3 Modellbildung	84
4.2.4 Regelstruktur.	85
4.2.5 Analyse des geregelten Systems .	85
4.2.6 Weitergehende Einflussmöglichkeiten erkennen	86
4.3 Entwurf eines aktiven Feder-/Neigemoduls	87
4.3.1 Prinzipieller Aufbau	89
4.3.2 Modellbildung	91
4.3.3 Hierarchische Systemstruktur . .	94
4.3.4 Analyse des geregelten Systems .	95
4.3.5 Laborversuche	98
4.4 Entwurf von integrierten Mehrkoordinatenantrieben	100
4.4.1 Strukturen	100
4.4.2 Entwurfsprozess für Systeme mit Volumenintegration	101
4.4.3 Konstruktiver Aufbau	105
4.4.4 Steuerung	108
4.4.5 Parameter	110
4.4.6 Anwendungsfelder.	111
Schrifttum	112
Glossar	115
4. Application examples	72
4.1 From the mechanical brake to the mechatronic brake in twelve decades	73
4.1.1 First mechanical motor-vehicle brake system.	73
4.1.2 Improvement of the mechanical operating principle and transmission principle	74
4.1.3 Functional integration of the electronics	74
4.1.4 Functional and spatial integration of the sensor and actor technology	76
4.1.5 New functions of a mechatronic brake system.	78
4.2 Design of the drive unit of a simple painting system.	81
4.2.1 Selected requirements	83
4.2.2 System design	83
4.2.3 Modeling	84
4.2.4 Control structure.	85
4.2.5 Analysis of the controlled system .	85
4.2.6 Identifying further possibilities for influence	86
4.3 Design of an active spring/tilting module .	87
4.3.1 Basic construction	89
4.3.2 Modeling	91
4.3.3 Hierarchical system structure . .	94
4.3.4 Analysis of the controlled system .	95
4.3.5 Laboratory trials	98
4.4 Design of integrated multicoordinate drives	100
4.4.1 Structures	100
4.4.2 Design process for systems with volume integration.	101
4.4.3 Structural setup	105
4.4.4 Control.	108
4.4.5 Parameters	110
4.4.6 Fields of application.	111
Bibliography	112
Glossary	115

Vorwort

Innovative Produkte erfordern ein interdisziplinäres Zusammenwirken von Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik. Der Begriff „Mechatronik“ bringt dies zum Ausdruck. Angesichts dieser Situation ist ein praxisorientierter Leitfaden für die systematische Entwicklung derartiger Produkte notwendig. Die vorliegende Richtlinie VDI 2206 soll diesem Anspruch gerecht werden.

Preliminary note

Innovative products require an interdisciplinary combination of mechanical engineering, electrical engineering and information technology. The term "mechatronics" is the expression of this. In view of this situation, a practical guideline for the systematic development of such products is necessary. The present guideline, VDI 2206, is intended to meet this requirement.

Sie ersetzt nicht die bewährten Leitfäden wie z.B. die VDI-Richtlinien und eingeführte domänen spezifische Entwurfsmethoden, sondern führt diese zusammen. Die vorliegende Richtlinie behandelt die Entwicklung eines modernen mechatronischen Produktes ganzheitlich. Damit wird eine wesentliche Grundlage für die Kommunikation und Kooperation der Fachleute aus den beteiligten Disziplinen geschaffen. Hier liegen in der Praxis die meisten Defizite. Die Richtlinie fördert die interdisziplinäre Zusammenarbeit, die sich als ein herausragender Erfolgsfaktor bei der Entwicklung mechatronischer Systeme erwiesen hat.

Die Richtlinie VDI 2206 ist das Ergebnis einer Gemeinschaftsarbeit des VDI-Ausschusses A127 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“. Allen ehrenamtlichen Mitarbeitern dieses Ausschusses sei an dieser Stelle für ihr Engagement und das zur Verfügung gestellte Fachwissen, Tabellen- und Bildmaterial gedankt.

Der Obmann des VDI-Richtlinienausschusses der VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb dankt allen Mitwirkenden, insbesondere dem Kernteam, für die geleistete Arbeit.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der globale Wettbewerb ist geprägt durch hohe Innovationsgeschwindigkeit, verkürzte Entwicklungs- und Produktlebenszyklen und steigende Kundenerwartungen an Leistung, Qualität und Preis zukünftiger Produkte. Produktinnovationen tragen in entscheidender Weise dazu bei, um sich in diesem globalen Wettbewerb zu behaupten. Mechatronik – ein Kunstwort aus Mechanik und Elektronik – stellt ein Erfolgspotenzial für die Gestaltung zukünftiger Produkte dar: Durch das enge Zusammenspielen von Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik werden neue Prinziplösungen möglich, die das Kosten/Nutzen-Verhältnis heute bekannter Produkte erheblich verbessern, aber auch neue, heute noch nicht bekannte Produkte stimulieren können. Erfolgs geschichten wie z.B. die Entwicklung vom Plattenspieler zum tragbaren CD-Player, vom manuellen Schaltgetriebe zum adaptiven Automatikgetriebe und alltäglich gewordene Produktinnovationen wie die Autofokus kamera oder der geregelte Katalysator im Fahrzeug belegen die Leistungsfähigkeit der Mechatronik (siehe auch Textkasten „Von der mechanischen zur mechatronischen Bremse in zwölf Dekaden“ sowie Abschnitt 4.1).

It does not supersede the tried-and-tested guidelines such as the VDI guidelines and adopted domain-specific design methods, but instead brings them together. The present guideline deals with the development of a modern mechatronic product in its entirety. In this way it creates an essential basis for the communication and cooperation of experts in the disciplines involved. This is where most of the deficiencies are to be found in practice. The guideline promotes interdisciplinary cooperation, which has proven to be an outstanding factor in the success of the development of mechatronic systems.

The guideline VDI 2206 "Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme" (Development methodology for mechatronic systems) is the result of collaborative work by VDI committee A127 "Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme". At this point we would like to thank all the co-workers of this committee for their commitment and also for the technical knowledge and material for tables and figures they have provided.

The chairman of the VDI guideline committee of the VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb (VDI Society for Development, Design and Marketing) would like to thank all co-workers, in particular the core team, for the work they have contributed.

1 Introduction

1.1 Motivation

The global economy is characterized by rapid innovation, shortened development and product life cycles and rising customer expectations in terms of the performance, quality and price of future products. Product innovations make a decisive contribution to the way in which these products maintain their position in this global economy. Mechatronics – a word made up of mechanics and electronics – represents a potential means of successfully creating future products: the close integration of mechanical engineering, electrical engineering and information technology makes possible new fundamental solutions which considerably improve the cost/benefit ratio of currently known products, but can also provide a stimulus for new, as yet unknown products. Success stories, such as for example the development of record players into portable CD players and the development from the manual gearbox to the adaptive automatic transmission, and product innovations that have become part of everyday life, such as the automatically focusing camera or the controlled catalytic converter in a motor vehicle, bear testimony to the capabilities of mechatronics (see also graphic "From the mechanical brake to the mechatronic brake in twelve decades" and also Section 4.1).

Die Mechatronik bietet Erfolgspotenziale, stellt aber zugleich besondere Anforderungen an den Entwicklungsprozess: Mechatronische Systeme sind auf Grund des vernetzen Zusammenspiels verschiedener Wissensdomänen durch hohe Komplexität gekennzeichnet. Die Komplexität ergibt sich auf Grund der im Vergleich zu mechanischen Systemen größeren Anzahl von verkoppelten Elementen, die zudem in verschiedenen Fachdisziplinen realisiert werden (Heterogenität). Diese Problematik ist bereits in der frühen Phase des Entwurfs zu berücksichtigen, da die Wechselwirkungen von mechanischen, elektrotechnischen und informationsverarbeitenden Komponenten das Verhalten und die Gestalt des mechatronischen Gesamtsystems beeinflussen.

Die Entwicklung erfolgt bislang meist getrennt in den involvierten Domänen auf der Basis etablierter, spezifischer Entwicklungsmethoden, die durch eigene Denkweisen, Begriffswelten und Erfahrungen geprägt sind. Die Integration heterogener Komponenten zu mechatronischen Systemen erfordert jedoch domänenübergreifende Kommunikation und Kooperation zwischen den beteiligten Fachdisziplinen, um eine gemeinsame Vorstellung des zukünftigen Produkts zu gewinnen und eine gesamtoptimierte Lösung herbeizuführen. Mit der fortschreitenden Entwicklung der Informationstechnik ist eine Vielzahl von IT-Werkzeugen entstanden, die den Entwurf unterstützen. Diese sind jedoch nur unzureichend integrierbar; durchgängige Entwurfsumgebungen sind ebenfalls nur in Ansätzen vorhanden. Diese Werkzeuge ermöglichen eine frühzeitige modelltechnische Abbildung und Simulation mechatronischer Systeme, führen aber auch zu veränderten Arbeitsweisen und werfen neue Probleme wie Integration und Schnittstellenbildung auf. Das Entwickeln mechatronischer Systeme über verschiedene Abteilungen und auch Unternehmensgrenzen hinweg ist ferner durch geeignete Formen interdisziplinärer Zusammenarbeit organisatorisch zu unterstützen.

Die Entwicklung am Beispiel einer rein mechanischen Kraftfahrzeugbremse zu einem mechatronischen System wird im nachfolgenden Kasten gezeigt.

Mechatronics offers potential for success but at the same time imposes special requirements on the development process: on account of the integrated combination of various intellectual domains, mechatronic systems are characterized by a high level of complexity. The complexity is attributable to the greater number of coupled elements in comparison with mechanical systems, elements which are, moreover, realized in different technical disciplines (heterogeneity). This problem is already taken into account in the early phase of design, since the interactions of mechanical, elektrotechnical and information processing components influence the behavior and form of the overall mechatronic system.

Until now, the development has mostly taken place separately in the domains involved, on the basis of established, specific development methods which are characterized by their own ways of thinking, conceptual ranges and experiences. However, the integration of heterogeneous components into mechatronic systems requires cross-domain communication and cooperation between the technical disciplines involved, in order to obtain a common conception of the future product and bring about a solution that is optimized overall. With the advancing development of information technology, many IT tools which support the design process have been created. However, they can only be integrated inadequately; universal design environments likewise only exist in their initial stages. These tools make it possible for mechatronic systems to be modeled and simulated at an early time, but also lead to changed working practices and give rise to new problems such as integration and interfacing. The development of mechatronic systems that involves different departments and also crosses corporate boundaries must also be supported organizationally by suitable forms of interdisciplinary cooperation.

The development taken as an example of a purely mechanical motor-vehicle brake into a mechatronic system is shown in the following graphic.

Von der mechanischen zur mechatronischen Bremse in zwölf Dekaden

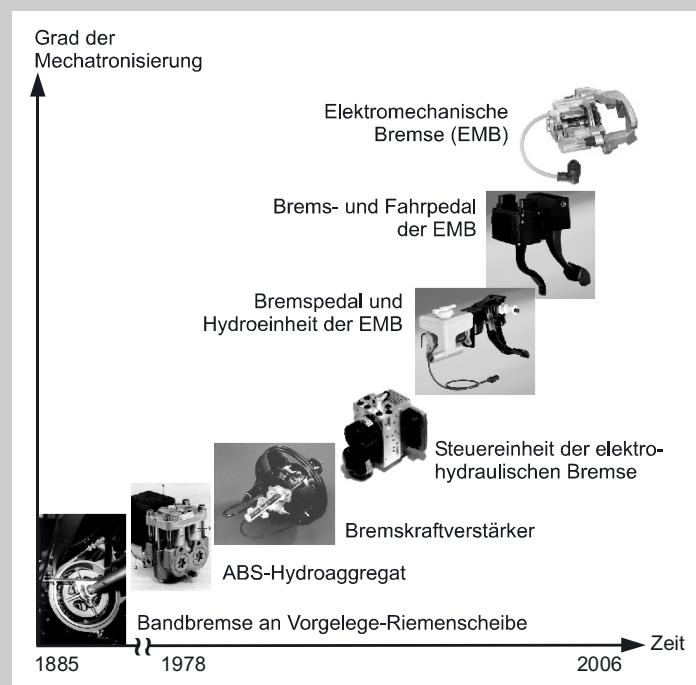
Leistungsfähige Bremsanlagen gehören seit Beginn der individuellen, motorbetriebenen Mobilität im Jahre 1885 zu den wichtigsten Sicherheitseinrichtungen eines Automobils. Sie müssen absolut ausfallsicher und in der Lage sein, das Fahrzeug unter allen Fahrbedingungen auf dem kürzesten Weg unter Beibehaltung der Fahrstabilität zum Stillstand zu bringen.

Die Erfolgsgeschichte der Betriebsbremse im Kraftfahrzeug zeigt die Entwicklung eines rein mechanischen zu einem mechatronischen System, wobei das Grundprinzip der Bremsfunktion – die Umwandlung von Bewegungsenergie durch Reibung zwischen Körpern in Wärme – unverändert beibehalten wird.

Die erste Bremse des im Jahre 1885 gebauten Benz Patent-Motorwagen Modell 1 war als **Bandbremse** mit einer Vorgelege-Riemscheibe ausgeführt, die über einen Mechanismus per Hand betätigt wird. Die folgenden Weiterentwicklungen der Bremsfunktion waren ausschließlich eine Verbesserung der Mechanik bzw. Hydraulik und durch die Gesichtspunkte Funktionsverbesserung, Sicherheit und Zuverlässigkeit motiviert. Die Grenzen der rein mechanisch realisierten Bremsysteme waren erreicht, als komplexere Regelungsaufgaben, Steuerungen über Kennlinien sowie die Speicherung und Verarbeitung großer Informationsmengen als Voraussetzung für weitere Innovationen von den Entwicklern gefordert wurden.

Die Einführung der **Antiblockierfunktion** beim Bremsen der Räder (ABS) im Jahre 1978 wurde mit dem Einzug der Elektronik in die Bremsanlage möglich; die mechanischen Funktionen wurden ergänzt durch: 1) Sensoren, die mit elektronischen Wirkprinzipien arbeiten, 2) elektronische Steuergeräte, die der Informationsspeicherung und -verarbeitung dienen, und 3) elektronisch betätigtes, hydraulische Schaltventile, die als Aktoren den Bremsdruck in den einzelnen Radbremszylindern steuern. Erst durch die funktionale Integration der Sensoren, des Steuergeräts und der hydraulischen Aktoren (auch Aktuatoren genannt) wird die gesamte Funktionalität, die ABS-Funktion, gewährleistet.

Der nächste Innovationsschritt erfolgte im Jahr 2001 mit der Trennung der hydraulischen Verbindung zwischen dem Bremspedal und den Radbremsen in der **elektrohydraulischen Bremse** (EHB). Die bisher bekannte Betätigung des Bremspedals wird ersetzt durch eine Betätigungsseinheit, die aus einem Pedalgefühlssimulator und Sensoren zur Fahrerwunscherfassung besteht. Die Signale dieser Einheit und weiterer Sensoren werden auf elektrischem Weg („by wire“) an den Regler im Steuergerät übertragen. Im Kernstück der EHB, der zentralen mechatronischen Steuereinheit, zeigt das interdisziplinäre Zusammenspiel von Maschinenbau, Elektro- und Informationstechnik seine größten Vorteile: Mikroprozessor, Software, Sensoren, hydraulische Ventile und Elektropumpe arbeiten zusammen und ermöglichen ein völlig neuartiges, hochdynamisches Bremsenmanagement.



From the mechanical brake to the mechatronic brake in twelve decades

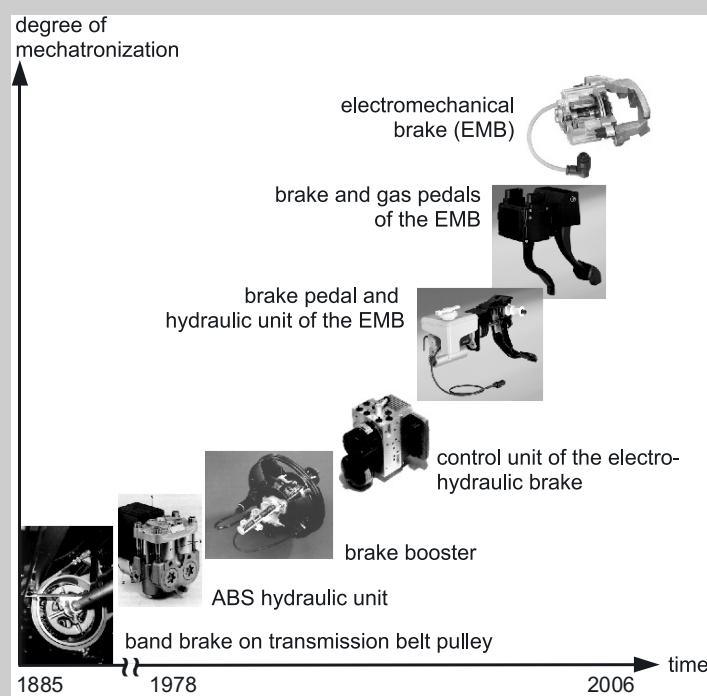
Efficient brake systems have been one of the most important safety features of an automobile since the beginning of individual motorized mobility in the year 1885. They must be absolutely failsafe and capable of bringing the vehicle to a standstill over the shortest distance under all driving conditions, while maintaining stability.

The success story of the service brake in a motor vehicle illustrates the development of a purely mechanical system into a mechatronic system, while retaining the basic principle of the braking function – the conversion of kinetic energy into heat by friction between bodies – unchanged.

The first brake of Benz's patented model 1 "horseless carriage" was designed as a **band brake** with a transmission belt pulley which was actuated manually via a mechanism. The further developments that followed were exclusively an improvement of the mechanics or hydraulics and were motivated by the aspects of functional improvement, safety and reliability. The limits of the purely mechanical brake systems were reached when more complex control tasks, control by means of characteristic curves and also the storing and processing of large amounts of information were required as a precondition for further innovations by the developers.

The introduction of the **antilock function** for the braking of the wheels (ABS) in the year 1978 became possible as electronics were incorporated in the brake system; the mechanical functions were supplemented by: 1) sensors which operate with electronic operating principles, 2) electronic control devices which serve for storing and processing information, and 3) electronically actuated, hydraulic shift valves, which work as actors to control the brake pressure in the individual wheel brake cylinders. Only the functional integration of the sensors, the control unit and the hydraulic actors (also known as actuators) ensures the overall functionality, the ABS function.

The next innovative step took place in the year 2001 with the separation of the hydraulic connection between the brake pedal and the wheel brakes in the **electrohydraulic brake** (EHB). The previously known actuation of the brake pedal is replaced by an actuating unit which comprises a pedal feeling simulator and sensors for detecting the wishes of the driver. The signals of this unit and further sensors are transmitted by electronic means (by wire) to the controller in the control unit. In the most important part of the EHB, the central mechatronic control unit, the interdisciplinary cooperation of mechanical engineering, electrical engineering and information technology shows its greatest advantages: the microprocessor, software, sensors, hydraulic valves and electric pump operate together and make a completely novel, highly dynamic type of brake management possible.



Die Elektromechanische Bremse (EMB), die aus heutiger Sicht etwa im Jahre 2006 die nächste Innovation beschreibt, geht noch einen Schritt weiter und verzichtet auf Bremszylinder, -leitungen und -schläuche, die durch elektrische Kabel ersetzt werden. Der Einsatz der Elektronik verringert den Wartungsaufwand; zudem kann auf die teure Entsorgung der Bremsflüssigkeit verzichtet werden. Wie stark der Bremswunsch des Fahrers ist, ermitteln auch bei der EMB Sensoren im Bremspedalsimulator. Das Steuergerät verarbeitet die empfangenen Signale, verknüpft sie gegebenenfalls mit Daten anderer Sensoren und Regelungssysteme und errechnet für jedes Rad die Kraft, mit der die Bremsbeläge an die Bremsscheibe gedrückt werden sollen. Die Radbremsmodule bestehen hauptsächlich aus einer elektrischen Steuereinheit, einem Elektromotor und einem Getriebe, die im Bremssattel die Zuspanskräfte erzeugen. Die vier Aktoren können innerhalb von Millisekunden jeweils Kräfte bis zu mehreren Kilo-Newton bereit stellen. Die EMB verspricht durch das schnelle Ansprechen der Bremsen verkürzte Anhaltewege. Durch das elek-

tronische Bremspedal, seine ergonomische Anordnung und die geringeren Bedienkräfte kann ein Zeitgewinn von einer halben Sekunde realisiert werden, der den Anhalteweg aus 100 km/h um etwa 20 % verkürzt. Auf Grund der ausschließlich elektrischen Signalübertragung kann das Pedalmodul im Gegensatz zur rein mechanisch-hydraulischen bzw. elektro-hydraulischen Bremse näher an die Spritzwand rücken. Dadurch entsteht mehr Platz im Innenraum und das Verletzungsrisiko im Fußraum wird reduziert.

Die Forderungen an die Kraftfahrzeugsbremsanlage nach mehr Verzögerungsleistung bzw. steigender Funktionalität, Sicherheit, Komfort, Wirtschaftlichkeit und besserer Umweltverträglichkeit bei gleichzeitig immer kürzer werdenden Produktzyklen bedingt einen hohen Integrationsgrad auf Systemebene und lässt die Mechatronik zu einem immer bedeutenderen und wettbewerbsbestimmenden Faktor für zukünftige Innovationen werden.

Quelle: [Ber02]

The **electromechanical brake (EMB)**, which from the current perspective describes the next innovation in the year 2006, goes another step further and dispenses with brake cylinders, lines and hoses, which are replaced by electric cables. The use of electronics reduces the amount of maintenance required; moreover, the expensive disposal of brake fluid is no longer necessary. The degree of braking desired by the driver is also determined in the case of EMB by sensors in the brake pedal simulator. The control unit processes the signals received, possibly combines them with data from other sensors and control systems and calculates for each wheel the force with which the brake liners are to be pressed against the brake disk. The wheel brake modules principally comprise an electronic control unit, an electric motor and a transmission, which generate the tensile forces in the brake caliper. The four actors can each produce forces of up to several kilonewtons within milliseconds. The EMB promises to deliver reduced stopping distances by the rapid response of the brakes. The electronic brake pedal, its ergonomic arrangement and the lower op-

erating forces can provide a time gain of half a second, which reduces the stopping distance from 100 km/h by approximately 20 %. On account of the exclusively electrical signal transmission, the pedal module can be moved closer to the bulkhead, by contrast with the purely mechanical-hydraulic or electrohydraulic brake. This creates more space in the passenger compartment and reduces the risk of injury in the foot well.

The requirements imposed on the motor-vehicle brake system for greater decelerating power or increasing functionality, safety, comfort, cost-effectiveness and better environmental compatibility, with at the same time ever shorter product cycles, brings about a high degree of integration at system level and makes mechatronics become an ever more significant and competitive-determining factor for future innovations.

Source: [Ber02]

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Richtlinie ist, das domänenübergreifende Entwickeln mechatronischer Systeme methodisch zu unterstützen. Hauptaugenmerk sollen hierbei Vorgehensweisen, Methoden und Werkzeuge für die frühe Phase des Entwickelns mit Schwerpunkt Systementwurf bilden. Ergebnis des Systementwurfs ist das abgesicherte Konzept eines mechatronischen Systems. Darunter wird die prinzipiell festgelegte und durch *Verifikation* und *Validierung*¹⁾ überprüfte Lösung verstanden. Je nach Anwendungsfall und Risikobetrachtung sind unterschiedliche Validierungsgenauigkeiten erforderlich: Die Validierung des Konzepts kann am virtuellen, am in Teilen realen oder am vollständig realen Prototyp erfolgen.

Die vorliegende Richtlinie bezieht sich bevorzugt auf die mechatronischen Systeme, die aus diskreten mechanischen und elektronischen Komponenten in Symbiose mit der Informationstechnik bestehen.

Die Richtlinie soll dazu beitragen, die Vielfalt der in den letzten Jahren durch Forschungs- und Praxisarbeiten entstandenen Erkenntnisse aufzubereiten und dem Praktiker in Form einer Leitlinie für das Entwickeln mechatronischer Systeme zugänglich zu machen. Anhand von Anwendungsbeispielen sollen die Umsetzung der Leitlinie illustriert und zugleich das Erfolgspotenzial mechatronischer Lösungen verdeutlicht werden.

1.3 Zielgruppe

Die Richtlinie soll sich in erster Linie an Entwickler²⁾ von mechatronischen Systemen in der Praxis wenden. Sie soll die Grundzüge des Entwickelns mechatronischer Systeme vermitteln und zu einer ganzheitlichen Sichtweise über die einzelne Fachdisziplin hinaus anregen.

1.4 Einordnung der Richtlinie

Die Richtlinie soll ergänzend zu den Richtlinien VDI 2221 und VDI 2422 positioniert werden. Analog der Richtlinie VDI 2221, die allgemeingültige, branchenunabhängige Grundlagen methodischen Entwickelns und Konstruierens behandelt, sollen in der Richtlinie VDI 2206 die Methoden zur Entwicklung mechatronischer Systeme beschrieben werden. Die mechatronischen Ansätze der Richtlinie VDI 2422, die vor dem Hintergrund des Einzugs der Mikroelektronik in die Gerätetechnik entstand, sollen erweitert und zu einem durchgängigen domänenübergreifenden Leitfaden ausgebaut werden.

¹⁾ Definition von „*Verifikation*“ und „*Validierung*“ siehe Abschnitt 3.1.3 „Eigenschaftsabsicherung“.

²⁾ In diesem Dokument wird ausschließlich zur besseren Lesbarkeit die maskuline Form verwendet. Wenn wir von Entwicklern schreiben, meinen wir selbstredend auch Entwicklerinnen.

1.2 Objective

The objective of this guideline is to provide methodological support for the cross-domain development of mechatronic systems. The main aspects here are intended to be the procedures, methods and tools for the early phase of development, concentrating on system design. The result of system design is the assured concept of a mechatronic system. This is understood as meaning the solution established in principle and checked by *verification* and *validation*¹⁾. Depending on the application and risk assessment, different validation accuracies are required: the validation of the concept may be performed on the virtual prototype, on the partly real prototype or on the completely real prototype.

The present guideline relates preferably to the mechatronic systems that comprise discrete mechanical and electronic components in symbiosis with the information technology.

The guideline is intended to contribute to presenting the diversity of knowledge acquired in recent years by research and practical work and make it available to practitioners in the form of a guideline for the development of mechatronic systems. Application examples are to be used as a basis for illustrating the implementation of the guideline and at the same time the potential for the success of mechatronic solutions.

1.3 Target group

The guideline is aimed primarily at practical developers²⁾ of mechatronic systems. It is intended to convey the principles of the development of mechatronic systems and encourage a fully inclusive viewpoint to be taken of individual technical disciplines.

1.4 Classification of the guideline

The guideline is intended to supplement the guidelines VDI 2221 and VDI 2422. By analogy with the guideline VDI 2221, which deals with generally applicable, sector-independent fundamentals of methodological development and design, the guideline VDI 2206 is intended to describe the methods of developing mechatronic systems. The mechatronic premises of guideline VDI 2422, conceived against the background of the incorporation of microelectronics into transmission technology, are to be expanded and developed into a universal cross-domain guideline.

¹⁾ For a definition of "verification" and "validation" see Section 3.1.3 "Assurance of properties".

²⁾ [Translator's note: Footnote in original German text, concerning use of masculine form, not relevant in the English.]

1.5 Aufbau der Richtlinie

Die Richtlinie weist folgende Struktur auf:

Abschnitt 2

Einführung in die Entwicklung mechatronischer Systeme

Hier werden die Grundlagen mechatronischer Systeme behandelt. Diese beinhalten ein definiertes Begriffsverständnis der Mechatronik und den grundsätzlichen Aufbau mechatronischer Systeme. Ferner werden das Nutzenpotenzial der Mechatronik verdeutlicht und die Besonderheiten beim Entwickeln mechatronischer Systeme skizziert.

Abschnitt 3

Entwicklungsmethodik Mechatronik

Die Entwicklungsmethodik bildet den Kern der Richtlinie. Dieser besteht aus einem dreiteiligen Vorgehensmodell (*Mikrozyklus, Makrozyklus, Prozessbausteine*), den Methoden des modellbasierten Systementwurfs, unterstützenden IT-Werkzeugen sowie ausgewählten Aspekten der Organisation.

Abschnitt 4

Anwendungsbeispiele

Konkrete Praxisbeispiele veranschaulichen die Umsetzung der Entwicklungsmethodik mit unterschiedlichen Schwerpunkten. Die Entwurfsaufgaben aus der Kraftfahrzeug- und Bahntechnik, dem Maschinen- und Anlagenbau sowie der Antriebstechnik belegen zudem das Erfolgspotenzial der Mechatronik für die Gestaltung der Produkte von morgen.

Abschnitt 5; Abschnitt 6

Schrifttum; Glossar

Das Verzeichnis der verwendeten Literatur und ein Glossar der wichtigsten Begriffe runden die Richtlinie ab.

2 Einführung in die Entwicklung mechatronischer Systeme

2.1 Charakterisierung des Begriffs Mechatronik

1969 prägte der Japaner *Ko Kikuchi*, Präsident der YASKAWA Electric Corporation, den Begriff **Mechatronics** (deutsch Mechatronik) [HTF96]. Der Hersteller automatisierungstechnischer Produkte, wie Servoantriebe und Roboter, verstand darunter die elektronische Funktionserweiterung mechanischer Komponenten. Der Begriff setzt sich zusammen aus Mechanism (später mechanics, Mechanik oder allgemeiner Maschinenbau) und Electronics (Elektronik oder allgemeine Elektrotechnik) und war im Zeitraum von 1971 bis 1982 als Handelsname geschützt [Uni02].

1.5 Structure of the guideline

The guideline has the following structure:

Section 2

Introduction to the development of mechatronic systems

This deals with the principles of mechatronic systems. These include a defined understanding of the concepts of mechatronics and the basic structure of mechatronic systems. Furthermore, the beneficial potential of mechatronics is illustrated and the special features in the development of mechatronic systems are outlined.

Section 3

Development methodology of mechatronics

The development methodology forms the core of the guideline. This comprises a three-part procedural model (*micro-cycle, macro-cycle, process modules*), the methods of model-based system design, supporting IT tools and selected aspects of the organization.

Section 4

Application examples

Concrete practical examples illustrate the implementation of the development methodology with different points of emphasis. The design tasks from automotive engineering and railroad technology, mechanical engineering and plant construction as well as drive technology provide further evidence of the potential for the success of mechatronics for creating the products of tomorrow.

Section 5; Section 6

Bibliography; Glossary

A list of literature cited and a glossary of the most important terms round off the guideline.

2 Introduction to the development of mechatronic systems

2.1 Characterization of the term mechatronics

In 1969, the Japanese president of YASKAWA Electric Corporation, *Ko Kikuchi*, coined the term **mechatronics** [HTF96]. The manufacturer of automation-engineering products, such as servodrives and robots, understood this to mean the electronic functional enhancement of mechanical components. The term comprises mechanisms (later mechanics, or generally mechanical engineering) and electronics (or general electrical engineering) and was protected as a trade name in the period from 1971 to 1982 [Uni02].

Mit dem Aufkommen der Mikroelektronik und besonders der Mikroprozessortechnik ist die Informationstechnik als weiterer Bestandteil der Mechatronik hinzugekommen. Die Mechatronik nutzt somit die **Synergien** aus dem Zusammenwirken der klassischen Ingenieurwissenschaften Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik (Bild 2-1).

Mechatronische Systeme zeichnen sich durch die funktionale und/oder räumliche Integration von Sensoren, Aktoren (auch Aktuatoren genannt), Informationsverarbeitung und einem Grundsystem aus (vgl. Abschnitt 2.2.1). Das Grundsystem kann aus mechanischen, fluidtechnischen, chemischen oder biologischen Strukturen bestehen. Ein Ziel der Mechatronik ist es, das Verhalten eines technischen Systems zu verbessern, indem mit Hilfe von Sensoren Informationen über die Umgebung, aber auch über das System selbst, erfasst werden. Diese Informationen werden in Prozessoren verarbeitet, die im jeweiligen Kontext „optimale“ Reaktionen mit Hilfe von Aktoren auslösen. Durch den Einbezug der modernen Informationstechnik in die Produkte selbst können anpassungsfähige technische Systeme entstehen. Diese Systeme sind in der Lage, auf Veränderungen ihrer Umgebung zu reagieren, kritische Betriebszustände zu erkennen und Abläufe, die nur schwer steuerbar sind, durch Einsatz der Regelungstechnik zu optimieren.

Eine allgemein akzeptierte, einheitliche Definition des Begriffs „Mechatronik“ ist bis heute nicht erkennbar. Vielmehr ist eine ständige Weiterentwicklung des Begriffs im Sinne einer Technologieerweiterung zu beobachten. 1989 definierte Schweitzer [Sch89]:

With the advent of microelectronics, and in particular microprocessor technology, information technology was added as a further component of mechatronics. Mechatronics consequently uses the **synergies** from the interaction of the classic engineering sciences mechanical engineering, electrical engineering and information technology (Figure 2-1).

Mechatronic systems are distinguished by the functional and/or spatial integration of sensors, actors (also known as actuators), information processing and a basic system (cf. Section 2.2.1). The basic system may comprise mechanical, fluid-technical, chemical or biological structures. One aim of mechatronics is to improve the behavior of a technical system by using sensors to obtain information on the environment, but also on the system. This information is processed in processors, which in the respective context trigger „optimum“ reactions with the aid of actors. The incorporation of modern information technology in the products themselves allows adaptive technical systems to be created. These systems are capable of responding to changes in their environment, detecting critical operating states and optimizing sequences which can only be controlled with difficulty, by the use of control technology.

As yet, a generally accepted, standard definition of the term „mechatronics“ has not been adopted. Rather, a constant further development of the term in line with technological expansion can be observed. In 1989, Schweizer defined it as follows [Sch89]:

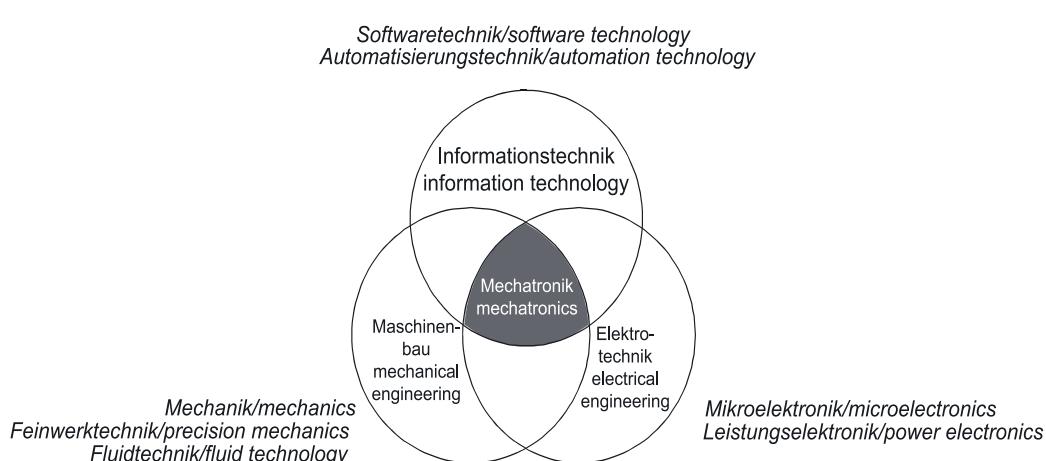


Bild 2-1. Mechatronik – Synergie aus dem Zusammenwirken verschiedener Disziplinen, nach [Ise99]

Fig. 2-1. Mechatronics – synergy from the interaction of different disciplines, according to [Ise99]

„Mechatronik ist ein interdisziplinäres Gebiet der Ingenieurwissenschaften, das auf den klassischen Disziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik aufbaut. Ein typisches mechatronisches System nimmt Signale auf, verarbeitet sie und gibt Signale aus, die es z.B. in Kräfte und Bewegungen umsetzt.“

Damit sind letztlich alle Formen von Sensoren, Aktoren, Elektronikfunktionen und mechanischen Systemkomponenten in integrierter funktionaler bzw. räumlicher Anordnung als Mechatronik zu bezeichnen. 1996 erweiterten *Harashima, Tomizuka und Fukuda* [HTF96]:

„[Mechatronics is]...the synergistic integration of mechanical engineering with electronic and intelligent computer control in the design and manufacturing of industrial products and processes.“

Mechatronik bezieht sich demnach nicht nur auf die Funktions- und Bauteilintegration, sondern auch auf den integrierten Entwurf und die Fertigung mechatronischer Erzeugnisse.

1996 modifizierte *Van Brussel* und betont die domänenübergreifende Sichtweise beim Entwurf mechatronischer Systeme [Bru96]:

„[Mechatronics needs]...a synergistic cross-fertilization between the different engineering disciplines involved: mechanical engineering, control engineering, microelectronics and computer science. This is exactly what mechatronics is aiming at; it is a concurrent-engineering view on machine design.“

Im deutschsprachigen Raum ist folgende Definition von *Isermann* zu finden [Ise99]:

„Mechatronik ist ein interdisziplinäres Gebiet, bei dem folgende Disziplinen zusammenwirken: mechanische und mit ihnen gekoppelte Systeme, elektronische Systeme, Informationstechnik. Dabei ist das mechanische System im Hinblick auf die Funktionen dominierend. Es werden synergistische Effekte angestrebt, die mehr beinhalten als die reine Addition der Disziplinen.“

Kern eines modernen Verständnisses von Mechatronik ist der synergistische Effekt verschiedener Technologien. Entscheidend ist also nicht eine Einzeltechnologie, sondern die Kombination der Einzeltechnologien, die es ermöglicht, dass ein System seine Aufgabe optimal erfüllt oder dass neue Funktionalitäten realisiert werden können. Die Integration der Technologien muss dabei bereits zu Beginn der Entwicklung in der ersten Spezifikationsphase erfolgen. Die

[Mechtronics is an interdisciplinary field of engineering sciences which is based on the classic disciplines of mechanical engineering, electrical engineering and information technology. A typical mechatronic system records signals, processes them and outputs signals which it converts for example into forces and movements.]

Consequently, all forms of sensors, actors, electronic functions and mechanical system components in an integrated functional or spatial arrangement are in fact to be referred to as mechatronics. In 1996, this was expanded by *Harashima, Tomizuka and Fukuda* [HTF96]:

„[Mechatronics is]... the synergistic integration of mechanical engineering with electronic and intelligent computer control in the design and manufacturing of industrial products and processes.“

Mechtronics accordingly relates not only to the integration of functions and components but also to the integrated design and production of mechatronic products.

In 1996, *Van Brussel* modified this and emphasized the cross-domain viewpoint to be taken when designing mechatronic systems [Bru96]:

„[Mechatronics needs]... a synergistic cross-fertilization between the different engineering disciplines involved: mechanical engineering, control engineering, microelectronics and computer science. This is exactly what mechatronics is aiming at; it is a concurrent-engineering view on the machine design.“

In the German-speaking world, the following definition by *Isermann* can be found [Ise99]:

[Mechtronics is an interdisciplinary field in which the following disciplines interact: mechanical systems and systems coupled with them, electronic systems, information technology. The mechanical system is dominant here with regard to the functions. Synergistic effects are aimed for, comprising more than the mere addition of the disciplines.]

At the center of a modern understanding of mechatronics is the synergistic effect of different technologies. Consequently, what is decisive is not the individual technology but the combination of individual technologies, making it possible for a system to perform its task optimally or for new functionalities to be realized. The integration of technologies must in this case already take place at the beginning of the development, in the first specification phase. The de-

Entwicklung von mechatronischen Systemen setzt die ganzheitliche Betrachtung der Systeme, ein interdisziplinäres Denken, eine gemeinsame begleitende Sprache bei den Entwicklern und meist den Einsatz rechnerunterstützter Werkzeuge voraus. Infolge der Komplexität und Heterogenität, die den meisten mechatronischen Systemen anhaften, ist eine systematische Vorgehensweise unabdingbar (siehe Abschnitt 3.1).

Neben der Mechatronik haben sich in der Vergangenheit eine Reihe weiterer Begriffe für verschiedene, verwandte Fachgebiete etabliert. Dies sind u.a. Elektromechanik, Feinwerktechnik, Mikrosystemtechnik und Adaptronik.

Die **Elektromechanik** beschreibt Strukturen, die im Allgemeinen durch eine Wechselwirkung elektromagnetischer Felder mit massebehafteten Körpern charakterisiert sind. Beispiele sind Relais, rotierende elektrische Maschinen oder Linearantriebe, also Systeme, die elektrische und mechanische Energie wandeln.

Die klassische und elektronische **Feinwerktechnik** umfasst alle Teile der angewandten Physik, der Mechanik, der Elektrotechnik und Elektronik, der technischen Optik sowie deren Mischgebiete und der elektronischen Informationsverarbeitung. Die Dimension der Produkte bewegt sich im Bereich von wenigen Millimetern und reicht bis an die Mikrotechniken heran.

Die konsequente Weiterentwicklung der Feinwerktechnik zu immer kleiner werdenden Bauelementen mit den dazu notwendigen neuen mikromechanischen Fertigungsverfahren führt zur **Mikro- und Mikrosystemtechnik**. Die Mikrosystemtechnik hat als Gegenstand Systeme, die sich als miniaturisierte Gesamtheit integrierter Sensor-, Informationsverarbeitungs- und Aktorkomponenten beschreiben lassen. Sie ermöglichen Wahrnehmungs-, Verarbeitungs- und/oder Antriebsfunktionen durch die Kombination von mechanischen, elektrischen, elektromagnetischen, optischen, chemischen, biologischen und/oder weiteren Funktionselementen. Stehen nur Systeme im Fokus, die mechanische, elektronische und informationstechnische Funktionselemente in Symbiose aufweisen, dann wird häufig auch von Mikromechatronik (Mikrotechnik) gesprochen.

In der **Adaptronik** werden Werkstoffstrukturen mit werkstoffintegrierten Sensoren, Aktoren und informationsverarbeitenden elektronischen Komponenten kombiniert und als aktive Systeme mit weiteren Funktionen versehen. Sie übernehmen damit gleichzeitig tragende wie aktorische bzw. sensorische Auf-

velopment of mechatronic systems presupposes the fully inclusive consideration of the systems, an interdisciplinary way of thinking, a common accompanying language among the developers and usually the use of computer-aided tools. Because of the complexity and heterogeneity affecting most mechatronic systems, a systematic procedure is essential (see Section 3.1).

Apart from mechatronics, a series of further terms for various related technical fields have become established in the past. These include electro-mechanics, precision mechanics, microsystems engineering and adaptronics.

Electro-mechanics describes structures which are generally characterized by the interaction of electromagnetic fields with bodies affected by mass. Examples are relays, rotating electrical machines or linear drives, that is systems which convert electrical and mechanical energy.

Classic and electronic **precision mechanics** comprises all parts of related physics, mechanics, electrical engineering and electronics, technical optics and also areas where they overlap and electronic information processing. The products vary in their dimensions from the range of a few millimeters to the micro-engineering scale.

The systematic further development of precision mechanics to ever smaller components with the new micro-mechanical production methods necessary for them leads to **micro-engineering and microsystems engineering**. Microsystems engineering concerns systems which can be described as a miniaturized entirety of integrated sensor, information processing and actor components. They make detecting, processing and/or driving functions possible by the combination of mechanical, electrical, electromagnetic, optical, chemical, biological and/or further function elements. If the focus is directed only at systems that have mechanical, electronic and IT function elements in a symbiosis, reference is often also made to micro-mechatronics (micro-engineering).

In **adaptronics**, material structures are combined with material-integrated sensors, actors and information processing electronic components and, as active systems, provided with further functions. Consequently, at the same time they assume supporting tasks, such as those of actors or sensors. Materials

gaben. Materialen sind z.B. Piezoelektrika, Magnetostriktiva oder elektrorheologische Fluide. Die in adaptrotronischen Systemen erzeugbare mechanische Leistung ist begrenzt, da die werkstoffintegrierten Aktoren als „One Stroke-Actuators“ nur mit kleinen Hüben im Rahmen der zulässigen Materialdehnung arbeiten können. Anwendungsfelder für adaptrotronische Systeme sind die aktive Schwingungs- oder Lärmdämpfung von Strukturen, adaptive Tragflächen und adaptive Trägerstrukturen wie z.B. Antennenmasten. Mechatronische Systeme nutzen hingegen meist „Multiple Stroke Actuators“ wie z.B. Elektromotoren, die ihre hohe Leistung aus der schnellen Wiederholung von einzelnen Hüben erzielen.

Eine genaue Abgrenzung dieser Fachgebiete untereinander ist nicht immer möglich; die Grenzen sind fließend. Manche Systeme kann man durchaus auch mehreren Gebieten zuordnen. Allerdings ist allen eines gemeinsam: Erst der Systemgedanke, das heißt die funktionale und räumliche Integration vieler unterschiedlicher Technologien zu einem komplexen System und dessen ganzheitliche Betrachtung, ergibt eine neue Qualität und ist unabdingbar für die erweiterte mechatronische Gesamtfunktionalität.

2000 hat *Tomizuka* [Tom00] die Definition der Mechatronik so weit gefasst, dass sich nahezu alle industriellen Produkte und Prozesse unter dem Oberbegriff der Mechatronik subsumieren lassen:

„Mechatronics is the synergetic integration of physical systems with information technology and complex-decision making in the design, manufacture and operation of industrial products and processes.“

Die Berücksichtigung dieses erweiterten Mechatronikbegriffs würde jedoch den vorgesehenen Umfang der Richtlinie übersteigen. Die Richtlinie VDI 2206 bezieht sich deshalb bevorzugt auf solche mechatronischen Systeme, die aus diskreten mechanischen und elektronischen Komponenten in Symbiose mit der Informationstechnik bestehen. Dabei sind – vom einfachen Ersatz mechanischer Funktionselemente durch elektronische Komponenten bis hin zum kompletten Neuentwurf auf der Basis eines mechatronischen Entwicklungsprozesses – unterschiedliche Ausprägungen mechatronischer Systeme denkbar. Ausprägungen sind z.B. funktionale und/oder räumliche Integration (siehe Abschnitt 3.1.3). Generell können mechatronische Systeme auch aus Subsystemen bestehen, die selbst wieder mechatronische Systeme sind. **Mechatronische Systeme im Sinne dieser VDI-Richtlinie sind daher am besten durch die Definition von Harashima, Tomizuka und Fukuda [HTF96] beschrieben**, die zur Verdeutlichung hier noch einmal wiederholt wird:

are, for example, piezoelectrics, magnetostrictives or electrorheological fluids. The mechanical power which can be generated in adaptronic systems is limited, since, as "one-stroke actuators", the material-integrated actors can only operate with small strokes within the limits of the permissible material extension. Fields of application for adaptronic systems are active vibration or noise damping of structures, adaptive load-bearing surfaces and adaptive support structures, such as for example antenna masts. Mechatronic systems on the other hand usually use "multiple-stroke actuators", such as for example electric motors, which achieve their high power from the rapid repetition of individual strokes.

An exact delimitation of these technical areas from one another is not always possible; the boundaries are fluid. Some systems can quite well be assigned to a number of areas. However, they all share one thing in common: only the concept of a system, i.e. the functional and spatial integration of many different technologies to form a complex system and its consideration as a whole, produces a new quality and is indispensable for the overall expanded mechatronic functionality.

In 2000, *Tomizuka* [Tom00] formulated the definition of mechatronics so broadly that virtually all industrial products and processes can be subsumed under the generic term of mechatronics:

„Mechatronics is the synergetic integration of physical systems with information technology and complex-decision making in the design, manufacture and operation of industrial products and processes.“

However, it would go beyond the scope envisaged for the guideline to consider this expanded concept of mechatronics. The guideline VDI 2206 therefore relates preferably to those mechatronic systems which comprise discrete mechanical and electronic components in symbiosis with information technology. At the same time, different distinct forms of mechatronic systems are conceivable, from the simple replacement of mechanical functional elements by electronic components through to the complete new design on the basis of a mechatronic development process. Distinct forms are, for example, functional and/or spatial integration (see Section 3.1.3). In general, mechatronic systems may also comprise subsystems which themselves are again mechatronic systems. **Therefore, for the purposes of this VDI guideline, mechatronic systems are best described by the definition by Harashima, Tomizuka and Fukuda [HTF96]**, which is repeated here once again for clarification.

„[Mechtronics is]...the synergistic integration of mechanical engineering with electronic and intelligent computer control in the design and manufacturing of industrial products and processes.“³⁾

2.2 Aufbau mechatronischer Systeme

2.2.1 Grundstruktur

Mechatronische Systeme bestehen aus einem *Grundsystem*, *Sensoren*, *Aktoren* und einer *Informationsverarbeitung*. Zusätzlich von Bedeutung ist die Umgebung, in der das mechatronische System betrieben wird (Bild 2-2).

Beim **Grundsystem** handelt es sich in der Regel um eine mechanische, elektromechanische, hydraulische oder pneumatische Struktur bzw. eine Kombination aus diesen. Allgemein ist allerdings ein beliebiges physikalisches System als Grundsystem denkbar, so dass insbesondere auch hierarchisch strukturierte mechatronische Systeme darstellbar sind (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Aufgabe der **Sensoren** ist die Bestimmung von ausgewählten Zustandsgrößen des Grundsystems. Unter sehr allgemeinen Voraussetzungen⁴⁾ versteht man unter den Zustandsgrößen eines technischen Systems die physikalischen Größen, durch deren Wert zu einem beliebigen Zeitpunkt t_0 der Ablauf des Systems für $t > t_0$ eindeutig bestimmt ist, sofern die Eingangsgrößen des Systems für $t > t_0$ gegeben sind [FöI94]. Sensoren können dabei physisch vorhandene Messwertaufnehmer oder aber reine Softwaresenso-

³⁾ Deutsche Übersetzung durch die Redaktion: Mechatronik bezeichnet das synergetische Zusammenwirken der Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik beim Entwurf und der Herstellung industrieller Erzeugnisse sowie bei der Prozessgestaltung.

⁴⁾ Voraussetzung ist die Erfüllung des Existenz- und Eindeutigkeitssatzes für Differentialgleichungen. Er gilt für stetige Eingangsfunktionen und lässt sich auf stückweise stetige Funktionen erweitern.

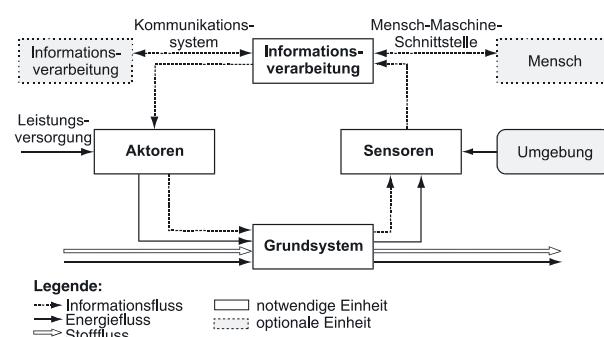


Bild 2-2. Grundstruktur eines mechatronischen Systems

„[Mechtronics is]... the synergistic integration of mechanical engineering with electronic and intelligent computer control in the design and manufacturing of industrial products and processes.“³⁾

2.2 Structure of mechatronic systems

2.2.1 Basic structure

Mechatronic systems comprise a *basic system*, *sensors*, *actors* and *information processing*. Also of significance is the environment in which the mechatronic system is operated (Figure 2-2).

The **basic system** is generally a mechanical, electro-mechanical, hydraulic or pneumatic structure or a combination of these. However, generally any desired physical system is conceivable as a basic system, so that it is possible in particular even for hierarchically structured mechatronic systems to be represented (cf. Section 2.2.2).

The task of the **sensors** is to determine selected state variables of the basic system. Under very general pre-conditions⁴⁾, the state variables of a technical system are understood as meaning the physical variables which definitively determine by their value at any desired point in time t_0 the sequence of the system for $t > t_0$, provided that the input variables of the system for $t > t_0$ are given [FöI94]. Sensors may in this case be physically present measured-value pickups or else straightforward software sensors (so-called "observ-

³⁾ [Translator's note: Footnote in original German text, giving a translation of this into German, not relevant in the English]

⁴⁾ The precondition is to satisfy the existence and uniqueness theorem for differential equations. It applies to continuous input functions and can be extended to piecewise continuous functions.

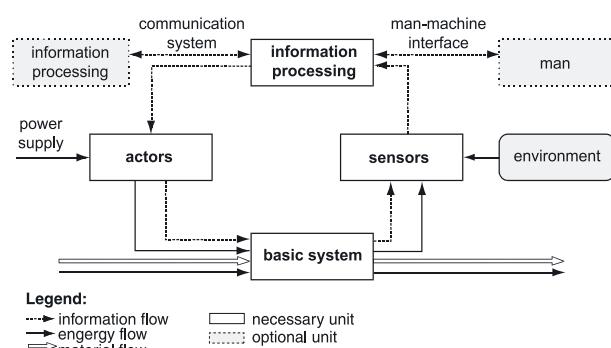


Fig. 2-2. Basic structure of a mechatronic system

ren (so genannte „Beobachter“, siehe z.B. [Ise88]) sein. Die Sensoren liefern die Eingangsgrößen für die **Informationsverarbeitung**, die heute in den meisten Fällen digital, das heißt wert- und zeitdiskret, mittels Mikroprozessor erfolgt, allgemein aber auch mittels rein analoger oder gemischt analog/digitaler (hybrider) Elektronik realisierbar ist. Die Informationsverarbeitung bestimmt die notwendigen Einwirkungen, um die Zustandsgrößen des Grundsystems in gewünschter Weise zu beeinflussen. Die Umsetzung der Einwirkungen erfolgt durch **Aktoren** direkt am Grundsystem.

Sowohl im Bereich Sensoren als auch im Bereich Aktoren existiert heute das Bestreben einer räumlichen Integration mit weiteren Funktionseinheiten. Dadurch entstehen „intelligente“ Einheiten, das heißt **intelligente Sensoren** (Integration von Messwertaufnehmer, Analog/Digital-Umsetzer und Mikroprozessor) und **intelligente Aktoren** (Integration von Digital/Analog-Umsetzer, Anpassungs- bzw. Verstärkerschaltung sowie gegebenenfalls Mikroprozessor). Intelligente Sensoren messen analoge physikalische Größen wie beispielsweise Druck, Temperatur oder Geschwindigkeit, digitalisieren die gemessenen Werte und übertragen die Signale – entsprechend angepasst – an die Informationsverarbeitung. Intelligente Aktoren werden direkt durch digitale Signale der Informationsverarbeitung angesteuert. Die Signale werden in analoge Größen umgewandelt, verstärkt und dienen dann beispielsweise dem Aufbringen von Kräften oder der Erzeugung von Bewegungen.

Für eine genauere Betrachtung der Verknüpfungen zwischen Grundsystem, Sensoren, Informationsverarbeitung und Aktoren ist eine Darstellung der Beziehungen zwischen den Komponenten mittels Flüssen hilfreich. Grundsätzlich sind drei Arten von Flüssen zu unterscheiden: *Stofffluss*, *Energiefluss* und *Informationsfluss* [PB97].

- **Stoffflüsse:** Beispiele für Stoffe, die zwischen Einheiten mechatronischer Systeme fließen, sind feste Körper, Prüfgegenstände, Behandlungsobjekte, Gase oder Flüssigkeiten.
- **Energieflüsse:** Unter Energie ist in diesem Zusammenhang jede Energieform zu verstehen wie z.B. mechanische, thermische oder elektrische Energie, aber auch Größen wie Kraft oder Strom.
- **Informationsflüsse:** Informationen, die zwischen den Einheiten mechatronischer Systeme ausgetauscht werden, sind beispielsweise Messgrößen, Steuerimpulse oder Daten.

Das Grundsystem eines mechatronischen Systems besteht aus Einheiten, die über alle drei Arten von Flüssen verkettet sind (Bild 2-2). Im Vordergrund stehen

ers“, see for example [Ise88]). The sensors supply the input variables for the **information processing**, which today in most cases takes place digitally, i.e. discretely in terms of value and time, by means of a microprocessor; however, it can also be realized by means of purely analog electronics or mixed analog/digital (hybrid) electronics. The information processing determines the effects necessary to influence the state variables of the basic system in the desired way. The implementation of the effects takes place by **actors** directly on the basic system.

Both in the area of sensors and in the area of actors, today there is the aim to achieve spatial integration with further functional units. This creates “intelligent” units, i.e. **intelligent sensors** (integration of the measured-value pickup, analog/digital converter and microprocessor) and **intelligent actors** (integration of the digital/analog converter, adaptation or amplifier circuit and possibly microprocessor). Intelligent sensors measure analog physical variables, such as for example pressure, temperature or speed, digitize the measured values and transmit the signals – correspondingly adapted – to the information processing. Intelligent actors are activated directly by digital signals of the information processing. The signals are converted into analog variables, amplified and then serve for example for exerting forces or producing movements.

For a closer look at the interrelationships between the basic system, sensors, information processing and actors, it is helpful to represent the relationships between the components by means of flows. In principle, a distinction has been made between three types of flow: *material flow*, *energy flow* and *information flow* [PB97].

- **Material flows:** Examples of materials which flow between units of mechatronic systems are solid bodies, objects under test, objects being treated, gases or liquids.
- **Energy flows:** Energy is to be understood in this connection as meaning any form of energy, such as for example mechanical, thermal or electrical energy, but also variables such as force or current.
- **Information flows:** Information exchanged between units of mechatronic systems are for example measured variables, control pulses or data.

The basic system of a mechatronic system comprises units which are linked by all three types of flow (Figure 2-2). At the forefront here are generally energy

hierbei in der Regel Energie- und Stoffflüsse. Die Flüsse, die das Grundsystem und die Umgebung mit den Sensoren und Aktoren verbinden, besitzen sowohl den Charakter von Energie- als auch von Informationsflüssen, da sowohl für das Messen (Sensoren) als auch für das Einwirken (Aktoren) Energie „fließt“, andererseits aber auch Informationen – Steuersignale der Aktoren und Messsignale der Sensoren – übertragen werden. Die Informationsverarbeitung nutzt die Informationsflüsse der Sensoren und liefert selbst Informationsflüsse für die Aktoren. Bei den Energieflüssen in Bild 2-2 ist zu beachten, dass nur die wesentlichen Energieflüsse dargestellt sind, die direkt oder indirekt auf das Grundsystem einwirken. Oft wird die Informationsverarbeitung zusätzlich über ein Kommunikationssystem mit anderen Informationsverarbeitungseinheiten verbunden sein. Die Kommunikation mit dem Menschen bzw. dem Systemanwender erfolgt gegebenenfalls über spezielle Mensch-Maschine-Schnittstellen. Die Verbindungen stellen in beiden Fällen Informationsflüsse dar.

2.2.2 Modularisierung und Hierarchisierung

Komplexe mechatronische Systeme bestehen im Allgemeinen aus der synergetischen Integration verschiedener mechatronischer **Module**, das heißt Systemelementen oder Bauteilen, die zu einer Gruppe zusammengefasst werden und gemeinsam eine bestimmte Funktion erfüllen. Da diese Module unterschiedliche Funktionen beinhalten und repräsentieren, ist es sinnvoll, diese Integration nicht nur auf einer Ebene zu gestalten, sondern auf das Ordnungsprinzip der **Hierarchisierung** zurückzugreifen. Die in Abschnitt 2.2.1 beschriebene Grundstruktur eines mechatronischen Systems ist als Grundbaustein zu verstehen.

Werden mehrere Grundbausteine über ihre mechatronische Funktionsstruktur und über ihre mechanische Tragstruktur miteinander verkoppelt, so entsteht ein System höherer Ordnung. Auf dieser höheren Stufe werden zusätzliche Aufgaben des Grundbausteins unter Umständen mit zusätzlicher Sensorik und Informationsverarbeitung realisiert. Neben der Realisierung von Fehlerdiagnose und Überwachungsalgorithmen steht besonders die Generierung von Vorgaben für untergeordnete mechatronische Grundbausteine im Vordergrund dieser Hierarchiestufe.

Sollen weitere Aufgaben wie z.B. Lernvorgänge oder Adaption in einem mechatronischen System realisiert werden, sind weitere Hierarchiestufen sinnvoll, in denen Grundbausteine und bereits aggregierte Systeme nur noch über ihre Informationsverarbeitung verkoppelt werden. Hierfür ist entsprechend der Komplexität der Aufgabenstellung und der vorhandenen Ressourcen eine angepasste und somit optimale Struktur zu finden. Eine mögliche Realisierung solcher Strukturen liefert der Ansatz von [LKS00].

and material flows. The flows which connect the basic system and the environment to the sensors and actors have both the character of energy flows and information flows, since energy "flows" both for the measuring (sensors) and for the acting (actors), but on the other hand information is also transmitted – control signals of the actors and measuring signals of the sensors. The information processing uses the information flows of the sensors and itself provides information flows for the actors. In the case of the energy flows in Figure 2-2, it is to be noted that only the main energy flows which act directly or indirectly on the basic system are represented. The information processing is often additionally connected to other information processing units via a communication system. The communication with man or the system user may take place via special man-machine interfaces. The connections in both cases represent information flows.

2.2.2 Modularization and hierarchization

Complex mechatronic systems generally comprise the synergetic integration of various mechatronic **modules**, i.e. system elements or components which are combined to form a group and together perform a specific function. Since these modules comprise and represent different functions, it is meaningful not just to create this integration on one plane but to resort to the ordering principle of **hierarchization**. The basic structure of a mechatronic system described in Section 2.2.1 is to be understood as a basic module.

If a number of basic modules are coupled to one another via their mechatronic function structure and their mechanical supporting structure, a system of higher order is created. On this higher level, additional tasks of the basic module are realized, under some circumstances with additional sensor technology and information processing. Apart from realizing error diagnostics and monitoring algorithms, the generation of setpoint selections for subordinate mechatronic basic modules is especially at the forefront of this hierarchical level.

If further tasks, such as for example learning processes or adaptation, are to be realized in a mechatronic system, it is appropriate to have further hierarchical levels in which basic modules and already aggregated systems are simply coupled via their information processing. For this purpose, an adapted and consequently optimum, structure is to be found, to correspond to the complexity of the defined task and the available resources. A possible way of realizing such structures is provided by the approach proposed by [LKS00].

Bild 2-3 zeigt exemplarisch eine hierarchische Struktur mechatronischer Systeme. Grundbausteine der 1. Ebene (z.B. Federbein) werden auf der 2. Ebene mit überlagerter Informationsverarbeitung verkoppelt (z.B. Fahrzeug). Auf der 3. Ebene entstehen vernetzte Systeme, die nur über die Informationsverarbeitung verbunden sind (z.B. Kreuzungsmanagement).

Figure 2-3 shows by way of example a hierarchical structure of mechatronic systems. Basic modules of the first level (for example spring strut) are coupled on the second level with superposed information processing (for example vehicle). Created on the third level are interconnected systems, which are connected only via the information processing (for example crossing management).

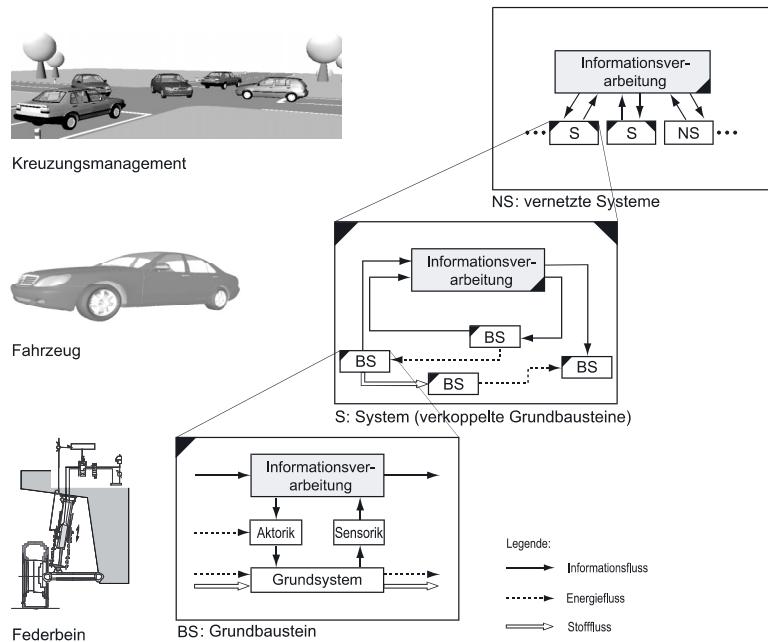


Bild 2-3. Beispiel für Strukturierung mechatronischer Systeme, nach [LKS00]

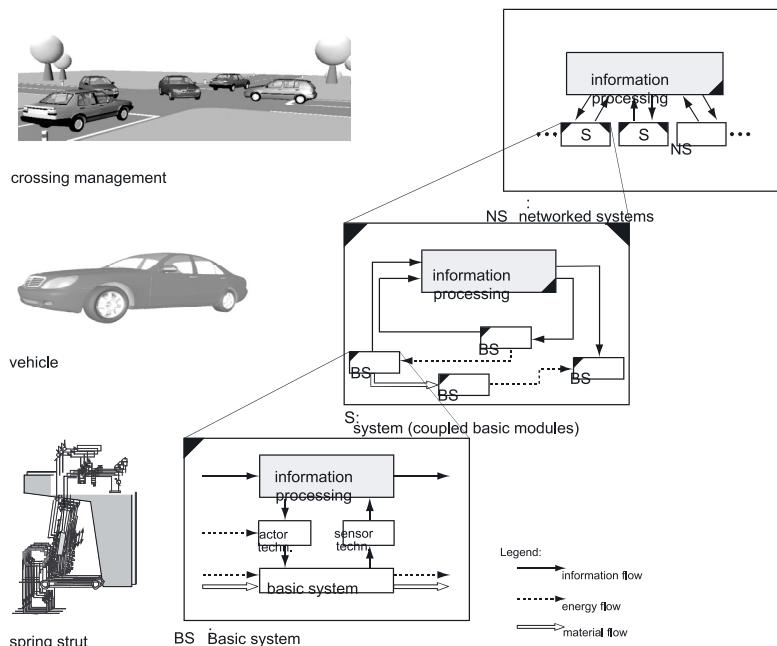


Fig. 2-3. Example of structuring of mechatronic systems, according to [LKS00]

Neben der funktionalen Integration mechatronischer Module stellt auch die räumliche, gerätetechnische Integration eine wichtige Aufgabe dar. Hierbei sind Geräte-Module mittels definierter Schnittstellen zu einem Gesamtsystem mit verschiedenen Hierarchiestufen (mechatronische Aggregate) zu integrieren. Die gleichzeitige Betrachtung beider Integrationsaufgaben führt zu einem optimal gestalteten mechatronischen Produkt.

2.3 Nutzenpotenzial der Mechatronik

Das Nutzenpotenzial der Mechatronik ergibt sich aus den Innovationspotenzialen der Technologien sowie durch funktionale und räumliche Integration der Technologien. Die erste Quelle der Innovation resultiert aus **der Entwicklungsdynamik elektronischer und softwaretechnischer Komponenten** und deren konsequenter Einbindung in vormals rein mechanische Produkte. Im Vergleich zur Mechanik sind die Innovationszyklen in der Elektronik und Informationstechnik deutlich kürzer. Aus dieser Dynamik ergeben sich eine Reihe von Potenzialen, die durch die Integration für mechatronische Produkte genutzt werden können [Ehl00]. Daneben eröffnet die **neuartige Kombination bekannter Produkttechnologien** eine zweite Potenzialquelle. Durch den technologischen Fortschritt können in zunehmendem Maße elektronische Komponenten und Software in vormals rein mechanische bzw. elektrotechnische Produkte integriert werden. Dies führt zu einer Integration von Funktionen in ein Produkt, die bislang an anderer Stelle realisiert wurden oder ermöglicht sogar ganz neue Funktionalitäten [ENS00].

Eine wesentliche Voraussetzung zur Ausschöpfung dieser beiden Potenziale ist die **Modularisierung** der Produktfunktionen und die Definition von **Schnittstellen** (vgl. Abschnitt 2.2.2). Modularisierung bedeutet die Bildung einer Produktstruktur mit Modulen, bei der die Beziehungen zwischen den Modulen geringer ausgeprägt sind als die Beziehungen innerhalb der Module. Damit lassen sich Wechselwirkungen zwischen Modulen auf ein Minimum reduzieren. Zwischen den Modulen sind Schnittstellen zu bilden, um die Kompatibilität auch bei unterschiedlicher Innovationsdynamik sicherzustellen, z.B. Hardwarekomponenten unterschiedlicher Produktgenerationen, Softwareupdate bei unveränderter Hardware etc.

Innovationspotenziale aus der Informationstechnik und Elektronik

Der Nutzen für mechatronische Produkte resultiert aus der Innovationsdynamik der Informationstechnik und Elektronik. Die Innovationsdynamik hat eine wirtschaftliche und eine technologische Dimension [Sch00].

Apart from the functional integration of mechatronic modules, the spatial, equipment-related integration also represents an important task. In this respect, equipment modules must be integrated by means of defined interfaces to form an overall system with various hierarchical levels (mechatronic units). The simultaneous consideration of both integration tasks leads to an optimally created mechatronic product.

2.3 Beneficial potential of mechatronics

The beneficial potential of mechatronics is obtained from the innovation potentials of the technologies and by functional and spatial integration of the technologies. The first source of innovation results from **the development dynamics of electronic and software-technical components** and their systematic incorporation into previously purely mechanical products. In comparison with mechanics, the innovation cycles in electronics and information technology are much shorter. These dynamics give rise to a series of potentials, which can be used for mechatronic products by integration [Ehl00]. In addition, the **novel combination of known product technologies** opens up a second source of potential. Technological progress increasingly allows electronic components and software to be integrated in previously purely mechanical or electrotechnical products. This leads to integration in a product of functions which were previously realized elsewhere or even makes entirely new functionalities possible [ENS00].

An essential precondition for fully exploiting these two potentials is the **modularization** of the product functions and the definition of **interfaces** (cf. Section 2.2.2). Modularization means the forming of a product structure with modules, in which the relationships between the modules are less distinct than the relationships within the modules. This allows interactions between modules to be reduced to a minimum. Interfaces are to be formed between the modules to ensure compatibility even when there is differing innovation dynamics, for example hardware components of different product generations, software update with unchanged hardware, etc.

Innovation potentials from information technology and electronics

The benefit for mechatronic products results from the innovation dynamics of information technology and electronics. The innovation dynamics have a commercial and technological dimension [Sch00].

Wirtschaftliche Dimension: Wirtschaftlich ist der Bereich der Elektronik durch einen fortwährenden Preisverfall bei mikroelektronischen Bauelementen gekennzeichnet. Realisierte Kostensenkungen werden unmittelbar zur Preissenkung am Markt genutzt und auch technische Innovationen werden direkt am Markt eingeführt. Unternehmen, die mikroelektronische Schaltungen in ihr Produkt integrieren, können direkt von dieser wirtschaftlichen Dimension profitieren und den Preisverfall für die Verbesserung der Kosten-/Leistungsrelation des eigenen Produkts nutzen [Sch00].

Technologische Dimension: Die Innovationsdynamik der Elektronik- und Softwaretechnologie kann anhand des Moore'schen Gesetzes verdeutlicht werden, wonach die Leistungsfähigkeit von Mikroprozessoren ca. alle 18 Monate verdoppelt wird [Moo65]. Der technologische Fortschritt ist aber nicht nur auf die Leistungsfähigkeit der mikroelektronischen Bauteile begrenzt. Durch Fortschritte in der Aufbautechnologie der Bauelemente sinken die Anforderungen an die Einsatzumgebung der elektronischen Komponenten. Hierdurch werden immer neue Anwendungsbereiche von elektronischen Schaltungen erschlossen, deren Einsatz früher auf Grund von baulichen Gegebenheiten oder klimatischen Verhältnissen ausgeschlossen war.

Die technologische und die wirtschaftliche Dimension sind miteinander gekoppelt. So ist trotz der Steigerung der Leistungsfähigkeit gleichzeitig ein Preisverfall zu beobachten. Die beschriebenen Fortschritte bei den elektronischen Komponenten erlauben zudem, in Produkten immer umfangreichere Softwareprogramme einzusetzen. Hierdurch werden gänzlich neue Funktionen oder die zielgerichtete Substitution von mechanischen, elektrischen oder elektronischen Komponenten möglich [Sch00].

Innovationspotenziale durch funktionale und räumliche Integration

Die funktionale und räumliche Integration der unterschiedlichen Komponenten führt zu folgenden Vorteilen [Art94; ENS00; GL00]:

- Preis-Leistungsverhältnisse verbessern
- Leistung erhöhen (z.B. Energieeffizienz, Geschwindigkeit, Beschleunigung)
- Funktionalitäten vergrößern (z.B. Bedienungskomfort) oder erst ermöglichen (z.B. Selbsttest und -diagnose)
- Verhaltensverbesserungen erreichen (z.B. Erhöhung der Präzision, Kompensation von Störeinflüssen)

Commercial dimension: The area of electronics is commercially characterized by a continued sharp fall in the price of microelectronic components. Cost reductions achieved are used directly for lowering prices on the market and technical innovations are also introduced directly on the market. Companies which integrate microelectronic circuits into their product can profit directly from this commercial dimension and use the sharp fall in prices for improving the cost/performance ratio of their own product [Sch00].

Technological dimension: The innovation dynamics of electronic and software technology can be illustrated by Moore's law, according to which the capability of microprocessors can be doubled about every 18 months [Moo65]. However, technological progress is not restricted only to the capability of the microelectronic components. Advances in the technology for constructing components lower the requirements that have to be met by the environment in which the electronic components are used. This has the repeated effect of opening up new application areas for electronic circuits which could not previously be used because of construction-related or climatic conditions.

The technological and commercial dimensions are coupled with each other. So, in spite of the increasing capability, a sharp fall in price can be observed at the same time. The described advances in respect of the electronic components also allow ever more extensive software programs to be used in products. As a result, entirely new functions or the targeted substitution of mechanical, electrical or electronic components become possible [Sch00].

Innovation potentials through functional and spatial integration

The functional and spatial integration of the different components leads to the following advantages [Art94; ENS00; GL00]:

- Improved price-performance ratios
- Enhanced performance (for example energy efficiency, speed, acceleration)
- Increased functionalities (for example operating convenience) or even make them possible in the first place (for example self-testing and diagnosis)
- Achieved improvements in behavior (for example increase of precision, compensation for disturbing influences)

Aus verschiedenen Industrien ist eine Vielzahl von Beispielen bekannt, in denen vormals rein mechanische/elektromechanische Produkte durch die funktionale Integration von Elektronik und gegebenenfalls von Software verbessert oder überhaupt erst möglich wurden (Tabelle 1).

Tabelle 1. Produktbeispiele für die Integration von Elektronik in mechanische Produkte

Bereich	Produktbeispiele
Automobiltechnik	Fensterheber, Getriebesteuerung, Key-less-go, Klimaautomatik, Motormanagement, Sitzverstellung, X-by-wire-Produkte
Maschinenbau	Bildverarbeitungssysteme zur automatischen Positionierung, Pick-and-Place-Automaten, Roboter
Konsumelektronik	CD-Abspielgeräte (Laser und Präzisionsmechanik), Digital-Fotoapparat

Die **funktionale Integration** von mechanischen und elektrischen/elektronischen Komponenten erfolgt durch Verbindung mittels Stoff-, Energie- und Informationsflüssen. Die Komponenten können hierbei räumlich getrennt angeordnet sein.

Bei der **räumlichen Integration** bilden die mechanischen und elektrischen/elektronischen Komponenten eine bauliche Einheit im Sinne einer gemeinsamen Gestalt. Dies ist in vielen Fällen mit zusätzlichem technischen Aufwand verbunden, um u.a. die elektronischen Komponenten an das Einsatzumfeld der mechanischen Komponenten anzupassen. Häufig ist das Einsatzumfeld auf Grund von hohen Temperaturen, Temperaturschwankungen, Feuchtigkeit, mechanischen Stößen und Schwingungen, starken elektromagnetischen Feldern etc. nicht ohne weiteres für den Einsatz von elektronischen Komponenten geeignet. Erst durch die Anwendung von Maßnahmen wie Kapselung, Kühlung oder spezielle Aufbau- und Verbindungstechnologien wird die räumliche Integration der elektronischen Komponenten realisierbar.

Durch die Integration von Mechanik und Elektronik in mechatronischen Modulen und Komponenten werden etablierte Schnittstellen im Produkt sowie im Entwicklungs- und Produktionsprozess neu definiert. Insbesondere bei einer stärkeren Einbeziehung von externen Partnern werden auch die Schnittstellen zwischen Unternehmen umgestaltet. Diese Veränderungen sind nur zu rechtfertigen, wenn daraus gleichermaßen technische und wirtschaftliche Potenziale zu erschließen sind.

Many examples in which previously purely mechanical/electromechanical products have been improved or made possible in the first place by the functional integration of electronics and possibly software are known from various industries (Table 1).

Table 1. Product examples for the integration of electronics in mechanical products

Area	Product examples
Automotive engineering	Window lifter, transmission control, key-less go, automatic climatic control, engine management, seat adjustment, x-by-wire products
Mechanical engineering	Image processing systems for automatic positioning, pick-and-place machines, robots
Consumer electronics	CD players (laser and precision mechanics), digital camera

The **functional integration** of mechanical and electrical/electronic components takes place by connecting them by means of material, energy and information flows. The components may in this case be spatially separate from one another.

In the case of **spatial integration**, the mechanical and electrical/electronic components form a structural unit in the sense of a common entity. In many cases, this involves additional technical complexity, in order for instance to adapt the electronic components to the environment in which the mechanical components are used. The operating environment is often not readily suitable for the use of electronic components on account of high temperatures, temperature fluctuations, humidity, mechanical shocks and vibrations, strong electromagnetic fields, etc. It is only by the use of measures such as encapsulation, cooling or special construction and connection technologies that the spatial integration of the electronic components can be realized.

The integration of mechanics and electronics in mechatronic modules and components redefines established interfaces in the product and in the development and production process. In particular in cases where outside agencies are involved to a greater extent, interfaces between companies are also redefined. These changes can only be justified if they allow technical and commercial potentials equally to be exploited.

In Bild 2-4 sind die wichtigsten technischen und wirtschaftlichen Potenziale entsprechend einer Einschätzung von Unternehmen der Automobilzulieferindustrie aufgeführt [Sch00; SFB01]. Als wichtiges technisches Potenzial werden ein kleinerer Bauraum durch den Wegfall von Gehäusen und Verbindungs-elementen (82 %), eine höhere Zuverlässigkeit durch den Wegfall von Steckkontakten und Verbindungs-leitungen (81 %) sowie eine höhere Dynamik (64 %) genannt [ENS00].

Ein Vergleich zeigt, dass die wirtschaftlichen Potenziale im Gegensatz zu den technischen Potenzialen im Durchschnitt höher eingeschätzt werden. Das wichtigste wirtschaftliche Potenzial sehen die Unternehmen übereinstimmend in der Möglichkeit zur Prüfung des Gesamtsystems bereits beim Zulieferer. Damit wird der Einbau eines geprüften Systems beim Original Equipment Manufacturer (OEM) bzw. Kunden (mit 88 % wichtiges Potenzial) möglich. Ein weiteres wichtiges Potenzial ist der geringere Montageaufwand beim OEM durch eine reduzierte Anzahl zu montierender Elemente (82 %). Darauf folgen als Nennungen geringere Logistikkosten durch die reduzierte Anzahl von Komponenten/Modulelementen und die Verlagerung von Produkt- bzw. Montage-Varianten in die Software (80 %) [ENS00].

Diesen Potenzialen stehen Nachteile entgegen. Als wesentliche Nachteile werden die höheren Ersatzteil-kosten im Reparaturfall, die fehlende Erfahrung beim Einsatz neuer Produktions- und Prüftechnologien sowie beim Einsatz von Grenztechnologien in der Aufbau- und Verbindungstechnik gesehen [ENS00].

In Figure 2-4, the most important technical and commercial potentials are presented in a way corresponding to an appraisal of companies of the automotive supply industry [Sch00; SFB01]. Cited as most important in terms of technical potential are a smaller installation space brought about by dispensing with housings and connecting elements (82 %), greater reliability brought about by dispensing with plug-in contacts and connecting lines (81 %) and greater dynamics (64 %) [ENS00].

A comparison shows that, by contrast with technical potentials, on average the commercial potentials are assessed as being higher. Companies agree in regarding the most important commercial potential in the possibility of the overall system already being tested at the supplier's. This makes it possible for a tested system to be installed at the premises of the Original Equipment Manufacturer (OEM) or customer (with 88 % important potential). A further important potential is the lower assembly effort for the OEM brought about by a reduced number of elements to be assembled (82 %). Cited after that are lower costs of logistics brought about by the reduced number of components/module elements and the relocating of product or assembly variants into the software (80 %) [ENS00].

These potentials are counterbalanced by disadvantages. Regarded as the main disadvantages are the higher costs of spare parts in the case of repair, the lack of experience with the use of new production and testing technologies and also the use of pioneering technologies in the construction and connection technology [ENS00].

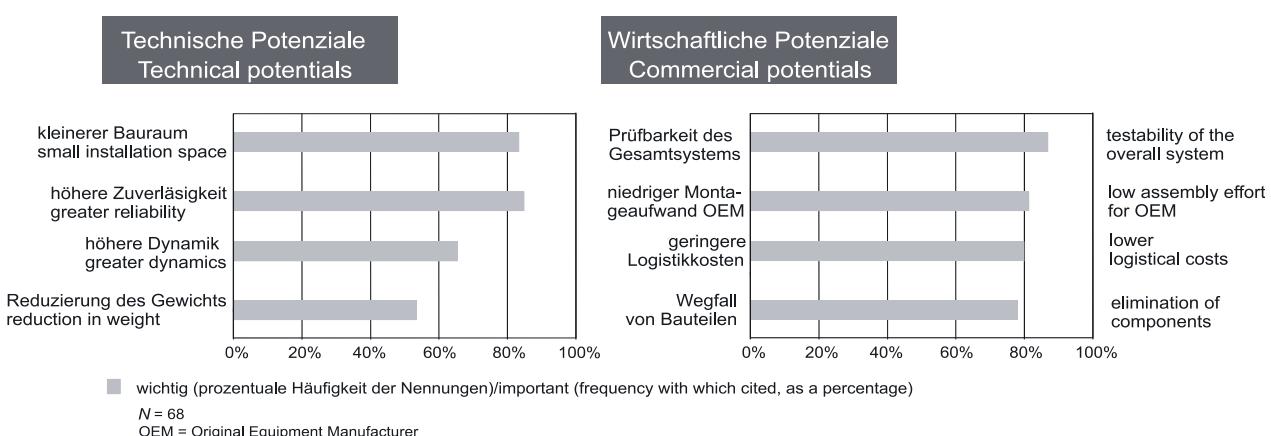


Bild 2-4. Wichtige wirtschaftliche und technische Potenziale [ENS00]

Fig. 2-4. Important commercial and technical potentials [ENS00]

Die wirtschaftlichen Potenziale räumlich integrierter Produkte, wie der geringere Montageaufwand, reduzierte Logistikkosten und die Möglichkeit zur Prüfung des Gesamtsystems beim Zulieferer, liegen im Wesentlichen beim OEM bzw. Kunden. Beim Zulieferer hingegen erhöhen sich Aufwände durch den steigenden Prüfaufwand und den Aufbau neuer Produktions- und Prüfkompetenzen. Es stellt sich daher die Frage, inwieweit die beim OEM bzw. Kunden wirksamen wirtschaftlichen Potenziale bei der Festlegung der Zielkosten berücksichtigt werden. An dieser Problematik wird die Notwendigkeit und Bedeutung einer übergreifenden Bewertungsmethodik für mechatronische Produkte deutlich.

Die funktionale und räumliche Integration führt des Weiteren zu Herausforderungen in der Organisation von Unternehmen und der Qualifikation der Mitarbeiter (vgl. Abschnitt 3.4). Im Bereich der Unternehmensorganisation gilt es drei unterschiedliche Disziplinen zu koordinieren. Eine Hilfestellung im Bereich der Produktentwicklung bietet die vorliegende Richtlinie. Ziel der Mitarbeiterqualifikation ist es, nicht nur Spezialisten in einer der Disziplinen auszubilden, sondern ebenfalls die Wissensaneignung in den anderen Disziplinen zu eröffnen.

2.4 Besonderheiten bei der Entwicklung

Besonderheiten ergeben sich vor allem durch Interdisziplinarität, größere Komplexität und die Notwendigkeit von „Virtual Prototyping“ beim Entwickeln mechatronischer Systeme.

Kommunikation und Kooperation der Fachleute mehrerer Wissensdomänen

An der Entwicklung mechatronischer Systeme sind mehrere Wissensdomänen, hauptsächlich Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik beteiligt. Diese Domänen verfügen über eigene Begriffswelten, Erfahrungen und über Jahrzehnte gewachsene Methoden und Beschreibungsmittel. In der Vergangenheit wurde die Produktentwicklung häufig von einer Wissensdomäne dominiert. Die mechanische Grundstruktur stellte die Basis dar, Elektrotechnik und Informationsverarbeitung wurden später ergänzt. Dieses **sequentielle Vorgehen** bei der Entwicklung führte zu teiloptimierten Produkten, die langwierige Iterationen mit kosten- und zeitintensiven Entwicklungsprozessen nach sich zogen.

Die Herausforderungen und zugleich die Chancen mechatronischer Systeme bestehen darin, das Potenzial domänenübergreifender Zusammenarbeit zu nutzen und im Sinne eines **Concurrent Engineering** zu einem Gesamtoptimum zu führen [Bru96]. Hierzu müssen Produktkonzeptionen durch die beteiligten Fachleute integrativ erarbeitet werden; Systemkomponenten können dann – bei gegebener Kompa-

The commercial potentials of spatially integrated products, such as the lower assembly effort, reduced costs for logistics and the possibility of the overall system being tested at the supplier's, lie essentially with the OEM or customer. For the supplier, on the other hand, expenditures increase because of the increasing expenditure on testing and the setting up of new production and testing competences. The question therefore arises, to what extent the commercial potentials that are effective for the OEM or customer are taken into account when fixing the target costs. This problem clearly illustrates the necessity and significance of an all-embracing assessment methodology for mechatronic products.

The functional and spatial integration further leads to challenges in the organization of companies and the qualification of employees (cf. Section 3.4). In the area of company organization, there are three different disciplines to be coordinated. The present guideline offers assistance in the area of product development. The aim of employee qualification is not only to train specialists in one of the disciplines, but likewise to make it possible for them to acquire knowledge in the other disciplines.

2.4 Special aspects of the development

Special aspects arise in particular through interdisciplinarity, greater complexity and the necessity for virtual prototyping in the development of mechatronic systems.

Communication and cooperation between the experts of a number of knowledge domains

A number of knowledge domains, principally mechanical engineering, electrical engineering and information technology, are involved in the development of mechatronic systems. These domains have their own conceptual ranges, experiences and methods and means of description that have evolved over decades. In the past, product development was often dominated by one knowledge domain. The fundamental mechanical structure represented the basis; electrical engineering and information processing were added later. This **sequential procedure** in the development led to partly optimized products, with the consequence of laborious iterations with cost- and time-intensive development processes.

The challenges and at the same time the opportunities presented by mechatronic systems are that of using the potential of cross-domain cooperation leading to an overall optimum in the sense of **concurrent engineering** [Bru96]. For this purpose, product conceptions must be integratively worked out by the experts involved; system components can then be realized – if compatible – by solution approaches of different

tibilität – durch Lösungsansätze unterschiedlicher Domänen realisiert werden bzw. werden durch die domänenübergreifende Zusammenarbeit erst möglich. Dies erfordert organisatorische Maßnahmen, um die so genannte „Throw-it-over-the-wall“-Mentalität [Ehr95] zu überwinden (siehe Abschnitt 3.4). Ferner werden domänenübergreifende Vorgehensweisen und Beschreibungsmittel benötigt, um die Kommunikation und Kooperation zwischen den beteiligten Fachdisziplinen sicherzustellen; die domäneneigenen Methoden sind meist für spezielle Aufgabenstellungen entwickelt worden und nicht ohne weiteres erweiterungsfähig bzw. mit anderen Methoden koppelbar. Die Zusammenarbeit von Experten unterschiedlicher Fachdisziplinen stellt auch besondere Anforderungen an deren Qualifikation: Basierend auf der fundierten Grundlage einer Wissensdisziplin (z.B. Maschinenbau, Elektrotechnik oder Informatiktechnik) werden u.a. die Fähigkeit und die Bereitschaft benötigt, Wissen und Verständnis für die Möglichkeiten der anderen Fachgebiete zu entwickeln, mit anderen Spezialisten im Team Lösungen zu entwerfen, zu bewerten und zu einer gemeinsamen Entscheidung zu kommen.

Die Heterogenität mechatronischer Systeme bringt außerdem mit sich, dass Entwicklungsteams über verschiedene Abteilungen, Unternehmensteile oder Unternehmen verteilt sein können. Die Anforderungen des **verteilten Entwickelns** (frühzeitiger Ergebnisaustausch und -abgleich, orts- und zeitunabhängiger Zugriff auf einen aktuellen und konsistenten Datenbestand bzw. Wissenstand, heterogener Modell austausch etc.) betreffen damit die Mechatronik in besonderer Weise.

Beherrschung größerer Komplexität

Durch die Heterogenität und durch mehrere zu berücksichtigende physikalische Prinzipien, Werkstoffe und Technologien existiert ein großer Machbarkeitsraum. Der frühzeitigen Fokussierung auf einen der Aufgabenstellung angepassten, vollständig bearbeitbaren Lösungsraum kommt deshalb besondere Bedeutung zu. Folgende Maßnahmen können hierzu beitragen:

- Präzisierung der Aufgabenstellung
- eine differenzierte Berücksichtigung der Anforderungen in allen Phasen des Entwicklungsprozesses
- die Verwendung von Funktions-Struktur-Speichern⁵⁾, um das Auffinden erster Funktionsstrukturen zu erleichtern

⁵⁾ Sammlungen bewährter Funktionsstrukturen, mit deren Hilfe komplexe Aufgaben in überschaubare Teilaufgaben zerlegt und lösungsneutral beschrieben werden können. Sie unterstützen die systematische Variantenbildung und frühzeitige Überlegungen zur Funktionsintegration und -trennung [KBS97; Rot00].

domains, or become possible in the first place by the cross-domain cooperation. This requires organizational measures to overcome the so-called "throw-it-over-the-wall" mentality [Ehr95] (see Section 3.4). Furthermore, cross-domain procedures and means of description are required to ensure the communication and cooperation between the technical disciplines involved; the domains' own methods have usually been developed for specific defined tasks and cannot readily be expanded or coupled with other methods. The cooperation between experts of different technical disciplines also imposes requirements on their qualification: taking the established basis of a knowledge discipline (for example mechanical engineering, electrical engineering or information technology) as a basis, ability and willingness are among the requirements needed for developing knowledge and understanding for the possibilities of the other technical fields, for designing and assessing solutions with other specialists in the team and for coming to a joint decision.

The heterogeneity of mechatronic systems is also accompanied by the possibility that development teams may be distributed among different departments, parts of a company or companies. The requirements of **distributed development** (early exchange and adjustment of results, location- and time-independent access to an up-to-date and consistent database or state of knowledge, heterogeneous model exchange, etc.) consequently concern mechatronics to a particular extent.

Dealing with major complexity

The heterogeneity and the fact that a number of physical principles, materials and technologies have to be considered mean that a great feasibility space exists. The early focusing on a solution space that has been adapted to the defined object and can be worked completely therefore takes on special significance. The following measures can contribute to this:

- more precisely defined object
- a differentiated consideration of the requirements on all phases of the development process
- the use of function-structure memories⁵⁾, to facilitate the finding of first function structures

⁵⁾ Collections of tried-and-tested function structures with the aid of which complex tasks can be broken down into easily comprehensible subtasks and described neutrally in terms of a solution. They support the systematic forming of variants and early considerations regarding function integration and separation [KBS97; Rot00].

Ziel ist es, die Partitionierung⁶⁾, die Auswahl der Komponenten und ihre Integration so durchzuführen, dass ein Gesamtoptimum entsteht und die Anzahl der notwendigen Entwürfe auf ein Minimum beschränkt wird [KBS97].

Die Komplexität mechatronischer Produkte führt zu einer erweiterten Systembetrachtung: Die Spezifikation von Funktionen kann nicht wie bei der klassischen Systemtechnik isoliert erfolgen. Bereits bei der Funktionsbeschreibung müssen physikalische, geometrische und technologische Aspekte beachtet werden. Zur Beherrschung der Komplexität kommen hierbei Methoden wie Modularisierung, Hierarchisierung, Partitionierung und Integration zum Einsatz [WK97; KBG96].

Die wachsende Integration von Funktionen, Wirkprinzipien/Lösungselementen und Technologien führt zu Wechselwirkungen, die so früh wie möglich berücksichtigt werden müssen. Das Vorgehen, getrennt entwickelte und optimierte Baugruppen zu einem Gesamtsystem zusammenzufügen (**bottom-up-design**), ist nicht mehr ausreichend. Es sind iterative Vorgehensschritte nötig, um zunächst Kenntnisse der Grobstruktur zu erlangen und dann durch schrittweise Verfeinerung die Strukturelemente genauer zu spezifizieren (**top-down-design**). Detailliertere Kenntnisse der Systemeigenschaften bewirken eventuell Änderungen an übergeordneten Elementen, so dass ein Wechsel zum bottom-up-design stattfindet. Die fortgeschrittenen Entwurfsstadien sind meist durch einen Wechsel zwischen beiden Entwicklungsstrategien geprägt (Jo-Jo-Effekt) [WT98; Koc00].

Virtual Prototyping

Der Einsatz von Versuchsmodellen und Prototypen stellt einen wichtigen Bestandteil des Entwicklungsprozesses dar, um Produkterprobungen für die spätere Serienfertigung durchführen zu können. Da der Prototypenbau und -test zeit- und kostenaufwändig ist, bestehen Bestrebungen, die Anzahl der physischen Prototypen so gering wie möglich zu halten. Virtuelle Prototypen, das heißt die Analyse der Rechnermodelle von in der Entwicklung befindlichen Objekten, können dies wirkungsvoll unterstützen. Als Erweiterung des **digital mock-up**, der die 3D-Gestaltmodelle und die Produktstruktur umfasst, werden beim virtuellen Prototyp zusätzlich Aspekte wie Kinematik, Dynamik, Festigkeit etc. berücksichtigt. Das Beispiel der Boeing 777, die als erstes Flugzeug vollständig mit 3D-

The aim is to carry out the partitioning⁶⁾, the selection of the components and the integration in such a way that an overall optimum is produced and the number of necessary designs is restricted to a minimum [KBS97].

The complexity of mechatronic products leads to a widened consideration of the system: the specification of functions cannot take place in isolation, as it can in the case of classic system technology. Even in the functional description, physical, geometrical and technological aspects must be taken into account. To deal with the complexity, methods such as modularization, hierarchization, partitioning and integration are used [WK97; KBG96].

The growing integration of functions, operating principles/solution elements and technologies leads to interactions which must be considered as early as possible. The procedure of putting together separately developed and optimized subassemblies to form an overall system (**bottom-up design**) is no longer adequate. Iterative procedural steps are necessary in order firstly to gain knowledge of the basic structure and then to specify the elements of the structure more exactly by step-by-step refinement (**top-down design**). More detailed knowledge of the system properties possibly brings about changes to higher-level elements, so that a change to bottom-up design takes place. The advanced design stages are mostly characterized by an alternation between the two development strategies (yo-yo effect) [WT98; Koc00].

Virtual prototyping

The use of test models and prototypes represents an important component of the development process, to allow product trials to be carried out for later mass production. Since the building and testing of prototypes is time- and cost-intensive, there are efforts to minimize as far as possible the number of physical prototypes. Virtual prototypes, i.e. the analysis of the computer models of objects that are in development, can effectively support this. As an extension of the **digital mock-up**, which comprises the 3D design models and the product structure, aspects such as kinematics, dynamics, strength, etc. are additionally considered in the case of the virtual prototype. The example of the Boeing 777, which was the first aircraft to be developed completely by 3D-CAD systems, including virtual as-

⁶⁾ Aufteilen eines Systems auf mehrere Einheiten/Module, z.B. Funktionserfüllung durch Komponenten verschiedener Hersteller oder Fachdisziplinen; Aufteilen eines Systems in einen Teil, der in Hardware und einen Teil, der in Software implementiert wird (Hardware-Software-Partitionierung)

⁶⁾ Dividing a system into a number of units/modules, for example functions being performed by components of different manufacturers or technical disciplines; dividing a system into a part which is implemented in hardware and a part which is implemented in software (hardware-software partitioning)

CAD-Systemen einschließlich dem virtuellen Zusammenbau entwickelt wurde, zeigt die Leistungsfähigkeit der virtuellen Betrachtung [GEK01].

Virtual Prototyping ist insbesondere für die Entwicklung mechatronischer Produkte vorteilhaft: Wechselwirkungen und steigende Komplexität durch Kopplung vormals unabhängiger Teilsysteme (z.B. Kopplung von Motormanagement und Bremsystem beim elektronischen Stabilitätsprogramm ESP) erfordern eine Modellierung und Simulation⁷⁾ des Systemverhaltens bereits in der frühen Entwurfsphase, um die Vielzahl der möglichen Ausführungsformen zeit- und kostengünstig untersuchen zu können. Aber auch energetische Entkopplungen wie z.B. bei Fremdkraftbremsanlagen oder der elektrischen Parkbremse stellen neue Anforderungen an die Systemsicherheit (Antizipieren der Versagensarten einzelner Bauteile und die Auswirkungen auf das Gesamtsystem), die eine Simulation sicherheitskritischer Situationen im Vorfeld nahelegen. Solche Testsituationen bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen und Systemparametern sind durch Simulation schnell verfügbar und reproduzierbar; alternative Regelungs- und Sicherheitskonzepte können unter identischen Bedingungen ohne aufwändiges Umrüsten von Prototypen verglichen werden [ZEB97].

Bei der Simulation mechatronischer Systeme muss neben dem Verhalten der Teilsysteme auch der Einfluss der Teilsysteme untereinander beachtet werden. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die Systemelemente oft nicht einer Wissensdisziplin zuordnen lassen; sie enthalten Funktionen mindestens zweier Disziplinen und bilden Schnittstellen zwischen den beteiligten Teilsystemen, z.B. Hydraulikzylinder oder elektrische Gleichstrommotoren. Auf Grund dieser Heterogenität sind vielfältige IT-Werkzeuge⁸⁾ im Einsatz, um die Simulation eines mechatronischen Gesamtsystems durchzuführen: beispielsweise Werkzeuge, die möglichst viele Wissensdomänen abdecken, Import von Modellen anderer Werkzeuge in ein Simulationsprogramm oder getrennte Simulation der Teilsysteme mit verschiedenen Werkzeugen und anschließendem Ergebnisaustausch [Dür99]. Die Herausforderung besteht darin, die relevanten IT-Werkzeuge zu einer Entwicklungsumgebung zusammenzuführen und das Zusammenspiel der Werkzeuge modell-, system-, prozess- und verfahrenstechnisch zu unterstützen (vgl. Abschnitt 3.3).

⁷⁾ Simulation: „Das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“ (VDI 3633)

⁸⁾ IT-Werkzeuge: Rechneranwendungen, die den Entwickler beim Bearbeiten der Entwicklungsaufgaben unterstützen, z.B. Modellierer/Berechnungsprogramme, Produktdatenmanagement-Systeme (vgl. Abschnitt 3.3)

sembly, shows the capability of virtual consideration [GEK01].

Virtual prototyping is advantageous in particular for the development of mechatronic products: interactions and increasing complexity brought about by coupling of previously independent subsystems (for example coupling of engine management and brake system in the electronic stability program ESP) require modeling and simulation⁷⁾ of the system behavior already in the early design phase, in order to be able to investigate the large number of possible configurations with low expenditure in terms of time and cost. Energy-related decoupling, such as for example in the case of power-assisted brake systems or the electrical parking brake, also impose new requirements on system safety (anticipation of types of failure of individual components and the effects on the overall system), which suggest a simulation of safety-critical situations in advance. Such test situations under different ambient conditions and system parameters can be quickly made available and reproduced by simulation; alternative control and safety concepts can be compared under identical conditions without elaborate modification of prototypes [ZEB97].

In the simulation of mechatronic systems, not only the behavior of the subsystems but also the influence of the subsystems on one another must be taken into account. An added difficulty is that the system elements often cannot be assigned to a knowledge discipline; they contain functions of at least two disciplines and form interfaces between the subsystems involved, for example hydraulic cylinders or electric DC motors. On account of this heterogeneity, a variety of IT tools⁸⁾ are in use to carry out the simulation of an overall mechatronic system: for example, tools which cover as many knowledge domains as possible, the importing of models of other tools into a simulation program or separate simulation of the subsystems with different tools and subsequent exchange of results [Dür99]. The challenge is to put the relevant IT tools together to form a development environment and support the interaction of the tools by model, system, process and method technology (cf. Section 3.3).

⁷⁾ Simulation: "The application of a system with its dynamic processes in an experimental model, in order to gain knowledge that can be transferred to reality." (VDI 3633)

⁸⁾ IT tools: computer applications which support the developer when working on the development tasks, for example modeling/calculating programs, product data management systems (cf. Section 3.3)

3 Entwicklungsmethodik Mechatronik

3.1 Vorgehen

Sowohl die Erfahrungen der industriellen Praxis als auch die Ergebnisse der empirischen Konstruktionsforschung der letzten Jahre haben deutlich gemacht, dass es keine „kanonisierbare Optimalform des Konstruktionsprozesses gibt, der der Konstrukteur in einem festen Ablaufplan folgen kann“ [Dör94]. Um dieser Erkenntnis auch bei der Entwicklung mechatronischer Systeme Rechnung zu tragen, wird im Rahmen dieser Richtlinie ein flexibleres Vorgehensmodell vorgeschlagen, das sich im Wesentlichen auf drei Elemente stützt:

- allgemeiner Problemlösungszyklus auf der Mikroebene
- V-Modell auf der Makroebene
- vordefinierte Prozessbausteine zur Bearbeitung wiederkehrender Arbeitsschritte bei der Entwicklung mechatronischer Systeme

Problemlösungszyklus als Mikrozyklus: Die Strukturierung des Vorgehens im Entwicklungsprozess erfolgt dabei auf der Grundlage eines allgemeinen Problemlösungszyklus, wie er z.B. aus dem „Systems Engineering“ [DH94] bekannt ist. Durch Aneinanderreihen und Verschachteln von Vorgehenszyklen lässt sich die Prozessplanung flexibel an die Eigenheiten jeder Entwicklungsaufgabe anpassen. Der vorgestellte Mikrozyklus soll vor allem den im Prozess stehenden Produktentwickler bei der Bearbeitung vorhersehbarer und damit planbarer Teilaufgaben, aber auch bei der Lösung plötzlich auftretender, unvorhersehbarer Probleme unterstützen.

Das V-Modell als Makrozyklus: Eine Richtschnur für das grundsätzliche Vorgehen bietet das aus der Softwareentwicklung übernommene und an die Anforderungen der Mechatronik angepasste V-Modell, das die logische Abfolge wesentlicher Teilschritte bei der Entwicklung mechatronischer Systeme beschreibt [Brö95; FKM00]. Bei der Anwendung dieses Modells in der Praxis ist zu beachten, dass die zeitliche Abfolge der Teilschritte von der logischen Reihenfolge abweichen kann: So kann es z.B. sinnvoll sein, kritische Teilsysteme zur Minimierung des Entwicklungsrisikos fast bis zur Serienreife zu bringen, bevor mit der Entwicklung des davon abhängigen komplexen Gesamtsystems begonnen wird.

Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte: Die Bearbeitung einzelner Teilschritte der auf der Grundlage des V-Modells erarbeiteten Prozessplanung orientiert sich am bereits erwähnten Problemlösungszyklus. Für einige bei der Entwicklung mechatronischer Systeme immer wieder auftretende

3 Development methodology of mechatronics

3.1 Procedure

Both the experiences of industrial practice and the results of empirical design research from recent years have made it clear that there is no “canonizable optimal form of the design process which the designer can follow in a fixed schedule“ [Dör94]. In order to allow for this realization also in the development of mechatronic systems, within this guideline there is proposed a more flexible procedural model, which is supported essentially on three elements:

- general problem-solving cycle on the micro-level
- V model on the macro-level
- predefined process modules for handling recurrent working steps in the development of mechatronic systems

Problem-solving cycle as a micro-cycle: The structuring of the procedure in the development process takes place in this case on the basis of a general problem-solving cycle, such as that known for example from systems engineering [DH94]. By arranging procedural cycles in series and one within the other, process planning can be flexibly adapted to the peculiarities of any development task. The presented micro-cycle is intended in particular to support the product developer engaged in the process to work on predictable, and consequently plannable, subtasks, but also to solve suddenly occurring, unforeseeable problems.

The V model as a macro-cycle: A guide for the basic procedure is offered by the V model adopted from software development and adapted to the requirements of mechatronics; it describes the logical sequence of important substeps in the development of mechatronic systems [Brö95; FKM00]. When using this model in practice, it must be taken into account that the time sequence of the substeps may deviate from the logical sequence: for example, to minimize the development risk, it may be advisable to bring critical subsystems almost up to readiness for mass production before commencing development of the complex overall system dependent on it.

Process modules for recurrent working steps: The handling of individual substeps of the process planning worked out on the basis of the V model is governed by the already mentioned problem-solving cycle. However, for some mechatronic systems that are in development for recurring defined tasks, handling

Aufgabenstellungen kann die Bearbeitung jedoch konkreter in Form von teilweise vordefinierten Prozessbausteinen beschrieben werden. In dieser Richtlinie werden Prozessbausteine für Systementwurf, Modellbildung und -analyse, domänenspezifischer Entwurf, Systemintegration und Eigenschaftssicherung beschrieben.

Die funktionale und räumliche Integration von mechanischen und elektrischen/elektronischen Komponenten in mechatronischen Produkten erfordert die möglichst frühzeitige Betrachtung der in Frage kommenden Fertigungstechnologien und die entsprechende Planung des Herstellprozesses. Produkt- und Produktionsentwicklung sind daher im engen Wechselspiel vorzunehmen. Darauf wird in Abschnitt 3.1.4 eingegangen.

3.1.1 Problemlösungszyklus als Mikrozyklus

Der hier vorgestellte Mikrozyklus der Handlungsorganisation (vgl. Bild 3-1) stammt aus dem Systems Engineering und hat in Abwandlungen auch Eingang in andere Disziplinen wie z.B. Betriebswirtschaft oder Software Engineering gefunden.

Seine prinzipielle Gültigkeit zur Planung und Durchführung effektiven Problemlösungsverhaltens wurde dabei auch von psychologischer Seite immer wieder bestätigt [KOV86; Dör89]. Er umfasst folgende Schritte:

Situationsanalyse bzw. Zielübernahme: Am Beginn eines elementaren Handlungszyklus steht entweder die Situationsanalyse oder die Zielübernahme. Die handelnde Gruppe bzw. das Individuum können ein extern vorgegebenes Ziel übernehmen, woran sich eine Situationsanalyse anschließt (Soll-Zustand-orientiertes Vorgehen) oder nach der Analyse einer zunächst unklaren Situation selbstständig das Ziel formulieren (Ist-Zustand-orientiertes Vorgehen).

Analyse und Synthese: Vor dem Hintergrund von Situationsanalyse und Zielformulierung findet die Suche nach Lösungen für das gegebene Problem statt. Dieser Prozess stellt sich in der Praxis als ein permanentes Wechselspiel von Synthese- und Analyseschritten dar, die die Produktentwickler zum Teil bewusst, zum Teil aber auch unbewusst durchführen. Ziel dieses Teilschritts ist es, alternative Lösungsvarianten zu erarbeiten. Bei der Lösungssuche können selbstverständlich zusätzliche Aspekte des Problems erkannt werden, die einen Rücksprung zu Situationsanalyse und Zielformulierung notwendig machen oder als ergänzende Kriterien in den nachfolgenden Bewertungsschritt mit einfließen müssen.

can be described in more concrete terms in the form of partly predefined process modules. In this guideline, process modules for system design, modeling and model analysis, domain-specific design, system integration and assurance of properties are described.

The functional and spatial integration of mechanical and electrical/electronic components in mechatronic products requires the earliest possible consideration of the production technologies coming into consideration and the corresponding planning of the manufacturing process. Product and production development are therefore to be performed in close cooperation. This is dealt with a Section 3.1.4.

3.1.1 Problem-solving cycle as a micro-cycle

The micro-cycle of the handling organization presented here (cf. Figure 3-1) originates from systems engineering and has also been adopted in modified forms in other disciplines, such as for example business management or software engineering.

Its validity in principle for the planning and implementation of effective problem-solving behavior has in this way been confirmed over and again, including from a psychological aspect [KOV86; Dör89]. It comprises the following steps:

Situation analysis or adoption of a goal: at the beginning of an elementary handling cycle there is either the situation analysis or the adoption of a goal. The acting group or individual can adopt an externally prescribed goal, which is followed by a situation analysis (procedure governed by the desired state), or, following the analysis of an initially unclear situation, itself formulate the goal (procedure governed by the actual situation).

Analysis and synthesis: The search for solutions to the given problem takes place against the background of situation analysis and objective. This process takes the form in practice of a permanent alternation between synthesis steps and analysis steps which the product developers carry out partly consciously, partly also subconsciously. The aim of this substep is to work out alternative solution variants. In the search for a solution, it is of course possible to identify additional aspects of the problem which necessitate a return to situation analysis and objective or have to be included in the subsequent assessment step as supplementary criteria.

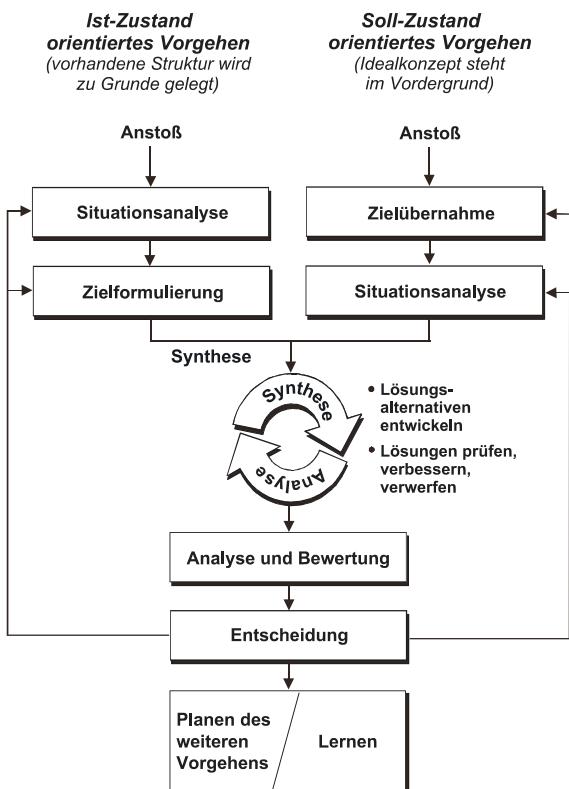


Bild 3-1. Problemlösungszyklus als Mikrozyklus, nach [DH94]

Analyse und Bewertung: Die im Verlauf der Lösungssuche konkretisierten Lösungsvarianten werden im Anschluss einer detaillierten Evaluation unterzogen. Hierzu werden die Eigenschaften der einzelnen Teil- bzw. Gesamtlösungsvarianten anhand der an sie gestellten Anforderungen analysiert. Dies kann z.B. durch Berechnung, Simulation, Versuch etc. erfolgen. Unterscheiden sich dabei einzelne Lösungsansätze in ihrem Konkretisierungsgrad zu stark, um vergleichend bewertet werden zu können, sollte auch hier ein Rückschritt zur Lösungssuche erfolgen. Die Bewertung der Lösungsvarianten erfolgt dabei auf Grundlage der im Rahmen von Zielformulierung und Lösungssuche definierten Bewertungskriterien. Als Ergebnis der Bewertung sollte ein Vorschlag oder eine Empfehlung für eine oder mehrere Lösungsalternativen das Fällen einer Entscheidung vorbereiten.

Entscheidung: Mit der Entscheidung muss festgestellt werden, ob der bisherige Verlauf der Problemlösung zu einem befriedigenden Ergebnis geführt hat. Ist das nicht der Fall, muss zur Situationsanalyse und Zielformulierung zurückgekehrt werden. Andernfalls erfolgt eine Entscheidung für eine, vielleicht auch mehrere Lösungsalternativen, die zur Grundlage der weiteren Planung gemacht werden sollen.

Planen des weiteren Vorgehens bzw. Lernen: Die Planung des weiteren Vorgehens wird in vielen Fällen

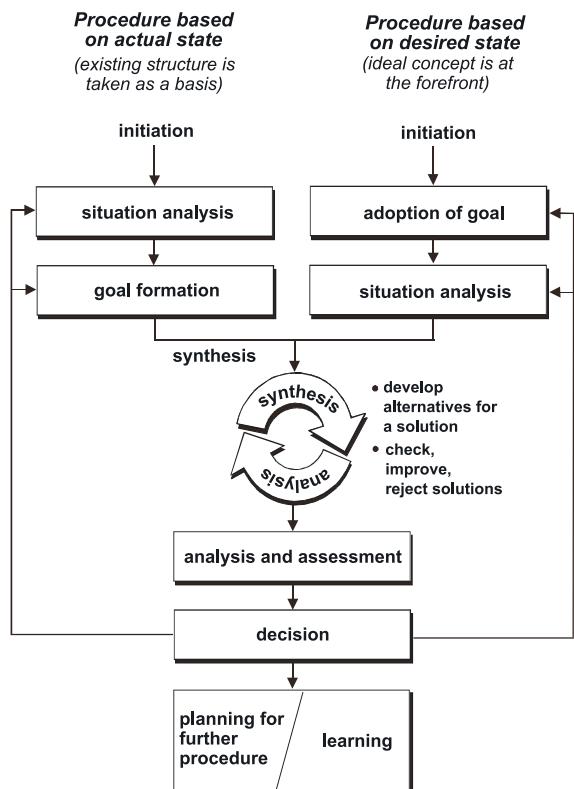


Fig. 3-1. Problem-solving cycle as a micro-cycle, according to [DH94]

Analysis and assessment: The solution variants concretized in the course of the search for a solution are subsequently subjected to a detailed evaluation. For this purpose, the properties of the individual variants of a part solution or overall solution are analyzed on the basis of the requirements imposed on them. This can take place for example by calculation, simulation, experimentation, etc. If individual approaches to a solution differ too much in their degree of concretization to allow comparative assessment, a return should also be made here to the search for a solution. The assessment of the solution variants in this case takes place on the basis of the assessment criteria defined during the formulation of a goal and search for a solution. As a result of the assessment, a proposal or recommendation for one or more alternatives for a solution should prepare the way for a decision to be taken.

Decision: With the decision, it must be established whether the previous procedure for problem-solving has led to a satisfactory result. If this is not the case, a return must be made to the situation analysis and formulation of a goal. Otherwise, a decision is made on an alternative for a solution, perhaps even more than one alternative, which is or are to be made the basis of further planning.

Planning the further procedure or learning: The planning of the further procedure will in many cases

mehr oder weniger fließend in weitere Problemlösungszyklen einmünden und auf diese Weise zu einem effizienten, situationsangepassten Prozessverlauf führen. Neben der rein operativen Bewertung des Handlungsergebnisses sollte am Ende jedes Mikrozyklus jedoch auch kurz innegehalten werden, um sowohl das Ergebnis als auch den Prozessablauf einer allgemeinen kritischen Betrachtung zu unterziehen. Indem nachvollzogen wird, was am jeweiligen Prozessablauf und dem Ergebnis gut und was weniger gut war bzw. ist, lässt sich verfügbares Wissen für kommende Entwicklungsaufgaben generieren. Auf diese Weise können zukünftige Prozessabläufe systematisch verbessert werden.

3.1.2 V-Modell als Makrozyklus

Das V-Modell beschreibt das generische Vorgehen beim Entwurf⁹⁾ mechatronischer Systeme, das fallweise auszuprägen ist (Bild 3-2).

Anforderungen: Ausgangspunkt bildet ein konkreter Entwicklungsauftrag. Die Aufgabenstellung wurde präzisiert und in Form von Anforderungen beschrieben. Diese Anforderungen bilden zugleich den Maßstab, anhand dessen das spätere Produkt zu bewerten ist.

Systementwurf: Ziel ist die Festlegung eines domänenübergreifenden Lösungskonzepts, das die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen

run more or less smoothly into further problem-solving cycles and in this way lead to an efficient process procedure that is adapted to the situation. Apart from the purely operative assessment of the handling result, there should however also be a brief pause at the end of each micro-cycle, in order to subject both the result and the process sequence to a general critical appraisal. By examining what was or is good about the respective process sequence and the result and what was or is less good, available knowledge can be generated for forthcoming development tasks. In this way, future process sequences can be systematically improved.

3.1.2 V model as a macro-cycle

The V model describes the generic procedure for designing⁹⁾ mechatronic systems, which is to be given a more distinct form from case to case (Figure 3-2).

Requirements: The starting point is formed by an actual development order. The defined object was specified more precisely and described in the form of requirements. These requirements at the same time form the measure against which the later product is to be assessed.

System design: The aim is to establish a cross-domain solution concept which describes the main physical and logical operating characteristics of the future prod-

⁹⁾ Unter Entwurf wird „die Erahnung eines Ganzen, eines Lösungskonzepts, das Erkennen bzw. Finden der dazu erforderlichen Lösungselemente und das gedankliche, modellhafte Zusammenfügen und Verbinden dieser Elemente zu einem tauglichen Ganzen“ verstanden [DH94, S. 158]. Diese Vorstellung umfasst auch das so genannte Konzipieren und weicht damit von der im Maschinenbau eingeführten Terminologie ab. Das Entwerfen ist demnach ein Vorgang, der ausgehend von den Anforderungen zu einer Konkretisierung eines technischen Systems führt. Diese Konkretisierung drückt sich in Komponenten der Mechatronik sowie dem Zusammenwirken dieser Komponenten aus.

⁹⁾ A design is understood as meaning "the conceiving of a whole, a solution concept, the identifying or finding of the solution elements required for this and the intellectual, model-based joining together and connecting of these elements to form a workable whole" [DH94, p. 158]. This idea also includes the so-called conceptual design and consequently deviates from the terminology introduced in mechanical engineering. Designing is accordingly a process which, starting from the requirements, leads to a concretization of a technical system. This concretization is expressed in components of mechatronics and the interaction of these components.

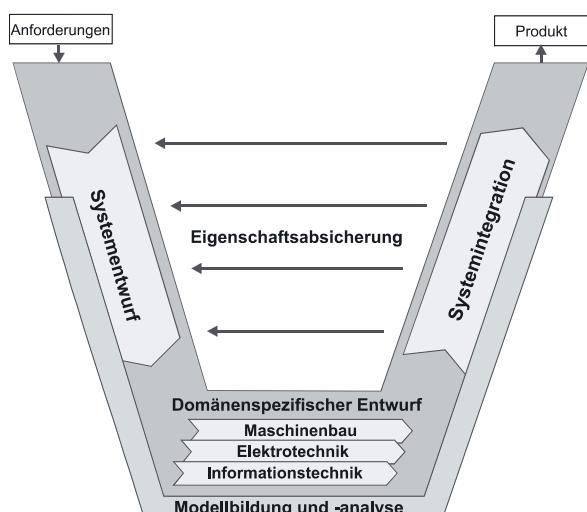


Bild 3-2. V-Modell als Makrozyklus

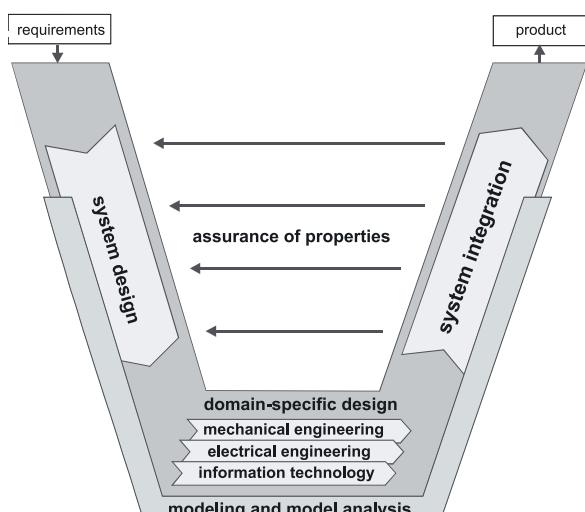


Fig. 3-2. V model as a macro-cycle

des zukünftigen Produktes beschreibt. Hierzu wird die Gesamtfunktion eines Systems in wesentliche Teilfunktionen zerlegt. Diesen Teifunktionen werden geeignete Wirkprinzipien bzw. Lösungselemente zugeordnet und die Funktionserfüllung wird im Systemzusammenhang geprüft.

Domänenpezifischer Entwurf: Auf der Basis dieses gemeinsam entwickelten Lösungskonzepts erfolgt die weitere Konkretisierung meist getrennt in den beteiligten Domänen. Detailliertere Auslegungen und Berechnungen sind nötig, um insbesondere bei kritischen Funktionen die Funktionserfüllung sicherzustellen.

Systemintegration: Die Ergebnisse aus den einzelnen Domänen werden zu einem Gesamtsystem integriert, um das Zusammenwirken untersuchen zu können.

Eigenschaftabsicherung: Der Entwurfsfortschritt muss fortlaufend anhand des spezifizierten Lösungskonzepts und der Anforderungen überprüft werden. Es ist sicherzustellen, dass die tatsächlichen mit den gewünschten Systemeigenschaften übereinstimmen.

Modellbildung und -analyse: Die beschriebenen Phasen werden flankiert durch die Abbildung und Untersuchung der Systemeigenschaften mit Hilfe von Modellen und rechnerunterstützten Werkzeugen zur Simulation.

Produkt: Ergebnis eines durchlaufenen Makrozyklus ist das Produkt. Dabei wird unter Produkt nicht ausschließlich das fertige, real existierende Erzeugnis verstanden, sondern die zunehmende Konkretisierung des zukünftigen Produktes (Produktreife). Reifegrade sind z.B. das Labormuster, das Funktionsmuster, das Vorserialenprodukt etc.

Ein komplexes mechatronisches Erzeugnis entsteht in der Regel nicht innerhalb eines Makrozyklus. Vielmehr sind mehrere Durchläufe erforderlich (Bild 3-3).

In einem ersten Zyklus werden beispielsweise das Produkt funktional spezifiziert, erste **Wirkprinzipien**¹⁰⁾ und/oder **Lösungselemente**¹¹⁾ ausgewählt und grobdimensioniert, im Systemkontext auf Konsistenz geprüft und exemplarisch realisiert. Ergebnis ist in der

¹⁰⁾ „Das Wirkprinzip bezeichnet den Zusammenhang von physikalischem Effekt sowie geometrischen und stofflichen Merkmalen (Wirkgeometrie, Wirkbewegung und Werkstoff). Es lässt das Prinzip der Lösung zur Erfüllung einer Teifunktion erkennen“. [PB97]

¹¹⁾ „Ein Lösungselement ist eine realisierte und bewährte Lösung zur Erfüllung einer Funktion. Dabei handelt es sich im Allgemeinen um ein Modul/eine Baugruppe, das/die auf einem Wirkprinzip beruht. Die rechnerinterne Repräsentation eines Lösungselementes besteht aus unterschiedlichen Aspekten wie Verhalten und Gestalt. Jeder dieser Aspekte weist unterschiedliche Konkretisierungen auf, die den Phasen des Entwicklungsprozesses entsprechen. Der Aspekt Gestalt enthält grobe Festlegungen für die Bestimmung der prinzipiellen Lösung und weitergehende Festlegungen für die Bestimmung der Baustruktur. Der Aspekt Verhalten weist für den Fall von Software beispielsweise für die frühen Entwicklungsphasen abstrakte Datentypen und für die spätere Entwicklungsphase Code auf“. [GEK01]

uct. For this purpose, the overall function of a system is broken down into main subfunctions. These subfunctions are assigned suitable operating principles or solution elements and the performance of the function is tested in the context of the system.

Domain-specific design: On the basis of this jointly developed solution concept, further concretization usually takes place separately in the domains involved. More detailed interpretations and calculations are necessary to ensure the performance of the function, in particular in the case of critical functions.

System integration: The results from the individual domains are integrated to form an overall system, to allow the interaction to be investigated.

Assurance of properties: The progress made with the design must be continually checked on the basis of the specified solution concept and the requirements. It must be ensured that the actual system properties coincide with the desired system properties.

Modeling and model analysis: the phases described are flanked by the forming and investigating of the system properties with the aid of models and computer-aided tools for simulation.

Product: The result of a continuous macro-cycle is the product. In this case, a product is understood as meaning not exclusively the finished, actually existing product but the increasing concretization of the future product (product maturity). Degrees of maturity are, for example, the laboratory specimen, the functional specimen, the pilot-run product, etc.

A complex mechatronic product is generally not produced within one macro-cycle. Rather, a number of cycles are required (Figure 3-3).

In a first cycle, for example, the product is functionally specified, first **operating principles**¹⁰⁾ and/or **solution elements**¹¹⁾ are selected and roughly dimensioned, checked for consistency in the system context and realized in an exemplary form. The result is gener-

¹⁰⁾ “The operating principle refers to the interrelationship between physical effect and geometrical and material-related features (effective geometry, effective movement and material). It allows the principle of the solution for performing a subfunction to be identified“. [PB97]

¹¹⁾ “A solution element is a realized and tried-and-tested solution for performing a function. It is generally a module/subassembly which is based on an operating principle. The computer-internal representation of a solution element comprises different aspects such as behavior and form. Each of these aspects has different concretizations, which correspond to the phases of the development process. The aspect of form comprises rough stipulations for determining the solution in principle and more specific stipulations for determining the building structure. The aspect of behavior has for the case of software, for example, abstract data types for the early development phases and code for the later development phase“. [GEK01]

Regel ein Labormuster. Dies wird in einem zweiten Zyklus weiter konkretisiert (Feindimensionierung der Lösungselemente, Verhaltens- und Gestaltsimulation), um erste Funktionsmuster zu erstellen. Je nach Entwurfsfortschritt, Art und Komplexität der Entwicklungsaufgabe sind gegebenenfalls weitere Makrozyklen erforderlich, um zum serienreifen Produkt zu gelangen. Die Anzahl der Makrozyklen und die zu durchlaufenden Teilschritte im V-Modell hängen von der spezifischen Entwicklungsaufgabe ab.

ally a laboratory specimen. This is further concretized in a second cycle (fine dimensioning of the solution elements, simulation of behavior and form), in order to create a first functional specimen. Depending on the progress made with the design and the type and complexity of the development task, further macro-cycles may be required to arrive at the product that is ready for mass production. The number of macro-cycles and the substeps to be run through in the V model depend on the specific development task.

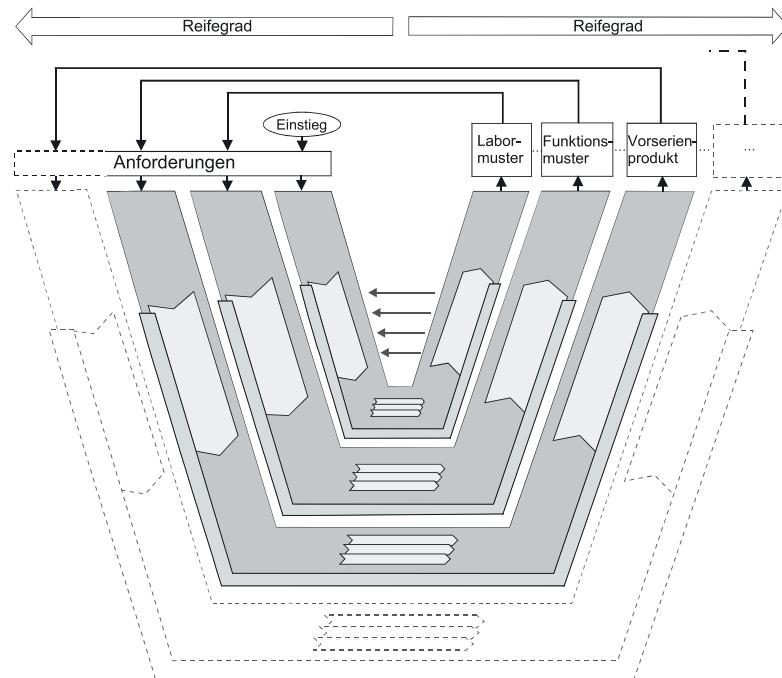


Bild 3-3. Durchlaufen mehrerer Makrozyklen mit zunehmender Produktreife

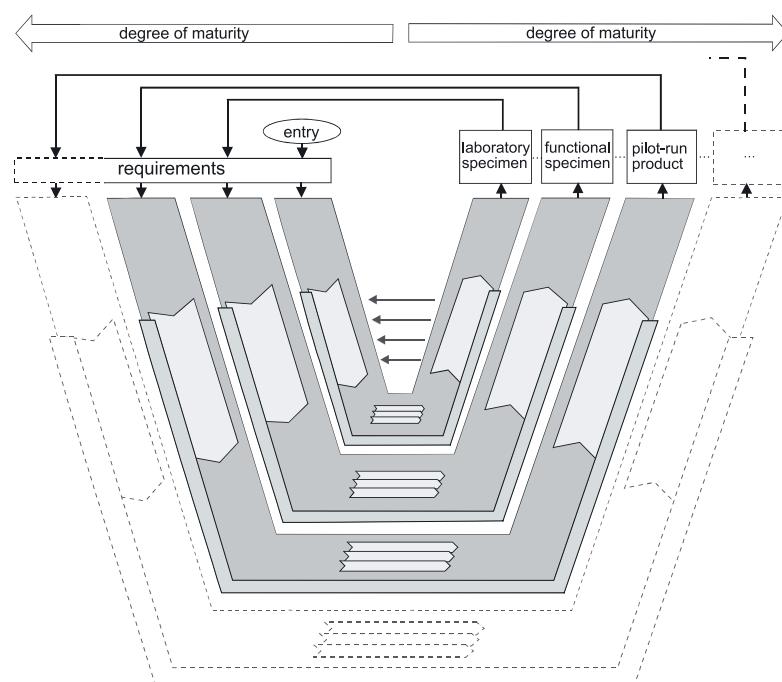


Fig. 3-3. Running through a number of macro-cycles with increasing product maturity

3.1.3 Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte

Einige Teilschritte, die beim Entwurf mechatronischer Systeme immer wieder auftreten, können konkreter in Form von teilweise vordefinierten Prozessbausteinen beschrieben werden. Im Folgenden werden die Prozessbausteine *Systementwurf*, *Modellbildung und -analyse*, *domänenspezifischer Entwurf*, *Systemintegration* und *Eigenschaftsabsicherung* erläutert.

Systementwurf

Der Systementwurf beginnt mit dem Abstrahieren der in der Anforderungsliste beschriebenen Vorstellungen. Vorfixierungen, die den möglichen Lösungsraum unnötig einschränken, sollen dadurch vermieden werden. Ziel ist es, das Wesentliche und Allgemeingültige der Problemstellung herauszuarbeiten. Dies wird z.B. erreicht durch Reduktion der Anforderungsliste auf wesentliche Aussagen und die lösungsneutrale Formulierung des Problems [PB97].

Aufstellen der Funktionsstruktur: Aus der Problemspezifikation wird die **Gesamtfunktion** abgeleitet (vgl. Bild 3-4). Sie stellt die Zielfunktion für das Verhalten des Systems unter seinen Einsatzbedingungen dar. Die Einsatzbedingungen bilden die Eingangsgrößen, die Ausgangsgrößen beschreiben das gewünschte Verhalten. Mit Hilfe der allgemeinen Flussgrößen Stoff, Energie und Information (vgl. Ab-

3.1.3 Process modules for recurrent working steps

Some substeps which keep recurring when designing mechatronic systems can be described in a more concrete way in the form of partly predefined process modules. The process modules of *system design*, *modeling and model analysis*, *domain-specific design*, *system integration* and *assurance of properties* are explained below.

System design

The system design begins with the abstraction of the ideas described in the requirements list. This is intended to avoid prefixed elements which possibly restrict the solution space. The aim is to work out what is essential and generally applicable in respect of the setting of the problem. This is achieved for example by reduction of the requirements list to essential statements and solution-neutral formulation of the problem [PB97].

Setting up the function structure: the **overall function** is derived from the problem specification (cf. Figure 3-4). It represents the target function for the behavior of the system under its operating conditions. The operating conditions form the input variables, the output variables describe the desired behavior. With the aid of the general flow variables of material, energy and information (cf. Section 2.2.1), and block

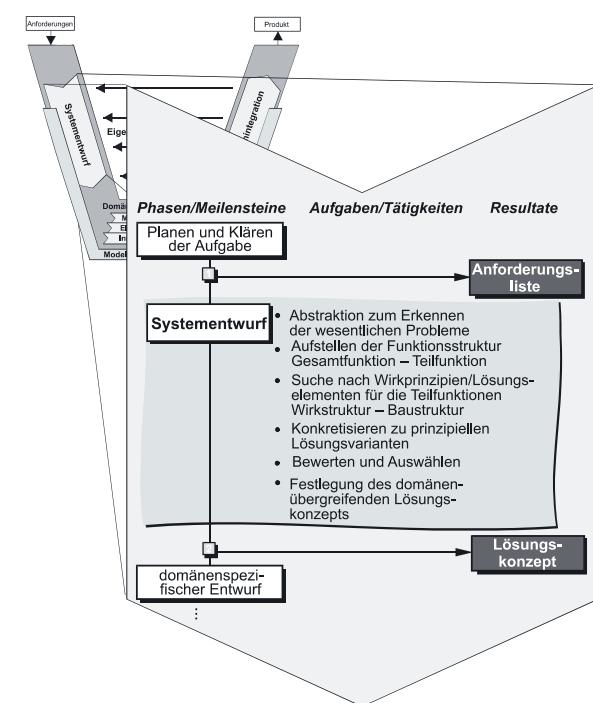


Bild 3-4. Tätigkeiten beim Systementwurf, nach [KBS97; PB 97]

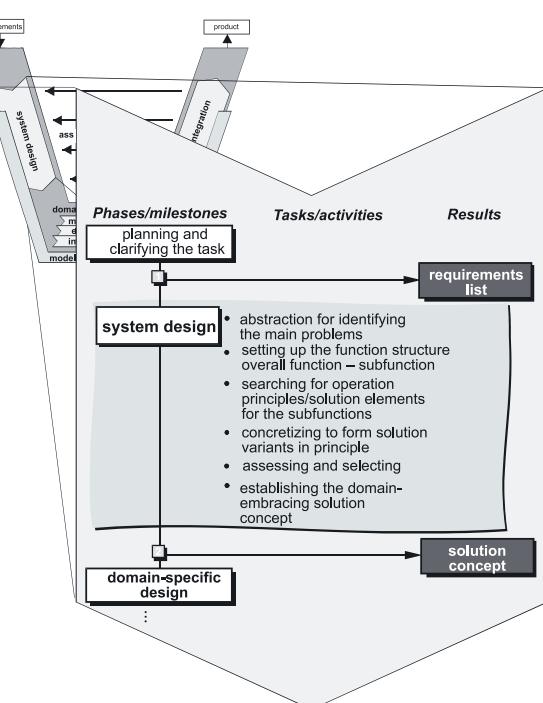


Fig. 3-4. Activities in system design, according to [KBS97; PB 97]

schnitt 2.2.1) und der Blockdarstellung kann der Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen spezifiziert werden. In der Regel ist die zu lösende Aufgabe zu komplex, um unmittelbar aus der Gesamtfunktion die technische Realisierung ableiten zu können. Deshalb ist eine Aufgliederung der Gesamtfunktion in **Teilfunktionen** vorzunehmen. Teilfunktionen mechatronischer Systeme sind z.B. Antrieben, Steuern/Regeln, Messen, Übertragen etc. Die Teilfunktionen werden wiederum über Stoff-, Energie- und Informationsflüsse zur **Funktionsstruktur** verknüpft, um das Verhalten zu beschreiben und frühzeitig Inkonsistenzen zu erkennen. Ziel ist, die Funktionsstruktur so weit zu detaillieren, bis es gelingt, Wirkprinzipien und Lösungselemente zur Erfüllung der Teilfunktionen zu finden. Wenn dies für eine Teilfunktion nicht möglich erscheint, dann ist die Teilfunktion weiter aufzugliedern. Dies erfolgt als Wechselspiel von Analyse- und Syntheseschritten (vgl. Abschnitt 3.1.1). So genannte „kanonische Funktionen“ stellen einen neuen Lösungsansatz dar, um den beschriebenen Übergang von den abstrakten allgemeinen Fluss- und Funktionsgrößen zu geeigneten mechatronischen Lösungsprinzipien zu unterstützen. Kanonische Funktionen bestehen aus einem Satz von domänenunabhängigen Funktionsverben und Funktionsgrößen. Zur Konkretisierung einer kanonischen Funktionsgröße steht jeweils nur eine physikalische Größe aus jeder Domäne zur Auswahl. Dies erleichtert die weitere Spezifikation. Zur Vertiefung der kanonischen Funktionen wird auf [Hua02] verwiesen.

Suche nach Wirkprinzipien und Lösungselementen zur Erfüllung von Teilfunktionen: Für die einzelnen Teilfunktionen werden geeignete Wirkprinzipien und Lösungselemente gesucht. Die Erfüllung einer Teilfunktion kann nicht immer als 1 : 1-Beziehung mit einem Wirkprinzip/Lösungselement realisiert werden; vielmehr bestehen polyhierarchische Erfüllungsbeziehungen [Rot00]. Dies ist z.B. bei tragenden Lösungselementen wie dem Gehäuse der Fall, welches mehrere Teilfunktionen (Befestigen, Tragen, Dichten etc.) erfüllt. Die Suche und Zuordnung erfolgt in einem iterativen Prozess unter Berücksichtigung der Nutz- und Störfunktionen und der Kompatibilitätsbedingungen. Der Prozess wird so lange fortgesetzt, bis alle Teilfunktionen durch geeignete Wirkprinzipien und/oder Lösungselemente erfüllt werden [KBS97]. Kataloge (Kataloge für physikalische Effekte und Wirkprinzipien z.B. [Rot00], Produktkataloge) und elektronische Marktplätze (z.B. CompoNET¹²) erleichtern die Suche. Zum Erfüllen der Gesamtfunktion werden die Wirk-

representation, the interrelationship between input variables and output variables can be specified. The task to be solved is generally too complex to allow the technical realization to be derived directly from the overall function. Therefore, the overall function has to be divided up into **subfunctions**. Subfunctions of mechatronic systems are, for example, driving, open-closed-loop control, measurement, transmission, etc. The subfunctions are in turn linked via material, energy and information flows to form the **function structure**, to describe the behavior and detect inconsistencies at an early time. The aim is to detail the function structure to the extent required to find operating principles and solution elements for performing the subfunctions. If this does not appear to be possible for a subfunction, the subfunction has to be divided up further. This takes place as an alternation of analysis steps and synthesis steps (cf. Section 3.1.1). So-called canonical functions represent a new solution approach, to support the described transition from the abstract general flow and function variables to suitable mechatronic solution principles. Canonical functions comprise a set of domain-independent function verbs and function variables. For concretizing a canonical function variable, only one physical variable from each domain is respectively available for selection. This makes further specification easier. For more on the canonical functions, you are referred to [Hua02].

Search for operating principles and solution elements for performing subfunctions: For individual subfunctions, suitable operating principles and solution elements are sought. The performance of a subfunction cannot always be realized as a 1 : 1 relationship with an operating principle/solution element; rather, there are polyhierarchical performance relationships [Rot00]. This is the case for example with supporting solution elements such as the housing, which performs several subfunctions (fastening, supporting, sealing, etc.). The search and assignment takes place in an iterative process, taking the beneficial and disturbing functions and the compatibility conditions into consideration. The process is continued until all the subfunctions are satisfied by suitable operating principles and/or solution elements [KBS97]. Catalogs (catalogs for physical effects and operating principles, for example [Rot00], product catalogs) and electronic market places (for example CompoNET¹²) make the search easier. To perform the overall function, the operating principles/solution

¹²) CompoNET: Online-Marktplatz für Zulieferkomponenten;
<http://www.CompoNET.de>

¹²) CompoNET: online market place for supplier components;
<http://www.CompoNET.de>

prinzipien/Lösungselemente (über Stoff-, Energie- und Informationsflüsse) zur **Wirkstruktur**¹³⁾ verknüpft. Ziel ist, die physikalischen Verträglichkeiten zwischen den Wirkprinzipien/Lösungselementen zu erkennen und einen störungsfreien Stoff-, Energie- und Informationsfluss sicherzustellen. Vielfach ist die alleinige Wirkstruktur aber noch zu wenig konkret, um das Lösungsprinzip beurteilen zu können. Die Wirkstruktur muss z.B. durch überschlägige Berechnung oder Grobdimensionierung der Geometrie quantifiziert werden. Die weitere Konkretisierung der Wirkstruktur führt zur **Baustuktur**¹⁴⁾. Mit ihrer Hilfe werden die Verträglichkeiten zwischen den Wirkprinzipien/Lösungselementen in Bezug auf die Gestalt (insbesondere bei räumlicher Integration) überprüft. Die Lösungselemente sind ferner in ein **Stütz- und Hüllsystem** einzubetten, das die funktionsgerechte Anordnung der Elemente und ihr Zusammenwirken sicherstellt. Zur Optimierung der Baustuktur hinsichtlich Integrationsgrad, Vermeidung von Störfunktionen etc. sind Gestaltungsprinzipien wie z.B. die **Integral- und Differentialbauweise**¹⁵⁾ anzuwenden.

Konkretisieren zu prinzipiellen Lösungsvarianten: Die erarbeiteten Vorstellungen für eine Lösung sind in der Regel noch nicht konkret genug, um das endgültige domänenübergreifende Konzept festzulegen und den Entwurf in den beteiligten Fachdisziplinen fortsetzen zu können. Es sind weitere Aspekte wie Störanfälligkeit, Gewicht, Lebensdauer etc. zu berücksichtigen. Zur Informationsgewinnung dienen u.a. orientierende Berechnungen (Finite-Elemente-Methode (FEM), Analyse von Mehrkörpersystemen (MKS); vgl. Abschnitt 3.3), skizzenhafte Gestaltungsstudien, Bau von Anschauungsmodellen. Die Wirkprinzipien und Lösungselemente werden auf der Basis der neugewonnenen Informationen so weit konkretisiert bis prinzipielle Lösungsvarianten der Aufgabenstellung erkennbar sind. Diese werden einer abschließenden Bewertung nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien unterzogen.

¹³⁾ Wirkstruktur: Die Kombination mehrerer Wirkprinzipien/Lösungselemente führt zur Wirkstruktur einer Lösung. In ihr wird das Zusammenwirken mehrerer Wirkprinzipien/Lösungselemente und damit das Lösungsprinzip zum Erfüllen der Gesamtaufgabe erkennbar [PB97].

¹⁴⁾ Baustuktur: Sie berücksichtigt die räumlichen Zusammenhänge und die Anforderungen der Fertigung, der Montage etc. In ihr werden Bauräume, später Bauteile und Baugruppen mit ihren zugehörigen Verbindungen festgelegt, die das konkrete Erzeugnis darstellen [PB97].

¹⁵⁾ Integralbauweise: Vereinigen mehrerer Einzelkomponenten zu einem Bauteil bzw. zu einem heterogenen System durch Funktionsintegration. Gründe: Bauraumverkleinerung, Gewichtersparnis, Vermeidung von Schnittstellen etc.

Differentialbauweise: Auflösung einer Einzelkomponente in mehrere Bestandteile durch Funktionstrennung. Gründe: Funktionssicherheit, Verfügbarkeit von Standardkomponenten, erleichterte Herstellung und Wartung etc. [PB97]

elements are linked (via material, energy and information flows) to form the **operating structure**¹³⁾. The aim is to identify the physical compatibilities between the operating principles/solution elements and ensure a trouble-free material, energy and information flow. Often, however, the operating structure alone is still insufficiently concrete to allow the solution principle to be assessed. The operating structure must be quantified for example by approximate calculation or rough dimensioning of the geometry. The further concretization of the operating structure leads to the **building structure**¹⁴⁾. With its aid, the compatibilities between the operating principles/solution elements are checked with respect to the form (in particular in the case of spatial integration). The solution elements are also to be embedded in a **supporting and enveloping system**, which ensures the functionally appropriate arrangement of the elements and their interaction. For optimizing the building structure with regard to degree of integration, avoidance of disturbing functions etc., creation principles, such as for example the **integral and differential methods of construction**¹⁵⁾ are to be applied.

Concretizing to form solution variants in principle: The ideas worked out for a solution are generally not concrete enough to stipulate the final cross-domain concept and allow the design to be continued in the technical disciplines involved. Further aspects such as fault susceptibility, weight, service life, etc. must be taken into consideration. Among the means of obtaining information are orienting calculations (Finite Element Method (FEM), analysis of multi-body systems (MBS); cf. Section 3.3), outlined creation studies, building of viewing models. The operating principles and solution elements are concretized on the basis of the newly obtained information until solution variants in principle of the defined object can be identified. These are subjected to a final assessment on the basis of technical and commercial criteria.

¹³⁾ Operating structure: The combination of a number of operating principles/solution elements leads to the operating structure of a solution. In it, the interaction of a number of operating principles/solution elements, and consequently the solution principle for performing the overall task, can be identified [PB97].

¹⁴⁾ Building structure: It takes into consideration the spatial interrelationships and the requirements of production, assembly, etc. Defined in it are installation spaces, later components and subassemblies with their associated connections, which represent the concrete product [PB 97].

¹⁵⁾ Integral method of construction: Unifying a number of individual components to form a component or a heterogeneous system by function integration. Reasons: reducing size of installation space, saving weight, avoiding interfaces, etc.

Differential method of construction: Resolving an individual component into a number of constituent parts by function separation. Reasons: functional reliability, availability of standard components, facilitated manufacture and maintenance, etc. [PB97]

Ergebnis des Systementwurfs ist ein domänenübergreifendes **Lösungskonzept**, das die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zukünftigen Produkts und die Art und Anordnung seiner Komponenten beschreibt.

Modellbildung und -analyse

Mechatronische Systeme sollten auf Grund ihrer komplexen Struktur und des domänenübergreifenden Charakters im Rechner abgebildet werden. Ohne die Modellbildung des Gesamtverhaltens ist die Komplexität mechatronischer Produkte nicht zu beherrschen. Die Modellierung und Analyse des Systems geschieht unter den Aspekten Dynamik, Erwärmung, Streufelder, Schwingungs-Geräusch-Simulation etc. Bei der Modellbildung und -analyse sind einige Besonderheiten zu beachten, die genauer in Abschnitt 3.2 beschrieben werden.

Domänenspezifischer Entwurf

Bei der Zuordnung von Wirkprinzipien und Lösungselementen zu Teilfunktionen erfolgt in der Regel eine Partitionierung, das heißt eine Aufteilung der Funktionserfüllung unter den beteiligten Domänen. Der Begriff Partitionierung ist im Hardware/Software-Code-Design eingeführt worden [Buc01]. Die Entwicklung in den relevanten Domänen erfolgt auf der Basis etablierter, domänenspezifischer Entwicklungsmethodiken, die durch eigene Denkweisen, Begriffswelten und Erfahrungen geprägt sind. Zur Vertiefung wird auf die jeweilige Literatur verwiesen: u.a. Maschinenbau (VDI 2221); Softwaretechnik: Phasenmodelle [Pre94; Bei95], Wasserfallmodell [PB96], V-Modell [Brö95; Ver94], Spiralmodell [Boe88], Unified Modeling Language (UML) [Oes98]; Digitalelektronik: Abstraktionsebenen [BGH96; Arm89], Phasenmodell [Esc93]. Einen umfassenden Überblick liefert auch [GEK01].

Systemintegration

Unter Systemintegration wird der Zusammenschluss von Teilen (Funktionen, Komponenten, Teilsysteme) zu einem übergeordneten Ganzen (zukünftiges Produkt repräsentiert je nach Reifegrad als z.B. Labormuster, Funktionsmuster, Vorserienprodukt) verstanden. Entsprechend der Aufgabenstellung ist die geeignete Art der Integration zu wählen. Integrationsarten sind z.B. [KZB01]:

- **Integration verteilter Komponenten:** Komponenten wie Aktoren, Sensoren und Leistungsstglieder werden über Signal- und Energieflüsse miteinander verbunden. Die Verarbeitung der Signale erfolgt mit Hilfe von Kommunikationssystemen (z.B. Sensor-Aktor-Bus, Feldbus etc.),

The result of the system design is a cross-domain **solution concept**, which describes the main physical and logical operating characteristics of the future product and the type and arrangement of its components.

Modeling and model analysis

On account of their complex structure and cross-domain character, mechatronic systems should be depicted in a computer. Without modeling the entire behavior, it is not possible to deal with the complexity of mechatronic products. The modeling and analysis of the system takes place from the aspects of dynamics, heating, stray fields, vibration-noise simulation, etc. In modeling and model analysis, it is necessary to take into account some special aspects, which are described in more detail in Section 3.2.

Domain-specific design

When assigning operating principles and solution elements to subfunctions, a partitioning is generally performed, i.e. dividing of the performance of the function among the domains involved. The term partitioning has been introduced in hardware/software codesign [Buc01]. The development in the relevant domains takes place on the basis of established, domain-specific development methodologies, which are characterized by their own ways of thinking, conceptual ranges and experiences. For more, you are referred to the respective literature: including mechanical engineering (VDI 2221); software technology: phase models [Pre94; Bei95], waterfall model [PB96], V model [Brö95; Ver94], spiral model [Boe88], Unified Modeling Language (UML) [Oes98]; digital electronics: abstraction levels [BGH96; Arm89], phase model [Esc93]. A comprehensive overview is also provided by [GEK01].

System integration

System integration is understood as meaning the bringing together of parts (functions, components, subsystems) to form a superordinate whole (future product represented according to degree of maturity as, for example, laboratory specimen, functional specimen, pilot-run product). The suitable type of integration is to be chosen in accordance with the defined object. Types of integration are, for example [KZB01]:

- **Integration of distributed components:** Components such as actors, sensors and power actuators are connected to one another via signal and energy flows. The processing of the signals takes place with the aid of communication systems (for example sensor-actor bus, field bus, etc.), that of the

die der Energieflüsse über Verkabelung und Steckverbinder. Vorteilhaft ist, dass Serienkomponenten verwendet werden können; Kabel- und Steckverbindungen bergen jedoch die Gefahr von Kontaktproblemen, Kabelbrüchen und Kurzschlüssen insbesondere bei rauen Umgebungsbedingungen.

- **Modulare Integration:** Das Gesamtsystem setzt sich aus Modulen definierter Funktionalität und standardisierter Abmessungen in verschiedenen Größenklassen zusammen. Die Kopplung erfolgt über vereinheitlichte Schnittstellen wie z.B. DIN-Steckeranschluss, standardisierte stoff-, kraft- oder formschlüssige Verbindungen. Diese in einem Baukastensystem enthaltenen Module können flexibel kombiniert werden und ermöglichen eine große Funktionsvielfalt. Modular integrierte Systeme weisen in der Regel auch ein größeres Bauteilvolumen und höheren Material- und Bauaufwand im Vergleich zu räumlich integrierten Systemen auf.
- **Räumliche Integration:** Alle Komponenten werden räumlich integriert und bilden eine komplexe Funktionseinheit, z.B. Integration aller Elemente eines Antriebssystems (Regler, Leistungsstegglied, Motor, Übertragungselement, Wirkelement) in einem Gehäuse (siehe Beispiel „Integrierter Mehrkoordinatenantrieb“ in Abschnitt 4.4). Vorteile sind u.a. ein kleinerer Bauraum, höhere Zuverlässigkeit durch Reduktion der Schnittstellen, schnellere Datenübertragung/höhere Leistung und geringerer Montageaufwand. Durch die räumliche Nähe der Komponenten können aber auch unerwünschte Wechselwirkungen wie z.B. Erwärmung, magnetische Streufelder, Schwingungen, Geräusche und Spannungsspitzen entstehen, die frühzeitig zu berücksichtigen sind. Elektronische Komponenten sind unter Umständen an das Einsatzumfeld (Temperatur, Feuchtigkeit, Schwingungen etc.) anzupassen; zusätzliche Maßnahmen wie Kapselung oder Kühlung können erforderlich sein, um die Bauteilzuverlässigkeit sicherzustellen. Räumliche Integration erfordert deshalb ein systematisches Vorgehen beim Entwurf, die frühzeitige Beachtung des Gestaltungsprinzips Integralbauweise (siehe Abschnitt 3.1.3 „Systementwurf“) sowie die Unterstützung durch Modellbildung und IT-Werkzeuge.

Um einen hohen Integrationsgrad zu erreichen, sind bereits beim Systementwurf die Wirkprinzipien und Lösungselemente unter Berücksichtigung der Nutz- und Störfunktionen auf Kompatibilität zu überprüfen und die Schnittstellen für die spätere Integration auszubilden (Grobdimensionierung). Während der Fein-

energy flows via cabling and plug-in connectors. It is advantageous that series components can be used; cable and plug-in connections entail the risk, however, of contact problems, cable breakages and short-circuits, in particular under rough ambient conditions.

- **Modular integration:** The overall system is made up of modules of defined functionality and standardized dimensions in various size classes. The coupling takes place via unified interfaces, such as for example a DIN plug and socket connection, standardized integral, nonpositive or positive connections. These modules that are included in a modular system can be flexibly combined and make it possible to obtain great functional variety. Modularly integrated systems generally also have a larger component volume and higher material expenditure and component complexity in comparison with spatially integrated systems.
- **Spatial integration:** All components are spatially integrated and form a complex functional unit, for example integration of all elements of a drive system (controller, power actuator, motor, transfer element, operating element) into a housing (see for example the "Integrated multicoordinate drive" in Section 4.4). Advantages include a smaller installation space, greater reliability brought about by reduction of the interfaces, faster data transmission/higher power and lower assembly effort. However, the spatial proximity of the components also allows undesired interactions to arise, such as for example heating, stray magnetic fields, vibrations, noises and voltage peaks, which are to be taken into consideration at an early time. Under some circumstances, electronic components are to be adapted to the operating environment (temperature, humidity, vibrations, etc.); additional measures such as encapsulation or cooling may be required to ensure component reliability. Spatial integration therefore requires a systematic procedure for design, early observance of the creation principle of an integral method of construction (see Section 3.1.3 "System design") and support by modeling and IT tools.

To achieve a high degree of integration, the operating principles and solution elements are to be checked for compatibility, taking the beneficial and disturbing functions into consideration, and the interfaces for the later integration (rough dimensioning) are to be formed already in the system design. During the fine

dimensionierung in den involvierten Fachdisziplinen (domänenspezifischer Entwurf) kann es jedoch zu Veränderungen der Wirkstruktur (durch Funktionsintegration, Funktionstrennung etc.) und der Baustruktur kommen. Mögliche Inkompabilitäten müssen deshalb bei der Systemintegration erkannt und eliminiert werden (Bild 3-5).

Als Mittel bietet sich hier z.B. der **Morphologische Kasten** an [PB97]. Ein morphologischer Kasten ist ein Ordnungsschema in Matrizenform. Den Zeilen werden die Teilfunktionen zugeordnet. In die Spalten werden die Lösungen (und gegebenenfalls die im Zuge des domänenspezifischen Entwurfs gebildeten Varianten) eingetragen.

Zu den Lösungen werden in der Regel auch Informationen über deren Wechselwirkungen mit der Umgebung abgelegt (Montagemöglichkeiten, Energie-, Stoff- und Informationsfluss, Versorgung etc.); diese Informationen werden zur Verträglichkeitsbewertung der Lösungen benötigt.

Zur Integration des Gesamtsystems wird für jede Teilfunktion eine Lösung ausgewählt und alle Lösungen werden zu einer Gesamtlösung verknüpft. Stehen m_i Lösungen für die Teilfunktionen F_i zur Verfügung, erhält man $N = m_1 \cdot m_2 \cdots m_n$ theoretisch mögliche Gesamtsystemvarianten. Durch Inkompabilitäten einzelner Lösungen wird die Anzahl der Gesamtsystemvarianten meist deutlich eingeschränkt. Sind konsistente Gesamtsystemvarianten gefunden, muss aus diesen die optimale Gesamtlösung ausgewählt werden.

dimensioning in the technical disciplines involved (domain-specific design), however, there may be changes to the operating structure (due to function integration, function separation, etc.) and the building structure. Possible incompatibilities must therefore be detected and eliminated during the system integration (Figure 3-5).

An example of a suitable means for this is the **morphological box** [PB97]. A morphological box is an ordering scheme in the form of a matrix. The subfunctions are assigned to the rows. The solutions (and possibly the variants formed in the course of the domain-specific design) are entered in the columns.

Generally stored along with the solutions there is also information on their interactions with the environment (assembly possibilities, energy, material and information flow, supply, etc.); this information is required for the compatibility assessment of the solutions.

For the integration of the overall system, a solution is selected for each subfunction and all the solutions are interlinked to form an overall solution. If m_i solutions are available for the subfunctions F_i , then $N = m_1 \cdot m_2 \cdots m_n$ theoretically possible overall system variants are obtained. The number of overall system variants is usually greatly restricted by incompatibilities of individual solutions. Once consistent overall system variants have been found, the optimum overall solution must be selected from them.

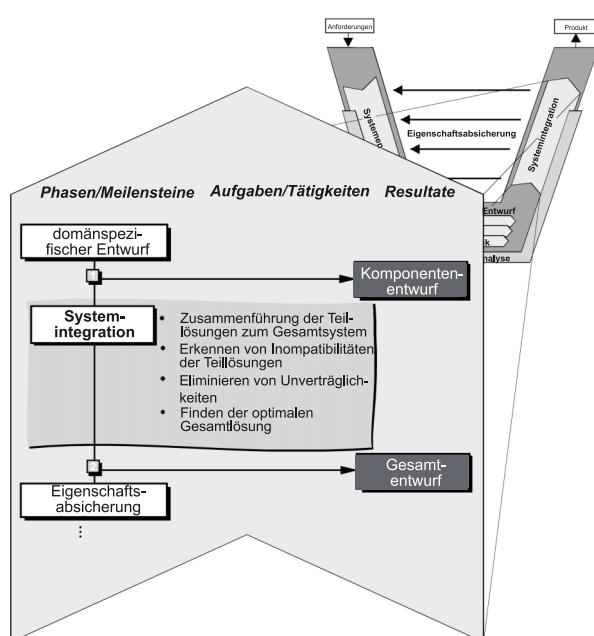


Bild 3-5. Tätigkeiten bei der Systemintegration

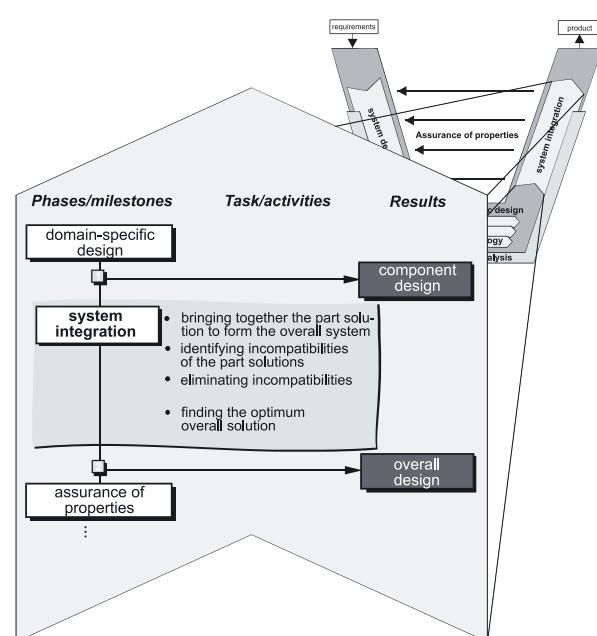


Fig. 3-5. Activities in system integration

Im klassischen Maschinenbau liegt die Problematik der Systemintegration meist bei den gestaltbestimmenden Eigenschaften. Beim Entwurf mechatronischer Systeme sind vielfältige Wechselwirkungen (z.B. Verhalten, elektromagnetische Verträglichkeit etc.) zur Überprüfung der Verträglichkeiten zu berücksichtigen. Neben dem Einsatz von IT-Werkzeugen zur Simulation von Wechselwirkungen (vgl. nächster Abschnitt „Eigenschaftsabsicherung“ sowie Abschnitt 3.3) ist eine enge Zusammenarbeit der Fachdisziplinen gefordert, da die Bewertung dieser Wechselwirkungen detailliertes Fachwissen verlangt.

In classic mechanical engineering, the problem of system integration usually lies in the form-determining properties. When designing mechatronic systems, various interactions (for example behavior, electromagnetic compatibility, etc.) have to be taken into consideration for checking the compatibilities. Apart from the use of IT tools for simulating interactions (cf. next section "Assurance of properties" and Section 3.3), close cooperation between the technical disciplines is required, since the assessment of these interactions requires detailed technical knowledge.

Eigenschaftsabsicherung

Beim Durchlaufen der Phasen Systementwurf, domänenpezifischer Entwurf und Systemintegration sind nach den einzelnen Phasen immer wieder Lösungsvarianten auszuwählen und deren Eigenschaften anhand der Anforderungsliste zu bewerten. Bei den Eigenschaftsgrößen handelt es sich um zahlenmäßige Kennwerte, verbal formulierte Aussagen etc. Diese so genannte Eigenschaftsabsicherung subsumiert die beiden Begriffe **Verifikation** und **Validierung**, die verschiedene Stufen zur Sicherung der geforderten Systemeigenschaften beschreiben.

Assurance of properties

When running through the phases of system design, domain-specific design and system integration, it is necessary after the individual phases to keep selecting solution variants and assess their properties on the basis of the requirements list. The property variables are numerical characteristic values, verbally formulated statements, etc. This so-called assurance of properties subsumes the two terms **verification** and **validation**, which describe different stages of ensuring the required system properties.

Verifikation meint allgemein den Nachweis der Wahrheit von Aussagen. Übertragen auf technische Systeme ist hierunter die Überprüfung zu verstehen, ob eine Realisierung (z.B. ein Software-Programm) mit der Spezifikation (in diesem Fall mit der Algorithmenbeschreibung) übereinstimmt. Bei der Überprüfung der Gültigkeit eines Programms wird auch von der Programmverifikation gesprochen. Die Verifikation wird im Allgemeinen formal realisiert.

Umgangssprachlich ist die Verifikation die Beantwortung der Frage: Wird ein *korrektes* Produkt entwickelt?

Verification means generally demonstrating the truth of statements. Transferred to technical systems, it is to be understood as meaning checking whether the way in which something is realized (for example a software program) coincides with the specification (in this case with the description of algorithms). When checking the validity of a program, reference is also made to program verification. The verification is generally realized in a formal manner.

In everyday language, verification is the answer to the question: Is a *correct* product being developed?

Validierung meint ursprünglich die Gültigkeitsprüfung einer Messmethode in der empirischen Sozialforschung, das heißt inwieweit die Testresultate tatsächlich das erfassen, was durch den Test bestimmt werden soll. Übertragen auf technische Systeme ist hierunter die Prüfung zu verstehen, ob das Produkt für seinen Einsatzzweck geeignet ist bzw. den gewünschten Wert erzielt. Hier geht die Erwartungshaltung des Fachexperten und des Anwenders ein. Die Validierung beinhaltet z.B. die Prüfung, ob die Beschreibung eines Algorithmus mit dem zu lösenden Problem übereinstimmt. Sie ist im Allgemeinen nicht formal durchzuführen.

Umgangssprachlich ist die Validierung die Beantwortung der Frage: Wird das *richtige* Produkt entwickelt?

Mit Hilfe der Bewertung können verschiedene Lösungsvarianten untereinander verglichen oder im Vergleich zu einer idealisierten Lösung als Grad der Annäherung an diese eingeschätzt werden. In dieser Richtlinie soll nicht detaillierter auf die Bewertung und die damit verbundenen Schritte eingegangen werden (siehe VDI 2225). Vielmehr sollen die möglichen Kombinationen von Modellen, Prototypen und Produkten der Lösungsvarianten in ihren jeweiligen Systemgrenzen aufgezeigt werden; die integrierten Untersuchungen mit Hilfe von IT-Werkzeugen stehen hierbei im Vordergrund. Sie bieten bei wachsender Komplexität heutiger Funktionen die Möglichkeit, in sorgfältig strukturierten, systematischen Entwicklungsabläufen die Funktion, Sicherheit und Zuverlässigkeit der Systeme auch unter kritischen Bedingungen zu verifizieren und zu validieren. Hierbei ist zwischen Experimenten mit entsprechend ausgerüsteten Prototypen, in denen das gesamte System zum Einsatz kommt, und solchen mit isolierten Einzelkomponenten zu unterscheiden.

Derartige Untersuchungen können in einem virtuellen, realen oder einer Kombination aus virtuellem und realem Versuch durchgeführt werden. Bei einem virtuellen Versuch wird das gesamte zu untersuchende System mit Hilfe von Modellen beschrieben und in seinem Verhalten simuliert (siehe Abschnitt 3.2). Dagegen muss in einem realen Versuch das System physikalisch realisiert sein, um das Verhalten in dem jeweiligen Kontext untersuchen zu können. Hierfür sind alle physikalischen Lasten real nachzubilden. Bei mechanischen Systemen handelt es sich hierbei beispielsweise um Bewegungen, Kräfte und Momente, bei elektronischen Systemen um resistive, induktive und kapazitive

Validation originally means checking the validity of a measuring method in empirical social research, i.e. the extent to which test results actually register what is intended to be determined by the test. Transferred to technical systems, it is to be understood as meaning testing whether the product is suitable for its intended purpose or achieves the desired value. The expectations of the technical expert and the user come into the equation here. Validation comprises, for example, checking whether the description of an algorithm coincides with the problem to be solved. It generally does not have to be carried out in a formal manner.

In everyday language, validation is the answer to the question: Is the *right* product being developed?

With the aid of the assessment, various solution variants can be compared with one another or appraised in comparison with an idealized solution as the degree of approximation to the latter. In this guideline, it is not intended to go into any more detail concerning the assessment and the associated steps (see VDI 2225). Rather, the possible combinations of models, prototypes and products of the solution variants are to be presented in their respective system limits; integrated investigations with the aid of IT tools are at the forefront of this. With increasing complexity of functions today, they offer the possibility of verifying and validating the function, safety and reliability of the systems, even under critical conditions, in carefully structured, systematic development sequences. A distinction is to be made here between experiments with correspondingly equipped prototypes, in which the overall system is used, and those with isolated individual components.

Such investigations can be carried out in a virtual experiment, a real experiment or a combination of these. In a virtual experiment, the entire system to be investigated is described with the aid of models and simulated in its behavior (see Section 3.2). On the other hand, in a real experiment, the system must be physically realized, in order to be able to investigate the behavior in the respective context. For this, all the physical loads must be replicated as they are in reality. In the case of mechanical systems, these are for example movements, forces and moments, in the case of electronic systems they are resistive, inductive and capacitive loads. A combination of real and virtual parts of a sys-

Lasten. Eine Kombination aus realen und virtuellen Teilen eines Systems kann in einer Hardware-in-the-Loop-Umgebung untersucht werden.

Hardware-in-the-Loop (HIL) ist die Integration von realen Komponenten (Bauteilen) und Systemmodellen in eine gemeinsame Simulationsumgebung. Die HIL-Nachbildung (Simulation) dynamischer Systeme durch physikalische und mathematische Modelle muss dabei in Echtzeit und unter Nachbildung der physikalischen Lasten erfolgen. Ein Beispiel ist die Simulation eines Gesamtfahrzeugs am Rechner mit der Anbindung eines realen Steuergerätes und der Aktorik für eine Funktionsregelung zur Fahrstabilitätsregelung. Ein entscheidender Vorteil der HIL ist der Funktionstest des Steuergerätes unter realen Bedingungen bei gleichzeitiger Einsparung an zeit- und kostenintensiven Fahrmanövern.

Software-in-the-Loop (SIL) ist die Integration von Systemmodellen in eine gemeinsame Simulationsumgebung mit dem modellierten Prozess (Regelstrecke); sowohl die zu entwickelnde Funktion als auch der Prozess (Regelstrecke), auf den die Funktion einwirkt, werden modelliert. Die SIL-Nachbildung (Simulation) dynamischer Systeme durch mathematische Modelle muss dabei nicht in Echtzeit erfolgen. Ein entscheidender Vorteil der SIL ist der Funktionstest unter simulierten Bedingungen bei gleichzeitiger Einsparung zeit- und kostenintensiver Experimente (z.B. Fahrmanöver). Ausgehend von einer SIL-Umgebung können entweder die Funktion, der Prozess oder beide Teile physikalisch realisiert und im geschlossenen Kreis hinsichtlich ihres Verhaltens analysiert werden.

Bild 3-6 zeigt beispielhaft die Arbeitsschritte der Eigenschaftsabsicherung unter dem Gesichtspunkt der Kopplung von Modellen und Prototypen.

tem can be investigated in a hardware-in-the-loop environment.

Hardware-in-the-loop (HIL) is the integration of real components and system models in a common simulation environment. The HIL replication (simulation) of dynamic systems by physical and mathematical models must in this case take place in real time and with the physical loads replicated. An example is the simulation of an entire vehicle on a computer with the connection of a real control device and the actor technology for functional control to provide vehicle stability. A decisive advantage of HIL is the function test of the control device under real conditions while at the same time saving on time- and cost-intensive driving maneuvers.

Software-in-the-loop (SIL) is the integration of system models in a common simulation environment with the modeled process (controlled system); both the function to be developed and the process (controlled system) on which the function acts are modeled. The SIL replication (simulation) of dynamic systems by mathematical models does not have to take place in real time. A decisive advantage of SIL is the function test under simulated conditions while at the same time saving on time- and cost-intensive experiments (for example driving maneuvers). On the basis of an SIL environment, either the function, the process or both parts can be physically realized and analyzed with regard to their behavior in a closed loop.

Figure 3-6 shows by way of example the working steps of the assurance of properties from the aspect of coupling models and prototypes.

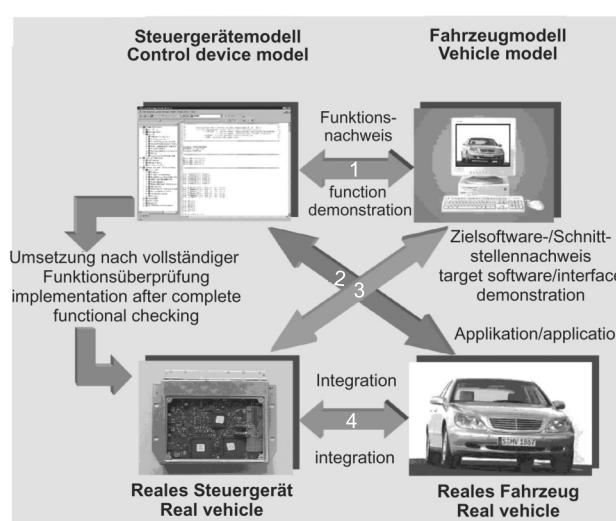


Bild 3-6. Arbeitsschritte der Eigenschaftsabsicherung am Beispiel des Kraftfahrzeugs

Fig. 3-6. Working steps of the assurance of properties in the example of a motor vehicle

- 1) **Funktionsnachweis:** Eine neue oder veränderte Funktionalität eines Steuergerätes wird dabei als Modell in einem geschlossenen Regelkreis mit einem Streckenmodell (Prozessmodell) getestet. Diese Untersuchung wird als Software-in-the-Loop (SIL) bezeichnet.
- 2) **Applikation:** Die am Streckenmodell überprüfte Funktion kann dann an dem realen Prozess nachgeprüft und in einem ersten Schritt auf den Prozess abgestimmt werden.
- 3) **Zielsoftware-/Schnittstellennachweis:** Durch die Kopplung des realen Steuergerätes mit dem Streckenmodell in einer HIL-Umgebung kann die Fehlerfreiheit der Zielsoftware und der Schnittstellenkommunikation überprüft werden.
- 4) **Integration:** Die Integration des mit einer neuen Funktionalität ausgestatteten Steuergerätes in den realen Prozess erlaubt die Erprobung des Gesamtsystems und die Anpassung aller relevanten Signal- und Steuerdaten.

- 1) **Function demonstration:** A new or changed functionality of a control device is in this case tested as a model in a closed control loop with a system model (process model). This investigation is referred to as software-in-the-loop (SIL).
- 2) **Application:** The function checked on the system model can then be rechecked on the real process and adjusted to match the process in a first step.
- 3) **Target software/interface demonstration:** By coupling the real control device with the system model in an HIL environment, the freedom from errors of the target software and of the interface communication can be checked.
- 4) **Integration:** the integration of the control device equipped with a new functionality into the real process allows the overall system to be tried out and the adaptation of all relevant signal and control data.

3.1.4 Integrativer Entwurf von Produkt und Produktionssystem

Aus dem eingangs erläuterten Begriffsverständnis der Mechatronik wird deutlich, dass ein Hauptmerkmal mechatronischer Produkte die funktionale und räumliche Integration von Komponenten aus den Domänen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik ist. Um diese Integration zu erreichen, bedarf es einer frühzeitigen Abstimmung der spezifischen Entwurfsprozesse der involvierten Domänen [SFB01]. Für den Entwurf von Produktionssystemen ergeben sich daraus zwei Forderungen:

1. Die für den Produktentwurf gültige Integrationsforderung muss auch an den Entwurf von Produktionssystemen gestellt werden.
2. Das Produktkonzept wird entscheidend durch die Fertigungstechnologien (insbesondere Aufbau- und Verbindungstechnologien) geprägt. Der Entwurf von Produkt und Produktionssystemen muss deshalb bereits in den frühen Entwurfsphasen integrativ betrachtet werden.

Auf Grund der Fokussierung der vorliegenden VDI-Richtlinie auf den Produktentwurf soll an dieser Stelle in Form eines Exkurses auf den Entwurf von Produktionssystemen eingegangen werden. Zur weiteren Vertiefung wird auf die einschlägige Literatur¹⁶⁾ verwiesen.

¹⁶⁾ vgl. [Agg89; Dan98; EBL95; ES99; Fel89; Gru00; Ket84; Sch95; Wil98]

3.1.4 Integrative design of product and production system

It is clear from the understanding of the term mechatronics explained at the beginning that a main feature of mechatronic products is the functional and spatial integration of components from the domains of mechanical engineering, electrical engineering and information technology. To achieve this integration, early coordination of the specific design processes of the domains involved is required [SFB01]. For the design of production systems, this gives rise to two requirements:

1. The integration requirement that applies to the product design must also be imposed on the design of production systems.
2. The product concept is decisively characterized by the production technologies (in particular construction and connection technologies). The design of a product and production systems must therefore already be taken into account in an integrative manner in the early design phases.

On account of the fact that this VDI guideline focuses on product design, a digression is to be made at this point to consider the design of production systems. For more, you are referred to the relevant literature¹⁶⁾.

¹⁶⁾ including [Agg89; Dan98; EBL95; ES99; Fel89; Gru00; Ket84; Sch95; Wil98]

Integrativer Entwurf der unterschiedlichen Produktionsprozesse

Vor allem die räumliche Integration der Komponenten in ein mechatronisches Produkt stellt neue Herausforderungen an den Entwurf der Produktionsprozesse und deren Vernetzung: Erstens bedingt dies einen Montageprozess, in dem mechanische, elektronische und informationstechnische Komponenten zu einer Baueinheit integriert werden. Der (End-)Montageprozess ist daher in analoger Weise wie der Produktentwurfsprozess durch zahlreiche Schnittstellen und Wechselwirkungen zwischen den Komponenten und deren Produktionsprozessen geprägt [Sch00]. Zweitens erfordert die funktionale und räumliche Integration der Komponenten im Produkt auch integrierte Mechanik- und Elektronik-Prüfungen und Tests nach der Montage. Diese müssen sowohl die mechanischen als auch die elektrischen und elektronischen Eigenschaften des Produkts mit einbeziehen, um dessen einwandfreie Gesamtfunktion sicherzustellen. Diese Form der mechatronischen Qualitätssicherung hat für die Erschließung der wirtschaftlichen Potenziale mechatronischer Produkte eine hohe Bedeutung.

Daraus leiten sich für den Entwurf von Produktionsystemen für mechatronische Produkte folgende Abstimmungsbedarfe zwischen Mechanik- und Elektronik-Produktion ab:

- Entwicklung neuer Produktionstechnologien (z.B. Reduzierung der Einbringung von Prozesswärme und -vibrationen)
- Abstimmung der domänen spezifischen Produktionsprinzipien (z.B. Festlegung von Varianten und wirtschaftlichen Stückzahlen)
- Entwicklung integrierter Produktionssysteme (z.B. (Laser-)Abgleichprozesse, in denen eine Elektronik individuell auf eine Mechanik (z.B. Optik) justiert wird, um auf diese Weise Fertigungstoleranzen auszugleichen; Umspritzen oder Vergießen von Elektronikkomponenten)
- Koordination von Änderungen (z.B. Serien-Einlaufzeitpunkte, Aktualisierung von Prüfmitteln und -programmen)
- Kontrolle und Steuerung der Umlaufbestände (z.B. bei mangelnder Lagerbarkeit von Halbzeugnissen)
- Klärung von Qualitätsproblemen auf Komponenten- und Produkt ebene (z.B. bei Transportschäden an elektronischen Komponenten)

Integrativer Entwurf von Produkt und Produktionssystem

In Wissenschaft und Praxis ist die Notwendigkeit einer engen Verzahnung von Produkt- und Produk-

Integrative design of the different production processes

In particular, the spatial integration of the components into a mechatronic product presents new challenges for the design of production processes and how they are interconnected: Firstly, this requires an assembly process, in which mechanical, electronic and information-technical components are integrated to form a structural unit. The (final) assembly process is therefore characterized in a way analogous to that of the product design process by numerous interfaces and interactions between the components and their production processes [Sch00]. Secondly, the functional and spatial integration of the components in the product also requires integrated checks and tests of the mechanics and electronics after assembly. These must include both the mechanical properties and the electrical and electronic properties of the product in order to ensure its satisfactory overall function. This form of mechatronic quality assurance is of very great significance for exploiting the commercial potentials of mechatronic products.

For the design of production systems for mechatronic products, this gives rise to the following requirements for coordination between mechanical production and electronic production:

- Development of new production technologies (for example reduction of the introduction of process heat and vibrations)
- Coordination of the domain-specific production principles (for example stipulation of variants and profitable numbers of units)
- Development of integrated production systems (for example (laser) adjustment processes, in which electronics are adjusted individually to mechanics (for example optics) in order in this way to compensate for production tolerances; encapsulation or potting of electronic components)
- Coordination of changes (for example times of entry into mass production, updating of means of testing and testing programs)
- Monitoring and control of the stocks in circulation (for example when semifinished products cannot adequately be stored)
- Clarification of quality problems at component level and product level (for example in the case of damage to electronic components in transit)

Integrative design of product and production systems

In business and in practice, the necessity for close intermeshing of product design and production system

tionssystementwurf umstritten. Ein integrierter Entwurf legt den Schwerpunkt der Betrachtungen auf die zeitbezogene, produkt- bzw. projektspezifische Abstimmung von Einzelaufgaben. Ziel ist es, die Abläufe zeitlich zu parallelisieren. Hieraus leitet sich die Forderung nach einer Erweiterung der rein produktorientierten Betrachtungsweise eines Produktentwicklungsprozesses ab [CR92; Eve93; EBL95].

Neben der Reduktion der Entwicklungszeit ermöglicht der parallele Entwurf von Produkt und Produktionssystem eine Abstimmung von Entscheidungen bereits in den frühen Phasen; hierdurch können maßgebliche Optimierungspotenziale erschlossen sowie aufwändige Änderungen vermieden werden. Eine enge Verzahnung von Produkt- und Produktionssystementwurf muss vor allem in der Phase der Vorberitung und Produktionskonzipierung gewährleistet werden. Drei Gründe können hierfür angeführt werden:

- Es ist während der Konzipierung zu überprüfen, ob entsprechende Produkt- und Produktionstechnologien zum Aufbau und zur Verbindung der elektronischen Komponenten verfügbar und wirtschaftlich produzierbar sind, damit diese den veränderten Umweltbedingungen (klimatischen, mechanischen, magnetischen und biologischen) standhalten.
- Die Integration unterschiedlicher Domänen erfordert die Neudefinition der Kompetenzen im Bereich Produkt- und Produktionssystementwurf für diese Domänen. Es muss frühzeitig entschieden werden, welche Kompetenzen in Entwicklung (Anforderungs-, Bewertungs- oder Entwicklungskompetenz) und Produktion (Integrations-, Prototypen- oder Serienkompetenz) vorzuhalten sind.
- Durch die unterschiedliche Länge der Innovationszyklen von Mechanik und Elektronik gewinnt eine enge Anbindung von Produkt- und Produktionssystementwurf an Bedeutung, damit Fortschritte sowohl produkt- wie auch produktionsseitig wirtschaftlich realisierbar sind.

Es gilt somit einen geeigneten Informationsaustausch zwischen Produkt- und Produktionssystementwurf vorzunehmen. Dieser ist in drei Dimensionen zu koordinieren: Zeit, Inhalt und Intensität der Zusammenarbeit. Die zeitliche Koordination bestimmt sich über den Technologiebereich (Produkt oder Produktion), aus dem die Innovation betrieben wird. Die Inhalte der Entwurfsprozesse, das heißt welche Planungsschritte im Detail auszuführen sind, werden über die Art des Planungsanlasses festgelegt (Neuplanung vs. Weiterentwicklung), während die Intensität der Ab-

design is undisputed. An integrated design puts the emphasis of considerations on the time-related, product- or project-specific coordination of individual tasks. The aim is to arrange the sequences temporally in parallel. The requirement for expansion of the purely product-oriented way of considering a product development process arises from this [CR92; Eve93; EBL95].

Apart from reducing the development time, the parallel design of a product and production system makes it possible to coordinate decisions already in the early phases; this allows decisive optimization potentials to be exploited and elaborate changes to be avoided. Close meshing of product and production system design must be ensured in particular in the phase of preparation and production conception. Three reasons for this can be cited:

- During the conception it must be checked whether corresponding product and production technologies for constructing and connecting the electronic components are available and can be produced cost-effectively to withstand the changed environmental conditions (climatic, mechanical, magnetic and biological).
- The integration of different domains requires the redefinition of competences in the area of product and production system design for these domains. It must be decided at an early time which competences in development (requirement, assessment or development competence) and production (integration, prototype or mass-production competence) are to be provided.
- The different lengths of the innovation cycles for mechanics and electronics makes it important for product and production system design to be closely linked, in order that advances can be commercially realized both on the product side and on the production side.

Consequently, a suitable exchange of information must take place between product design and production system design. This is to be coordinated in three dimensions: time, content and intensity of the cooperation. The temporal coordination is determined according to the area of technology (product or production) from which the innovation is driven. The contents of the design processes, i.e. which planning steps are to be taken in detail, are fixed according to the kind of reason for planning (new planning vs. further development), while the intensity of the coordi-

stimmung aus der Art der Planungsorganisation und des entsprechenden Projektfortschritts bestimmt wird. Letztendlich ist der Entwurfsprozess somit immer von der Ausgangssituation des jeweiligen Unternehmens abhängig, und es kann daher keine detaillierte, allgemeingültige Vorgehensweise beschrieben werden. Vielmehr muss jedes Unternehmen für sich situationsspezifisch die entsprechende Vorgehensweise zur Anbindung des V-Modells des Produktionssystementwurfs an das des Produktentwurfs entwickeln bzw. festlegen.

Bild 3-7 zeigt die Vorgehensweise beim Entwurf mechatronischer Produktionssysteme, die sich wie der Entwurf mechatronischer Systeme am V-Modell orientiert (vgl. Bild 3-2).

nation is determined by the type of planning organization and the corresponding progress made in the project. Ultimately, the design process is consequently always dependent on the initial situation of the respective company and therefore a detailed, generally applicable procedure cannot be described. Rather, each company must itself develop or lay down the appropriate procedure specific to the given situation for linking the V model of the production system design to that of the product design.

Figure 3-7 shows the procedure when designing mechatronic production systems which are based on the V model in the same way as the design of mechatronic systems (cf. Figure 3-2).

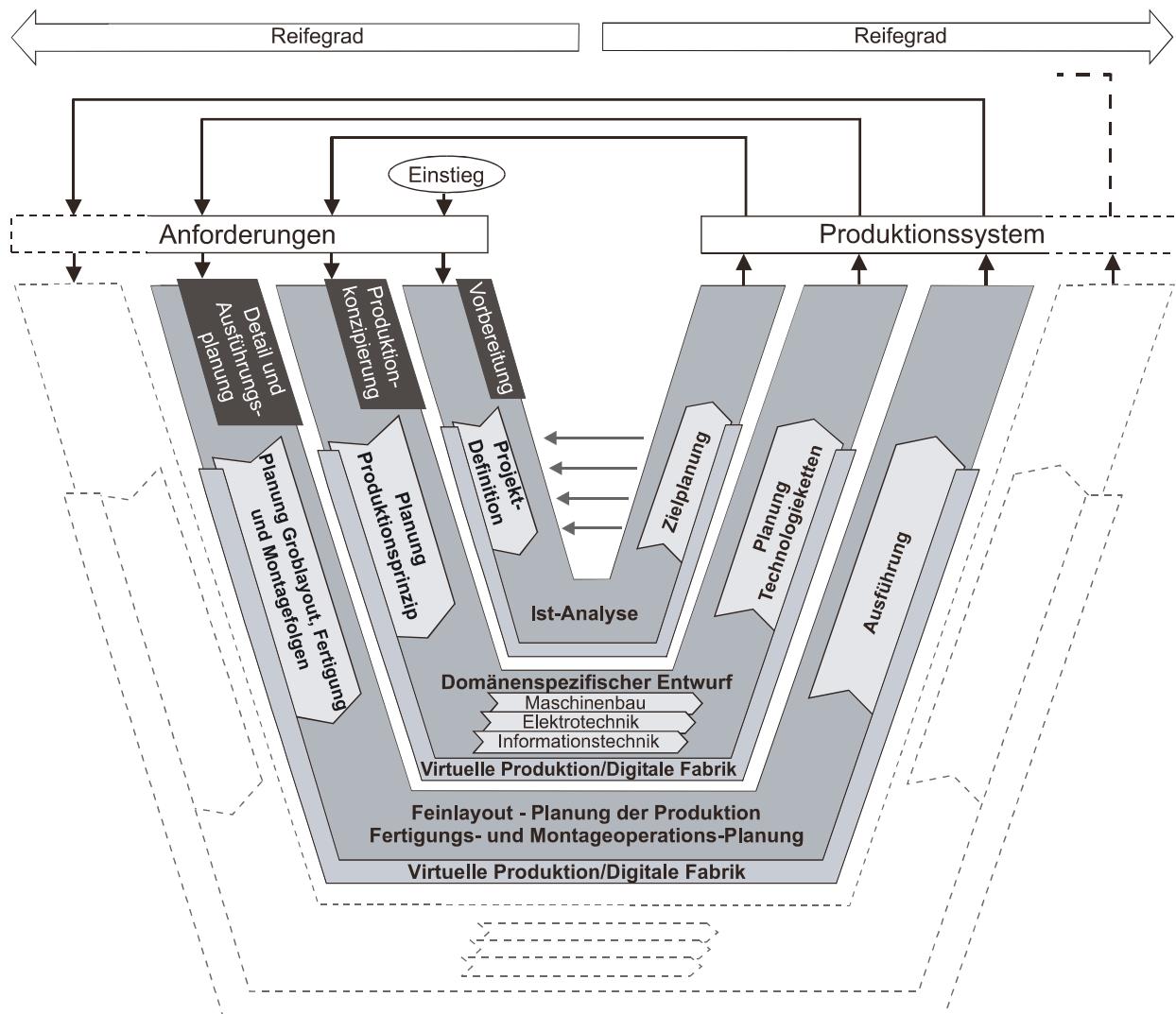


Bild 3-7. Iteratives Vorgehen beim Entwurf von Produktionssystemen für mechatronische Erzeugnisse

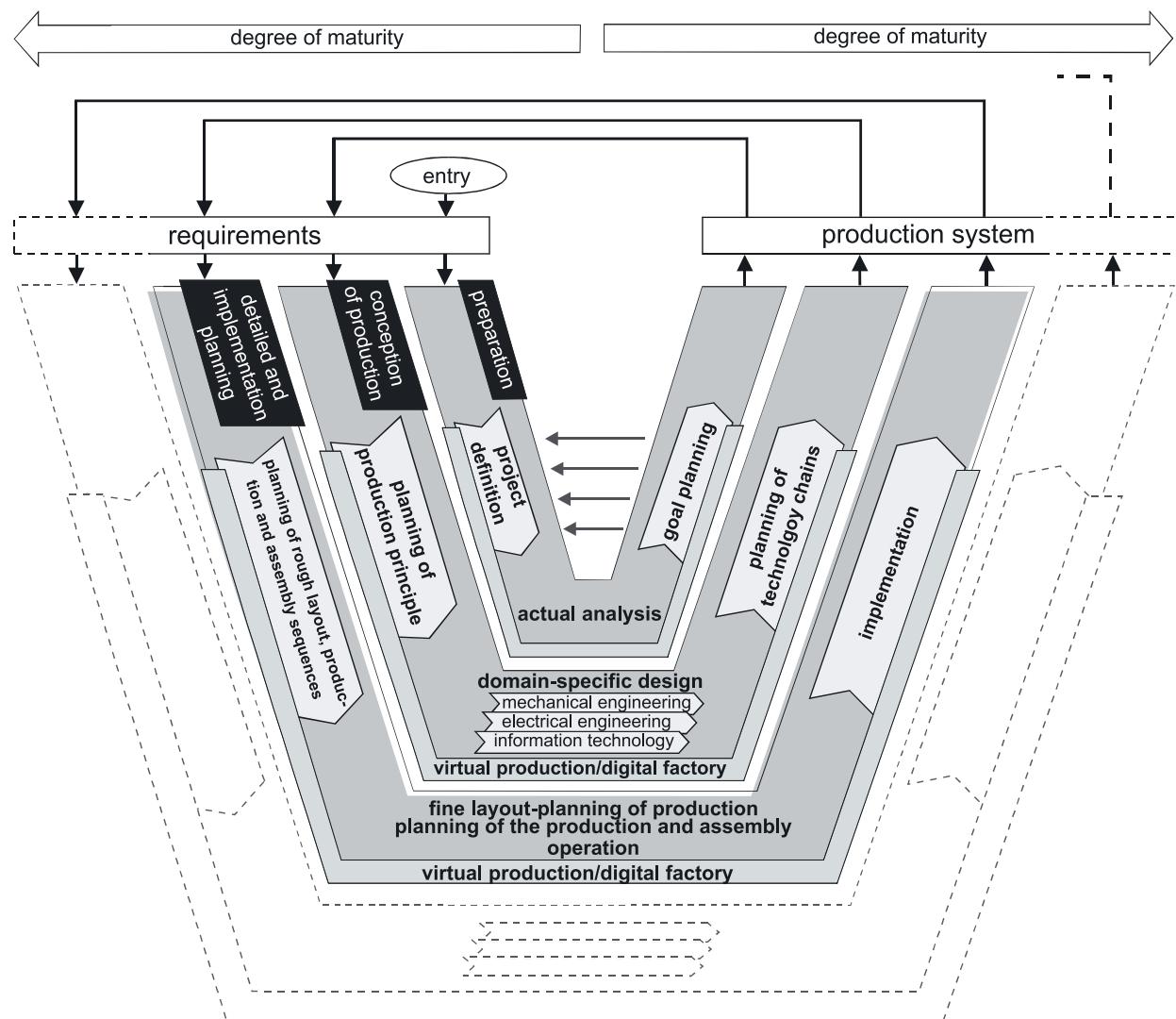


Fig. 3-7. Iterative procedure in the design of production systems for mechatronic products

Innerhalb eines V-Zyklus wird die zu lösende Gesamtaufgabe in Teilaufgaben unterteilt, konkretisiert und die Teillösungen im aufsteigenden Ast des „V“ wieder zur Lösung der Gesamtaufgabe zusammengeführt. Eine Konkretisierung des Produktionsystementwurfs erfolgt somit sowohl innerhalb der einzelnen Phasen sowie über die Phasen hinweg bis zur Ausführung der Planungen, mit der die Phase „Detail- und Ausführungsplanung“ abschließt. Unterstützt werden die Entwurfsaktivitäten in allen Phasen mit Hilfsmitteln der **Virtuellen Produktion/Digitalen Fabrik**¹⁷⁾, u.a. 3D-CAD-, Mehrkörper-

Within a V cycle, the overall task to be solved is subdivided into subtasks, concretized and the subtasks are brought together again in the rising branch of the "V" to solve the overall task. Concretizing the production system design consequently takes place both within the individual phases and over the phases up to the execution of the plans, which brings the "detailed and implementation planning" to a conclusion. The design activities are supported in all phases by auxiliary means of **virtual production/digital fabrication**¹⁷⁾, including 3D-CAD, multibody, FEM, material-flow simulation. The strength of simulation is

¹⁷⁾ Virtuelle Produktion/Digitale Fabrik: Bezeichnet den integrierten Prozess der Produktentstehung und Produktionsgestaltung vom Entwurf bis zur Serienfertigung. Ziel ist, die Fertigung mit allen Aspekten im Computer zu planen und zu simulieren, bevor sie errichtet wird. Auf Basis einer zentralen und durchgängigen Datenbasis werden Maschinen, Anlagen und Betriebsmittel in digitaler bzw. auch dreidimensionaler Form abgebildet und ihr dynamisches Verhalten mittels mehrskaliger und hierarchischer Simulation dargestellt [WB01].

¹⁷⁾ Virtual production/digital fabrication: Refers to the integrated process of product creation and production formation from design to mass production. The aim is to plan and simulate production with all aspects in a computer before it is set up. On the basis of the central and universal database, machines, plants and operating means are depicted in digital form or else three-dimensional form and their dynamic behavior is represented by means of multiscalar and hierarchical simulation [WB01].

per-, FEM-, Materialfluss-Simulation. Die Stärke der Simulation ist es, bereits vor der Realisierung von Planungsergebnissen die Leistungsfähigkeit der Lösungsalternativen festzustellen, zu vergleichen und zu optimieren. Eine domänenübergreifende enge Zusammenarbeit im Bereich des Produktionssystementwurfs ist insbesondere bis zur Festlegung der Produktionsprinzipien notwendig. Danach sind in den einzelnen Domänen die Technologieketten zu spezifizieren und auszugestalten.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die räumliche und funktionale Integration von Komponenten in mechatronischen Produkten einen integrativen Entwurf von Produkt und Produktionssystemen erfordert – kurz: Die Integration der Domänen muss auch das Produktionssystem einschließen.

3.2 Modellbasierter Systementwurf

Zur effizienten, rechnerbasierten Entwicklung von mechatronischen Systemen werden Abbildungen – so genannte **Modelle** – der Systeme im Rechner benötigt. Diese Modelle werden für alle Komponenten des zu betrachtenden Systems in Abhängigkeit vom Untersuchungsziel erstellt und berücksichtigen Elemente der involvierten Domänen. Die ganzheitliche Betrachtung auf Modellebene unterstützt die Entwickler beim Entwurf eines mechatronischen Systems.

Im Laufe des Systementwurfs entstehen verschiedene Modelle, die jeweils einen bestimmten Aspekt des Systems beschreiben. **Modellarten** sind beispielsweise Anforderungsmodelle zur Darstellung von Systemanforderungen oder Verhaltensmodelle, welche die Funktion abbilden. CAD-Beschreibungen sind ebenfalls Modelle, welche die Gestalt eines Systems enthalten. Einen besonderen Schwerpunkt bei der Modellbildung mechatronischer Systeme bilden die Verhaltensbeschreibungen, da mit ihnen der funktionale Zusammenhang domänenübergreifend erfasst und formuliert werden kann.

Die beteiligten Fachgebiete der Mechatronik haben verschiedene Darstellungsformen für Verhaltensmodelle entwickelt, z.B. das Blockschaltbild in der Regelungstechnik. In Anlehnung an die bekannten schriftlichen Darstellungen wurden mit zunehmendem Computereinsatz rechnerunterstützte Werkzeuge zur Modellbildung verfügbar; diese sind entsprechend der involvierten Domäne unterschiedlich ausgeprägt (vgl. Abschnitt 3.3).

Da die Gesamtfunktion eines mechatronischen Systems erst durch das Zusammenwirken der involvierten Fachdisziplinen erfüllt wird, besteht die Notwendigkeit, die Modelle der Teildisziplinen zusammen-

that the capability of the solution alternatives can be established, compared and optimized already before the realization of planning results. A cross-domain close cooperation in the area of production system design is necessary in particular until the production principles are stipulated. After that, the technology chains are to be specified and created in the individual domains.

To sum up, it can be stated that the spatial and functional integration of components in mechatronic products requires an integrative design of product and production systems – in short: Integration of the domains must also include the production system.

3.2 Model-based system design

For the efficient, computer-based development of mechatronic systems, **models** of the systems in a computer are required. These models are created for all components of the system under consideration, in dependence on the objective of the investigation, and take into consideration elements of the domains involved. Fully inclusive consideration at the model level supports the developers in the design of a mechatronic system.

In the course of system design, a wide variety of models respectively describing a specific aspect of the system are created. **Model types** are, for example, requirement models for representing system requirements or behavior models, which depict the function. CAD descriptions are likewise models which contain the form of a system. The behavior descriptions are particularly important in the case of modeling mechatronic systems, since with them the functional interrelationship can be captured and formulated in a cross-domain way.

The technical areas of mechatronics that are involved have developed various forms of representation for behavior models, for example the block diagram in control engineering. With increasing use of computers, computer-aided tools for modeling became available to mirror the known written representations; these tools are differently characterized in accordance with the domains involved (cf. Section 3.3).

Since the overall function of a mechatronic system is only satisfied by the interaction of the technical disciplines involved, there is the necessity to bring together the models of the subdisciplines. The **integra-**

zuführen. Die **Integration von Modellen** auf der Basis von mathematischen Beschreibungen ist eine flexible und gut handhabbare Vorgehensweise, da die Mathematik auf Grund ihrer Allgemeingültigkeit eine normierende Darstellung für unterschiedlichste Domänen bildet. Dabei ist jeweils die Frage zu klären, welche Informationen mit welcher Art mathematischer Gleichung innerhalb einer Domäne formulierbar sind und welche Korrelationen mit diesen Informationen domänenübergreifend bestehen.

Idealerweise bauen Modelle späterer Entwicklungsphasen auf Modellen früherer Phasen auf. Ausführbare Spezifikationen, die in frühen Entwicklungsphasen grob die Funktion eines Systems beschreiben, können beispielsweise für den Aufbau von detaillierteren Verhaltensmodellen genutzt werden. Verhaltensmodelle können Vorgaben für die geometrische Ausgestaltung oder auch für Softwarealgorithmen sein. Diese so genannte „Durchgängigkeit“ sollte sinnvollerweise über alle Entwicklungsphasen bis hin zum endgültigen System erhalten bleiben.

Das modellbasierte Vorgehen zum Entwurf mechatronischer Systeme bietet durch die Nutzung der Modellbildung und der rechnerunterstützten Analyse wichtige Zeit- und Kostenvorteile. Die Modellbildung benötigt zunächst mehr Zeit und verursacht Kosten, ermöglicht jedoch bezogen auf den gesamten Entwicklungsprozess zeit- und kostensparende Sekundäreffekte. Das Verhalten eines Systems oder einer Komponente ist bereits lange vor der Fertstellung des ersten Prototypen über realitätsnahe Simulationsmodelle überprüf- und analysierbar. So mit können Iterationen zur Absicherung der Produkteigenschaften bereits in einem virtuellen Entwicklungsstadium erfolgen; das Produkt verfügt über eine wesentlich höhere Produktreife, wenn der weiterhin notwendige Prototyp gebaut wird.

Wichtige Voraussetzung dieser Vorgehensweise ist, dass die simulierten Eigenschaften mit der Realität ausreichend übereinstimmen. Diese Überprüfung ist jedoch insbesondere bei Neukonstruktionen in den frühen Phasen nicht immer realisierbar. Die Anwendung der Modellbildung und Simulation erfordert deshalb eine gewisse kritische Grundhaltung und eine dauernde Überprüfung der Plausibilität der erzielten Untersuchungsergebnisse.

Das grundsätzliche **Vorgehen beim modellbasierten Systementwurf** gliedert sich in fünf Schritte (Bild 3-8):

tion of models on the basis of mathematical descriptions is a procedure which is flexible and easy to handle, since mathematics forms a standardizing representation for a wide variety of domains on account of its general applicability. To do so, it is necessary in each case to clarify the question as to which information can be formulated with which type of mathematical equation within a domain and which correlations with this information exist in a cross-domain way.

Ideally, models of later development phases are built up on models of earlier phases. Implementable specifications which in early development phases roughly describe the function of a system can be used for example for building up more detailed behavior models. Behavior models may be precepts for the geometrical configuration or else for software algorithms. It is appropriate for this so-called "universality" to be retained over all development phases up to the final system.

The model-based procedure for the design of mechatronic systems offers important advantages in terms of time and costs by the use of modeling and computer-aided analysis. Modeling initially needs more time and gives rise to costs, but it makes time- and cost-saving secondary effects possible in relation to the entire development process. The behavior of a system or a component can be checked and analyzed long before completion of the first prototype by means of realistic simulation models. Consequently, iterations can already take place in an early stage of development to assure the product properties; the product has a much greater product maturity when the still necessary prototype is built.

An important precondition for this procedure is that the simulated properties coincide adequately with reality. However, in particular in the case of new constructions, checking this cannot always be realized in the early phases. The use of modeling and simulation therefore requires a certain critical attitude and ongoing checking of the plausibility of the investigation results obtained.

The basic **procedure for model-based system design** is divided into five steps (Figure 3-8):

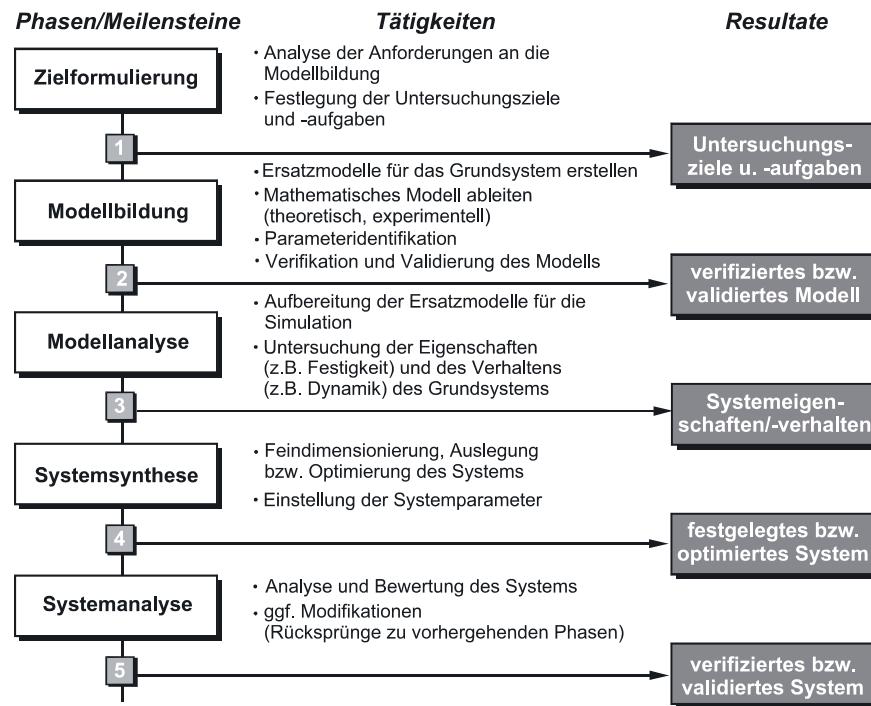


Bild 3-8. Vorgehen beim modellbasierten Systementwurf

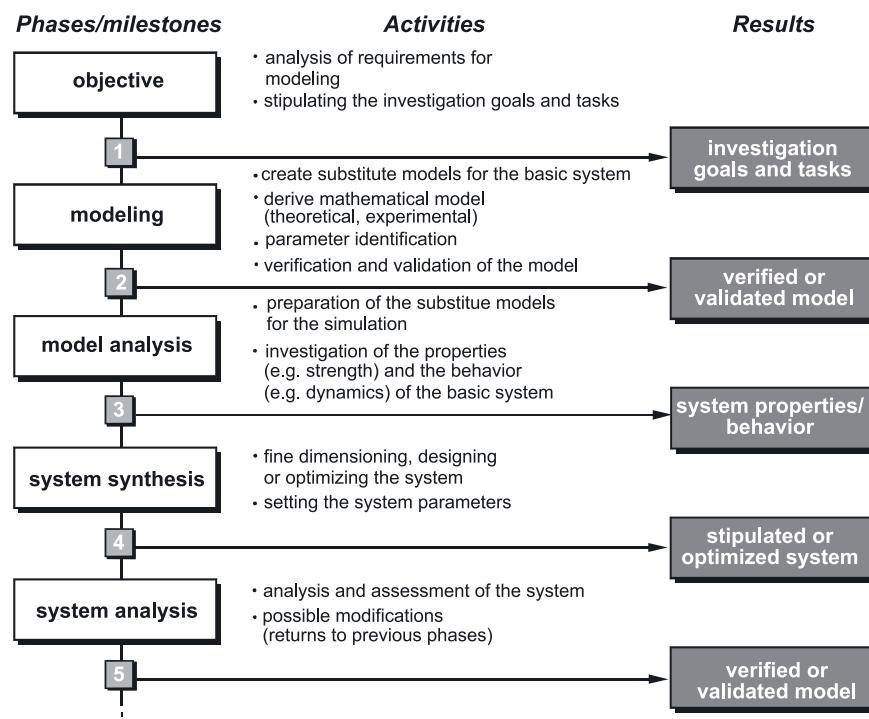


Fig. 3-8. Procedure for model-based system design

1. **Zielformulierung:** Zunächst sind Untersuchungsziele und -aufgaben festzulegen, um die geeigneten Methoden der Modellbildung auswählen zu können. Untersuchungsziele und -aufgaben sowie Gründe für die Modellbildung können u.a. sein [Ber01]:

1. **Objective:** Firstly, investigation goals and tasks are to be stipulated, to allow the suitable methods of modeling to be selected. The following may be among the investigation goals and tasks and reasons for modeling [Ber01]:

- Prinzipuntersuchungen an neu zu entwickelnden mechatronischen Systemen (Unterstützung des funktionsorientierten Entwurfs, Analyse erster Lösungskonzepte, Generierung von Vorgaben für den domänenspezifischen Entwurf)
 - zielgerichtete Reglerauslegung (lineare/nicht-lineare Analyse und Synthese zur Behandlung regelungstechnischer Aufgaben)
 - Analyse und Optimierung bestehender mechatronischer Systeme (Feinmodellierung zur Lösung bestehender Probleme bzw. zur zielgerichteten Verbesserung, z.B. Kosten oder Funktionalität)
 - Messeinrichtungen verursachen eine Rückwirkung auf das System und verfälschen die Messsignale (Gewicht und Wärmeleitung von Messeinrichtungen etc.).
 - Experimentelle Untersuchungen am System sind zu teuer, zu gefährlich oder nicht verantwortbar (z.B. Fahrversuche im physikalischen Grenzbereich, Crashversuche mit Personen) bzw. nur mit großem Aufwand zu erbringen (z.B. Kälte-/Hitzetests).
 - Experimentelle Untersuchungen dauern auf Grund der Systemzeitkonstanten zu lange (Werkstoffprüfungen, Verschleißuntersuchungen etc.).
 - Reduzierung des Prototypenaufwands durch vorausehende Simulationen (modellbasierte Integration der entwickelten Teilsysteme, Test des Zusammenwirkens der Systemkomponenten)
 - Hardware-in-the-Loop-Simulationen zur Funktionsüberprüfung (strukturierter Aufbau des neuen oder verbesserten Systems, modularer Systemtest unter reproduzierbaren Einsatzbedingungen)
2. **Modellbildung:** Die Qualität des Modells ist entscheidend für die Güte der Analyseergebnisse. Nur wenn das Modell das System realitätsnah beschreibt, kann die anschließende Modellanalyse auf die Wirklichkeit übertragbare Ergebnisse liefern. Das Vorgehen zur Modellbildung und die verschiedenen Modellabstraktionsebenen werden in Abschnitt 3.2.1 näher erläutert.
3. **Modellanalyse:** Auf Basis des Modells werden die Eigenschaften (z.B. Festigkeit mit Hilfe der FEM) und das Verhalten (z.B. Kinematik, Dynamik mit Hilfe der Simulation von Mehrkörpersystemen (MKS) [Hil83]) des Grundsystems untersucht (vgl. Abschnitt 3.2.2). Die Analyse liefert Erkenntnisse über das Systemverhalten für die nachfolgende Synthesephase.
- basic investigations carried out on mechatronic systems that are to be newly developed (support of the function-oriented design, analysis of first solution concepts, generation of setpoint selections for the domain-specific design)
 - targeted controller design (linear/nonlinear analysis and synthesis for the handling of control-engineering tasks)
 - analysis and optimization of existing mechatronic systems (fine modeling for solving existing problems or for targeted improvement, for example costs or functionality)
 - Measuring devices cause a reaction on the system and falsify the measuring signals (weight and heat conduction from measuring devices, etc.).
 - Experimental investigations carried out on the system are too expensive, too dangerous or irresponsible (for example driving tests at physical limits, crash tests with persons) or can only be performed with great effort (for example cold/heat tests).
 - Experimental investigations take too long on account of the system time constants (materials tests, investigations into wear, etc.).
 - reducing expenditure on prototypes by means of preceding simulations (model-based integration of the developed subsystems, testing of the interaction of the system components)
 - hardware-in-the-loop simulations for function checking (structured setup of the new or improved system, modular system test under reproducible operating conditions)
2. **Modeling:** The quality of the model is decisive for the quality of the analysis results. Only if the model realistically describes the system can the subsequent model analysis produce results which can be transferred to reality. The procedure for modeling and the various model abstraction levels are explained in more detail in Section 3.2.1.
3. **Model analysis:** On the basis of the model, the properties of the basic system are investigated (for example strength with the aid of FEM) and its behavior is investigated (kinematics, dynamics with the aid of the simulation of multibody systems (MBS) [Hil83]) (cf. Section 3.2.2). The analysis produces findings on the system behavior for the subsequent synthesis phase.

- 4. Systemsynthese:** In der Synthese werden die Simulations- und Berechnungsergebnisse der Modellanalyse auf das zu entwickelnde System übertragen. Wirkprinzipien und Lösungselemente werden feindimensioniert bzw. optimiert. Synthese und Optimierung sind ganzheitlich zu betrachten. Die Anforderungen an die Synthese ergeben sich aus der Modellanalyse. Falls es sich um einen kompletten oder teilweisen Neuentwurf des Systems handelt, wird der Entwickler in der Synthesephase die endgültigen Parameter des Systems festlegen. Die Ergebnisse der Analysephase werden konkret umgesetzt.
- 5. Systemanalyse:** Das festgelegte bzw. optimierte System wird nun von neuem analysiert und bewertet. Gegebenenfalls sind Rücksprünge zu vorhergehenden Schritten erforderlich. Dieses iterative Vorgehen ist um so effizienter, je schneller die Parameter des Gesamtsystems gegen eine optimale Lösung konvergieren. Die Auswahl des Modells ist herbei von großer Bedeutung.

3.2.1 Modellbildung

Die erforderliche Güte des Modells ist grundsätzlich abhängig von der zu betrachtenden Problemstellung. Daher sollte, bevor mit der Modellierung begonnen wird, Klarheit über die Entwicklungsaufgabe bestehen. Für Neuentwicklungen sind andere Modellierungsansätze zu wählen als bei der Weiterentwicklung bzw. Optimierung existierender Produkte. Je nach Fragestellung variiert die Modellierungstiefe in Hinblick auf die Berücksichtigung bestimmter physikalischer Effekte. So genügt in bestimmten Fällen die Modellierung eines aus mehreren Komponenten bestehenden mechanischen Systems (z.B. Kfz) als eine Punktmasse, während in anderen Fällen komplexe Mehrkörpermodelle oder auch Finite-Elemente-Modelle aufgebaut werden müssen. Für eine im Sinne der Mechatronik ganzheitliche Vorgehensweise ist die Verbindung verschiedener, domänenpezifischer Modelle mit angepassten Modellierungstiefen erforderlich, um Systeme domänenübergreifend und modellbasiert entwickeln und validieren zu können.

Das Vorgehen bei der Modellbildung kann für unterschiedliche Domänen der Mechatronik variieren. In der Domäne Softwaretechnik beispielsweise können – auf Basis einer durchgeföhrten Anforderungsanalyse – die Zusammenhänge zwischen Anforderungen für das System und die Subsysteme strukturiert und in einer Funktionsbeschreibung dargestellt werden. Dabei wird eine Beschreibung der Struktur und des zeitlichen Verhaltens benötigt. Die Strukturbeschreibung kann beispielsweise mit der semiformalen Funktionsbeschreibung nach Cartronic [BSD97] erfolgen.

- 4. System synthesis:** In the synthesis, the simulation and calculation results of the model analysis are transferred to the system to be developed. Operating principles and solution elements are finely dimensioned or optimized. Synthesis and optimization are to be considered in their entirety. The requirements for the synthesis arise from the model analysis. If a complete or partial new design of the system is concerned, the developer will stipulate the final parameters of the system in the synthesis phase. The results of the analysis phase are implemented in a concrete form.
- 5. System analysis:** The stipulated or optimized system is then analyzed and assessed once again. It may be required to return to previous steps. This iterative procedure is all the more efficient the quicker the parameters of the overall system converge toward an optimum solution. The selection of the model is of great significance here.

3.2.1 Modeling

The required quality of the model is fundamentally dependent on the problem to be considered. Therefore, before modeling is commenced, there should be clarity concerning the development task. For new developments, other modeling approaches are to be chosen than in the case of the further development or optimization of existing products. Depending on the question to be answered, the depth of modeling varies with regard to the consideration for specific physical effects. For instance, in certain cases the modeling of a mechanical system comprising a number of components (for example motor vehicle) as a point mass is adequate, while in other cases complex multibody models or else finite-element models have to be constructed. For a fully inclusive procedure in terms of mechatronics, the combination of various, domain-specific models with adapted modeling depths is required to allow systems to be developed and validated in a cross-domain and model-based manner.

The procedure for modeling may vary for different domains of mechatronics. In the domain of software technology, for example, the interrelationships between requirements for the system and the subsystems may be structured and represented in a functional description – on the basis of a requirements analysis that has been carried out. In this case, a description of the structure and of the behavior over time is required. The structural description may take place for example with the semi-formal functional description according to Cartronic [BSD97].

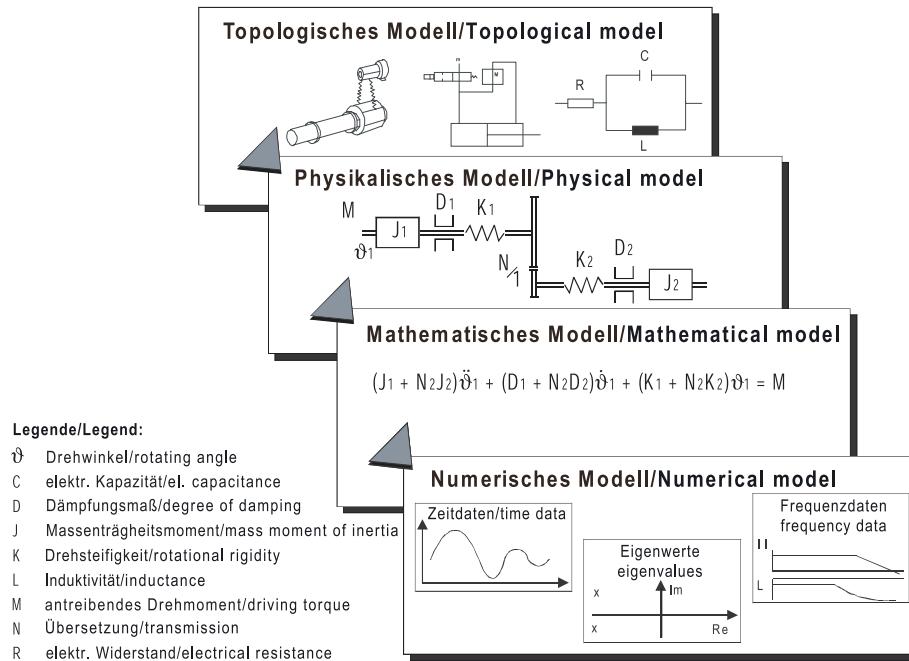


Bild 3-9. Modellabstraktionsebenen im Modellbildungsprozess

Um das Verhalten mit der geforderten Genauigkeit zu beschreiben, werden Ersatzmodelle des Systems auf verschiedenen **Abstraktionsebenen** gebildet (Bild 3-9):

Topologisches Modell: Zunächst ist die Topologie des zu simulierenden Systems zu modellieren. Sie beschreibt die Anordnung und Verknüpfung funktionserfüllender Elemente (z.B. Lösungselemente, Baugruppen oder Module). Ein Element repräsentiert im Allgemeinen die drei Basisfunktionen kinematische Funktion (z.B. Gelenkzahl, Armlänge und Gelenkpositionen eines Roboters), dynamische Funktion (z.B. Bewegung von Massen unter Einwirkung von Kräften) und mechatronische Funktion (z.B. Regelung, Überwachung, Bahnplanung etc.). Die Topologie mechanischer Elemente beispielsweise bestimmt im Wesentlichen die Kinematik des mechatronischen Systems; deshalb müssen diese Elemente vollständig im Simulationsmodell berücksichtigt werden. Anders stellt sich die Situation z.B. bei hydraulischen Elementen dar. Hier können bereits auf topologischer Ebene sinnvolle Vereinfachungen getroffen werden, indem Hydraulikbauteile durch stark vereinfachte Annahmen ersetzt werden. Das Vorgehen hängt jedoch stark von der zu Grunde liegenden Problemstellung und von der Zielsetzung der Simulation ab. Der funktionsorientierte Entwurf, das heißt die abstrakte, lösungsneutrale Modellierung einer Entwurfsaufgabe als Gesamtfunktion und die Aufgliederung in Teilfunktionen, ist ein wichtiges Instrument, um systematisch von der Produktfunktion zu einer geeigneten Topologie zu gelangen (vgl. Abschnitt 3.1.3).

Fig. 3-9. Model abstraction levels in the modeling process

In order to describe the behavior with the required accuracy, substitute models of the system are formed on various **abstraction levels** (Figure 3-9):

Topological model: Firstly, the topology of the system to be simulated is to be modeled. It describes the arrangement and interlinking of function-performing elements (for example solution elements, subassemblies or modules). An element generally represents the three basic functions, kinematic function (for example number of joints, length of arm and positions of joints of a robot), dynamic function (for example movement of masses under the effect of forces) and mechatronic function (for example control, monitoring, path planning, etc.). The topology of mechanical elements for example essentially determines the kinematics of the mechatronic system; therefore, these elements must be completely taken into consideration in the simulation model. The situation is different for example in the case of hydraulic elements. Here, it is already possible at the topological level to make meaningful simplifications, in that hydraulic components are replaced by greatly simplified assumptions. However, the procedure strongly depends on the underlying problem being addressed and on the objective of the simulation. The function-oriented design, i.e. the abstract, solution-neutral modeling of a design task as an overall function and the dividing up into subfunctions is an important instrument to arrive systematically at a suitable topology from the product function (cf. Section 3.1.3).

Physikalisches Modell: Ausgehend von der Topologiebeschreibung wird ein physikalisches Modell erstellt. Diese Darstellung ist durch systemangepasste Größen wie beispielsweise Massen und Längen bei mechanischen oder Widerstände und Induktivitäten bei elektrischen Systemen definiert. Bei den mechanischen Elementen werden dabei z.B. Anzahl und Verbindungen von Starrkörpern, Definition von flexiblen Körpern, Lagerreibung und -spiel oder Massenverteilungen festgelegt. Auf hydraulischer Seite umfasst das physikalische Modell z.B. Bauelemente, etwa hydraulische Kammern und Ventile, aber auch die Abbildung physikalischer Effekte wie Leckagen, Reibungen oder Hysteresen. Das physikalische Modell beschreibt die Systemeigenschaften in domänenspezifischer Form.

Mathematisches Modell: Das mathematische Modell bildet die Grundlage zur Verhaltensbeschreibung des Systems. Hierzu wird das physikalische Modell in eine abstrakte, systemunabhängige Darstellung überführt und die oben beschriebenen physikalischen Eigenschaften des Modells werden mit Hilfe von mathematischen Beschreibungen formuliert. Unterschiede in der Modellierungstiefe können sich hier beispielsweise durch detailgetreuere hydraulische Leitungsmodelle, detailliertere Reibungsmodelle, durch höherwertige Biegungsansätze bei der Berechnung elastischer Strukturen oder durch Berücksichtigung von Nichtlinearitäten anstelle von Linearisierungen ergeben. Das mathematische Modell integriert die unterschiedlichen domänenspezifischen Modelldarstellungen.

Numerisches Modell: Das mathematische Modell wird nun so aufbereitet, dass es algorithmisch behandelt und einem rechnerunterstützten Verfahren z.B. zur Simulation zugeführt werden kann. Das numerische Modell hängt sehr stark von der verwirklichten Modellierungstiefe, vom verwendeten Lösungsverfahren und vom mathematischen Modell (insbesondere im Hinblick auf Nichtlinearitäten) ab. Das numerische Modell wird durch konkrete Zahlenwerte belegt (parametrisiert). Diese Zahlenwerte werden gegebenenfalls durch eine Identifikation des realen Systems (falls vorhanden) ermittelt (vgl. Vorgehen bei der Modellbildung).

Bild 3-10 zeigt die typischerweise zu durchlaufenden **Vorgehensschritte bei der Modellbildung**, die unter Umständen iterativ wiederholt werden müssen.

Planen und Klären der Aufgabe: Auf der Basis der Zielformulierung wird ein geeignetes Modell erarbeitet. Dazu müssen die konkreten Anforderungen an das Modell der gewünschten Abstraktionsebene festgelegt werden. Die allgemeinste Anforderung ist die hinreichende Abbildung von Eigenschaften des realen Systems als Modell.

Physical model: Starting from the topological description, a physical model is created. This representation is defined by system-adapted variables, such as for example masses and lengths in the case of mechanical systems or resistances and inductances in the case of electrical systems. In the case of the mechanical elements, the number and connections of rigid bodies, the definition of flexible bodies, bearing friction and clearance or mass distributions are stipulated for example. On the hydraulic side, the physical model comprises, for example, components such as hydraulic chambers and valves, but also the replication of physical effects, such as leakages, frictions or hystereses. The physical model describes the system properties in a domain-specific form.

Mathematical model: The mathematical model forms the basis of the behavioral description of the system. For this purpose, the physical model is transferred into an abstract, system-independent representation and the physical properties of the model described above are formulated with the aid of mathematical descriptions. Differences in the depth of modeling may arise here for example due to more faithfully detailed hydraulic line models, more detailed friction models, due to more sophisticated bending evaluations in the calculation of elastic structures or due to consideration of nonlinearities instead of linearizations. The mathematical model integrates the different domain-specific model representations.

Numerical model: The mathematical model is then prepared in such a way that it can be algorithmically handled and subjected to a computer-aided process, for example simulation. The numerical model depends very strongly on the depth of modeling realized, on the solving method used and on the mathematical model (in particular with regard to nonlinearities). The numerical model is provided with concrete numerical values (parameterized). These numerical values are possibly determined by an identification of the real system (if present) (cf. procedure for modeling).

Figure 3-10 shows the **procedural steps for modeling** that are typically to be taken and under some circumstances must be iteratively repeated.

Planning and clarifying the task: On the basis of the objective, a suitable model is devised. For this purpose, the concrete requirements for the model of the desired abstraction level must be stipulated. The most general requirement is the adequate replication of properties of the real system as the model.

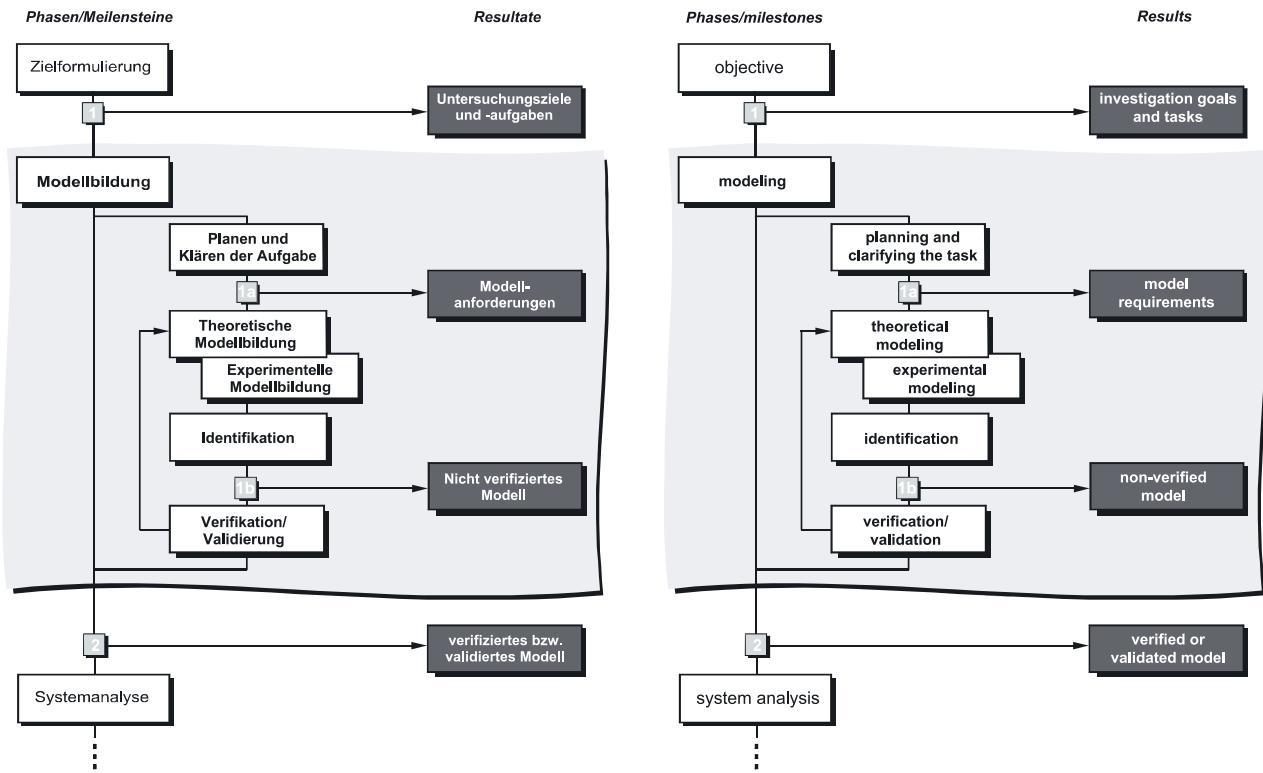


Bild 3-10. Vorgehen bei der Modellbildung

Fig. 3-10. Procedure for modeling

Theoretische bzw. experimentelle Modellbildung: Ziel dieser Phase sind mathematische Ersatzmodelle des Systems, die das Verhalten mit ausreichender Genauigkeit beschreiben. Ausgehend von der Topologie wird das physikalische Modell in eine abstrakte, systemunabhängige Darstellung überführt (vgl. obenstehende Beschreibung der Abstraktionsebenen; Bild 3-9). Hierfür gibt es im Wesentlichen zwei Wege:

- 1) Theoretische Modellbildung: Die Systemgleichungen werden durch Anwenden der physikalischen Grundgesetze abgeleitet, wobei die quantitativen Informationen aus der Geometrie des betreffenden Gebildes, aus Stoffkonstanten und empirischen Zusammenhängen gewonnen werden.
- 2) Experimentelle Modellbildung: Aus Messungen an dem zu beschreibenden System wird rückwärts auf die Systemstruktur(-gleichungen) geschlossen. Auch die Kombination beider Wege ist gebräuchlich, um z.B. das Verhalten des zunächst theoretisch aufgestellten Modells mit Messungen am realen System zu vergleichen bzw. um noch unbekannte Parameter durch Abgleich mit dem realen System zu bestimmen. Dies geschieht, sofern möglich, durch experimentelle Analyse [Fö194]. Die meisten Methoden beruhen auf der

Theoretical or experimental modeling: The aim of this phase is to obtain mathematical substitute models of the system which describe the behavior with adequate accuracy. Starting from the topology, the physical model is transferred into an abstract, system-independent representation (cf. previous description of the abstraction levels; Figure 3-9). There are essentially two ways of doing this:

- 1) Theoretical modeling: The system equations are derived by applying the physical principles, the quantitative information being obtained from the geometry of the formation concerned, from material constants and empirical interrelationships.
- 2) Experimental modeling: From measurements on the system to be described, ex post facto conclusions are drawn with respect to the system structure (equations). It is also common to combine the two ways, for example to compare the behavior of the initially theoretically set up model with measurements on the real system or to determine still unknown parameters by adjustment with the real system. This takes place where possible by experimental analysis [Fö194]. Most methods are based on the stimulation of the technical system with an

Anregung des technischen Systems mit einer angepassten Zeitfunktion und der Analyse der Zeitantwort. Die Modellparameter werden daraufhin so angepasst, dass die Antwort des Modells der Antwort des realen Systems entspricht. Die am häufigsten verwendete Anregungsfunktion ist die Sprung-Funktion.

Identifikation: Im Falle der Weiterentwicklung eines vorhandenen Produkts werden gemessene technische Werte des realen Systems auf das Modell übertragen. Bei einer Neuentwicklung werden die Parameter entsprechend den Anforderungen festgelegt. Resultat der Phase bildet ein durch konkrete Zahlenwerte belegtes Modell, das jedoch noch nicht verifiziert ist.

Verifikation/Validierung: Die Verifikation ermittelt, ob ein Modell grundsätzlich plausibel und richtig ist und ob es den eingangs aufgestellten Anforderungen genügt. Eine Aussage, ob das erstellte Modell ein reales System hinreichend beschreibt und damit auch eventuell nicht spezifizierte Anforderungen erfüllt, liefert die Validierung (siehe auch in „Eigenschaftsabsicherung“ Abschnitt 3.1.3). Für die Neuentwicklung bietet sich an dieser Stelle eine Plausibilitätsprüfung an, die ermittelt, ob das Modell einem realen System entsprechen kann. Dieser Vorgang erfordert in der Regel ein erhebliches Erfahrungswissen über realistische technische Größen bzw. physikalisches Verhalten. Genügt das Modell den vorgegebenen Anforderungen (Genauigkeit, hinreichende Abbildung der Realität, Modellierungstiefe etc.), ist der Modellbildungsprozess abgeschlossen. Das nun verifizierte bzw. validierte Modell kann anschließend in der Modellanalyse untersucht werden. Werden die Anforderungen nicht erfüllt, so wird zur theoretischen bzw. experimentellen Modellbildung zurückgekehrt und das Modell verbessert.

3.2.2 Modellanalyse

Die Modellanalyse dient allgemein zur **Ermittlung von Eigenschaften** für ein vorgegebenes System. Dieses System kann real vorhanden sein oder als Modell vorliegen. In vielen Fällen ist ein reales System vorhanden, aus dem ein Modell abgeleitet werden kann. Zwei Zielrichtungen der Modellanalyse können unterschieden werden: die **Analyse zur Feststellung des Ist-Zustands** und die **Analyse des möglichen Verhaltens**. In beiden Fällen werden Kenntnisse über das System ermittelt (Dynamik, Festigkeit etc.). Die Fragestellungen, welche an die Analyse gerichtet werden, bestimmen das Vorgehen und die Werkzeuge, mit denen das System analysiert wird. Auch eine Analyse an realen Modellen ist üblich, falls das rechnerunterstützte Modell zu komplex oder beispielsweise die Umwelt nicht oder nur

adapted time function and the analysis of the time response. The model parameters are then adapted in such a way that the response of the model corresponds to the response of the real system. The stimulation function used most frequently is the jump function.

Identification: In the case of the further development of an existing product, measured technical values of the real system are transferred to the model. In the case of a new development, the parameters are fixed in a way corresponding to the requirements. The result of the phase forms a model provided with concrete numerical values, which however is not yet verified.

Verification/validation: The verification determines whether in principle a model is plausible and correct and whether it satisfies the requirements imposed at the beginning. A statement as to whether the model created adequately describes a real system, and consequently also satisfies possibly not specified requirements, is provided by the validation (see also "Assurance of properties" in Section 3.1.3). For the new development, it is appropriate at this point to perform a plausibility check, which determines whether the model can correspond to a real system. This procedure generally requires considerable empirical knowledge of realistic technical variables or physical behavior. If the model satisfies the prescribed requirements (accuracy, adequate replication of reality, depth of modeling, etc.), the modeling process is concluded. The now verified or validated model can subsequently be investigated in the model analysis. If the requirements are not satisfied, a return is made to the theoretical or experimental modeling and the model is improved.

3.2.2 Model analysis

The model analysis generally serves for the **determination of properties** for a prescribed system. The system may exist in reality or as a model. In many cases there is a real system from which a model can be derived. A distinction can be made between two purposes for model analysis: **analysis for establishing the actual state** and **analysis of possible behavior**. In both cases, knowledge of the system is determined (dynamics, strength, etc.). The questions which are directed at the analysis determine the procedure and the tools with which the system is analyzed. An analysis on real models is also customary if the computer-aided model is too complex or, for example, the environment cannot be mathematically or physically reproduced, or only with difficulty. This applies in particular in the case of strongly nonlinear

schwer mathematisch bzw. physikalisch zu erfassen ist. Dies gilt im Besonderen bei stark nichtlinearem oder chaotischem Verhalten. Als Beispiel für solche Analysen sei hier das dynamische Verhalten von Schiffen bei starkem Wellengang genannt, das in einem künstlichen Wellenkanal mit einem maßstäblichen Modell untersucht wird. Durch die Entwicklung der Rechentechnik und der Analysewerkzeuge ist aber abzusehen, dass Untersuchungen an realen Modellen zunehmend durch Untersuchungen an rechnergestützten Modellen verdrängt werden.

Abgesehen von diesen speziellen Fällen dient die Feststellung des Ist-Zustands fast immer zum Aufbau bzw. der Parametrisierung von abstrakten rechnergestützten Modellen. In diesem Fall ist die Modellanalyse ein Teil des Modellbildungsprozesses [Sch85].

Die Analyse des Modells eines Systems soll Aussagen über das Systemverhalten liefern. Mit einem Modell können Systemzustände analysiert werden, in die das reale System nicht gebracht werden kann oder darf. Beispielsweise kann mit einem FEM-Modell auf eine zerstörende Festigkeitsuntersuchung verzichtet werden; das Schwingverhalten einer Windkraftanlage bei Sturm kann bestenfalls mit großem Aufwand untersucht werden. Die Modellanalyse ist hier ein Verfahren, das auf der Modellbildung aufbaut und das Modell als Hilfsmittel der Analyse benutzt.

Der konkrete **Ablauf eines modellbasierten Systementwurfs** kann folgendermaßen aussehen: Für ein vorhandenes technisches System (z.B. eine Werkzeugmaschine) soll eine Regelung entworfen werden. Zunächst wird auf Basis der vorhandenen Geometriemodelldaten (im Allgemeinen CAD) ein Mehrkörpersystemmodell aufgebaut (Modellbildung). Dieses abstrakte Modell wird anschließend mit dem realen System verglichen. Die freien Parameter des Modells müssen ermittelt bzw. eingestellt werden (Identifikation). Dies geschieht durch Messungen am realen System. Weitere Verfahren zur Ermittlung des Systemverhaltens schließen sich an, beispielsweise die Modalanalyse. Auch soll die Analyse ermitteln, welches Modell die konkrete Fragestellung hinreichend gut beschreibt (Modellanalyse). Für die Verbesserung der Dynamik eines Fahrzeugaufbaus müssen unter Umständen nur die Moden modelliert werden, die im relevanten Frequenzbereich liegen.

Für das parametrisierte Modell kann nun eine Regelung entwickelt werden (Systemsynthese). Die Struktur dieser Regelung ergibt sich im Wesentlichen aus der Struktur des Modells (bzw. aus der Struktur des Systems, aus dem das Modell abgeleitet wurde) und seines Übertragungsverhaltens. Das geregelte Gesamtsystem wird wiederum analysiert, z.B. Fre-

or chaotic behavior. An example of such analyses that may be cited is the dynamic behavior of ships in heavy seas, which is investigated with a scale model in an artificial wave tank. However, it is evident from the development of computing technology and analysis tools that investigations on real models will increasingly be replaced by investigations on computer-aided models.

Apart from these special cases, establishing the actual state almost always serves for setting up or parameterizing abstract computer-aided models. In this case, the model analysis is part of the modeling process [Sch85].

The analysis of the model of a system is intended to provide statements about the system behavior. With a model it is possible to analyze system states into which the real system cannot or must not be brought. For example, with an FEM model it is possible to dispense with an investigation of ultimate strength; the vibrational behavior of a wind power generating plant in a storm can at best be investigated with great effort. Model analysis is a method here which is based on modeling and uses the model as an auxiliary means of analysis.

The actual **sequence of a model-based system design** may look as follows: A control system is to be designed for an existing technical system (for example a machine tool). Firstly, a multibody system model is set up on the basis of the existing geometry model data (generally CAD) (modeling). This abstract model is subsequently compared with the real system. The free parameters of the model must be determined or set (identification). This takes place by measurements on the real system. Further methods of determining the system behavior follow, for example modal analysis. The analysis is also intended to determine which model describes the actual question adequately well (model analysis). To improve the dynamics of a vehicle construction, under some circumstances only the modes which are in the relevant frequency range have to be modeled.

For the parameterized model, a control system can then be developed (system synthesis). The structure of this control system essentially arises from the structure of the model (or from the structure of the system from which the model was derived) and its transmission behavior. The overall controlled system is in turn analyzed, for example frequency analysis,

quenzganganalyse, Eigenwertberechnung, Simulation etc. (Systemanalyse). Die Ergebnisse dieser Analysephase dienen zur Optimierung des neu entworfenen geregelten Gesamtsystems.

3.3 Werkzeuge

Die Entwicklung mechatronischer Systeme erfordert den Einsatz einer Vielzahl von Methoden. Der Methodeneinsatz wird durch IT-Werkzeuge unterstützt. Ziel einer integrierten Entwicklung ist es, den Entwurfsprozess möglichst durchgängig rechnerunterstützt ablaufen zu lassen [EM00; KA01]. Hierbei sind vier verschiedene Ebenen der Integration zu unterscheiden (s.u. Textkasten „KOMFORCE-Referenzmodell“).

Beispiele für die modelltechnische Integration sind VHDL-AMS¹⁸⁾ und MechaSTEP¹⁹⁾. MechaSTEP basiert auf der STEP²⁰⁾-Umgebung und liefert ein neutrales Datenformat für den Datenaustausch von Systemen der Domänen Fluidtechnik, Mechanik, Elektrotechnik und Regelungstechnik. Die prototypische Anbindung von zwei Simulationsprogrammen aus der Mehrkörpersimulation ist bereits erfolgreich realisiert worden; vereinzelte Implementierungen existieren. Eine der zukünftigen Herausforderungen liegt darin, die neu entwickelten Modellansätze in internationale Normungsgremien einzubringen [DK00]. Eine erste Normierung als Publicly Available Specification (PAS 1013) ist bereits erfolgt.

Einen relativ neuen fachübergreifenden Ansatz stellt Modelica²¹⁾ dar. Die objektorientierte Sprache Modelica ist eine Weiterentwicklung der Sprache Dymola²²⁾ mit Konzepten anderer interdisziplinärer Beschreibungssprachen. Sie ermöglicht die dynamische Simulation multidisziplinärer Systeme. Die Objektorientierung bietet ferner die Möglichkeit, Modellbibliotheken als Basis für die Systemsimulation aufzubauen und zu nutzen.

Die für den Entwurf mechatronischer Systeme gebräuchlichen Werkzeuge lassen sich in Klassen gliedern. Die einzelnen Werkzeugklassen werden im Folgenden beschrieben.

¹⁸⁾ VHDL: Hardwarebeschreibungssprache, erweitert um Sprachmittel zur Definition analoger und diskreter Bauelemente (VHDL-AMS), zum standardisierten Austausch zwischen Simulationsumgebungen unterschiedlicher Domänen (ISO 1076.1 Proposal)

¹⁹⁾ MechaSTEP: STEP – Datenmodelle zur Simulation mechatronischer Systeme (PAS 1013)

²⁰⁾ STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data): Datenmodell zur einheitlichen Beschreibung von Produktdaten (ISO 10 303)

²¹⁾ Modelica: objektorientierte Sprache zur Modellbildung multidisziplinärer Systeme, <http://www.modelica.org>

²²⁾ Dymola: Beschreibungssprache zur Modellbildung kontinuierlicher dynamischer Systeme

eigenvalue calculation, simulation, etc. (system analysis). The results of this analysis phase serve for optimizing the newly designed overall controlled system.

3.3 Tools

The development of mechatronic systems requires the use of a large number of methods. The use of methods is supported by IT tools. The aim of an integrated development is to allow the design process to proceed as far as possible in a computer-aided manner throughout [EM00; KA01]. In this case, a distinction is to be made between four different levels of integration (cf. KOMFORCE reference model graphic).

Examples of model-technical integration are VHDL-AMS¹⁸⁾ and MechaSTEP¹⁹⁾. MechaSTEP is based on the STEP²⁰⁾ environment and produces a neutral data format for the data exchange of systems of the domains of fluid technology, mechanics, electrical engineering and control engineering. The prototypical linking of two simulation programs from multibody simulation has already been successfully realized; instances of implementation exist. One of the future challenges is to get international standardization bodies to adopt the newly developed approaches to modeling [DK00]. There has already been a first standardization as a Publicly Available Specification (PAS 1013).

Modelica²¹⁾ represents a relatively new, universal approach. The object-oriented language Modelica is a further development of the language Dymola²²⁾ with concepts of other interdisciplinary descriptive languages. It makes possible the dynamic simulation of multidisciplinary systems. The object orientation offers the possibility, furthermore, of setting up and using model libraries as a basis for system simulation.

The customary tools for the design of mechatronic systems can be divided into classes. The individual tool classes are described below.

¹⁸⁾ VHDL: hardware descriptive language, extended by language means for the definition of analog and discrete components (VHDL-AMS), for the standardized exchange between simulation environments of different domains (ISO 1076.1 Proposal)

¹⁹⁾ MechaSTEP: STEP data models for the simulation of mechatronic systems (PAS 1013)

²⁰⁾ STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data): data models for the consistent description of product data (ISO 10 303)

²¹⁾ Modelica: object-oriented language for the modeling of multidisciplinary systems, <http://www.modelica.org>

²²⁾ Dymola: descriptive language for the modeling of continuous dynamic systems

Integrationsebenen nach dem KOMFORCE-Referenzmodell *)

Die Initiative KOMFORCE (Kommunikations- und Forschungskreis für Integrationstechnologien in Computer Aided Design und Engineering) hat zum Ziel, die für eine spezifische Produktentwicklung relevanten IT-Werkzeuge zu einem integrierten Entwicklungsarbeitsplatz zusammenzuführen. Die Integration erfolgt auf vier Ebenen:

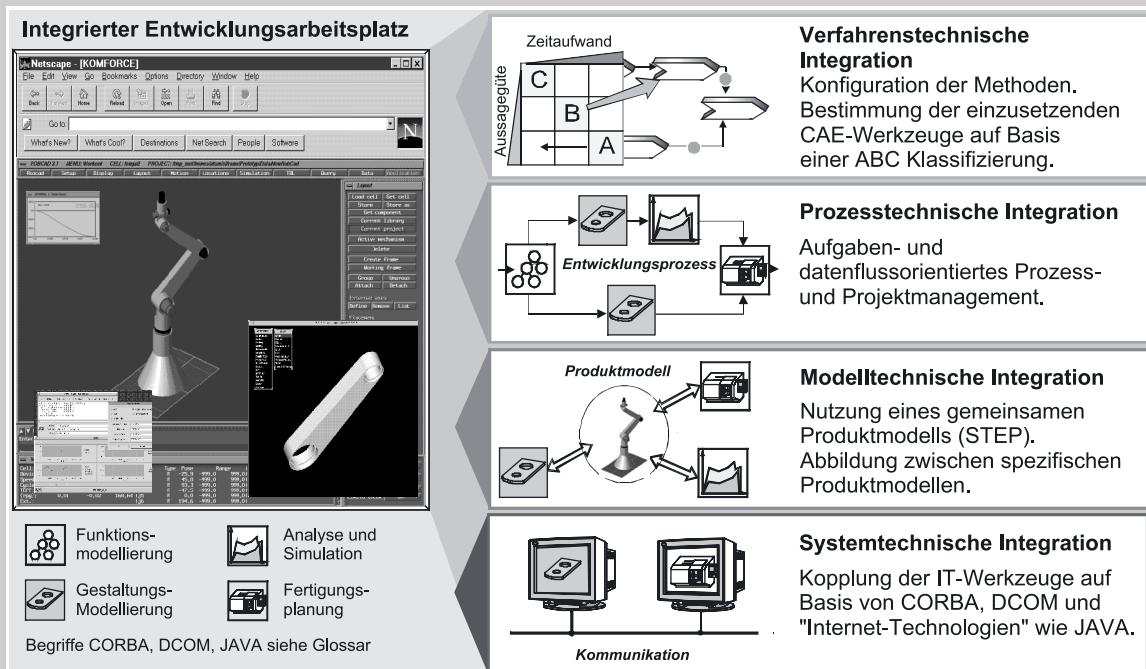
Verfahrenstechnische Ebene: Auf dieser Ebene werden die Methoden und Werkzeuge ausgewählt, die für eine spezifische Produktentwicklung zum Einsatz kommen sollen. Die einzusetzenden Methoden werden auf der Basis von Aussagegüte und Zeitaufwand bestimmt. Dazu bietet sich eine ABC-Klassifizierung an. Danach werden die entsprechenden CAE-Werkzeuge ausgewählt.

Prozesstechnische Ebene: Auf der prozesstechnischen Ebene wird der aktuelle Stand des Entwick-

lungsvorhabens analysiert, die Definition der Aufgabenpakete unterstützt und deren Durchführung kontrolliert. Ein Bestandteil dieser Ebene ist das Prozessmanagement. Die Prozessmanagementkomponente plant/steuert den Einsatz der integrierten Werkzeuge.

Modelltechnische Ebene: Damit CAE-Werkzeuge untereinander Informationen austauschen und kooperieren können, müssen sie das gleiche konzeptionelle Verständnis haben. Ziel der modelltechnischen Integration ist es, einen für den Anwender transparenten Umgang mit verschiedenen Produktmodellrepräsentationen zu schaffen.

Systemtechnische **) Ebene: Auf dieser Ebene wird ein sicherer und konsistenter Informationsaustausch der integrierten CAE-Werkzeuge realisiert. Dafür muss ein gemeinsames Kommunikationsmedium existieren, das die Kommunikation des Gesamtsystems gewährleistet.



Quelle: [GGK99]

*) Das Referenzmodell entstand im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Innovative rechnerunterstützte Konstruktionsprozesse: Integration von Gestaltung und Berechnung“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

**) Mit Systemen sind hier IT-Systeme und nicht mechatronische Systeme im Sinne der Richtlinie gemeint.

Integration levels in accordance with the KOMFORCE reference model*)

The KOMFORCE (Kommunikations- und Forschungskreis für Integrationstechnologien in Computer Aided Design and Engineering [communication and research group for integration technologies in computer aided design and engineering]) initiative has the aim of bringing together the IT tools relevant for a specific product development to form an integrated development workplace. The integration takes place on four levels:

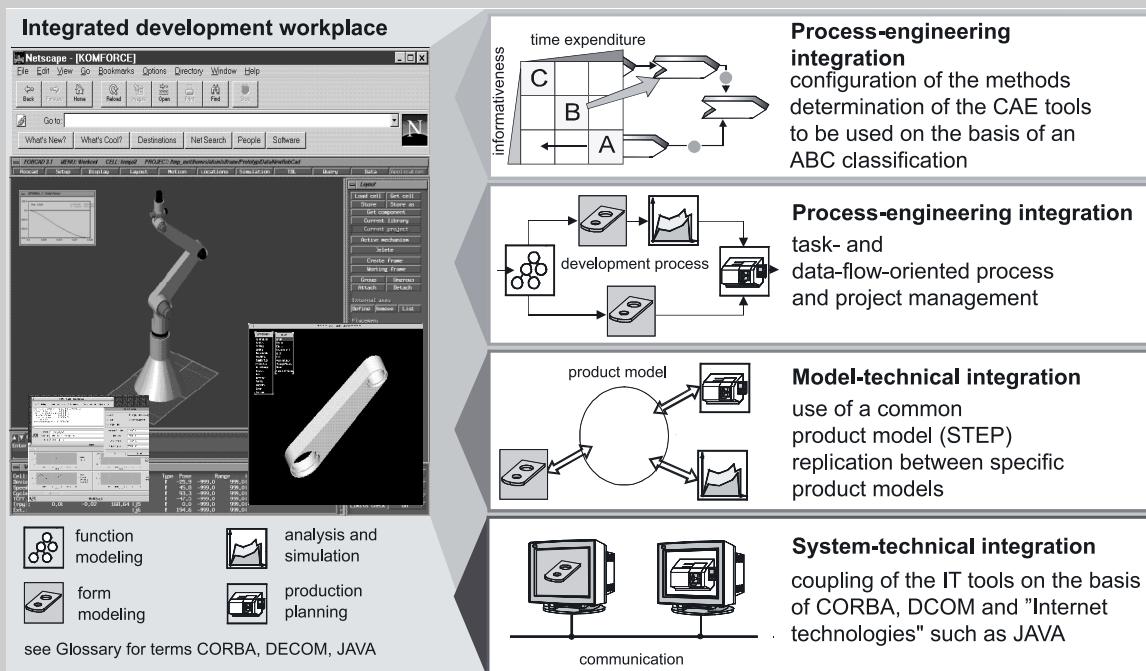
Method-technical level: On this level, the methods and tools which are to be used for a specific product development are selected. The methods to be used are determined on the basis of informativeness and time expenditure. An ABC classification is appropriate for this. The corresponding CAE tools are selected on this basis.

Process-technical level: On the process-technical

level, the current state of the development project is analyzed, the definition of the task packages is supported and their implementation is monitored. One element of this level is process management. The process management component plans/controls the use of the integrated tools.

Model-technical level: In order that CAE tools can exchange information and cooperate with one another, they must have the same conceptual understanding. The aim of model-technical integration is to create an environment with various product model representations that is transparent for the user.

System-technical) level:** On this level, a reliable and consistent information exchange of the integrated CAE tools is realized. For this purpose, a common communication medium which ensures the communication of the overall system must exist.



Source: [GGK99]

*) The reference model originated from the priority programme "Innovative rechnerunterstützte Konstruktionsprozesse: Integration von Gestaltung und Berechnung" [innovative computer-aided construction processes: integration of creation and calculation] of the Deutsche Forschungsgemeinschaft [German research society].

**) What is meant here by systems are IT systems and not mechatronic systems as specified by the guideline.

Werkzeuge zur Beschreibung der Anforderungen

Am Anfang einer Produktentwicklung bestehen meist nur vage Vorstellungen, was ein Produkt leisten soll und kosten darf. Diese Vorstellungen werden in Form von Forderungen und Wünschen konkretisiert und in der Anforderungsliste bzw. im Lastenheft meist in textueller Form dokumentiert.

Spezielle Werkzeuge zur Anforderungsbeschreibung unterstützen das systematische Erfassen und Gliedern von Anforderungen, stellen Checklisten zur Verfügung und gewährleisten eine einheitliche Dokumentation. Sofern die Anforderungen zu diesem Zeitpunkt bereits näher spezifiziert werden können (z.B. durch Vorgaben des Kunden), werden zusätzlich Werkzeuge eingesetzt, die auch beim Systementwurf zum Einsatz kommen. Dies sind z.B. geometrische Eigenschaften wie Bauräume oder Anschlussmaße (Beschreibung mit CAD-Werkzeugen), funktionale Eigenschaften (Beschreibung mit Werkzeugen zur Verhaltensmodellierung) sowie gewünschte Abläufe in Form von Anwendungsfällen (Beschreibung mit Anwendungsfalldiagrammen). Die Beschreibung der Anforderungen kann unter Umständen bis zur so genannten ablauffähigen Spezifikation der Anforderungen führen, mit der gewünschte Eigenschaften simuliert werden können.

Werkzeuge zur Verwaltung der Anforderungen

Die Notwendigkeit schneller Anpassungen an sich wandelnde Kundenwünsche, steigende Anforderungen an die Produkteigenschaften und der allgemeine Kostendruck zwingen zu einer möglichst weitgehenden Wiederverwendung von Entwicklungsergebnissen. Um die Wiederverwendbarkeit zu gewährleisten, ist eine strukturierte, nachvollziehbare und vollständige Dokumentation der Anforderungen an das Produkt von großer Bedeutung. Aber auch während des laufenden Entwicklungsprojekts ist es wichtig zu wissen, welche Forderungen welche Auswirkungen auf die Produktgestaltung haben und wer wann welche Forderungen eingebracht hat. Hierfür kommen Werkzeuge zur Anforderungsverwaltung (synonym Anforderungsmanagement, Requirement Engineering, Requirement Management) zum Einsatz. Sie unterstützen das Änderungsmanagement von Anforderungen, die Zuordnung zu Projekten und Verantwortlichen bis hin zu formalen Überprüfungen auf Vollständigkeit und Widerspruchsfreiheit.

Werkzeuge zur Funktionsmodellierung

Ziel der Funktionsmodellierung ist, die Entwurfsaufgabe auf lösungsneutraler Ebene zu formulieren. Aus der Gesamtaufgabe einer Problemstellung lässt sich die Gesamtfunktion für das System ableiten. Diese

Tools for describing the requirements

At the beginning of the development of a product there are usually only vague ideas as to what a product is intended to do and may cost. These ideas are concretized in the form of requirements and wishes and documented, usually in textual form, in the requirements list or in the specification.

Special tools for the description of requirements support the systematic recording and classifying of requirements, provide check lists and ensure consistent documentation. If the requirements can already be specified in more detail at this time (for example by precepts specified by the customer), tools which are also used in the system design are additionally used. Examples of these are geometrical properties such as installation spaces or connection dimensions (description with CAD tools), functional properties (description with tools for behavior modeling) and desired sequences in the form of application cases (description with application case diagrams). The description of requirements may in some circumstances lead to the so-called executable specification of requirements, with which desired properties can be simulated.

Tools for managing requirements

The necessity for rapid adaptations to changing customer requirements, increasing requirements on product properties and the general pressure of costs make it necessary for development results to be reused as much as possible. In order to ensure that they can be reused, a structured, comprehensible and complete documentation of the requirements imposed on the product is of great significance. However, it is also important to know during the development project that is in progress which requirements have which effects on the creation of the product and who has introduced which requirements and when. Tools for requirement management (synonymous with requirement engineering) are used for this. They support the management of changes to requirements, the assignment to projects and persons responsible through to formal checks for completeness and freedom from contradictions.

Tools for function modeling

The aim of function modeling is to formulate the design task on a solution-neutral level. The overall function for the system can be derived from the overall task of a problem being addressed. This overall

wird weiter in Teilfunktionen zerlegt, die Teilfunktionen werden zur Funktionsstruktur verknüpft. Zur Repräsentation einer Funktion wird im Allgemeinen eine Blockdarstellung (schwarzer Kasten, black box), zur Beschreibung der Verknüpfungen werden Flussgrößen (Stoff, Energie, Information) verwendet. Mit Hilfe von so genannten „System-Engineering-Werkzeugen“ werden Soll- und Fehlverhalten von Funktionen und ihre Ein- und Ausgänge spezifiziert. Damit können frühzeitige Untersuchungen zur Kompatibilität von Funktionen, Fehlerdiagnosen und Fehlermöglichkeiten- und Einflussanalysen (FMEA) durchgeführt werden. Der Übergang von der reinen Funktionsmodellierung (lösungsneutral, Beschreibung des Soll-Verhaltens) zur Prinziplösungsmodellierung (Zuordnung von Wirkprinzipien, physikalischen Größen und Lösungselementen) ist fließend. Gefundene Lösungen können mit den gleichen Werkzeugen frühzeitig evaluiert werden [GM01; MG02].

CAD-Werkzeuge

CAD-Systeme ermöglichen die Modellierung der Gestalt des zukünftigen Produkts. Grundlage bilden z.B. geometrische Anforderungen und erste gestaltbestimmende Festlegungen, um ein bestimmtes Verhalten zu erzielen. Durch die Auswahl geeigneter Wirkprinzipien und Lösungselemente sowie die Bestimmung der Geometrie-, Technologie- und Werkstoffparameter wird die Gestalt zunehmend konkretisiert (Grobdimensionierung). Im Wechselspiel mit Berechnungs- und Analyseverfahren (siehe FEM, MKS) werden die Parameter optimiert. Hierfür stellt das CAD-System Abmessungen und ableitbare Größen zur Verfügung. Ergebnis des domänenpezifischen Entwurfs ist ein vollständiges CAD-Modell des Produkts und seiner Komponenten, das neben geometrischen Informationen (Abmessungen, Toleranzen etc.) auch Strukturinformationen (Baustuktur, Stücklisten) und Fertigungsinformationen umfasst.

FEM-Werkzeuge

Für detaillierte Analysen im Bereich der Strukturmechanik und -dynamik, Elektromagnetik, Fluidodynamik, Akustik oder Temperaturfelder kommt die Finite Elemente Methode (FEM) zum Einsatz. Sie ist ein Verfahren, das allgemeine Feldprobleme näherungsweise löst. Dazu wird das betrachtete Kontinuum durch eine endliche (finite) Anzahl kleiner Elemente angenähert (diskretisiert). Untersucht werden kann beispielsweise, wie sich ein Bauteil unter statischer Last verformt und wo Spannungen auftreten (z.B. zum Festigkeitsnachweis); aber auch Analysen dynamischer und nichtlinearer Vorgänge können durchgeführt werden (z.B. Schwingungsanalyse, Crash-Analyse).

function is broken down further into subfunctions, the subfunctions are linked together to form the function structure. For the representation of a function, generally a block representation (black box) is used, for the description of the interlinkages, flow variables (material, energy, information) are used. With the aid of so-called system engineering tools, desired behavior and misbehavior of functions and their inputs and outputs are specified. Consequently, early investigations with respect to the compatibility of functions, error diagnostics and failure mode and effects analysis (FMEA) are carried out. The transition from pure function modeling (solution-neutral, description of the desired behavior) to solution-in-principle modeling (assignment of operating principles, physical variables and solution elements) is smooth. Solutions found can be evaluated with the same tools at an early time [GM01; MG02].

CAD tools

CAD systems make it possible to model the form of the future product. Geometrical requirements and initial form-determining stipulations form the basis for example for achieving a specific behavior. By the selection of suitable operating principles and solution elements and also the determination of the parameters relating to geometry, technology and materials, the form is increasingly concretized (rough dimensioning). In interaction with methods of calculation and analysis (see FEM, MBS), the parameters are optimized. The CAD system provides dimensions and derivable variables for this. The result of the domain-specific design is a complete CAD model of the product and its components, which along with geometrical information (dimensions, tolerances, etc.) also comprises structure information (building structure, parts lists) and production information.

FEM tools

For detailed analyses in the area of structure mechanics and dynamics, electromagnetics, fluid dynamics, acoustics or temperature fields, the Finite Element Method (FEM) is used. It is a method which solves the general field problems by approximation. For this purpose, the continuum considered is approximated by a finite number of small elements (discretized). It can be investigated, for example, how a component deforms under a static load and where stresses occur (for example for demonstrating strength); however, analyses of dynamic and nonlinear processes can also be carried out (for example vibration analysis, crash analysis). The required geometry can generally be adopted di-

Die benötigte Geometrie kann in der Regel direkt aus 3D-CAD-Systemen übernommen werden. Die FEM-Analyse ist im Wechselspiel mit der Gestaltung von Bauteilen und Baugruppen vorzunehmen.

BEM-Werkzeuge

Neben der Methode der Finiten Elemente ist die Boundary Element Method (BEM; dt. Randelementmethode) ein weiteres wichtiges Diskretisierungsverfahren zur Berechnung von Anfangs-/Randwertproblemen, z.B. für die Untersuchung des Fluidverhaltens. Die BEM hat gegenüber der FEM den Vorteil, dass nur die Oberfläche der betrachteten Struktur zu diskretisieren ist, und nicht deren Volumen. Dazu wird der Rand in Elemente unterteilt und es werden Randknoten eingeführt. Die Randelemente werden mit Ansatzfunktionen versehen. Haupteinsatzgebiete sind die Elektrostatik, Akustik, Hydromechanik und Thermodynamik.

Werkzeuge zur Simulation von Mehrkörpersystemen

Die Simulation von Mehrkörpersystemen (MKS) wird eingesetzt, um das Bewegungsverhalten komplexer Systeme zu untersuchen, die aus einer Vielzahl gekoppelter beweglicher Teile bestehen. Das Anwendungsspektrum reicht von der Überprüfung des Bewegungsverhaltens einzelner, aus wenigen Bauteilen bestehender Baugruppen über die Identifikation von Kollisionsproblemen durch Bauteilbewegungen bis hin zum Bewegungsverhalten eines Gesamtsystems (vgl. Bild 3-11). Ferner können mittels MKS-Simulation Kräfte und Momente bestimmt werden, die durch Bewegungen auf das System einwirken. Die Gestaltdaten können ebenfalls in der Regel aus einem 3D-CAD-System übernommen werden bzw. werden als vereinfachte 3D-Modelle mit Hilfe eines im MKS-System integrierten Volumenmodellierers erzeugt. Einige 3D-CAD-Systeme verfügen auch über integrierte Module für MKS-Untersuchungen [Hil83].

Werkzeuge zum fluidtechnischen Entwurf

Mit Hilfe von Computational Fluid Dynamics²³⁾ (CFD)-Werkzeugen können thermo- und fluiddynamische Vorgänge in einem abgegrenzten durch- bzw. umströmten Gebiet (Kontrollraum) analysiert werden, um sie zielgerichtet beeinflussen zu können. Eine CFD-Analyse liefert qualitative Aussagen (z.B. Art, Ausbreitung und Wirkung strömungsmechanischer Effekte) und quantitative Aussagen (Zahlenwerte für thermo-fluiddynamische Zustandsgrößen). Anwendungsgebiete sind u.a. [GEK01]:

²³⁾ Computational Fluid Dynamics: Gebräuchlicher englischer Begriff für die numerische Strömungssimulation; Fluid ist der Oberbegriff für Flüssigkeiten und Gase; Fluidodynamik (auch als Strömungsmechanik oder Strömungslehre bezeichnet) ist die Lehre von den Bewegungen der Fluide unter den Einflüssen von Kräften.

rectly from 3D-CAD systems. FEM analysis is to be performed in interaction with the creation of components and subassemblies.

BEM tools

Along with the Finite Element Method, the Boundary Element Method (BEM) is a further important discretizing method for the calculation of initial-/boundary-value problems, for example for the investigation of fluid behavior. BEM has the advantage over FEM that only the surface of the structure being considered has to be discretized, and not its volume. For this purpose, the boundary is subdivided into elements and boundary nodes are introduced. The boundary elements are provided with basis functions. Main areas of use are electrostatics, acoustics, hydromechanics and thermodynamics.

Tools for the simulation of multibody systems

The simulation of multibody systems (MBS) is used to investigate the movement behavior of complex systems which comprise a large number of coupled movable parts. The spectrum of applications ranges from checking the movement behavior of individual subassemblies, comprising few components, through the identification of collision problems caused by component movements to the movement behavior of an overall system (cf. Figure 3-11). Furthermore, forces and moments which act on the system due to movements can be determined by means of MBS simulation. The form data can likewise generally be adopted from a 3D-CAD system or be generated as simplified 3D models with the aid of a volume modeler integrated in the MBS system. Some 3D-CAD systems also have integrated modules for MBS investigations [Hil83].

Tools for fluid-technical design

With the aid of Computational Fluid Dynamics²³⁾ (CFD) tools, thermodynamic and fluid-dynamic processes in a bounded area through or around which a flow passes (control space) can be analyzed to allow them to be influenced in a targeted manner. A CFD analysis produces qualitative statements (for example type, extent and effect of flow-mechanical effects) and quantitative statements (numerical values for thermo- fluid-dynamic state variables). Application areas include [GEK01]:

²³⁾ Computational Fluid Dynamics: The customary English term for numerical flow simulation; fluid is the generic term for liquids and gases; fluid dynamics (also referred to as flow mechanics or flow theory) is the theory of the movements of fluids under the influences of forces.

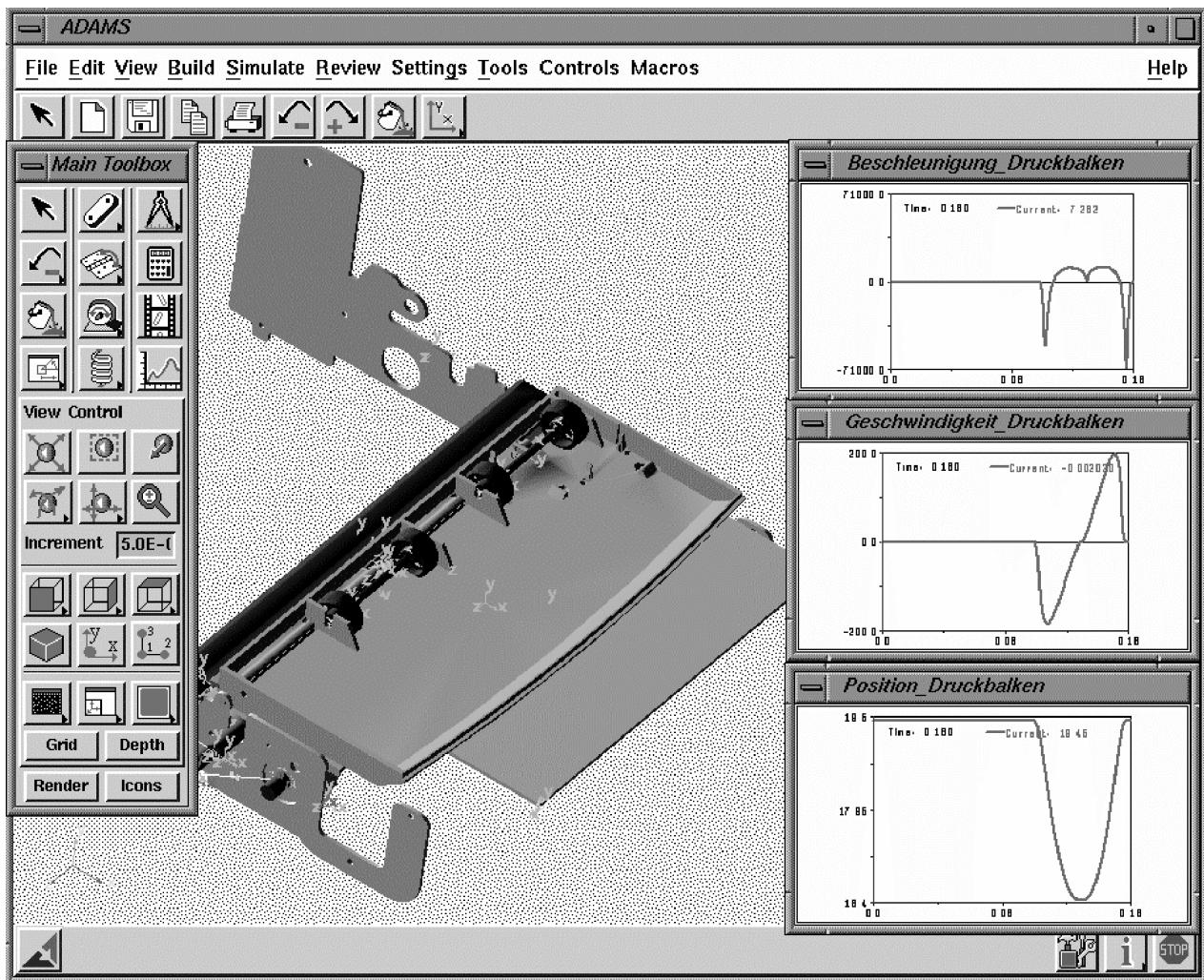


Bild 3-11. Ergebnisdarstellung der Kinematikanalyse eines Belegdruckers
Rechts sind Beschleunigung, Geschwindigkeit und Position des Druckbalkens dargestellt [GL00].

Fig. 3-11. Representation of the results of kinematic analysis of a document printer
Represented on the right are acceleration, speed and position of the compressed beam [GL00].

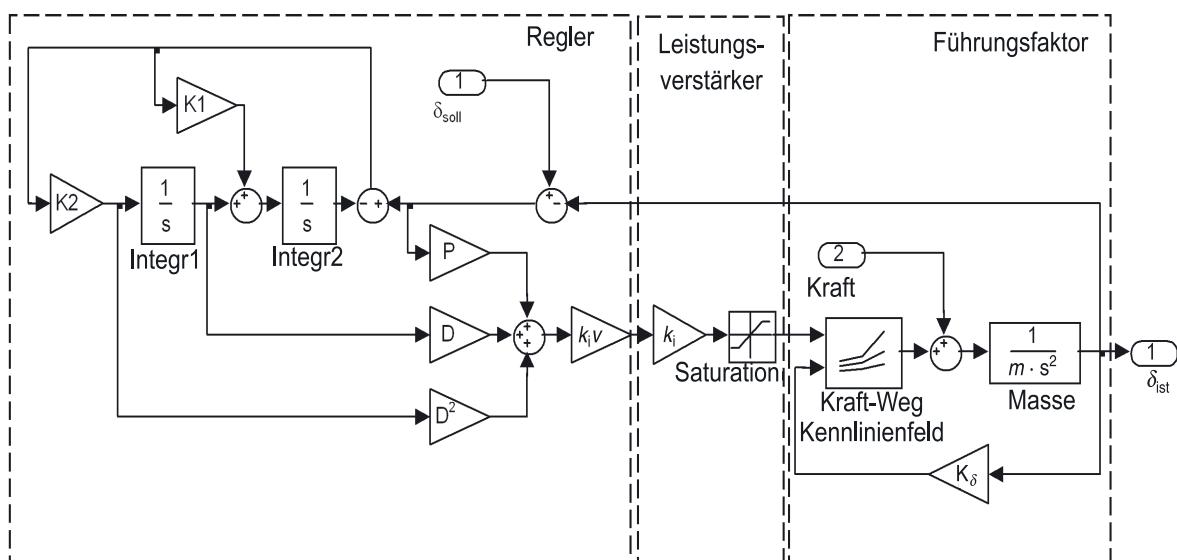


Bild 3-12. Reglergrundstruktur für einen Mehrkoordinatenantrieb (vgl. Beispiel Abschnitt 4.4) [Kov01]

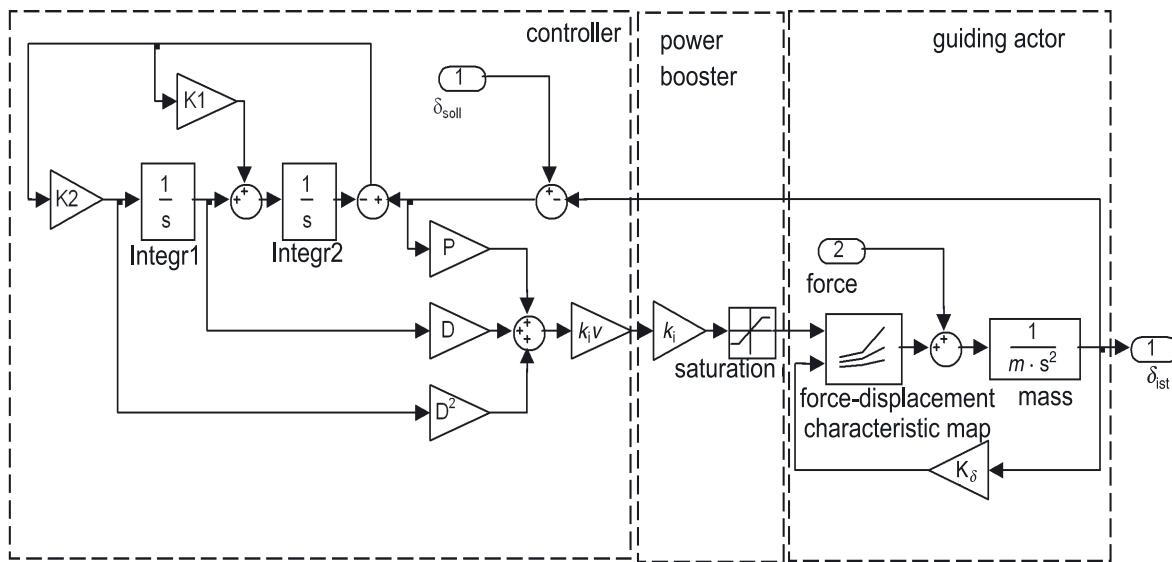


Fig. 3-12. Basic controller structure for a multicoordinate drive (cf. example of Section 4.4) [Kov01]

- Kraftfahrzeugtechnik: Außenaerodynamik, Klimatisierung des Fahrgastraums, Strömung und Verbrennung im Motor etc.
- Luft- und Raumfahrttechnik: Außenaerodynamik, Luftfahrtantriebe, Raketenantriebe etc.
- Energietechnik: Kraftwerkskomponenten wie Dampferzeuger, Feuerungen, Kondensatoren, Dampfturbinen, Pumpen etc.

Darüber hinaus unterstützen Werkzeuge die Modellbildung fluidtechnischer Systeme auf topologischer Ebene. Die Modellerstellung erfolgt interaktiv unter Verwendung von Modellbibliotheken.

Werkzeuge zum regelungstechnischen Entwurf

Die meisten Werkzeuge zum regelungstechnischen Entwurf setzen auf der Blockdiagrammdarstellung auf. Jeder Block hat ein genau definiertes Ein-/Ausgangsverhalten. Die Verknüpfungen zwischen den Blöcken erfolgt durch rückwirkungsfreie gerichtete Signalleitungen. Durch die hierarchische Anordnung der Funktionsblöcke können auch komplexere Strukturen anschaulich modelliert werden. Im Rahmen des Systementwurfs sind die aus der Modellierung der Anforderungen stammenden Modelle zu konkretisieren und zu partitionieren. Die Systemstruktur des zukünftigen Produkts wird dabei immer detaillierter. Die Zuordnung einzelner Funktionen zu den späteren Modulen des mechatronischen Produkts wird präziser. Auch die erwarteten Rückwirkungen aus der Betrachtung der Fertigungsmöglichkeiten werden in die Modelle eingearbeitet. Das Ergebnis ist ein weitgehend vollständiges, mit Blick auf die spätere Realisierung partitioniertes Funktionsmodell des zu entwickelnden Produkts.

- automotive engineering: exterior aerodynamics, climatic control of the passenger compartment, flow and combustion in the engine, etc.
- aeronautical and aerospace engineering: exterior aerodynamics, aircraft engines, rocket engines, etc.
- energy technology: components of power generating plants such as steam generators, furnaces, condensers, steam turbines, pumps, etc.

In addition, tools support the modeling of fluid-technical systems on the topological level. Models are created interactively by using model libraries.

Tools for control-engineering design

Most tools for control-engineering design are based on block diagram representation. Each block has a precisely defined input/output behavior. The links between the blocks are provided by reaction-free directional signal lines. The hierarchical arrangement of the function blocks allows even relatively complex structures to be modeled in a clearly presented way. As part of system design, the models originating from the modeling of requirements are to be concretized and partitioned. As this happens, the system structure of the future product becomes ever more detailed. The assignment of individual functions to the later modules of the mechatronic product becomes more precise. The expected reactions from the consideration of the production possibilities are incorporated in the models. The result is a largely complete function model of the product to be developed that is partitioned with a view to the later realization.

Werkzeuge für den Elektronikentwurf

Elektronik erfasst Kommando- und Sensorsignale, verarbeitet diese und gibt Meldungen und Aktorsteuersignale aus. Die Elektronik kann die geforderte Anwendefunktion in Form fest verdrahteter analoger oder auch digitaler Signalverarbeitung direkt abbilden. Sie kann darüber hinaus Plattformen bilden, bei denen die Anwendefunktionen ganz oder teilweise in programmierbaren analogen und digitalen Bausteinen realisiert werden. Die Elektronik kann außerdem Plattformen bilden, auf denen Anwendefunktionen mehr oder weniger vollständig durch Anwendersoftware programmiert werden.

Die Entwicklung analoger bzw. digitaler Schaltungen unterstützen so genannte EDA²⁴⁾-Programme, die auf den Entwurf und die Simulation elektronischer Schaltungen sowie die Layout-Erstellung spezialisiert sind. Die geforderten Funktionen werden meist in Form von Stromlaufplänen oder über VHDL-Listen beschrieben, aus denen sich über weitgehend automatisierte Prozesse die Fertigungsdaten für die Leiterplatten und die darauf verwendeten programmierbaren Bausteine erzeugen lassen. Für eine effiziente Entwicklung der Elektronik mechatronischer Systeme ist es wichtig, dass es eine möglichst automatisierte Ableitung der Stromlaufpläne oder VHDL-Listen aus dem Systemmodell gibt. Dazu muss beim Systementwurf die Partitionierung der verschiedenen Funktionen so weit getrieben werden, dass jedes Modul des Systemmodells auf einer eigenen Elektronik-Komponente, also z.B. als Analogmodul, als FPGA²⁵⁾ oder als Mikroprozessor mit Anwendersoftware abgebildet werden kann.

Werkzeuge für den Elektrikentwurf

Die Elektrik verbindet alle elektrischen Komponenten eines mechatronischen Produkts miteinander. Sie stellt die Versorgung aller elektrischen Komponenten mit elektrischer Energie sicher. Auch diese für einen sicheren Betrieb unverzichtbaren Funktionen werden zweckmäßigerweise schon im Systemmodell modelliert. Die Erzeugung der für die Verdrahtung nötigen Stromlaufpläne könnte dann automatisiert aus dem Systemmodell erfolgen.

Die Verlegung der elektrischen Leitungen zwischen den verteilten elektrischen bzw. elektronischen Modulen hat Rückwirkungen auf die geometrischen Eigenschaften des Produkts und muss in das CAD-Modell eingearbeitet werden.

²⁴⁾ EDA: Electronic Design Automation

²⁵⁾ FPGA: Field-Programmable Gate Arrays

Tools for electronic design

Electronics pick up command and sensor signals, process them and output messages and actor activation signals. Electronics can directly replicate the required user function in the form of hard-wired analog or digital signal processing. They can additionally form platforms with which the user functions are realized entirely or partly in programmable analog and digital modules. Electronics can also form platforms on which user functions are programmed more or less completely by user software.

The development of analog or digital circuits is supported by so-called EDA²⁴⁾ programs, which are specialized for the design and simulation of electronic circuits and layout creation. The required functions are usually described in the form of circuit diagrams or by means of VHDL lists, from which the production data for the printed circuit boards and the programmable modules used on them can be generated by means of largely automated processes. For an efficient development of the electronics of mechatronic systems, it is important that there is a means that is as automated as possible for deriving the circuit diagrams or VHDL lists from the system model. For this purpose, the partitioning of the various functions must be taken so far in the system design that each module of the system model can be replicated on an electronic component of its own, that is for example as an analog module, as FPGA²⁵⁾ or as a microprocessor with user software.

Tools for electric design

Electrics connect all the electrical components of a mechatronic product to one another. They ensure the supply of all the electrical components with electrical energy. It is expedient for these functions, which are indispensable for reliable operation, also to be already modeled in the system model. The generation of the circuit diagrams necessary for wiring could then be performed in an automated manner from the system model.

The laying of the electrical lines between the distributed electrical or electronic modules causes reactions on the geometrical properties of the product and must be incorporated into the CAD model.

²⁴⁾ EDA: Electronic Design Automation

²⁵⁾ FPGA: Field-Programmable Gate Arrays

Werkzeuge für den Softwareentwurf

Software steht im vorliegenden Zusammenhang für Embedded Software. Diese wird eingeteilt in Betriebssystemsoftware, wie Laufzeitsteuerung und Hardwaretreiber, und Anwendersoftware. Die Betriebssystemsoftware kann wie ein spezielles Hardwaremodul betrachtet werden. Es stellt sicher, dass die Anwendersoftware in die Zielelektronik geladen und in den geforderten Zeitintervallen bearbeitet wird, dass die Anwendersoftware Zugriff auf die Daten der angeschlossenen Sensoren hat und dass die Anwendersoftware alle notwendigen Ausgaben ausführen kann. Die Anwendersoftware bestimmt dann die Funktionen der durch Mikroprozessor gesteuerten Elektronikmodule, mit denen Steuer- und Regelungsfunktionen realisiert werden.

Im Rahmen der vorliegenden Richtlinie ist besonders die Entwicklung der Anwendersoftware relevant. Die dort zu realisierenden Funktionen werden beim Systementwurf definiert, modelliert und getestet. So genannte CASE²⁶⁾-Tools bieten grafische Editoren, mit deren Hilfe die Software modelliert und die Konsistenz zwischen Programmteilen sichergestellt werden kann. Bei der folgenden formalen Umsetzung der so definierten Funktion in den in der Zielelektronik ablauffähigen Code gibt es keine weitere inhaltliche Veränderung der Funktion. Deshalb ist heute verbreitet der Wunsch zu beobachten, den ablauffähigen Code durch eine automatisierte bzw. automatische Code-Generierung direkt aus der in der Systemsimulation modellierten Anwendersoftware zu erzeugen. Dies schließt alle nötigen Umsetzungs- und Compilerprozesse ein. Dies wird durch spezielle Entwurfsumgebungen unterstützt.

Werkzeuge zur Hardware-in-the-Loop-Simulation

Sobald einzelne Komponenten realisiert sind, müssen diese in einem ihrer späteren Umgebung nachempfundenen Umfeld getestet werden. Für diese Verifikation bzw. Validierung wird eine HIL-Umgebung aufgebaut, die der zu testenden Komponente bzw. dem zu testenden Produkt die reale Umgebung durch eine Echtzeitsimulation vorspiegelt (Bild 3-13).

Im Laufe der Entwicklung sind unterschiedliche HIL-Umgebungen für Komponenten, Gruppen von Komponenten und das Endprodukt aufzubauen. Bei den HIL-Tests werden idealerweise die gleichen Tests durchgeführt wie bei den Offline-Tests.

²⁶⁾ CASE: Computer Aided Software Engineering

Tools for software design

In the present context, software stands for embedded software. This is divided into operating system software, such as run-time control and hardware drivers, and user software. The operating system software can be regarded as a special hardware module. It ensures that the user software is loaded into the target electronics and is processed in the required time intervals, that the user software has access to the data of the connected sensors and that the user software can execute all the necessary outputs. The user software then determines the functions of the microprocessor-controlled electronic modules, with which open-loop and closed-loop control functions are realized.

Within the present guideline, the development of user software is particularly relevant. The functions to be realized there are defined, modeled and tested in the system design. So-called CASE²⁶⁾ tools offer graphic editors, with the aid of which the software can be modeled and the consistency between parts of a program can be ensured. In the following formal conversion of the function defined in this way into the code that can be executed in the target electronics there is no further change in the content of the function. Therefore, today there is a widely observed desire to generate the executable code by an automated or automatic code generation directly from the user software modeled in the system simulation. This includes all necessary conversion and compiler processes. This is supported by special design environments.

Tools for hardware-in-the-loop simulation

As soon as individual components are realized, they must be tested in an environment resembling their later environment. For this verification or validation, an HIL environment is set up, which uses real-time simulation to simulate the real environment for the component or the product to be tested (Figure 3-13).

In the course of the development, different HIL environments are to be set up for components, groups of components and the end product. In the HIL tests, ideally the same tests as in the offline tests are carried out.

²⁶⁾ CASE: Computer Aided Software Engineering



Bild 3-13. HIL-Umgebung für das Feder-/Neigemodul (vgl. Beispiel Abschnitt 4.3) [LLJ00]

Werkzeuge zur Validierung des Produktes im realen Umfeld

In der letzten Stufe wird überprüft, ob sich das komplette aus seinen Komponenten zusammengesetzte reale Produkt in seinem realen Umfeld unter realen Betriebsbedingungen wie beabsichtigt verhält. Zur Unterstützung existieren Werkzeuge, die Messdaten eines realen Systems in Echtzeit aufnehmen und verarbeiten können. Besteht das Produkt diese Validierung, steht einer Markteinführung nichts mehr im Wege.

Produktdatenmanagement-Systeme

Im Laufe der Produktentwicklung wird eine Vielzahl von Informationen an verschiedenen Stellen im Unternehmen verarbeitet. Die Informationsmenge ist nicht mehr überschaubar und der Zugriff nicht transparent, das heißt der Entwickler muss genau wissen, wo die Informationen zu finden sind. Aufgabe der Produktdatenmanagement-Systeme (PDMS) ist es, alle relevanten Daten über ein Produkt und die Prozesse der Produktentwicklung zu verwalten. Die Funktionalität moderner PDM-Systeme umfasst Produktstrukturmanagement (Modell der Beziehungen zwischen Baugruppen und Einzelteilen, z.B. nach Fertigungs- oder Montagegesichtspunkten), Dokumentenmanagement (Konsistenzsicherung, Zugriffsrechte etc.), Konfigurationsmanagement (Versionsverwaltung von Produktstrukturständen) und die Klassifikation von Produktdaten. Neben der Verwaltung von Produktdaten unterstützen PDM-Systeme auch die Planung, Steuerung und Überwachung von Abläufen (Prozessmanagement) [GEK01].

Fig. 3-13. HIL environment for the spring/tilting module (cf. example of Section 4.3) [LLJ00]

Tools for validating the product in the real environment

In the final stage, it is checked whether the complete real product, made up from its components, behaves in its real environment under real operating conditions in the way intended. Tools which can record and process measurement data of a real system in real time exist to provide support. If the product passes this validation, there is nothing preventing it from being launched on the market.

Product data management systems

In the course of product development, a considerable amount of information is processed at various places in the company. The volume of information no longer allows an overview and access is not transparent, i.e. the developer must know exactly where information is to be found. The task of the product data management system (PDMS) is to manage all relevant data on a product and the processes of product development. The functionality of modern PDM systems comprises product structure management (model of the relationships between subassemblies and individual parts, for example from production or assembly aspects), documentation management (ensuring consistency, rights of access, etc.), configuration management (version management of product structure states) and the classification of product data. Apart from the management of product data, PDM systems also support the planning, control and monitoring of sequences (process management) [GEK01].

3.4 Organisation

Organisatorische Fragestellungen in der Produktentwicklung können in dieser Richtlinie nur fokussiert behandelt werden; ein umfassender Überblick würde den Rahmen sprengen. Deshalb werden zwei ausgewählte Aspekte behandelt, die für die Entwicklung mechatronischer Produkte von besonderer Bedeutung sind: die *Rolle des Projektteams* und die *Umsetzung mechatronischer Potenziale* im Unternehmen.

3.4.1 Zusammenstellen eines Projektteams

Über das Zusammenstellen von Projektteams existiert umfangreiche Literatur, z.B. [Bor96]. Deshalb soll hier nur auf drei Aspekte der Teambildung eingegangen werden, die in interdisziplinären Entwicklungsprojekten bedeutsam sind (vgl. Bild 3-14).

3.4 Organization

Organizational questions in product development can only be dealt with in this guideline by focusing on specific aspects; a comprehensive overview is beyond its scope. It therefore looks at two selected aspects, which are of particular significance for the development of mechatronic products: the *role of the project team* and *how mechatronic potentials are exploited* in practice in the company.

3.4.1 Putting together a project team

There is extensive literature on putting project teams together, for example [Bor96]. Therefore, only three aspects of team forming that are of significance in interdisciplinary development projects are to be looked at here (cf. Figure 3-14).

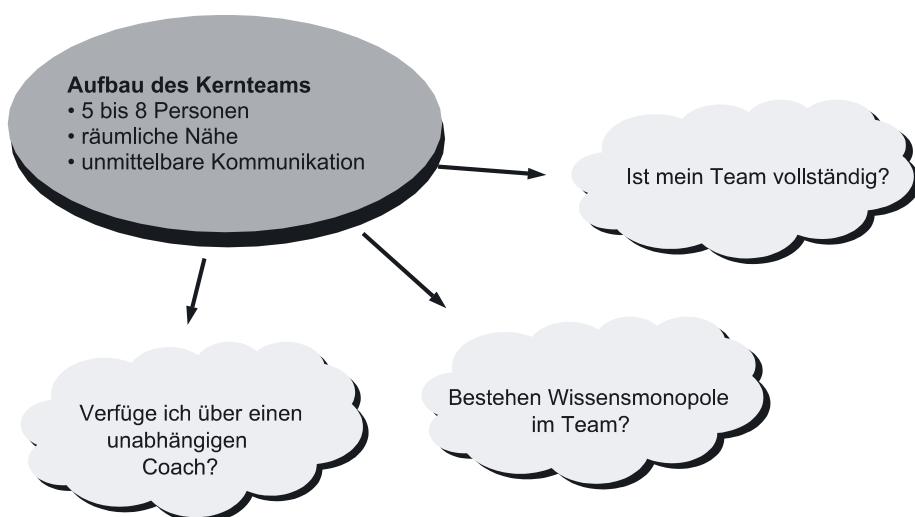


Bild 3-14. Fragen zur Teambildung

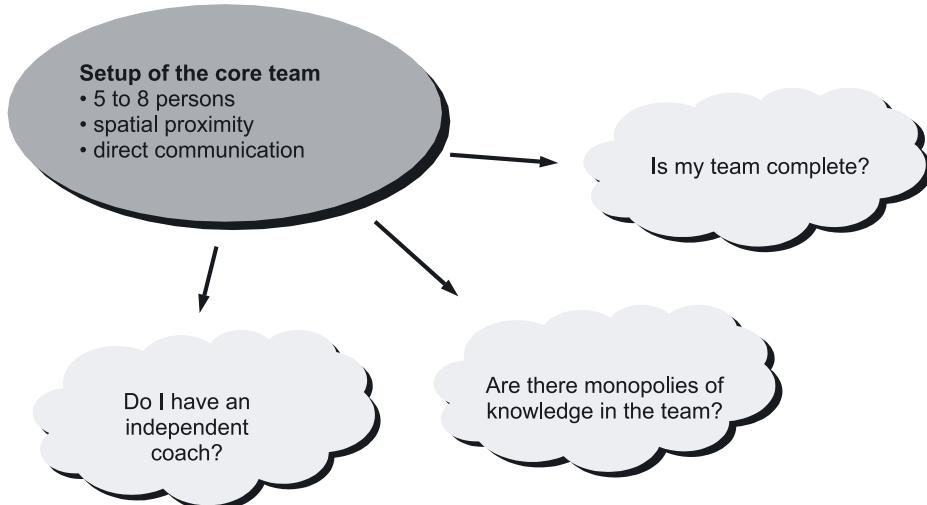


Fig. 3-14. Questions on team building

Vollständigkeit des Teams

Gerade bei der Neuentwicklung mechatronischer Systeme lässt sich beim Projektstart oft nicht zuverlässig abschätzen, welche Technologien zur Anwendung kommen werden. Diese Unsicherheit erschwert die Auswahl geeigneter Teammitglieder. Probleme treten auf, wenn im Verlauf des Entwicklungsprojekts weitere Spezialisten in das Team integriert werden sollen. Neben den psychologischen Fallstricken eines solchen Integrationsprozesses müssen Neulinge alle Schritte des bisherigen Entwicklungsprozesses nachvollziehen. Besonders wenn neue Mitglieder einen anderen fachlichen Hintergrund haben, zieht dieser Vorgang oft langwierige Diskussionen nach sich. Trotzdem ist es unmöglich, Teammitglieder aus allen betroffenen Bereichen zu rekrutieren – das Team würde dadurch aufgebläht und könnte nicht mehr effektiv arbeiten.

Ein mechatronisches Entwicklungsteam sollte deshalb auf einen Kern reduziert werden, der kompetent alle wichtigen Entscheidungen fällen kann. Spezialisten aus weiteren Bereichen sollten dagegen nur beratende Funktion haben und zeitweise hinzugezogen werden.

Wissensmonopole im Team

Die erfolgreiche Entwicklung mechatronischer Systeme ist an enge fachübergreifende Zusammenarbeit gebunden. Sie ist gefährdet, wenn einzelne Teammitglieder die Entscheidungsprozesse im Team dominieren. Das gilt besonders dann, wenn Fachwissen dazu verwendet wird, Entscheidungen im Hinblick auf persönliche Interessen zu beeinflussen. Dieses Problem tritt verstärkt bei Mechatronikentwicklungen auf, wo Experten aus entfernten Wissensgebieten zusammenarbeiten.

Bei der Teambildung ist folglich darauf zu achten, dass möglichst kein Mitglied ein Wissensmonopol bezüglich der im Projekt interessierenden Themen besitzt. Das ist nicht immer möglich – oft sind nicht genügend Experten verfügbar oder das Team würde zu groß werden. Auf jeden Fall sollte sich der Moderator des Teams über die Problematik von Monopolwissen im Klaren sein und über genug Autorität verfügen, jede unzulässige Einflussnahme zu unterbinden.

Externes Coaching

Als besonders wirksames Mittel zur „Entschärfung“ von Problemen im Team hat sich die Mitwirkung eines unabhängigen Moderators (Coach) an Entwicklungsprojekten erwiesen. Dieser Moderator sollte einerseits ausreichendes Fachwissen besitzen, um den Entwicklungsprozess immer wieder auf das eigentliche Ziel ausrichten zu können. Andererseits

Completeness of the team

Especially in the case of the new development of mechatronic systems, at the start of a project it is often not possible to estimate reliably which technologies will be used. This uncertainty makes it more difficult to select suitable team members. Problems arise if in the course of the development project further specialists are to be integrated into the team. Apart from the psychological pitfalls of such an integration process, new members must go back over all the steps of the previous development process. Especially when new members have a different technical background, this procedure is often accompanied by protracted discussions. Nevertheless, it is impossible to recruit team members from all areas concerned – this would make the team too large and no longer work effectively.

A mechatronic development team should therefore be reduced to a core that is competent for taking all important decisions. Specialists from other areas, on the other hand, should only have an advisory function and be brought in from time to time.

Monopoly of knowledge in the team

The successful development of mechatronic systems is dependent on close interdisciplinary cooperation. It is at risk if individual team members dominate the decision-making processes in the team. This applies in particular whenever technical knowledge is used to influence decisions with a view to personal interests. This problem occurs increasingly in mechatronic developments where experts from unrelated disciplines work together.

When forming a team, it is must consequently be ensured as far as possible that no member has a monopoly of knowledge with respect to the issues of interest in the project. This is not always possible – often there is not a sufficient number of experts available or the team would become too large. In any event, the coordinator of the team should be aware of the problem of a monopoly of knowledge and have enough authority to prevent any inadmissible influence being exerted.

Outside coaching

The involvement of an independent coordinator (coach) in development projects has proven to be a particularly effective means of "defusing" problems in the team. This coordinator should on the one hand have adequate technical knowledge to be able to keep directing the development process at the actual goal. On the other hand, the coordinator should be distant

sollte er genügend Distanz zu den Vorgängen im Unternehmen haben, um die Auswirkungen von Abteilungsanimositäten oder den beschriebenen Wissensmonopolen behutsam eindämmen zu können.

3.4.2 Umsetzung technischer Ergebnisse

Die Ergebnisse eines interdisziplinären Vorentwicklungsprojekts werden meist soweit konkretisiert, dass die Funktionsfähigkeit des Produktkonzepts anhand eines Demonstrators nachgewiesen werden kann. Um die Ergebnisse eines solchen Projekts sinnvoll nutzen zu können, muss überlegt werden, wie derartige Projekte in die Gesamtheit der Entwicklungsprozesse eines Unternehmens integriert werden können. Eine zweite methodische Frage von herausragender Bedeutung ist die Einbindung von externen Entwicklungspartnern in ein solches Vorentwicklungsprojekt. Dies gilt ganz besonders für die betrachteten mechatronischen Systeme, die in der Serie häufig von Zulieferfirmen entwickelt und gefertigt werden.

Integration in unternehmensweite Entwicklungsprozesse

Die Ergebnisse aus zahlreichen Entwicklungsprojekten [Wul98; WS00] haben gezeigt, dass die Idee der mechatronischen Integration noch ungenutztes Innovationspotenzial bezüglich der Funktionalität und der Kosten vieler technischer Systeme enthält. Eine konsequente Ausnutzung dieses Potenzials scheitert bisher oft an der starren Aufteilung der technischen Konzepte auf die organisatorischen Bereiche Mechanik und Elektronik. Das bisher beschriebene methodische Vorgehen hat zum Ziel, das organisationsbedingte Festhalten an überlieferten Konzepten durch die gemeinsame Konzeptentwicklung in einem interdisziplinären Team zu vermeiden. Davon unberührt bleibt die sicherlich sinnvolle Aufteilung der Serienentwicklungsprozesse auf unterschiedliche Fachabteilungen.

Wie können die Ergebnisse integrativer Entwicklungsprojekte mit den laufenden Produktentwicklungsprozessen für die Serie verknüpft werden?

Wie in Bild 3-15 dargestellt, muss dazu nach dem Start des Vorentwicklungsprojekts mit dem Beginn jeder neuen Serienentwicklung der aktuelle Entwicklungsstand abgefragt werden. Die vorliegenden Zwischenergebnisse werden dabei auf ihre Eignung für den Serieneinsatz hin überprüft. Was bei dieser Prüfung serientauglich erscheint, fließt in das aktuelle Entwicklungsprojekt mit ein, die übrigen Ideen werden bis zu einer endgültigen Entscheidung weiter im Vorentwicklungsprojekt untersucht. Das Vorentwicklungsprojekt wird so lange weitergeführt, bis das technische Potenzial des betrachteten Systems für den Einsatz in der Serie auf lange Sicht ausgeschöpft zu sein scheint.

enough from what goes on in the company to be able sensitively to quell the effects of any animosity between departments or the monopolies of knowledge described.

3.4.2 Implementation of technical results

The results of an interdisciplinary development project are usually concretized to the extent that the functional capability of the product concept can be demonstrated on the basis of a demonstrator. To allow meaningful use of the results of such a project, it must be considered how such projects can be integrated into a company's development processes as a whole. A second methodological question of great significance is the involvement of external development partners in such a predevelopment project. This applies most particularly to the mechatronic systems considered, which in mass production are often developed and produced by supplier companies.

Integration in company-wide development processes

The results from numerous development projects [Wul98; WS00] have shown that the idea of mechatronic integration still has unused potential for innovation with respect to the functionality and the costs of many technical systems. Systematic exploitation of this potential often failed in the past at the inflexible division of the technical concepts between the organizational areas of mechanics and electronics. The previously described methodological procedure has the aim of avoiding the adherence to handed-down concepts encountered in organizations by the joint concept development and an interdisciplinary team. The undoubtedly appropriate division of the mass-production development processes between different technical departments remains unaffected by this.

How can the results of integrative development projects be linked with the product development processes in progress for mass production?

As represented in Figure 3-15, for this purpose, after the start of the predevelopment project, the current state of development must be inquired at the beginning of each new mass-production development. The present interim results are in this case checked for their suitability for use in mass production. Anything in this test that appears to be fit for mass production is included in the current development project, other ideas are further investigated in the predevelopment project until a final decision is taken. The predevelopment project is continued until the technical potential of the system being considered for use in mass production in a long-term view appears to have been fully exploited.



Bild 3-15. Anbindung von Vorentwicklungsprojekten an Serienentwicklungsprozesse



Fig. 3-15. Linking of predevelopment projects to mass-production development processes

Einbindung von Entwicklungspartnern

Herausragende Bedeutung bei der erfolgreichen Durchführung mechatronischer Vorentwicklungsprojekte kommt der richtigen Einbindung externer Entwicklungspartner zu. Denn viele Baugruppen mechatronischer Systeme werden in der Serienentwicklung zum überwiegenden Teil von Zulieferfirmen entwickelt und produziert. Die Erfahrungen der letzten Jahre haben gezeigt, dass gerade etablierte Systemlieferanten wenig Bestreben zeigen, bewährte Konzepte durch neue Lösungen zu ersetzen. Um einen derartigen „technological lock-in“ [LW00] zu überwinden, wird ein Vorgehensmodell vorgeschlagen, das auf eine Einbeziehung eines Systemlieferanten bis zur Festlegung eines Konzepts für das betrachtete System bewusst verzichtet.

Inclusion of development partners

Of great significance for mechatronic predevelopment projects to be carried out successfully is the right inclusion of outside development partners. This is so because many subassemblies of mechatronic systems in development for mass production are predominantly developed and produced by supplier companies. Experience in recent years has shown that established system suppliers especially show little endeavor to use new solutions to replace tried-and-tested concepts. To overcome such a "technical lock-in" [LW00], there is proposed a procedural model which dispenses with any inclusion of a system supplier until the concept for the system being considered is stipulated.

Bild 3-16 zeigt den aus der Sicht des projektverantwortlichen Unternehmens anzustrebenden Verlauf der Zusammenarbeit mit Systemlieferanten und weiteren Firmen bei der Durchführung von Vorentwicklungsprojekten. Wichtig ist dabei vor allem, dass das projektverantwortliche Unternehmen in der Konzeptphase die breite Suche nach alternativen technischen Konzepten anstößt. Dabei führt die direkte Zusammenarbeit mit Firmen mit speziellem Know-how bezüglich des Einsatzes bestimmter Technologien oft zu innovativeren Lösungen als die Kooperation mit einem etablierten Systemlieferanten. Dessen Interesse konzentriert sich nämlich meist darauf, ein bereits existierendes Konzept mit möglichst wenigen Anpassungen in neue Projekte einzubringen. Alternative Lösungen werden deshalb von vornherein als unrealistisch abgetan. Das projektverantwortliche Unternehmen sollte deshalb bis zu einer Konzeptfestlegung unbedingt die Rolle des Vordenkers einnehmen und dabei die Zusammenarbeit mit unabhängigen Spezialisten suchen. Erst nachdem die Entscheidung für ein bestimmtes Konzept gefallen ist, sollte die Verantwortung für die weitere Entwicklung des Systems in die Hände eines Systemlieferanten gelegt werden.

Figure 3-16 shows how, from the viewpoint of the company responsible for a project, the cooperation with systems suppliers and other companies should proceed when predevelopment projects are carried out. What is important here in particular is that the company responsible for the project initiates a wide search for alternative technical concepts in the concept phase. In this case, direct cooperation with companies with special know-how with respect to the use of specific technologies often leads to more innovative solutions than cooperation with an established system supplier. This is because the latter is usually most interested in bringing into new projects an already existing concept with least possible adaptations. Alternative solutions are therefore dismissed from the outset as unrealistic. The company responsible for the project should therefore definitely assume the role of mentor until a concept has been stipulated, and at the same time seek cooperation with independent specialists. Only once the decision for a specific concept has been taken should the responsibility for further development of the system be placed in the hands of a system supplier.

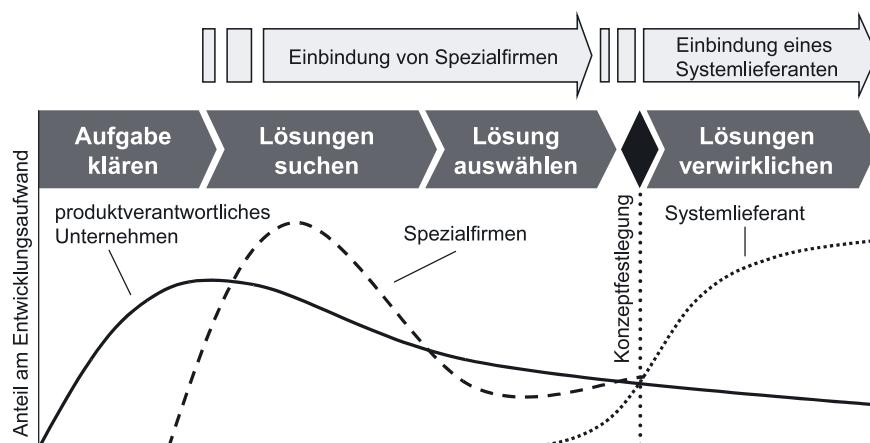


Bild 3-16. Einbinden externer Partner bei der Entwicklung mechatronischer Systeme

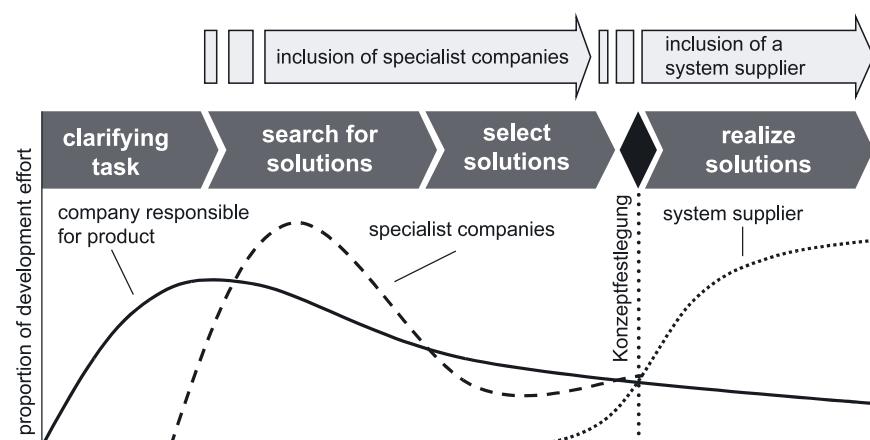


Fig. 3-16. Inclusion of outside partners in the development of mechatronic systems

Das hier vorgeschlagene Vorgehen steht in gewissem Widerspruch zum derzeit verstärkt praktizierten Outsourcing. Es ist jedoch wichtig, die technologische Kompetenz im verantwortlichen Unternehmen zu erhalten.

Umsetzung methodischer Vorgaben dieser Richtlinie

Die Umsetzung der methodischen Vorschläge dieser Richtlinie im Entwicklungsalltag ist eng mit der Durchführung von integrativen Vorentwicklungsprojekten der beschriebenen Art verknüpft. Damit solche Projekte erfolgreich durchgeführt werden können, müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Die Initiative zum Start eines konkreten Projekts muss von einem Baugruppenverantwortlichen ausgehen. Auf diese Weise wird eine „Zwangsläufigkeit“ von Fachabteilungen vermieden, was die Akzeptanz der erarbeiteten Methoden stark erschwert.
- Um die erforderliche Interdisziplinarität zu gewährleisten, müssen die Teams unbedingt bereichsübergreifend zusammengestellt werden. Das erfordert den Konsens aller beteiligten Fachverantwortlichen bezüglich der Ziele des Projekts.
- Die Moderation und die methodische Unterstützung des Teams sollte nach Möglichkeit einem unabhängigen Teammitglied übertragen werden.
- Das in dieser Richtlinie vorgestellte Vorgehen soll die strukturierte Arbeit in interdisziplinär zusammengesetzten Teams erleichtern. Die vorgeschlagenen Arbeitsritte sollten jedoch nicht dogmatisch abgearbeitet werden, sondern müssen flexibel an die jeweilige Situation angepasst werden.

4 Anwendungsbeispiele

Die vorgestellte Entwicklungsmethodik wird im Folgenden anhand von vier Beispielen unterschiedlicher Prägung illustriert. Das erste Beispiel „Von der mechanischen zur mechatronischen Bremse“ zeigt eindrucksvoll, wie durch das synergetische Zusammenwirken der Domänen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik bestehende Funktionen verbessert und neue Funktionen generiert werden können. Beim zweiten Beispiel „Entwurf der Antriebsseinheit einer Lackieranlage“ stehen die Phasen *Systementwurf* und anfängliche *Modellbildung* im Vordergrund. Das dritte Beispiel legt den Schwerpunkt auf die *Modellbildung*, die Strukturierung mechatronischer Systeme, den Reglerentwurf und die anschließende *Systemverifikation/-validierung* in einer Hardware-in-the-Loop-Umgebung. Die Besonderheiten der *räumlichen Integration* werden schließlich im vierten Beispiel „Entwurf von integrierten Mehrkoordinatenantrieben“ beschrieben.

The procedure proposed here is to some extent at odds with the currently popular practice of outsourcing. However, it is important to maintain the technological competence with the company bearing the responsibility.

Implementation of methodological precepts of this guideline

The implementation of the methodological precepts of this guideline in day-to-day development is closely linked with the carrying out of integrative predevelopment projects of the type described. In order that such projects can be successfully carried out, the following preconditions must be satisfied:

- The initiative for starting an actual project must come from a person responsible for a subassembly. This avoids forcing it on technical departments “whether they like it or not“, which makes acceptance of the methods devised much more difficult.
- In order to ensure the required interdisciplinarity, it is imperative for the teams to be put together from all different areas. This requires all those with technical responsibility who are involved to reach a consensus with respect to the goals of the project.
- Wherever possible, the coordination and methodological support of the team should be transferred to an independent team member.
- The procedure presented in this guideline is intended to facilitate structured work in teams of an interdisciplinary composition. However, the working steps proposed should not be dogmatically followed, but must be flexibly adapted to the respective situation.

4 Application examples

The development methodology presented is illustrated below on the basis of four examples of different distinct types. The first example ”From the mechanical brake to the mechatronic brake“ impressively shows how, by synergetic cooperation between the domains of mechanical engineering, electrical engineering and information technology, existing functions can be improved and new functions can be generated. In the second example ”Design of the drive unit of a painting system“, the phases of *system design* and initial *modeling* are at the forefront. The third example concentrates on *modeling*, the structuring of mechatronic systems, design of the controller and the subsequent *system verification/validation* in a hardware-in-the-loop environment. The special aspects of *spatial integration* are finally described in the fourth example ”Design of integrated multicoordinate drives“.

Weitere konkrete Beispiele aus Forschung und Industrie sind u.a. bei [GL00; HSB02; IBH02; Kas02; Ste00] zu finden.

4.1 Von der mechanischen zur mechatronischen Bremse in zwölf Dekaden

Leistungsfähige Bremsanlagen gehören seit Beginn der individuellen, motorbetriebenen Mobilität im Jahre 1885 zu den wichtigsten Sicherheitseinrichtungen eines Automobils. Sie müssen absolut ausfallsicher und in der Lage sein, das Fahrzeug unter allen Fahrbedingungen auf dem kürzesten Weg unter Beibehaltung der Fahrstabilität zum Stillstand zu bringen.

Die Betriebsbremse im Kraftfahrzeug kann als ein gutes Beispiel für eine Erfolgsgeschichte – die Entwicklung eines rein mechanischen zu einem mechatronischen System – herangezogen werden, wobei das Grundprinzip der Bremsfunktion, die Umwandlung von Bewegungsenergie durch Reibung zwischen Körpern in Wärme, unverändert beibehalten wird.

4.1.1 Erste mechanische Kraftfahrzeugsbremsanlage

Zurückblickend auf die Realisierung der Bremsfunktion des im Jahre 1885 gebauten Benz Patent-Motorwagen Modell 1 ist festzuhalten, dass es sich bei der ersten Bremse um eine Bandbremse mit einer Vorgelege-Riemenscheibe (Bild 4-1) handelt, die über einen Mechanismus per Hand betätigt wird. Dieses rein mechanische System ist ausreichend, um den Dreiradwagen mit 0,75 PS Motorleistung in den Stillstand zu verzögern. Die Fahrdynamik kann bei diesen Fahr- beziehungsweise Verzögerungsleistungen weitestgehend vernachlässigt werden.

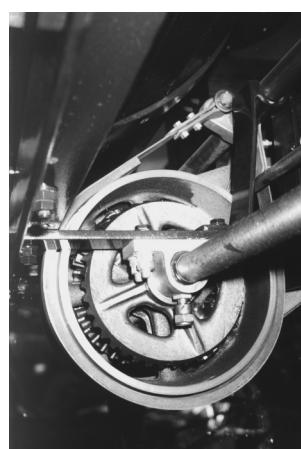


Bild 4-1. Bremse (links, [Dün02]) des Benz Patent-Motorwagen Modell 1 (rechts, [NN02])

Further concrete examples from research and industry are to be found for instance at [GL00; HSB02; IBH02; Kas02; Ste00].

4.1 From the mechanical brake to the mechatronic brake in twelve decades

Efficient brake systems have been one of the most important safety features of an automobile since the beginning of individual motorized mobility in the year 1885. They must be absolutely failsafe and capable of bringing the vehicle to a standstill over the shortest distance under all driving conditions, while maintaining stability.

The service brake in a motor vehicle can be taken as a good example of a success story – the development of a purely mechanical system into a mechatronic system, while retaining the basic principle of the braking function – the conversion of kinetic energy into heat by friction between bodies – unchanged.

4.1.1 First mechanical motor-vehicle brake system

Looking back at the way in which the braking function was realized in the Benz's patented model 1 "horseless carriage", it can be stated that the first brake was a band brake with a transmission belt pulley (Figure 4-1) which was actuated manually via a mechanism. This purely mechanical system is adequate to slow down to a standstill the three-wheeled carriage with a 0.75 hp engine. With these levels of driving or decelerating power, vehicle stability can be largely ignored.



Fig. 4-1. Brake (on the left, [Dün02]) of Benz's patented model 1 "horseless carriage" (on the right, [NN02])

4.1.2 Verbesserung der mechanischen Wirk- und Übertragungsprinzipien

Die weiteren Entwicklungen zu Beginn des 20. Jahrhunderts sind durch eine Optimierung der mechanischen Komponenten der Bremsanlage bzw. durch die Integration neuer, verfeinerter mechanischer Wirk- und Übertragungsprinzipien charakterisiert. Mit einer Fußbetätigten, auf das Getriebe wirkenden Außenbackenbremse im Jahre 1905 wird eine Steigerung der Leistungsfähigkeit im Sinne einer höheren Bremskraft erzielt. Die Teilung der Einkreisbremsanlage auf eine Zweikreisbremsanlage im Jahre 1906, die allerdings über zwei Fußhebel betätigt wird, trägt einer Steigerung der Funktionalität unter dem Sicherheitsaspekt Rechnung. Dabei sind die Verbindungen zwischen den Fußhebeln und den Radbremsen durch Gestänge bzw. Seilzüge mechanisch realisiert. Eine weitere Erhöhung der Bremskraft bringt die Integration der mechanischen Saugluft-Servo-Bremsanlage nach dem System *Bosch-Dewandre* in das Kraftfahrzeug im Jahre 1928. Bei dieser Vierradbremse wird die Saugwirkung in der Ansaugleitung des Motors als Bremskraft genutzt. Durch den Druck auf den Fußhebel wird ein Steuerschieber betätigt, der eine Verbindung zwischen dem Saugrohr des Vergasers und dem Bremszylinder herstellt. Dessen Kolben betätigt über ein Gestänge die Radbremse. Kräftigeres Treten des Fußhebels bringt die direkte mechanische Bremse in Aktion, so dass diese Bremsanlage bereits mit einer Rückfallebene unter dem Aspekt der Sicherheit ausgestattet ist.

Eine weitere Steigerung der Bremskraft wird mit der hydraulischen Bremsanlage im Jahre 1931 erzielt. Daneben können die Verbindungs- und Übertragungskomponenten flexibler an die geometrischen Gegebenheiten im Kraftfahrzeug angepasst werden. Die Steigerung der Sicherheit steht mit der Einführung der hydraulischen Zweikreisbremsanlage im Jahre 1963, die über nur einen Fußhebel betätigt wird, im Vordergrund. Bei eventuellem Ausfall eines Teils der Betriebsbremse (Bremskreis) kann mit dem verbleibenden Bremskreis immer noch ein Teil der Bewegungsenergie in Wärme gewandelt werden.

Die aufgezeigten Weiterentwicklungen der Bremsfunktion waren ausschließlich eine Verbesserung der Mechanik bzw. Hydraulik und durch die Gesichtspunkte Funktionsverbesserung, Sicherheit und Zuverlässigkeit motiviert.

4.1.3 Funktionale Integration der Elektronik

Die Grenzen der rein mechanisch realisierten Bremsysteme waren erreicht, als komplexere Regelungsaufgaben, Steuerungen über Kennlinien sowie die Speicherung und Verarbeitung großer Informations-

4.1.2 Improvement of the mechanical operating principle and transmission principle

The further developments at the beginning of the 20th century were characterized by an optimization of the mechanical components of the brake system and by the integration of new, refined mechanical operating and transmission principles. With a foot-actuated external-shoe brake, acting on the transmission, in the year 1905, an increase in capability was achieved in terms of a higher braking force. The dividing of the single-circuit brake system into a two-circuit brake system in the year 1906, actuated however by means of two pedals, provided an increase in functionality from the aspect of safety. In this case, the connections between the pedals and the wheel brakes were realized mechanically by linkages or cable lines. A further increase in the braking force was brought about in the year 1928 by the integration into the motor vehicle of the mechanical vacuum-servo brake system based on the *Bosch-Dewandre* system. With this four-wheel brake, the suction effect in the intake line of the motor was used as a braking force. The pressure on the pedal was used to actuate a control valve, which established a connection between the intake pipe of the carburetor and the brake cylinder. The piston of the latter actuated the wheel brake via a linkage. Pressing more forcibly on the pedal brought the direct mechanical brake into action, so that this brake system was already provided with a fall-back level from the aspect of safety.

A further increase in the braking force was achieved by the hydraulic brake system in the year 1931. Along with this, the connecting and transmission components could be adapted more flexibly to the geometrical conditions in the motor vehicle. With the introduction in the year 1963 of the hydraulic two-circuit brake system, which is actuated only by one pedal, the foremost consideration was to increase safety. In the possible event of part of the service brake (brake service) failing, part of the kinetic energy could still be converted into heat by the remaining brake circuit.

The further developments that followed were exclusively an improvement of the mechanics or hydraulics and were motivated by the aspects of functional improvement, safety and reliability.

4.1.3 Functional integration of the electronics

The limits of the purely mechanical brake systems were reached when more complex control tasks, control by means of characteristic curves and also the storing and processing of large amounts of informa-

mengen als Voraussetzung für weitere Innovationen von den Entwicklern gefordert wurden. Die Einführung der Antiblockierfunktion beim Bremsen der Räder (ABS) im Jahre 1978 wurde durch den Einzug der Elektronik in die Bremsanlage möglich: Die mechanischen Funktionen wurden ergänzt durch Sensoren, die mit elektronischen Wirkprinzipien arbeiten, durch elektronische Steuergeräte (Bild 4-2), die der Informationsspeicherung und -verarbeitung dienen, und durch elektronisch betätigtes, hydraulische Schaltventile (Bild 4-3), die als Aktoren den Bremsdruck in den einzelnen Radbremszylindern steuern.

Mit der ABS-Funktion kann auch bei kritischen Fahrverhältnissen ein Blockieren der Räder verhindert werden, sodass das Fahrzeug in jeder Situation lenkfähig ist. Das Fahrzeug folgt der Lenkung stabil und wird optimal abgebremst. Das System erkennt frühzeitig über die Raddrehzahlsensoren die Blockierneigung eines oder mehrerer Räder und sorgt umgehend für eine Konstanthaltung oder Minderung des Drucks in dem jeweiligen Radbremszylinder mit Hilfe der Schaltventile im Hydroaggregat.

tion were required as a precondition for further innovations by the developers. The introduction of the antilock function for the braking of the wheels (ABS) in the year 1978 was possible as electronics were incorporated in the brake system: the mechanical functions were supplemented by sensors which operate with electronic operating principles, by electronic control devices (Figure 4-2) which serve for storing and processing information, and by electronically actuated, hydraulic shift valves (Figure 4-3), which work as actors to control the brake pressure in the individual wheel brake cylinders.

With the ABS function, locking of the wheels can be prevented even under critical driving conditions, so that the vehicle can be steered in any situation. The vehicle follows the steering while remaining stable and is optimally braked. By means of the wheel speed sensors, the system detects at an early time if one or more of the wheels is liable to lock, and immediately ensures that the pressure in the respective wheel brake cylinder is kept constant or reduced with the aid of the shift valves in the hydraulic unit.

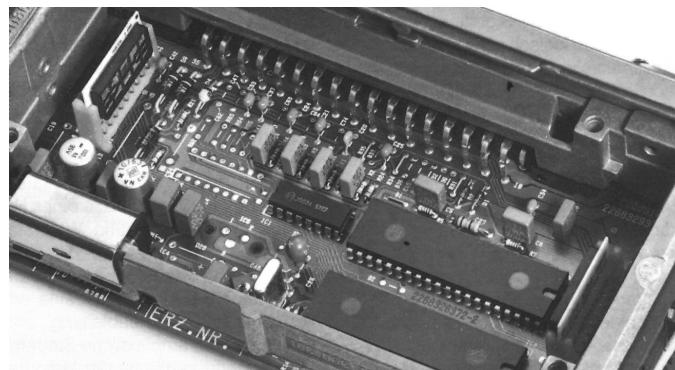


Bild 4-2. ABS-Steuergerät [Rob89]

Fig. 4-2. ABS control device [Rob89]

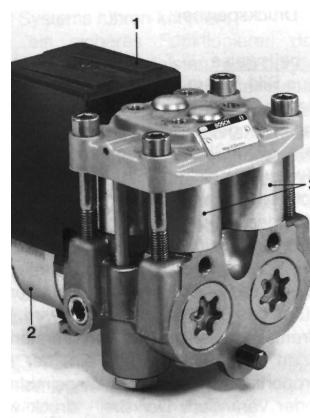


Bild 4-3. ABS-Hydroaggregat [Rob98]

- 1 Speicher
- 2 Rückförderpumpe
- 3 Magnetventil

Fig. 4-3. ABS hydraulic unit [Rob98]

- 1 accumulator
- 2 return pump
- 3 solenoid valve

Erst durch die funktionale Integration der Sensoren, des Steuergeräts und der hydraulischen Aktoren wird die gesamte Funktionalität, die ABS-Funktion, gewährleistet, sodass zu Recht von einem mechatronischen System gesprochen werden kann. Es handelt sich um ein mechatronisches System erster Stufe, da zunächst nur die funktionale Integration realisiert wird. Zur Abgrenzung von Systemen, die sowohl für eine funktionale als auch räumliche Integration stehen, erfolgt eine Klassifizierung von mechatronischen Systemen erster und zweiter Stufe. Bei einem heftigen Bremsvorgang mit sehr unterschiedlichen Fahrbahnreibwerten auf der linken und rechten Fahrzeugseite sowie beim Abkommen von der Fahrbahn entstehen Drehbewegungen des Fahrzeugs um die Hochachse (Gieren), die zu einem Schleudern des Fahrzeugs führen können. Mit der Einführung der Fahrdynamikregelung (ESP) (Bild 4-4) im Jahre 1995 ist die Realisierung einer neuen Fahrzeuge Regelung um die Hochachse verbunden: Sie umfasst im Wesentlichen eine Erweiterung des Sensorkonzepts (Gierraten-, Querbeschleunigungs-, Lenkradwinkel- und Vordrucksensor) sowie die Möglichkeit, unabhängig vom Fahrer einen hydraulischen Druck in einzelnen Radbremszylindern aufbauen zu können.

4.1.4 Funktionale und räumliche Integration der Sensorik und Aktorik

Im Jahre 1996 wird der Erkenntnis, dass die meisten Autofahrer in kritischen Fahrsituationen zwar schnell, aber nicht kräftig genug auf das Bremspedal treten, mit der Einführung eines Bremsassistenten (BAS) (Bild 4-5) in die Bremsanlage Rechnung getragen. Ein Bremskraftverstärker besteht aus zwei Kammern, die durch eine bewegliche Membrane voneinander getrennt sind. Wird nicht gebremst,

Only the functional integration of the sensors, the control unit and the hydraulic actors ensures the overall functionality, the ABS function, really making it possible to speak of a mechatronic system. This is a mechatronic system of the first stage, so initially only the functional integration is realized. To differentiate from systems which constitute both functional and spatial integration, there is a classification of mechatronic systems of the first and second stage. In the case of violent braking when there are very different roadway friction values on the left and right sides of the vehicle, and in the case where the vehicle leaves the roadway, rotational movements of the vehicle about the vertical axis occur (yawing), and can lead to swerving of the vehicle. With the introduction of the electronic stability program (ESP) (Figure 4-4) in the year 1995, a new vehicle control about the vertical axis was brought about: It essentially comprises an extension of the sensor concept (yawing-rate, lateral-acceleration, steering-wheel-angle and admission-pressure sensor) and also the possibility of being able to build up a hydraulic pressure in the individual wheel brake cylinders independently of the driver.

4.1.4 Functional and spatial integration of the sensor and actor technology

In the year 1996, the introduction of a brake power assist unit (BAS) (Figure 4-5) in the brake system was a response to the finding that, although most car drivers respond quickly in critical driving situations, they do not depress the brake pedal forcefully enough. A brake booster comprises two chambers which are separated from each other by a movable membrane. When there is no braking, a negative pres-

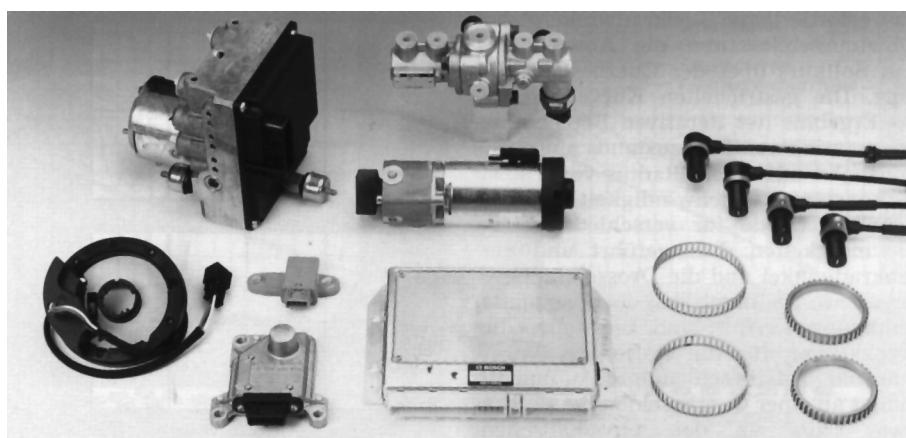


Bild 4-4. Komponenten der Fahrdynamikregelung (ESP) [ZEP94]

Fig. 4-4. Components of the electronic stability program (ESP) [ZEP94]

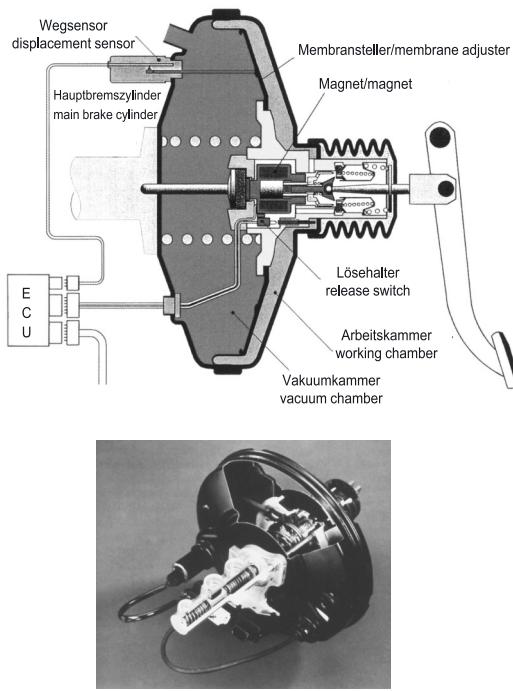


Bild 4-5. Mechatronischer Bremskraftverstärker [KKR97]

Fig. 4-5. Mechatronic brake booster [KKR97]

herrscht in beiden Kammern ein Unterdruck. Tritt der Fahrer auf das Bremspedal, öffnet sich das mechanisch betätigtes Magnetventil und Außenluft dringt in die hintere Kammer. Je nach Bremspedalstellung ist die Druckdifferenz zwischen den beiden Kammern das Maß der Verstärkung. Beim BAS ermittelt ein Wegsensor den Weg an der Membrane. Das elektronische Steuergerät errechnet daraus die Geschwindigkeit, mit welcher das Bremspedal durchgetreten wurde und erkennt, ob eine Notbremsung vorliegt. Erkennt das Steuergerät eine Notbremsung, aktiviert es elektrisch das Magnetventil, das blitzschnell die hintere Kammer des Bremskraftverstärkers belüftet und dadurch den vollen Bremsdruck im Bremsystem aufbaut. Während der Vollbremsung blockieren die Räder aber nicht, weil das ABS die Bremskraft bis zur Schlupfgrenze dosiert. Erst wenn der Fahrer den Pedaldruck deutlich reduziert, schließt ein Löseschalter das Magnetventil, und der Bremskraftverstärker funktioniert wieder normal. Mit dem BAS ist bereits ein mechatronisches System in die Bremsanlage integriert worden, das sowohl für eine funktionale als auch räumliche Integration der Sensorik und Aktorik steht. Die Informationsverarbeitung ist allerdings noch separat in einem eigenständigen Steuergerät ausgeführt.

sure prevails in both chambers. If the driver depresses the brake pedal, the mechanically actuated solenoid valve opens and outside air penetrates into the rear chamber. Depending on the brake pedal position, the pressure difference between the two chambers is a measure of the boosting. In the case of the BAS, a displacement sensor determines the displacement at the membrane. The electronic control device calculates from this the speed with which the brake pedal was depressed and detects whether it is a case of emergency braking. If the control device detects emergency braking, it electrically activates the solenoid valve, which admits air to the rear chamber of the brake booster extremely quickly and thereby builds up the full braking pressure in the brake system. The wheels do not lock, however, during the full braking, because the ABS apportions the braking force up to the slip limit. Only when the driver distinctly reduces the pedal pressure does a release switch close the solenoid valve and the brake booster returns to its normal operation. With the BAS, a mechatronic system which constitute both a functional integration and a spatial integration of the sensor and actor technology has already being integrated into the brake system. However, information processing is still carried out separately in an independent control device.

4.1.5 Neue Funktionen einer mechatronischen Kraftfahrzeubremssanlage

Der nächste Innovationsschritt erfolgt im Jahr 2001 mit der Trennung der hydraulischen Verbindung zwischen dem Bremspedal und den Radbremsen in der elektrohydraulischen Bremse (EHB). Die bisher bekannte Betätigung des Bremspedals wird ersetzt durch eine Betätigungsseinheit (Bild 4-6), die aus einem Pedalgefühlssimulator und Sensoren zur Fahrerwunscherfassung besteht. Die Signale dieser Einheit und weiterer Sensoren werden auf elektrischem Weg („by wire“) an den Regler im Steuergerät übertragen. Im Kernstück der EHB, der zentralen mechatronischen Steuereinheit (Bild 4-7), zeigt das interdisziplinäre Zusammenspiel von Maschinenbau, Elektro- und Informationstechnik seine größten Vorteile: Mikroprozessor, Software, Sensoren, hydraulische Ventile und Elektropumpe arbeiten zusammen und ermöglichen ein völlig neuartiges, hochdynamisches Bremsenmanagement.

4.1.5 New functions of a mechatronic brake system

The next innovative step took place in the year 2001 with the separation of the hydraulic connection between the brake pedal and the wheel brakes in the electrohydraulic brake (EHB). The previously known actuation of the brake pedal is replaced by an actuating unit (Figure 4-6), which comprises a pedal feeling simulator and sensors for detecting the wishes of the driver. The signals of this unit and further sensors are transmitted by electronic means (by wire) to the controller in the control unit. In the most important part of the EHB, the central mechatronic control unit (Figure 4-7), the interdisciplinary cooperation of mechanical engineering, electrical engineering and information technology shows its greatest advantages: the microprocessor, software, sensors, hydraulic valves and electric pump operate together and make a completely novel, highly dynamic type of brake management possible.



Bild 4-6. Mechatronisches Bremspedal der EHB [Con01]

Fig. 4-6. Mechatronic brake pedal of the EHB [Con01]



Bild 4-7. Zentrale mechatronische Steuereinheit der EHB [EDG01]

Fig. 4-7. Central mechatronic control unit of the EHB [EDG01]

Im Steuergerät der EHB treffen neben den Daten über die Betätigung des Bremspedals auch die Sensor-signale anderer elektronischer Assistenzsysteme zusammen. So liefert das ABS z.B. Informationen über die Drehzahlen der Räder, ESP stellt die Daten seiner Lenkwinkel-, Drehraten- und Querbeschleunigungs-sensoren zur Verfügung und die Getriebesteuerung liefert die eingelegte Fahrstufe. Das Ergebnis dieser Berechnungen sind Bremsbefehle, die in der jewei-ligen Fahrsituation ein Höchstmaß an Verzögerung und Fahrstabilität garantieren; so wird je nach Fahr-situation für jedes Rad der optimale Bremsdruck be-rechnet. Ein Hochdruckspeicher enthält die Brems-flüssigkeit, die mit einem Druck von 140 bis 160 bar in das System strömt.

Das Steuergerät regelt den Druck und steuert auch die an den Speicher angeschlossene Elektropumpe. Hier-durch können deutlich kürzere Ansprechzeiten als bei herkömmlichen Bremsanlagen realisiert werden. Selbst bei ausgeschaltetem Motor steht die volle Bremswirkung zur Verfügung. Die Hydraulikeinheit besteht im Wesentlichen aus vier so genannten „Rad-druckmodulatoren“. Sie dosieren den Bremsdruck bedarfsgerecht und leiten ihn an die Bremsen weiter. So lassen sich die Vorgaben des Mikroprozessors realisieren und jedes Rad wird im Interesse der Fahrsta-bilität und der größtmöglichen Verzögerung individuell abgebremst. Drucksensoren in den Raddruck-modulatoren überwachen die Vorgänge.

Die elektromechanische Bremse (EMB), die aus heu-iger Sicht im Jahre 2006 die nächste Innovation be-schreibt, geht noch einen Schritt weiter und verzichtet auf Bremszyliner, -leitungen und -schläuche, die durch elektrische Kabel ersetzt werden. Der Einsatz der Elektronik verringert den Wartungsaufwand, zu-dem kann auf die teure Entsorgung der Bremsflüssig-keit verzichtet werden. Wie stark der Bremswunsch des Fahrers ist, ermitteln auch bei der EMB Sensoren im Bremspedalsimulator. Das Steuergerät verarbeitet die empfangenen Signale, verknüpft sie gegebenen-falls mit Daten anderer Sensoren und Regelungssys-teme, und errechnet für jedes Rad die Kraft, mit der die Bremsbeläge an die Bremsscheibe gedrückt wer-den sollen. Die Radbremsmodule (Bild 4-8) bestehen hauptsächlich aus einer elektrischen Steuereinheit, ei-nem Elektromotor und einem Getriebe. Elektromotor und Getriebe bilden den Aktor, der im Bremssattel die Zuspannkräfte erzeugt. Die vier Aktoren sind in der Lage, innerhalb von Millisekunden jeweils Kräfte bis zu mehreren Kilo-Newton bereit zu stellen.

In the control device of the EHB, not only the data concerning the actuation of the brake pedal but also the sensor signals of other electronic assistance sys-tems come together. The ABS therefore provides, for example, information on the rotational speeds of the wheels, the ESP provides the data of its steering-angle, rotating-rate, lateral-acceleration sensors and the transmission control provides the selected driving position. The result of these calculations are braking commands which ensure a maximum deceleration and vehicle stability in the respective driving situation; for instance, the optimum braking pressure is calculated for each wheel according to the driving situation. A high-pressure accumulator contains the brake fluid, which flows into the system at a pressure of 140 to 160 bar.

The control device regulates the pressure and also controls the electric pump connected to the accumu-lator. As a result, much shorter response times than in the case of conventional brake systems can be realized. Even when the engine is switched off, the full braking effect is available. The hydraulic unit essen-tially comprises four so-called "wheel pressure mod-u-lators". They apportion the braking pressure accord-ing to requirements and pass it on to the brakes. In this way, the setpoints selections of the microproces-sor can be realized and each wheel is individually braked in the interests of vehicle stability and greatest possible deceleration. Pressure sensors in the wheel pressure modulators monitor the processes.

The electromechanical brake (EMB), which from the current perspective describes the next innovation in the year 2006, goes another step further and dispenses with brake cylinders, lines and hoses, which are re-placed by electric cables. The use of electronics re-duces the amount of maintenance required; moreover, the expensive disposal of brake fluid is no longer nec-essary. The degree of braking desired by the driver is also determined in the case of EMB by sensors in the brake pedal simulator. The control unit processes the signals received, possibly combines them with data from other sensors and control systems and calculates for each wheel the force with which the brake liners are to be pressed against the brake disk. The wheel brake modules (Figure 4-8) principally comprise an electronic control unit, an electric motor and a trans-mission. The electric motor and transmission form the actor which generates the tensile forces in the brake caliper. The four actors can each produce forces of up to several kilonewtons within milliseconds.



Bild 4-8. Bremskraftsteller der EMB [Sch99]

Die EMB, die sich ohne großen Aufwand zur elektronischen Parkbremse (EPB) erweitern lässt, verspricht durch das schnelle Ansprechen der Bremsen verkürzte Anhaltewege. Durch das elektronische Bremspedal, seine günstige, ergonomische Anordnung und die geringeren möglichen Bedienkräfte kann ein Zeitgewinn von einer halben Sekunde realisiert werden, der den Anhalteweg aus 100 km/h um etwa 20 % verkürzt. Auf Grund der ausschließlich elektrischen Signalübertragung kann das Pedalmodul (Bild 4-9) im Gegensatz zur rein mechanisch-hydraulischen oder der elektro-hydraulischen Bremse näher an die Spritzwand rücken. Dadurch entsteht mehr Platz im Innenraum und das Verletzungsrisiko im Fußraum wird reduziert.

Die Entwicklung der Kraftfahrzeugebremsanlage über einen Zeitraum von 120 Jahren zeigt sehr schön den Wandel von einem mechanischen zu einem mechatronischen System. Die Forderungen an die Kraftfahrzeugebremsanlage nach mehr Verzögerungsleistung bzw. steigender Funktionalität, Sicherheit, Komfort, Wirtschaftlichkeit und besserer Umweltverträglichkeit bei gleichzeitig immer kürzer werdenden Produktzyklen bedingen einen hohen Integrationsgrad auf Systemebene und lassen die Mechatronik zu einem immer bedeutenderen und wettbewerbsbestimmenderen Faktor für zukünftige Innovationen werden.

Fig. 4-8. Braking force adjuster of the EMB [Sch99]

The EMB, which can easily be extended to form the electric parking brake (EPB), promises to deliver reduced stopping distances by the rapid response of the brakes. The electronic brake pedal, its favorable ergonomic arrangement and the lower operating forces can provide a time gain of half a second, which reduces the stopping distance from 100 km/h by approximately 20 %. On account of the exclusively electrical signal transmission, the pedal module (Figure 4-9) can be moved closer to the bulkhead, by contrast with the purely mechanical-hydraulic or electrohydraulic brake. This creates more space in the passenger compartment and reduces the risk of injury in the foot well.

The development of the motor-vehicle brake system over a period of 120 years shows very nicely the change from a mechanical system to a mechatronic system. The requirements imposed on the motor-vehicle brake system for greater decelerating power or increasing functionality, safety, comfort, cost-effectiveness and better environmental compatibility, with at the same time ever shorter product cycles, brings about a high degree of integration at system level and makes mechatronics become an ever more significant and competitive-determining factor for future innovations.



Bild 4-9. Brems- und Fahrpedal der EMB [Con01]

Fig. 4-9. Brake and gas pedals of the EMB [Con01]

4.2 Entwurf der Antriebseinheit einer einfachen Lackieranlage

Am Beispiel einer einfachen Lackieranlage werden wesentliche Schritte der Teilprozesse *Systementwurf* und anfängliche *Modellbildung* gezeigt (vgl. Abschnitt 3.1.3).

Die Aufteilung der Gesamtfunktion in Telfunktionen soll als bereits durchgeführt gelten. Gegenstand der Ausführungen ist die Telfunktion *Erzeugen einer oszillierenden Translationsbewegung*. Für eine Struktur, die die Telfunktion erfüllt, wird ein einfaches Gesamtmodell der Antriebseinheit hergeleitet, das dynamische Verhalten des geregelten Systems dargestellt und Wechselwirkungen zur Konstruktion aufgezeigt. Eine ausführlichere Darstellung des Beispiels findet sich in [Nor01].

Zur Farbgebung von Massenartikeln (Küchengeräte, Audio- und Videogeräte, Alu-Felgen) kommen oft Lackieranlagen in Form von Durchlaufstraßen zum Einsatz. Dabei durchlaufen die zu lackierenden Objekte auf einem Förderband kontinuierlich die Anlage. Der Lackauftrag wird durch mehrere Sprühseinheiten vorgenommen, deren oszillierende Bewegung entweder vertikal (für die Seitenflächen des Objekts) oder horizontal (für die Oberseite des Objekts) verläuft (Bild 4-11).

4.2 Design of the drive unit of a simple painting system

Important steps of the subprocesses of *system design* and initial *modeling* are shown in the example of a simple painting system (cf. Section 3.1.3).

The division of the overall function into subfunctions is to be considered as already carried out. The subject discussed is the subfunction of *producing an oscillating translatory movement*. For a structure which performs the subfunction, a simple complete model of the drive unit is derived, the dynamic behavior of the controlled system represented and interactions with respect to the construction illustrated. A more detailed representation of the example can be found in [Nor01].

For painting mass-produced articles (kitchen appliances, audio and video equipment, aluminum wheel rims), painting systems in the form of continuous lines are often used. On these, the objects to be painted pass continuously through the system on a conveyor belt. The paint is applied by a number of spraying units, the oscillating movement of which runs either vertically (for the side surfaces of the object) or horizontally (for the upper side of the object) (Figure 4-11).

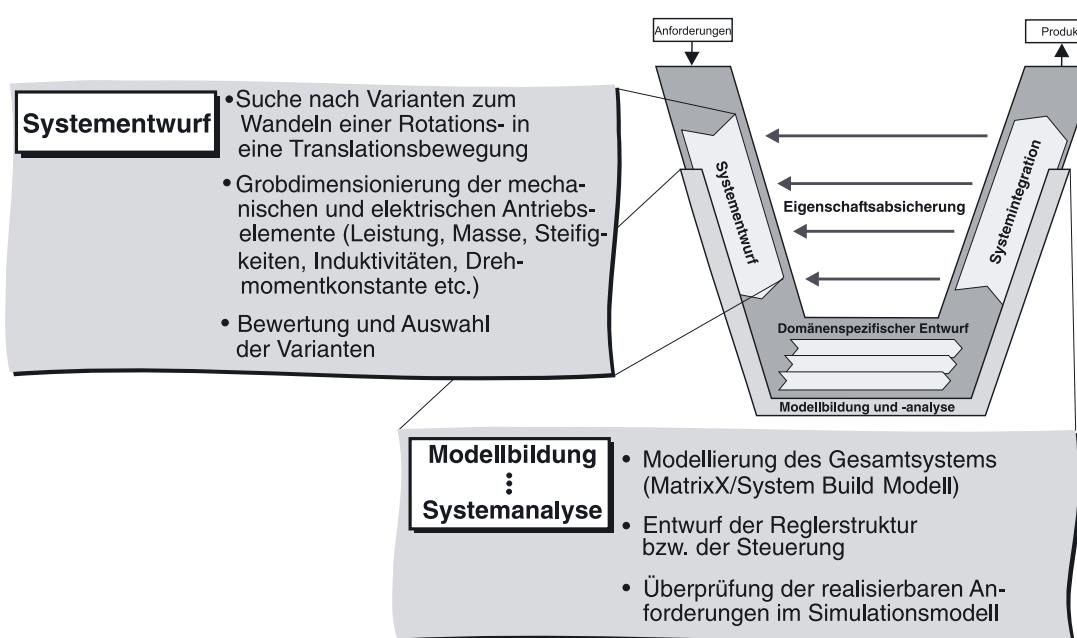


Bild 4-10. Vorgehen beim Entwurf der Antriebseinheit einer einfachen Lackieranlage

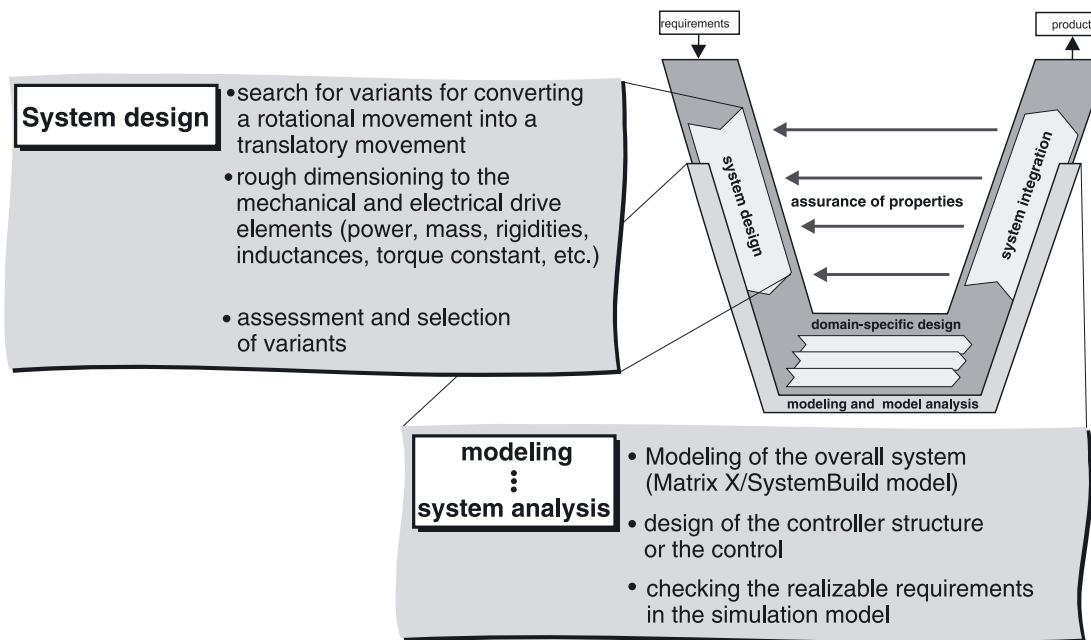


Fig. 4-10. Procedure for designing the drive unit of a simple painting system

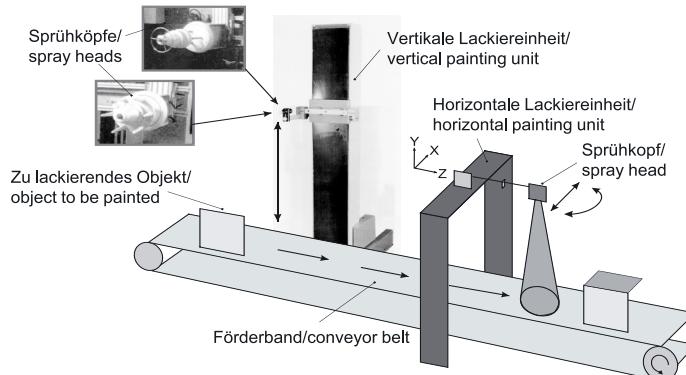


Bild 4-11. Prinzipdarstellung der Durchlaufstraße

Fig. 4-11. Basic representation of the continuous line

Bei modernen Lackieranlagen wird der Lackstrom im Sprühkopf elektrostatisch aufgeladen, um die Lackmenge zu vergrößern, die sich tatsächlich auf dem mit entgegengesetzter Polarität aufgeladenen Objekt niederschlägt (Verringerung des so genannten „Overspray“). Daher liegen am Sprühkopf Hochspannungen von ca. 100 kV an und er muss zur Vermeidung von Überschlägen über einen elektrisch nicht-leitenden bzw. mit nicht-leitendem Material ummantelten Ausleger von mindestens 800 mm Länge mit der Antriebseinheit verbunden sein.

In the case of modern painting systems, the stream of paint in the spray head is electrostatically charged, in order to increase the amount of paint which is actually deposited on the object, which is charged with opposite polarity (reduction of so-called "overspray"). The spray head is therefore under high voltages of about 100 kV and, to avoid flashovers, must be connected to the drive unit by means of a boom which is electrically nonconducting or sheathed with nonconducting material and at least 800 mm in length.

An den gleichmäßigen Lackauftrag werden hohe Anforderungen gestellt, da das Auge selbst sehr kleine Welligkeiten in der Lackschichtdicke wahrnimmt. Für die Bewegung des Sprühkopfs muss daher über eine definierte Wegstrecke eine konstante Geschwindigkeit eingehalten werden.

4.2.1 Ausgewählte Anforderungen

Soll-Geschwindigkeit in x -Richtung:

1 m/s

Wegstrecke mit konstanter Soll-Geschwindigkeit in x -Richtung über dem Band:

700 mm (Wunsch: 900 mm)

Maximale Schwingungsamplituden in x -Richtung im Bereich konstanter Soll-Geschwindigkeit:

± 3 mm (Wunsch: ± 2 mm)

Elektrischer Antrieb

Die geometrischen Anforderungen sind in Bild 4-12 zusammengefasst.

4.2.2 Systementwurf

Die Erzeugung einer oszillierenden Translationsbewegung – gerade auch in der Variante „Wandeln einer Rotations- in eine Translationsbewegung“ – ist nahezu ein Standardbeispiel der Konstruktionsmethodik (vgl. beispielsweise [Rot00]). Es fällt daher leicht, eine Lösungsvielfalt für diese Teilfunktion zu erreichen, wie in Bild 4-13 beispielhaft dargestellt.

Zur weiteren Unterteilung wurde zwischen Lösungsvarianten mit direkter Erzeugung der Translation und Varianten mit einer Umformung von Rotation in Translation unterschieden. Für die zweite Kategorie kann weiter unterteilt werden, ob das Oszillieren durch den elektrischen Antrieb oder einen Mechanismus erreicht wird.

High requirements are demanded for uniform application of the paint, since even very small undulations in the thickness of the coat of paint are perceptible to the human eye. Therefore, the spray head must be moved at a constant speed over a defined distance.

4.2.1 Selected requirements

Desired speed in x direction:

1 m/s

Distance at constant desired speed in x direction over the belt:

700 mm (ideally: 900 mm)

Maximum oscillating amplitudes in x direction in the range of constant desired speed:

± 3 mm (ideally: ± 2 mm)

Electric drive

The geometrical requirements are summarized in Figure 4-12.

4.2.2 System design

The production of an oscillating translatory movement – specifically also in the variant "converting a rotational movement into a translatory movement" – is actually a standard example of construction methodology (cf. for example [Rot00]). It is therefore easy to achieve a variety of solutions for this subfunction, as represented by way of example in Figure 4-13.

For further subdivision, a distinction is made between solution variants with the translation produced directly and variants with a transformation from rotation into translation. For the second category, it is possible to subdivide further according to whether the oscillating is achieved by the electric drive or a mechanism.

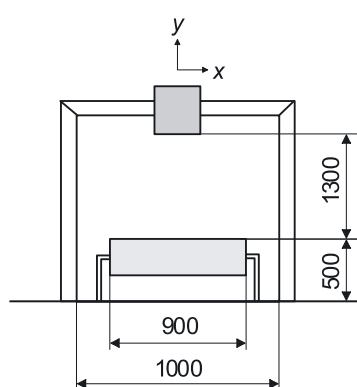


Bild 4-12. Geometrische Anforderungen

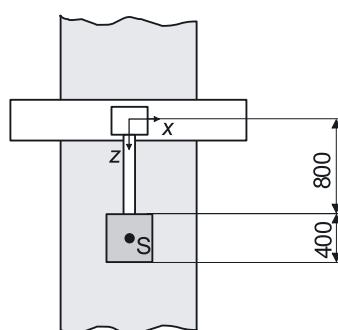


Fig. 4-12. Geometrical requirements

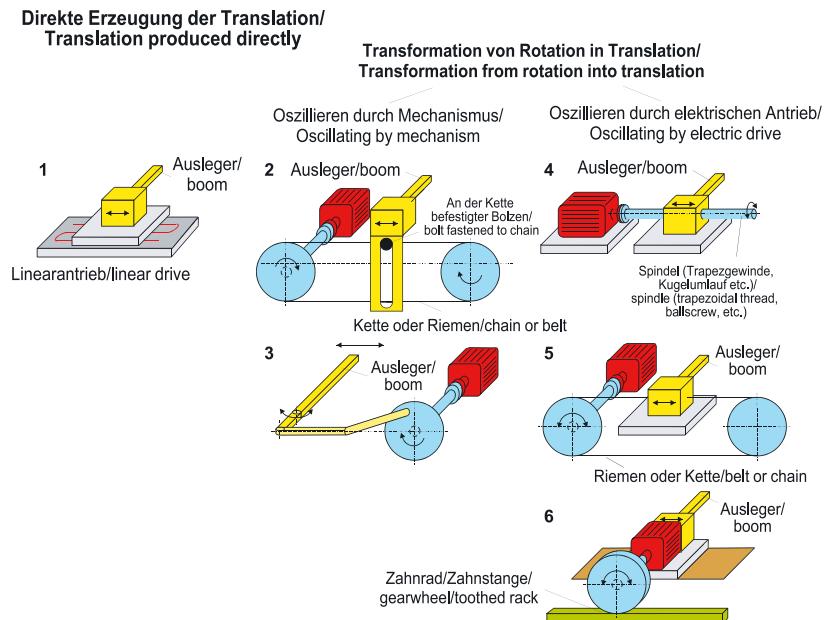


Bild 4-13. Lösungsvarianten des Systementwurfs

Fig. 4-13. Solution variants of the system design

Die Auswahl eines jeweils geeigneten Antriebs wird dadurch ganz wesentlich beeinflusst. So lassen sich die Varianten 2 und 3 mit einem einfachen Asynchronmotor ohne Umrichter erzeugen, während die Varianten 3 bis 5 diesen benötigen und auch höhere Anforderungen an die Dynamik des Motors stellen. Variante 1 setzt einen elektrischen Linearantrieb voraus.

Eine genauere Bewertung der Varianten kann in diesem Rahmen nicht erfolgen. Es soll aber angemerkt werden, dass Varianten des Typs 2 eine praxisübliche Lösung darstellen, die jedoch große Probleme mit mechanischen Belastungen und Verschleiß in der Kulissenführung aufweisen und weiterhin zu einer unflexiblen Kinematik im Umkehrbereich führen. Beispielhaft für ein anderes Konzept soll daher Variante 5 mit einem bürstenlosen GS-Motor in Kombination mit einem Zahnriementrieb betrachtet werden.

4.2.3 Modellbildung

Zunächst wird für die mechanischen Komponenten ein einfaches Modell erstellt. Alle Trägheiten des Antriebs (Rotor des Motors, Wellen, Zahnscheiben) werden zu einer trügen Masse zusammengefasst. Die Masse des Auslegers wird anteilig auf den Sprühkopf und den Schlitten aufgeteilt. Man erhält so einen Zwei-Massenschwinger mit Kraftanregung am Schlitten. Bild 4-14 zeigt die Modellbildung und das Aufstellen der Differentialgleichungen.

The selection of a suitable drive in each case is influenced quite significantly by this. For instance, variants 2 and 3 can be produced with a simple asynchronous motor without a converter, while variants 3 to 5 require the latter and also impose high requirements on the dynamics of the motor. Variant 1 needs an electric linear drive.

A more precise assessment of the variants cannot be made within the scope of this guideline. However, it should be noted that variants of type 2 represent a solution that is customary in practice, but have great problems with mechanical loads and wear in the connecting link guide and also lead to inflexible kinematics in the returning area. Therefore, variant 5 with a brushless DC motor in combination with a toothed belt drive is to be considered by way of example.

4.2.3 Modeling

Firstly, a simple model is created for the mechanical components. All the inertias of the drive (rotor of the motor, shafts, toothed disks) are combined to form an inert mass. The mass of the boom is divided proportionately between the spray head and the carriage. In this way, a two-mass oscillator with force excitation on the carriage is obtained. Figure 4-14 shows the modeling and the formulating of the differential equations.

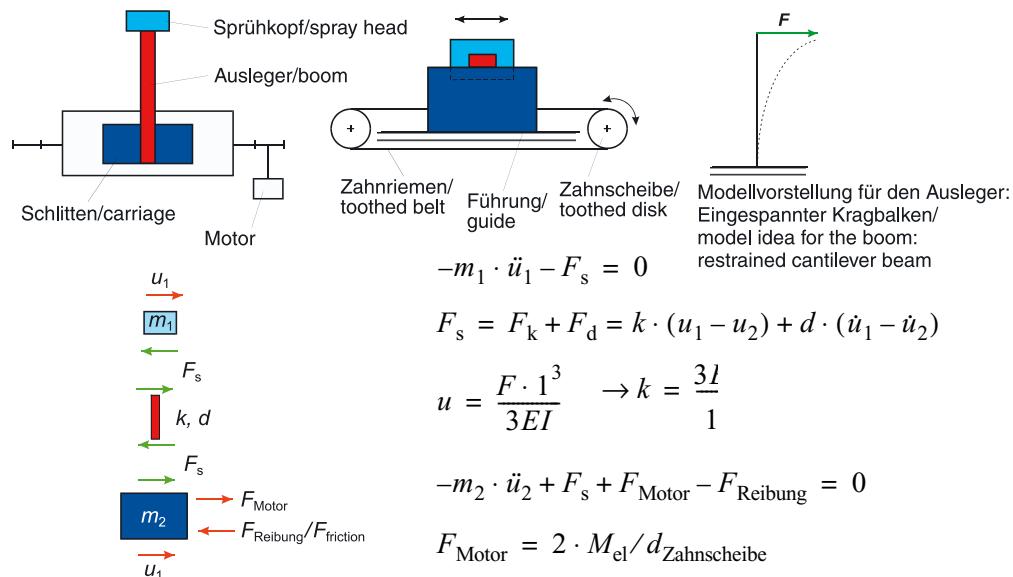


Bild 4-14. Aufstellen der Differentialgleichungen für das einfache mechanische Ersatzmodell

Der verwendete GS-Motor wird durch seine Wicklungsinduktivität und -widerstand sowie zwei konstante Faktoren k_i und k_E mit den Gleichungen

$$i = \frac{1}{L} \cdot (U_{\text{Motor}} - R \cdot i - k_E \cdot \dot{\phi})$$

$$M_{\text{el}} = k_i \cdot i$$

beschrieben. Der Term $k_E \cdot \dot{\phi}$ beschreibt die Gegeninduktion und koppelt die mechanischen und elektrischen Gleichungssysteme.

4.2.4 Regelstruktur

Das System wird als Kaskadenregelung mit drei PID-Reglern ausgeführt. In der inneren Kaskade sorgt die Stromregelung dafür, dass die Induktivität der Motorwicklung, die den Stromanstieg begrenzt, durch eine erhöhte Motorspannung kompensiert wird. Das dynamische Verhalten des Motors wird also idealisiert. Die mittlere Kaskade beinhaltet die Drehzahlregelung des Motors, während die äußere Kaskade die Position regelt. Hierbei wird zusätzlich noch der Sollweg als Vorsteuerung aufgeschaltet. Weiterhin werden in der Reglerkaskade Begrenzungen sowohl für den maximalen Motorstrom (43 A) als auch die maximale Motorspannung (300 V) integriert. Bild 4-15 zeigt das Gesamtsystem.

4.2.5 Analyse des geregelten Systems

Um zu überprüfen, ob die Anforderungen an die Kinematik erfüllt werden, muss sowohl die Geschwin-

Figure 4-14. Formulating the differential equations for the simple mechanical substitute model

The DC motor used is described by its winding inductance and winding resistance and also two constant factors k_i and k_E with the equations

$$i = \frac{1}{L} \cdot (U_{\text{motor}} - R \cdot i - k_E \cdot \dot{\phi})$$

$$M_{\text{el}} = k_i \cdot i$$

The term $k_E \cdot \dot{\phi}$ describes the mutual induction and couples the mechanical and electrical equation systems.

4.2.4 Control structure

The system is designed as a cascade control with three PID controllers. In the inner cascade, the current control ensures that the inductance of the motor winding which limits the rate of current rise is compensated by an increased motor voltage. The dynamic behavior of the motor is consequently idealized. The middle cascade comprises the speed control of the motor, while the outer cascade controls the position. The desired displacement is also additionally fed forward here as a precontrol. Furthermore, limitations both for the maximum motor current (43 A) and the maximum motor voltage (300 V) are integrated in the controller cascade. Figure 4-15 shows the overall system.

4.2.5 Analysis of the controlled system

In order to check whether the requirements on the kinetics are satisfied, both the speed of the spray head

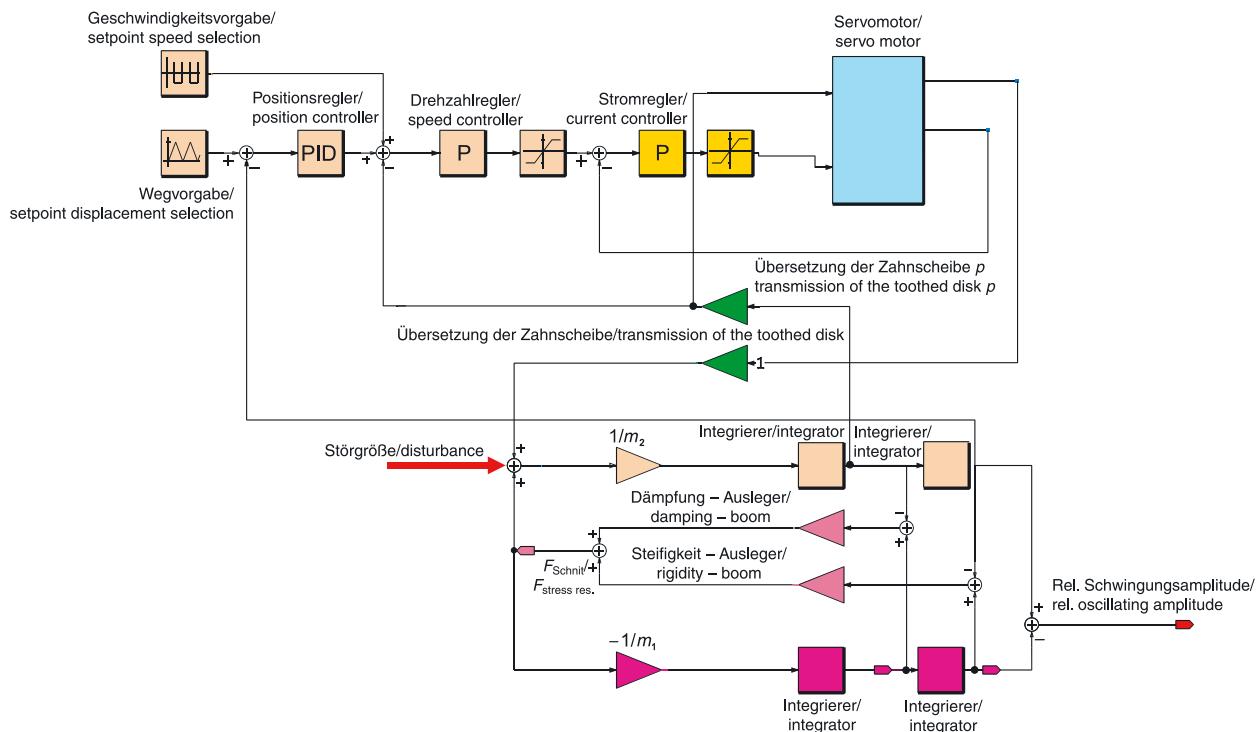


Bild 4-15. Blockschaltbild des Gesamtsystems

Fig. 4-15. Block diagram of the overall system

digkeit des Sprühkopfs als auch die Differenz des We- ges zwischen Schlitten und Sprühkopf betrachtet werden. Weiterhin lässt sich in der Simulation die Schnitt- kraft auf den Ausleger bestimmen. Mit dieser kann dann z.B. eine genauere Dimensionierung vorgenommen werden.

Darüber hinaus kann vorab überprüft werden, ob das System in der Lage ist, Störgrößen auszuregeln, wie sie sich z.B. durch Fremdkörper auf der Führung des Schlittens ergeben können. Hierzu wird eine kurzzeitig wirkende Störkraft am Kraftsummationspunkt des Schlittens aufgebracht. Bild 4-16 zeigt die Simula- tionsergebnisse des Blockschaltbildes.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Anforderungen an die Kinematik des Sprühkopfs über weite Bereiche des Verfahrwegs gut erfüllt werden und die Störgröße aus- geregelt wird. Damit erfüllt das einfache Simulations- modell in den frühen Phasen auch die Funktion der Ve- rifikation. Weitergehende Modellbildungen können z.B. durch FEM-Modelle des Auslegers mit seinen Anschlussbefestigungen oder Berücksichtigung des realen Verstärker- und Sensorverhaltens erfolgen.

4.2.6 Weitergehende Einflussmöglichkeiten erkennen

Eine wichtige kinematische Größe ist die Relativ- verschiebung zwischen Sprühkopf und Schlitten. Diese hängt konstruktiv eng mit der Steifigkeit und

and the difference in the displacement between the carriage and the spray head must be considered. Furthermore, the stress resultant on the boom can be determined in the simulation. This can then be used for example for performing more accurate dimensioning.

In addition, it can be checked in advance whether the system is capable of compensating for disturbances, such as can be caused for example by foreign bodies on the guide of the carriage. For this purpose, a briefly acting disturbing force is applied at the force summation point of the carriage. Figure 4-16 shows the simulation results of the block diagram.

The results show that the requirements for the kinematics of the spray head are well satisfied over wide ranges of the traveling path and compensation for the disturbance takes place. Consequently, the simple simulation model also performs the function of verification in the early phases. Further modeling may take place, for example by FEM models of the boom with its connection fastenings or consideration of the real amplifier and sensor behavior.

4.2.6 Identifying further possibilities for influence

An important kinematic variable is the relative dis- placement between the spray head and the carriage. With respect to the construction, this is closely related

Dämpfung des Auslegers zusammen. Es könnte also untersucht werden, ob sich durch konstruktive Erhöhung von Steifigkeit und/oder Dämpfung des Auslegers das Gesamtsystem weiter verbessern lässt. Eventuell ist auch ein Motor geringerer Leistung einsetzbar, da dann nur geringere Schwingungen und Geschwindigkeitsschwankungen auszuregeln wären. Es ist jedoch zu beachten, dass die Steifigkeits- oder Dämpfungsverhältnisse unter Umständen die Masse des Auslegers erhöht und darüber wieder die dynamischen Eigenschaften verschlechtert.

Ein Nachteil der bisher vorgestellten Lösung ist der nicht unerhebliche Aufwand für die Regelung. Neben der notwendigen Reglerhardware wird auch noch ein Wegsensor für einen Messbereich von einem Meter benötigt. Ein alternatives System könnte daher auf die Regelung verzichten und den Motor gesteuert betreiben.

Dabei stellt sich die Frage, wie ein sinnvolles Steuersignal für den Motor aussehen müsste. Diese Frage lässt sich mit dem bisherigen Kenntnisstand leicht beantworten: Das Signal müsste so aussehen wie die Motorspannung, die die Reglerkaskade aus Bild 4-15 an den Motor anlegt. Die notwendigen Steuersignale könnten z.B. in einer SPS abgelegt werden.

Am Beispiel einer Antriebseinheit wurde die Herleitung eines einfachen Simulationsmodells gezeigt, das aber bereits die wesentlichen Effekte des dynamischen Verhaltens wiedergibt. Ansatzpunkte für konstruktive Weiterentwicklungen aufzeigt und Eingangsgrößen für die Festigkeitsrechnung liefert.

4.3 Entwurf eines aktiven Feder-/ Neigemoduls

Dieses Beispiel zeigt den Entwurf eines aktiven Fahrwerks in der Bahntechnik [LLJ00]. Zunächst wird der Aufbau des betrachteten Systems erläutert. Es folgt eine Beschreibung der hierarchischen Struktur und der Regelung. Abschließend wird auf die Validierung am Prüfstand eingegangen (vgl. Bild 4-17).

Verbesserung von Fahrkomfort und Fahrsicherheit sind wichtige Anforderungen an eine moderne Schienenverkehrstechnik. Herkömmliche Schienenfahrzeuge sind mit einer passiven Feder-Dämpfer-Kombination ausgerüstet und verfügen darüber hinaus über einen, gemessen an heutiger Fahrzeugtechnik, schlechten Fahrkomfort. Gleislagefehler führen zu Wagenkastenschwingungen, die den Fahrkomfort des Passagiers verschlechtern und die Fahrsicherheit gefährden. Diese Fahrwerkseigenschaften können mit Hilfe von aktiver Federungstechnik verbessert werden. Auch die schnelle Fahrt über Gleisbögen soll durch den Einsatz eines aktiven Kurvenneigers erreicht werden.

to the rigidity and damping of the boom. It could consequently be investigated whether the overall system can be further improved by increasing the rigidity and/or damping of the boom by constructional design measures. A motor with lower power could possibly also be used, since then only lower vibrations and fluctuations in speed would have to be corrected. However, it should be noted that, under some circumstances, increasing the rigidity or damping increases the mass of the boom and, what is more, impairs the dynamic properties.

One disadvantage of the solution presented so far is the not inconsiderable expenditure needed for the control. Apart from the necessary controller hardware, a displacement sensor is also required for a measuring range of one meter. An alternative system could therefore dispense with the closed-loop control and operate the motor under open-loop control.

This gives rise to the question as to what form an appropriate control signal for the motor should take. This question can be easily answered with the knowledge gathered so far: the signal must take a form similar to the motor voltage which the controller cascade from Figure 4-15 applies to the motor.

The necessary control signals could be stored for example in a stored-program controller. The example of a drive unit has been used to show how to derive a simple simulation model, which, however, already reproduces the main effects of dynamic behavior, illustrates starting points for further developments of the construction and provides input variables for the strength calculation.

4.3 Design of an active spring/tilting module

This example shows the design of an active chassis in railroad technology [LLJ00]. Firstly, the setup of the system being considered is explained. There follows a description of the hierarchical structure and the control. Finally, the validation on the test stand is discussed (cf. Figure 4-17).

Improving riding comfort and safety are important requirements for modern rail transportation technology. Conventional rail vehicles are equipped with a passive spring-damper combination and also have poor riding comfort in comparison with today's vehicle technology. Faults in the level of the track bed lead to car body oscillations, which impair the riding comfort of the passenger and put safety at risk. These chassis properties can be improved with the aid of active suspension technology. High-speed travel over track bends is also to be achieved by the use of an active tilting device.

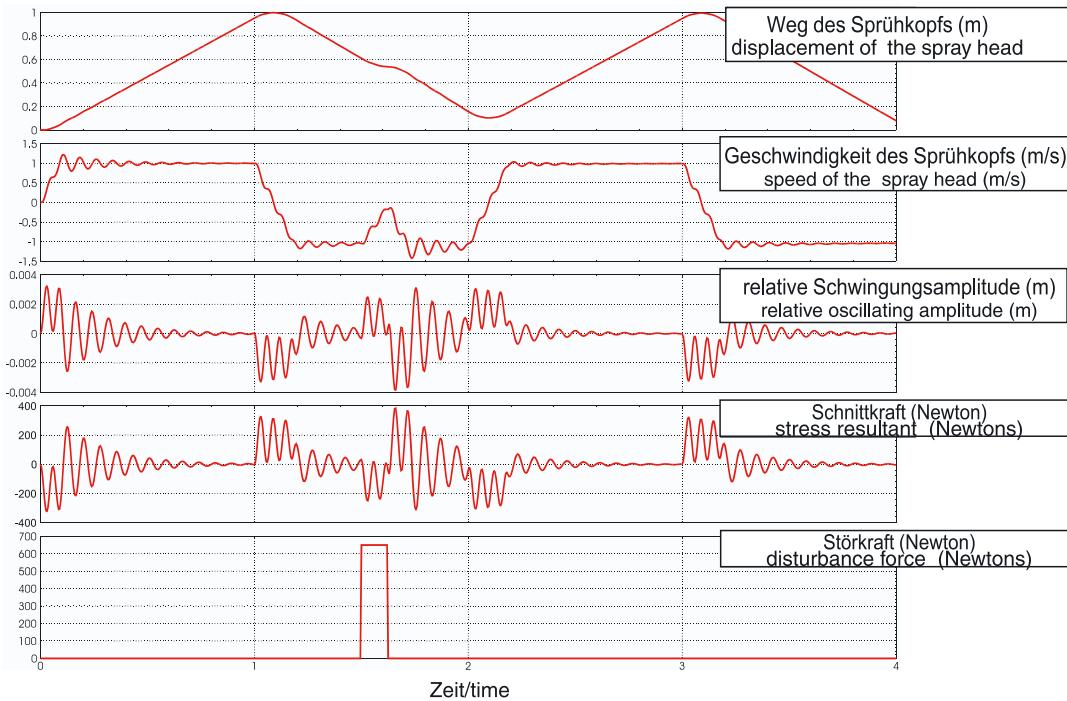


Bild 4-16. Simulationsergebnisse des Blockschaltbildes aus Bild 4-15

Fig. 4-16. Simulation results of the block diagram from Figure 4-15

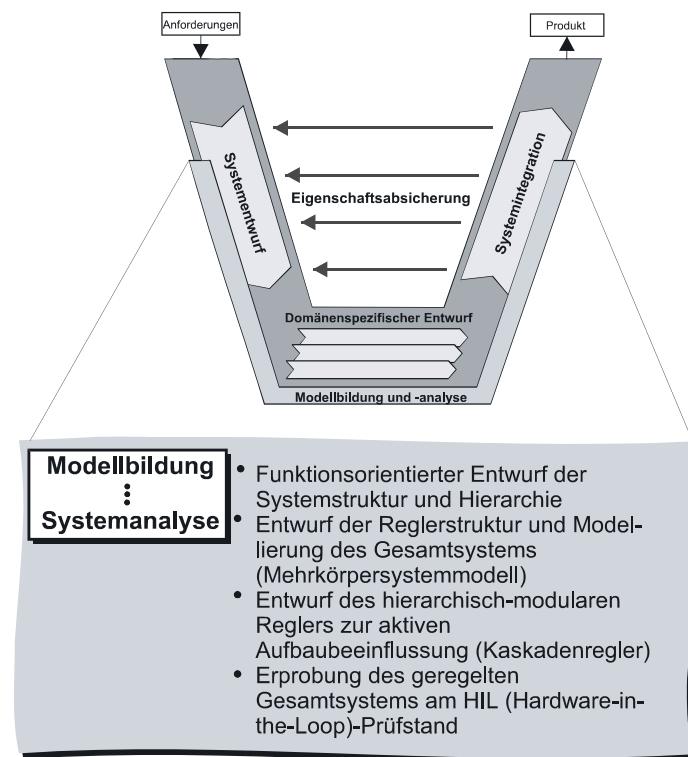


Bild 4-17. Vorgehens in den Phasen Modellbildung bis Systemanalyse beim Entwurf eines aktiven Feder-/Neigemoduls

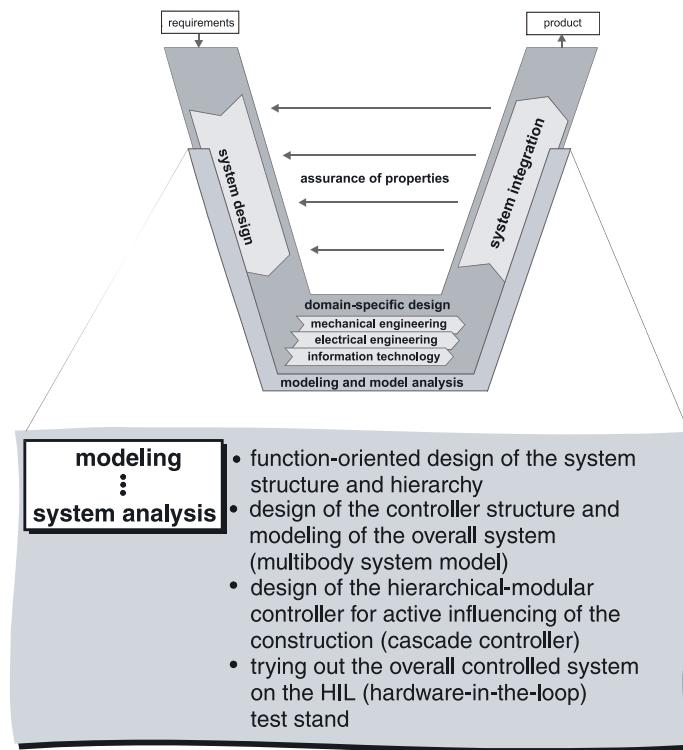


Fig. 4-17. The procedure in the phases of modeling to system analysis when designing an active spring/tilting module

4.3.1 Prinzipieller Aufbau

Im Gegensatz zu konventionellen Fahrwerken sollen alle passiven Dämpfer der Sekundärfederung von herkömmlichen Bahnfahrwerken entfallen. Der Wagenkasten ist lediglich über die Luftfedern mit dem Fahrwerk verbunden (Bild 4-18). Während die Luftfeder die Schwingungen im oberen Frequenzbereich isoliert, wird die gewünschte Dämpfung im unteren Frequenzbereich durch eine Fußpunktverstellung der Luftfeder über den Oberträger realisiert. Die durch Gleislagefehler eingeleiteten Störungen können kaum noch auf den Wagenkasten übertragen werden und man erreicht einen sehr guten Fahrkomfort. Die für die Regelung der Fußpunktverstellung benötigten Informationen werden durch geeignete Sensoren bereitgestellt und in einer hierarchisch aufgebauten Mehrgrößenregelung verarbeitet.

Die aktive Neigeeinrichtung, die eine Neigung des Wagenkastens ins Kurveninnere ermöglicht, kann mit dem gleichen Stellsystem realisiert werden. Hierbei findet eine Aufschaltung der Kurvenbeschleunigung statt.

4.3.1 Basic construction

By contrast with conventional chassis, it is intended to dispense with all the passive dampers of the secondary suspension of conventional rail chassis. The car body is connected to the chassis only by means of the pneumatic springs (Figure 4-18). While the pneumatic spring isolates the vibrations in the upper frequency range, the desired damping in the lower frequency range is realized by adjusting the base point of the pneumatic spring above the upper member. The disturbances introduced as a result of faults in the level of the track bed can hardly be transferred any longer to the car body and very good riding comfort is achieved. The information required for controlling the base point adjustment is provided by suitable sensors and processed in a hierarchically constructed multivariable control.

The active tilting device, which permits tilting of the car body into the inside of the curve, can be realized with the same adjusting system. Feed-forwarding of the curve acceleration takes place here.

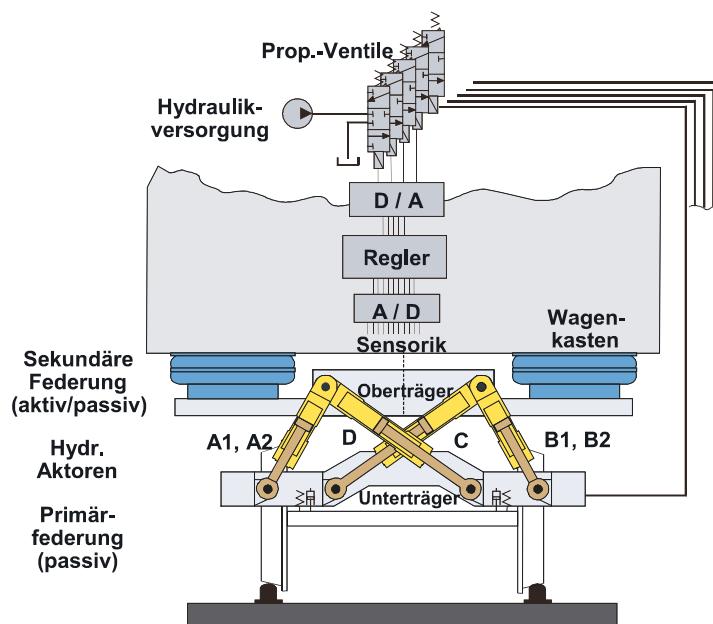


Bild 4-18. Der prinzipielle Aufbau des Feder-/Neigesystems

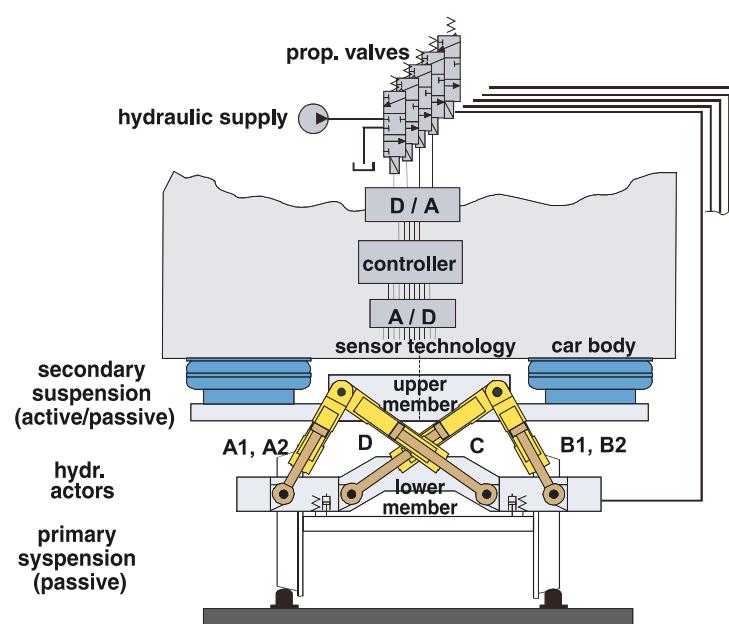


Fig. 4-18. The basic construction of the spring/tilting system

Die Kernstruktur des Stellsystems besteht aus den mechanischen Komponenten Ober- und Unterträger bzw. Luftfeder, den hydraulischen Aktoren und den Sensoren (Bild 4-18). Während vier Aktoren A1, A2, B1, B2 für Heben und Neigen zuständig sind, sorgen die anderen zwei Aktoren C und D hauptsächlich für die Querbewegung. Dabei wird die lokale Nickbewegung von der Fahrwerksebene durch die Aktoren A1, A2 und B1, B2 verhindert und die Längs- und Gierbewegungen durch Lemniskatenlenker gesperrt.

Dadurch wird jedes Feder-/Neigemodul drei Bewegungsrichtungen von Vertikal-, Quer- und Neigebewegungen aktiv gewährleisten. Das Fahrzeug (bestehend aus zwei Modulen) ermöglicht alle geregelten Rotations- und Translationsbewegungen in Quer- und Vertikalrichtung. Die Translationsbewegung in Längsrichtung wird über den Linearantrieb realisiert [HG99].

4.3.2 Modellbildung

Um das Verhalten eines dynamischen Systems zu untersuchen und anschließend eine Mehrgrößenregelung zu entwerfen, werden zuerst das physikalische und das mathematische Ersatzmodell abgebildet. Das Modell soll das kinematische, statische und dynamische Verhalten des zu untersuchenden Systems repräsentieren.

Kinematikfunktionen

Das kinematische Verhalten des Systems wird aus den Freiheitsgraden und der Geometrie des Feder-Neigemoduls bestimmt. Das geschieht durch Auswahl geeigneter Koordinatensysteme.

In Bild 4-19 sind das ICS (Inertia Coordinate System) auf der Schienenoberkante, das BCS (Body Coordinate System) in jedem Starrkörper, die ACS (Attachmentpoint Coordinate Systems) in Koppelpunkten zwischen miteinander gekoppelten Elementen und die Koordinaten von jedem Zylinderkolben x_{Zylinder} dargestellt. Die direkte und die inverse Kinematik des Gesamtsystems wird durch Koordinatentransformation berechnet und später in die globalen Regelkreise eingebettet.

Dynamikfunktionen

Die Dynamikfunktionen beschreiben das dynamische Verhalten unter Wirkung von Kräften. Es kann eine mathematisch formulierte Aussage über das Systemverhalten mit Hilfe der physikalischen Grundgesetze gemacht werden.

Die Dynamik des aktiven Feder-/Neigemoduls besteht aus der Dynamik von mechanischen Tragstrukturen, Aktoren, Sensoren und digitaler Signalverarbeitung (vgl. Bild 4-18). Unter entsprechenden Vereinfachungen wird ein räumliches Modell zur Untersuchung der Feder-/Neigetechnik erstellt (Bild 4-20).

The core structure of the adjusting system comprises the mechanical components of the upper and lower members or the pneumatic spring, the hydraulic actuators and the sensors (Figure 4-18). While four actors A1, A2, B1, B2 are responsible for lifting and tilting, the other two actors C and D primarily take care of the lateral movement. In this case, the local pitching of the chassis plane is prevented by the actors A1, A2 and B1, B2 and the longitudinal and yawing movements are blocked by lemniscate levers.

As a result, each spring/tilting module actively ensures three directions of movement of vertical, lateral and tilting movements. The vehicle (comprising two modules) permits all controlled rotational and translatory movements in the lateral and vertical directions. The translatory movement in the longitudinal direction is realized by means of the linear drive [HG99].

4.3.2 Modeling

In order to investigate the behavior of a dynamic system and subsequently design a multivariable control, first of all the physical substitute model and the mathematical substitute model are formed. The model is intended to represent the kinematic, static and dynamic behavior of the system to be investigated.

Kinematic functions

The kinematic behavior of the system is determined by the degrees of freedom and the geometry of the spring-tilting module. This takes place by selection of suitable coordinate systems.

In Figure 4-19, the ICS (Inertia Coordinate System) on the upper edge of the rail, the BCS (Body Coordinate System) in each rigid body, the ACS (Attachmentpoint Coordinate Systems) at coupling points between elements coupled to one another and the coordinates of each cylinder piston x_{cylinder} are represented. The direct and inverse kinematics of the overall system are calculated by coordinate transformation and later embedded in the global control loops.

Dynamic functions

The dynamic functions describe the dynamic behavior under the effect of forces. A mathematically formulated statement can be made about the system behavior with the aid of the fundamental laws of physics.

The dynamics of the active spring/tilting module comprise the dynamics of mechanical supporting structures, actors, sensors and digital signal processing (cf. Figure 4-18). With corresponding simplifications, a spatial model is created for investigating the spring/tilting technique (Figure 4-20).

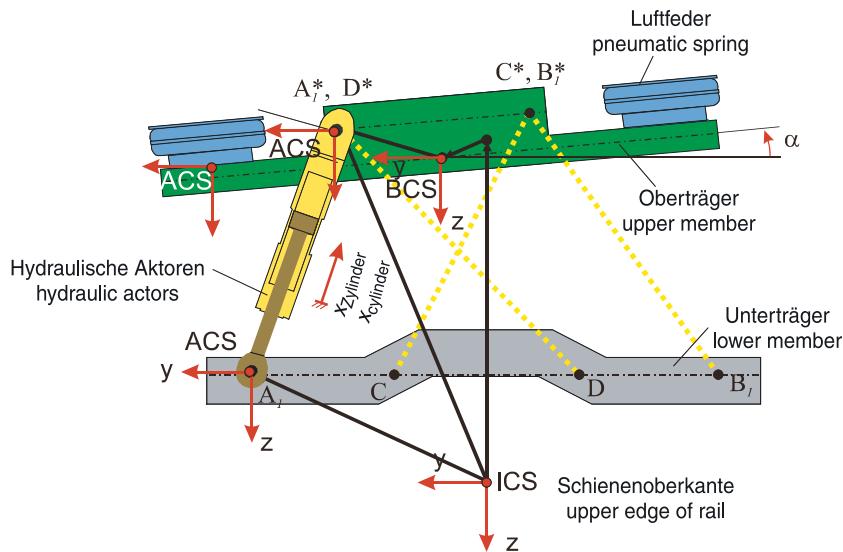


Bild 4-19. Koordinatensysteme der Kinematikfunktion

Fig. 4-19. Coordinate systems of the kinematic function

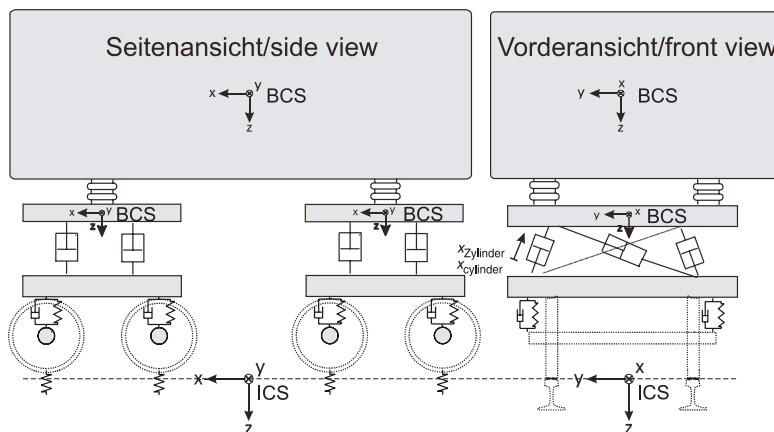


Bild 4-20. Räumliches Modell zur Untersuchung der Feder-/Neigetechnik

Fig. 4-20. Spatial model for investigating the spring/tilting technique

Mechanische Tragstrukturen

Wagenkasten und Oberträger des Feder-/Neigemoduls werden als Starrkörper mit jeweils sechs Freiheitsgraden modelliert. Die elastischen Eigenschaften des Wagenkastens werden in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt, da die Eigenfrequenzen der ersten drei Biege- und Torsionsmoden des Wagenkastens in einem anderen Frequenzbereich liegen.

Auf Grund des komplexen Arbeitsvorgangs der Luftfeder wird in der Schienenfahrzeugentwicklung üblicherweise ein vereinfachtes Ersatzmodell zur Modellierung der Dynamik der Luftfeder verwendet

Mechanical supporting structures

The car body and upper member of the spring/tilting module are modeled as rigid bodies with six degrees of freedom in each case. The elastic properties of the car body are not taken into consideration in this investigation, since the natural frequencies of the first three bending and torsion modes of the car body lie in another frequency range.

On account of the complex way in which the pneumatic spring operates, a simplified substitute model is usually used in rail vehicle development for modeling the dynamics of the pneumatic spring [KG92]. In the

[KG92]. Im idealen Fall weist die Luftfeder ein PDT1-Verhalten jeweils in Vertikal- und Horizontalrichtung auf. Die zugehörigen Modellparameter wurden über die physikalischen Kenngrößen der Luftfeder bestimmt.

Dynamik des Stellsystems

Hier werden hydraulische Aktorsysteme eingesetzt. Das Stellsystem besteht hauptsächlich aus sechs Differentialhydraulikzylindern mit fünf Servoventilen. Bild 4-21 stellt die hydraulische Verschaltung des Stellsystems dar. Die Zylinderkammern der Zylinder A1 und A2 sind parallel geschaltet und von einem Ventil angesteuert, während die Zylinder B1, B2, C und D jeweils von einem Ventil separat angesteuert werden.

Das Servoventil wandelt das elektrische Signal über die Schieberbewegung in einen Druckölstrom. Diese Dynamik wird durch ein System zweiter Ordnung modelliert [Pan84] und beschreibt die Abhängigkeit der Ventilschieberauslenkung von der Eingangsspannung. Die statischen Eigenschaften des Servoventils, die dem Bauteil starke Nichtlinearität einprägen, werden durch die Durchflusskennlinien beschrieben.

Die Stellkraft des Zylinders ergibt sich aus der Kolbenfläche, multipliziert mit der Druckdifferenz zwischen beiden Zylinderkammern, die durch die zu- und abfließenden Ölströme hervorgerufen wurde. Der dynamische Vorgang wird durch eine Differentialgleichung 1. Ordnung modelliert und beschreibt die Abhängigkeit des Druckaufbaus beider Zylinderkammern von der Änderung von Volumenströmen, von der Kompressibilität des Druckmediums und von Leckverlusten.

ideal case, the pneumatic spring has a PDT1 behavior respectively in the vertical and horizontal directions. The associated model parameters were determined by means of the physical characteristic variables of the pneumatic spring.

Dynamics of the adjusting system

Hydraulic actor systems are used here. The adjusting system principally comprises six differential hydraulic cylinders with five servo valves. Figure 4-21 represents the hydraulic circuitry of the adjusting system. The cylinder chambers of the cylinders A1 and A2 are connected in parallel and activated by a valve, while the cylinders B1, B2, C and D are respectively activated separately by a valve.

The servo valve converts the electrical signal via the slide-valve movement into a stream of oil under pressure. These dynamics are modeled by a system of the second order [Pan84] and describe the dependence of the valve slide deflection on the input voltage. The static properties of the servo valve, which impose strong nonlinearity on the component, are described by the characteristic flow curves.

The adjusting force of the cylinder is produced by the piston surface area, multiplied by the difference in pressure between the two cylinder chambers, brought about by the inflowing and outflowing streams of oil. The dynamic process is modeled by a differential equation of the first order and describes the dependence of the pressure build-up of the two cylinder chambers on the changing of volumetric flows, on the compressibility of the pressure medium and on leakage losses.

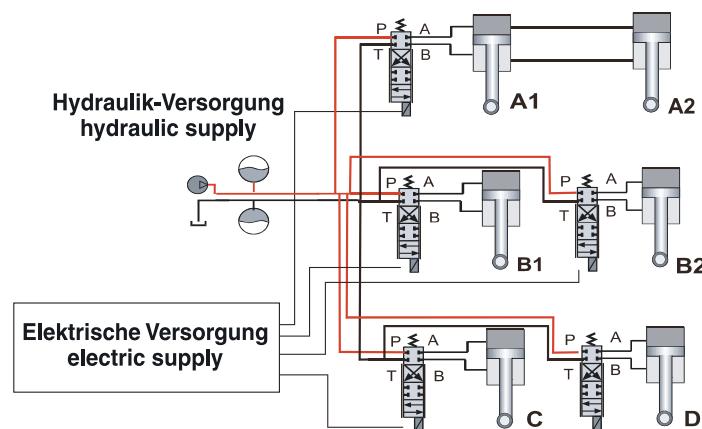


Bild 4-21. Schematischer Aufbau der hydraulischen Aktorsysteme

Fig. 4-21. Schematic setup of the hydraulic actor systems

Dynamik der Sensorik und der digitalen Signalverarbeitung

Bei der Reglerauslegung müssen das dynamische Verhalten der eingesetzten Sensoren und die mit der digitalen Realisierung des Reglers auftretenden Totzeiten in der Gesamtdynamik berücksichtigt werden. Als Positionssensoren werden hier die induktiven Wegaufnehmer zur Erfassung der Zylinderwege ausgewählt. Die Messung der Stellung jedes Ventilschreibers erfolgt über einen im Servoventil integrierten Positionssensor. Für die Messungen der Federwege werden Linearpotentiometer eingesetzt. Die Sensoren verringern die Bandbreite des Systems. Dieser Effekt wird mit einem PT2-Tiefpass-Glied modelliert.

Bei der Realisierung eines digitalen Reglers können die Abtastzeit und die zur Berechnung des Regelalgorithmus notwendige Verarbeitungszeit durch Totzeitverhalten im Millisekundenbereich beschrieben werden. Hierfür wird eine Padé-Approximation zur Nachbildung dieser digitalen Effekte im Modell implementiert.

Dynamik des gesamten Moduls

Nach den oben genannten Untersuchungen wird die Dynamik des gesamten Moduls mit einer Entwicklungsumgebung modelliert, wobei die Modelle aller Subsysteme im Rechner mit geeigneten Schnittstellen topologisch zusammengefügt werden. Die Tragstruktur wird unter Berücksichtigung der kinematischen Zusammenhänge um die Aktoren, Sensoren und digitalen Effekte erweitert.

Nachdem das dynamische Verhalten des Systems untersucht wurde, müssen Regelstrukturen ausgelegt werden, damit die mechatronischen Funktionen des Systems das gewünschte Systemverhalten erzielen.

4.3.3 Hierarchische Systemstruktur

Aus der funktionellen Struktur des vorgegebenen Systems lässt sich eine Hierarchie ableiten, die auch für den Entwurf der Regelung geeignet ist. Eine geeignete Strukturierung wurde schon in Abschnitt 2.2.2. vorgestellt (vgl. Bild 2-3). Angewandt auf dieses Beispiel ergibt sich eine Struktur aus mechatronischen Grundbausteinen, den so genannten „mechatronischen Funktionsmodulen“ (MFM), und aus einem System verkoppelter Grundbausteine, dem so genannten „autonomen mechatronischen System“ (AMS). Die MFM bestehen aus einer Tragstruktur, Sensoren, Aktoren und einer lokalen, regelnden Informationsverarbeitung. Das AMS wird aus informationstechnisch und mechanisch gekoppelten MFM aufgebaut. Das AMS, das ebenfalls eine Informationsverarbeitung aufweist, übernimmt übergeordnete Regelaufgaben wie z.B. Beeinflussung der Aufbaudynamik des Wagenkastens (Bild 4-22) im Sinne einer Kaskadenregelung und generiert Vorgaben für die lokale Informationsverarbeitung der MFM.

Dynamics of the sensor technology and the digital signal processing

When designing the controller, the dynamic behavior of the sensors used and the dead times occurring with the digital realization of the controller must be taken into consideration in the overall dynamics. Inductive displacement transducers are selected here as position sensors for sensing the cylinder displacement. The measurement of the position of each valve slide takes place by means of a position sensor integrated in the servo valve. Linear potentiometers are used for the measurements of the spring excursions. The sensors reduce the bandwidth of the system. This effect is modeled by a PT2 low-pass filter element.

When realizing a digital controller, the sampling time and the processing time necessary for calculating the control algorithm can be described by dead-time behavior in the millisecond range. For this purpose, a Padé approximation is implemented in the model to replicate these digital effects.

Dynamics of the complete module

After the aforementioned investigations, the dynamics of the complete module are modeled with a development environment, with the models of all the subsystems being brought together topologically in the computer with suitable interfaces. The supporting structure is extended by adding the actors, sensors and digital effects, taking the kinematic interrelationships into consideration.

Once the dynamic behavior of the system has been investigated, control structures must be designed, in order that the mechatronic functions of the system achieve the desired system behavior.

4.3.3 Hierarchical system structure

The functional structure of the described system can be used to derive a hierarchy which is also suitable for the design of the control system. Suitable structuring was already presented in Section 2.2.2 (cf. Figure 2-3). When applied to this example, this results in a structure comprising mechatronic basic modules, the so-called "mechatronic function modules" (MFM), and a system of coupled basic modules, the so-called "autonomous mechatronic system" (AMS). The MFM comprise a supporting structure, sensors, actors and local, controlling information processing. The AMS is constructed from MFM coupled in terms of IT and mechanically. The AMS, which likewise has information processing, undertakes superordinate control tasks, such as for example influencing the structure dynamics of the car body (Figure 4-22) in the sense of a cascade control, and generates setpoint selections for the local information processing of the MFM.

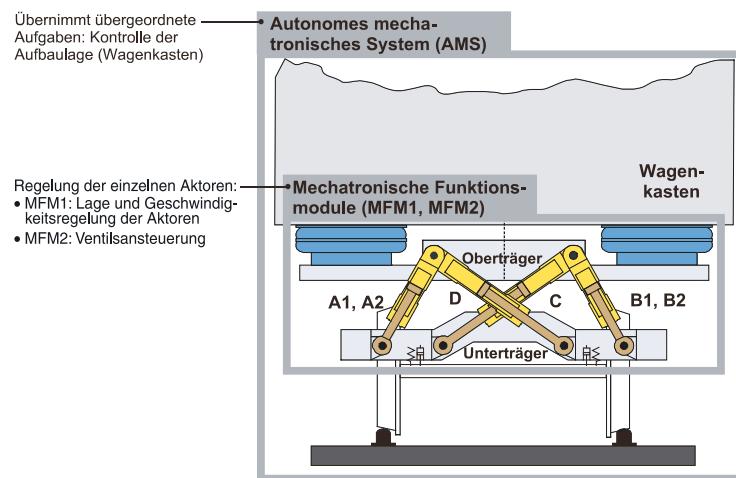


Bild 4-22. Hierarchisierung des Gesamtsystems Feder-/Neigemodul und Wagenkasten

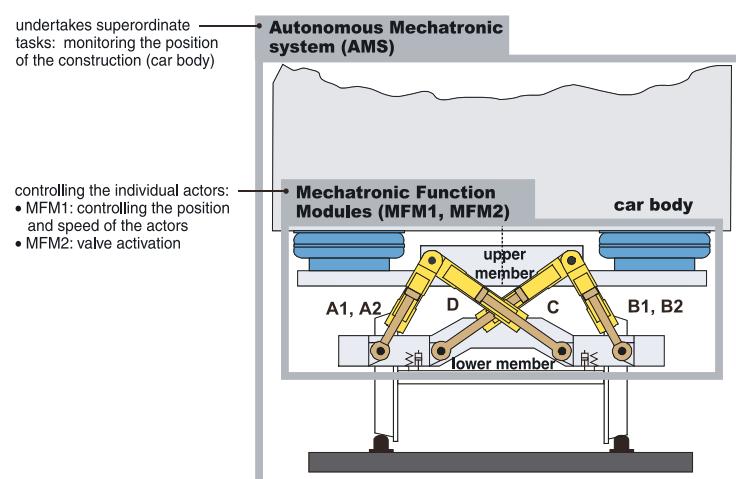


Fig. 4-22. Hierarchization of the overall spring/tilting module and car body system

Wie in Bild 4-22 zu sehen ist, kann das Gesamt- system, bestehend aus dem Feder-/Neigemodul und dem Wagenkasten, in zwei Hierarchien gegliedert werden. Auf der Ebene AMS wird im Wesentlichen die Aufbaulage kontrolliert, während auf der Ebene MFM das Verhalten der einzelnen Aktoren betrachtet wird. Die unterlagerte Ebene lässt sich noch einmal in zwei weitere Ebenen gliedern. MFM1 enthält die Lage- und Geschwindigkeitsregelung der hydraulischen Aktoren. Die Ansteuerung des Ventils erfolgt über ein unterlagertes MFM (MFM2), das die Ventschieberposition regelt.

Der übergeordnete Mehrgrößenregler besteht haupt- sächlich aus drei Blöcken: Entkopplung, Abstim- mung und Verkopplung (Bild 4-23). Vertikalwege, Querwege und Neigewinkel des Wagenkastens wer- den aus den gemessenen Zylinderwegen und Lufts- federwegen im auf der Systemkinematik basierenden Block *Entkopplung* abgeleitet. Daraus werden die ge-

As can be seen in Figure 4-22, the overall system, comprising the spring-tilting module and the car body, can be divided into two hierarchies. On the AMS level, essentially the position of the construction is monitored, while on the MFM level the behavior of the individual actors is considered. The subordinate level can be divided once again into two further levels. MFM1 contains the position and speed control of the hydraulic actors. The activation of a valve takes place via a subordinate MFM (MFM2), which controls the position of the valve slide.

The superordinate multivariable controller principally comprises three blocks: decoupling, matching and coupling (Figure 4-23). Vertical displacements, lateral displacements and tilting angles of the car body are derived from the measured cylinder dis- placements and pneumatic spring excursions in the *decoupling* block based on the system kinematics.

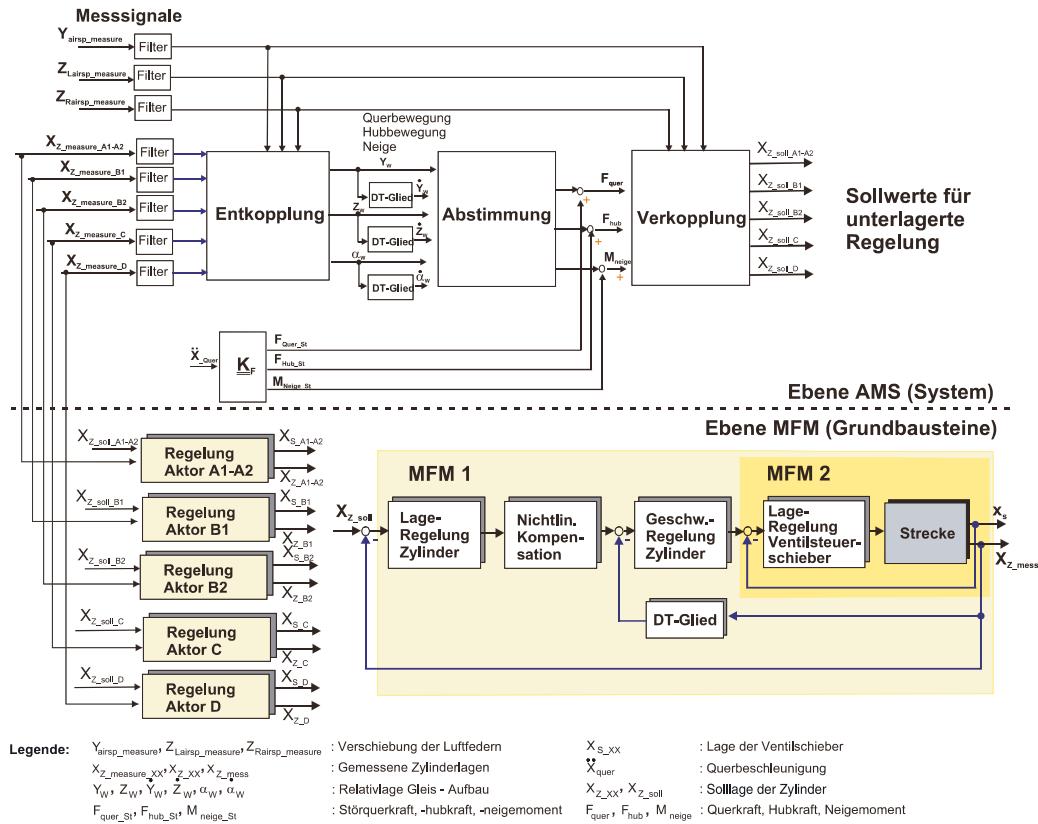


Bild 4-23. Hierarchische Reglerstruktur

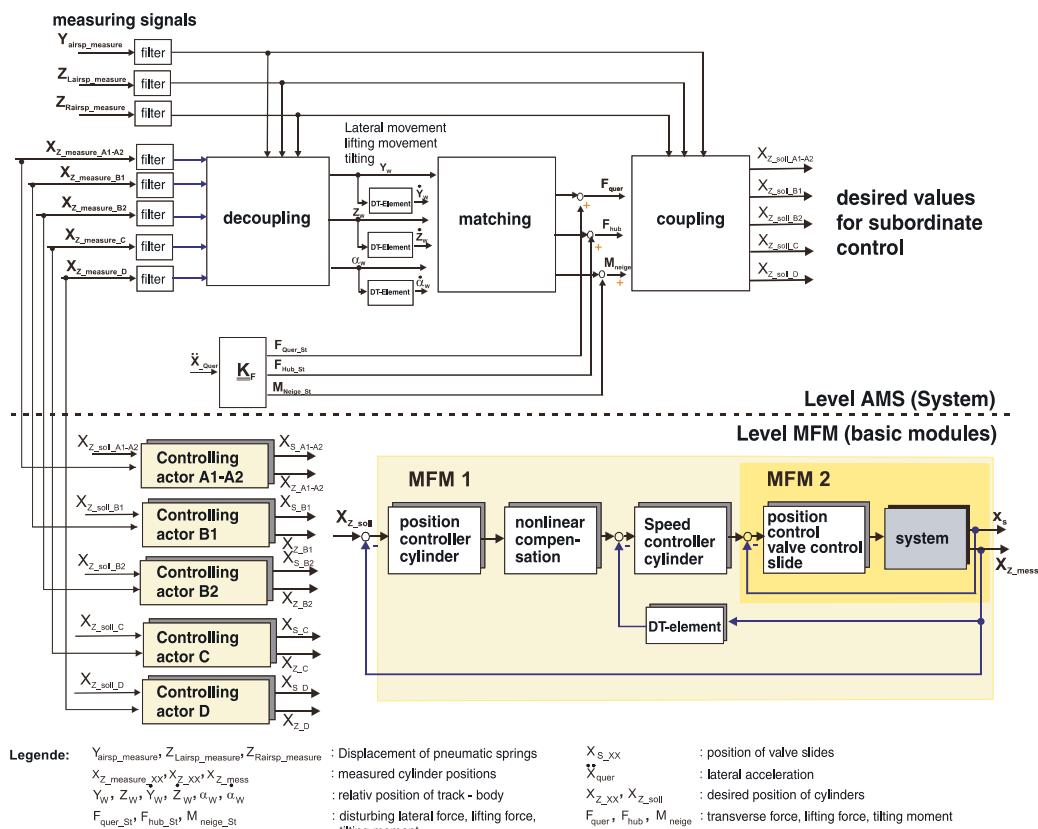


Fig. 4-23. Hierarchical controller structure

wünschten Feder- und Dämpferkräfte im Block *Abstimmung* generiert. Zusammen mit den aus der Kurvenbeschleunigung resultierenden Kräften führt dies im Block *Verkopplung* zu neuen Sollwerten der Zylinderwege für die unterlagerten Regelkreise.

Als lokale Regelungen dienen die Kaskadenregelungen mit drei Schleifen, welche die Dynamik des einzelnen Aktors hinreichend schnell ausregeln können. Den inneren Regelkreis bildet die Lageregelung des Ventilsteuerschiebers. Die Geschwindigkeitsregelung der Zylinder wird über die mittlere Regelstrecke realisiert und der äußere Regelkreis stellt die Lageregelung des Zylinders dar.

Die Parameter dieser hierarchisch angeordneten Regelstruktur werden über vektorielle Gütekriterien optimiert.

4.3.4 Analyse des geregelten Systems

Das geregelte Gesamtsystem und das passive System werden unter gleichen Betriebsbedingungen im Rechner simuliert. Als Anregung wird eine sprungförmige Störung aus dem Schienenbett verwendet.

Bild 4-24 stellt die Wagenkastenbewegung des aktiven und des passiven Systems in Vertikalrichtung dar. Die Sprungantworten der nichtlinearen Simulation für Quer- und Neigerichtungen haben ähnliche Verläufe. Das Simulationsergebnis zeigt, dass das Schwingungsverhalten des aktiven Systems eine wesentlich bessere Dämpfung als das des passiven Systems aufweist.

Die Flächen unter dem Amplitudenspektrum sind ein Maß für die auf den Fahrgästen wirkenden Beschleunigungen. Je größer die Fläche ist, desto schlechteren Fahrkomfort weist ein System auf. Bild 4-25 stellt die Amplitudenspektren für die Wagenkastenbeschleunigung der aktiven und der passiven Systeme gegenüber. Das aktive Fahrwerk schafft hier einen um ein Mehrfaches verbesserten Fahrkomfort.

The desired spring and damper forces are generated from this in the *matching* block. Together with the forces resulting from the curve acceleration, this leads in the *coupling* block to new desired values of the cylinder displacements for the subordinate control loops.

The cascade controls with three loops, which can correct the dynamics of the individual actor sufficiently quickly, serve as local control systems. The inner control loop is formed by the position control of the valve control slide. The speed control of the cylinders is realized by means of the middle control loop and the outer control loop represents the position control of the cylinder.

The parameters of this hierarchically arranged control structure are optimized by means of vectorial quality criteria.

4.3.4 Analysis of the controlled system

The overall controlled system and the passive system are simulated under the same operating conditions in a computer. A disturbance in the form of a jump from the rail bed is used as a suggestion.

Figure 4-24 represents the car body movement of the active system and the passive system in the vertical direction. The step responses of the nonlinear simulation for lateral and tilting directions have similar profiles. The simulation result shows that the vibrational behavior of the active system has much better damping than that of the passive system.

The areas under the amplitude spectrum are a measure of the accelerations acting on the passenger. The larger the area, the worse the riding comfort of a system. Figure 4-25 compares the amplitude spectra for the car body acceleration of the active system and the passive system. Here, the active chassis provides riding comfort that is improved by a multiple.

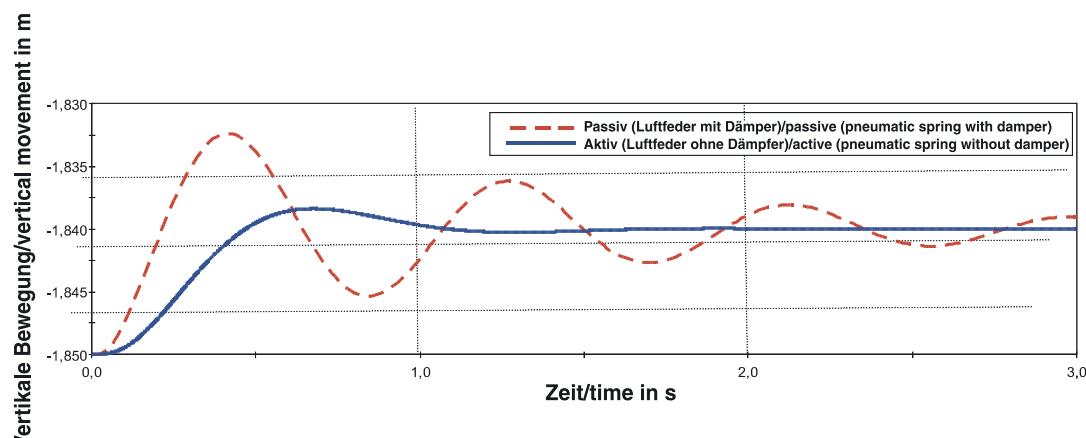


Bild 4-24. Sprungantwort des Gesamtsystems

Fig. 4-24. Step response of the overall system

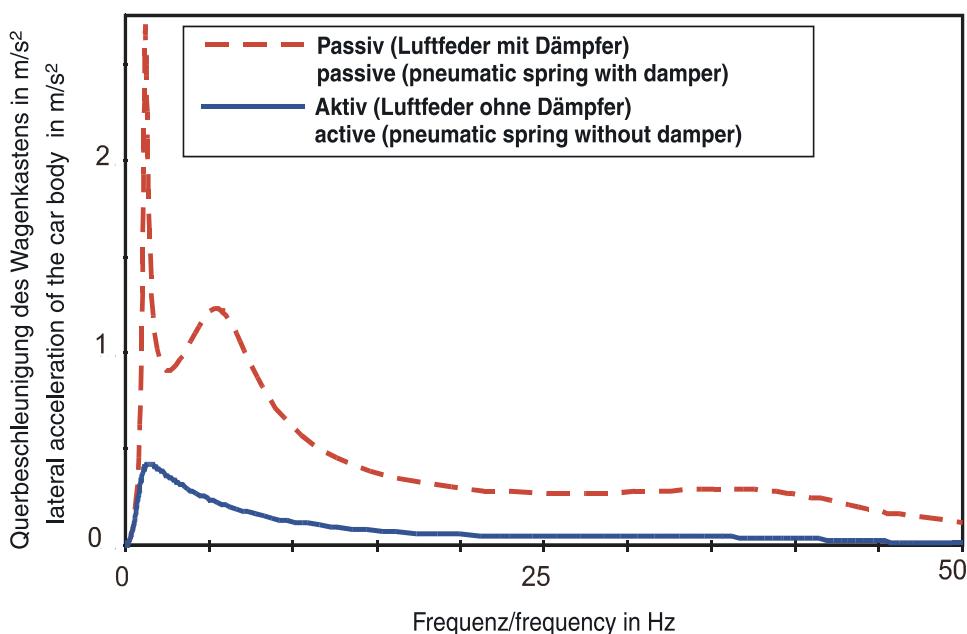


Bild 4-25. Amplitudenspektrum der Querbeschleunigung

Fig. 4-25. Amplitude spectrum of the lateral acceleration

4.3.5 Laborversuche

Nach dem oben genannten Entwicklungsvorgang wird die Erprobungs- bzw. Realisierungsphase durchgeführt, um einen Übergang vom theoretischen Rechnermodell zum realen System vorzunehmen. Die Submodelle werden von entsprechenden realen Bauteilen sukzessive im gesamten mechatronischen System ersetzt, und daraus entsteht der Hardware-in-the-Loop-Prüfstand (vgl. Bild 4-18 und Bild 3-13). Damit ist eine konsistente mechatronische Entwicklung gewährleistet.

Das gesamte Konzept des Prüfstands für die Feder-/Neigetechnik ist in Bild 4-26 illustriert. Es bildet einen Halbzug mit einem Feder-/Neigemodul im Maßstab 1 : 5. Der Aufbau besitzt drei Freiheitsgrade jeweils in Vertikal-, Quer- und Neigerichtung. Die in der Testinfrastruktur befindlichen Anregungszyliner bilden zum einen die Schwingungen aus dem Primärteil des Fahrwerks inklusive Gleislagefehler nach und zum anderen die Anregung auf Grund der Aufbauquerstörung und -beschleunigung. Der Prüfstand ist auf sechs Luftfedern gelagert, damit das System von der Schwingung der Prüfstandsumgebung entkoppelt werden kann.

Auf diesem Labor-Prüfstand können die ausgelegten hierarchischen Regelkreisstrukturen und die komplexe Konfiguration des Systems unter Echtzeitbedingungen messtechnisch analysiert, getestet und va-

4.3.5 Laboratory trials

After the aforementioned development process, the trial or realization phase is carried out, in order to make a transition from the theoretical computer model to the real system. The submodels are gradually replaced by corresponding real components in the complete mechatronic system, thereby producing the hardware-in-the-loop test stand (cf. Figure 4-18 and Figure 3-13). This ensures a consistent mechatronic development.

The overall concept of the test stand for the spring/tilting technique is illustrated in Figure 4-26. It forms a half-train with a spring/tilting module on a scale of 1 : 5. The structure has three degrees of freedom, in the vertical, lateral and tilting directions respectively. The excitation cylinders that are in the test infrastructure replicate on the one hand the oscillations from the primary part of the chassis including the faults in the level of the track bed and on the other hand the excitation on the basis of the structure's lateral disturbance and acceleration. The test stand is mounted on six pneumatic springs, in order that the system can be decoupled from the vibration of the surroundings of the test stand.

On this laboratory test stand, the designed hierarchical controller structures and the complete configuration of the system can be analyzed, tested and validated by measuring instrumentation under real-time

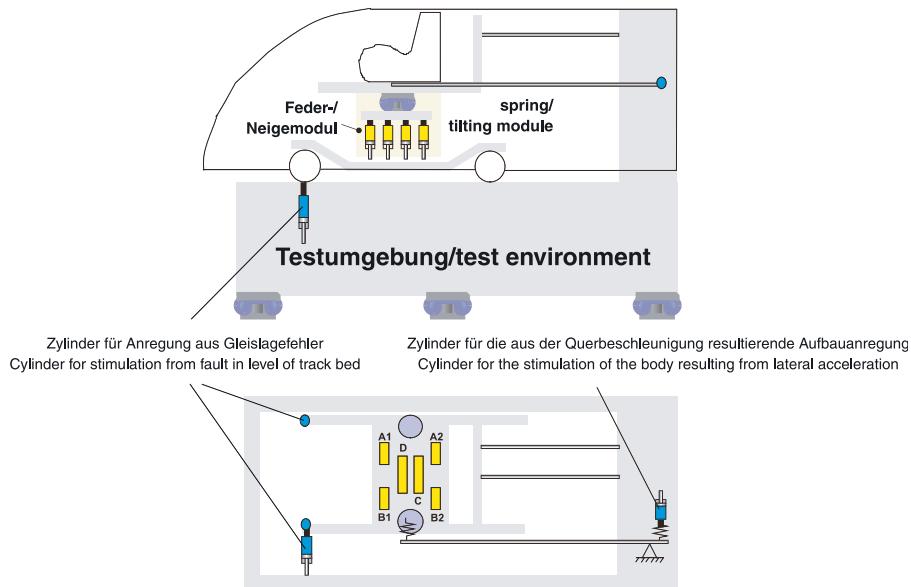


Bild 4-26. Konzept des Prüfstands

Fig. 4-27. Concept of the test stand

lidiert werden. Die Positionen der Zylinder, der Ventschieber und die Federwege werden gemessen, und die Messsignale werden über A/D-Wandler einem Digital-Signal-Prozessor zugeführt. Dort werden die Regelalgorithmen gerechnet und die Signale über D/A-Wandlerkarten an die Ansteuerungsventile im realen Subsystem ausgegeben.

Mittels der mechatronischen Entwicklungsmethodik (vgl. Abschnitt 3.1) wurde das aktive Feder-/Neigemodul zuerst theoretisch untersucht, indem das Systemverhalten im Rechner nachgebildet und darauf die hierarchischen Regelkonzepte festgelegt wurden. Mit Hilfe von Prüfstandsuntersuchungen wurde die ausgelegte Mehrgrößenregelung digital realisiert und das System validiert. Die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass der Fahrkomfort und die Fahrsicherheit durch die aktive Federungstechnik wesentlich verbessert werden.

4.4 Entwurf von integrierten Mehrkoordinatenantrieben

4.4.1 Strukturen

Antriebssysteme, die frei programmierbare Bewegungen in der Ebene (Freiheitsgrad 1, 2 oder 3) mit hoher Dynamik und Genauigkeit erzeugen können, werden zunehmend benötigt. Klassische Lösungen wurden realisiert, indem die einzelnen Bewegungsachsen seriell miteinander verkoppelt wurden. Dabei wurden Linearachsen bestehend aus Rotationsmotor einschließlich Bewegungswandler (Spindel) übereinander angeordnet (siehe Bild 4-27).

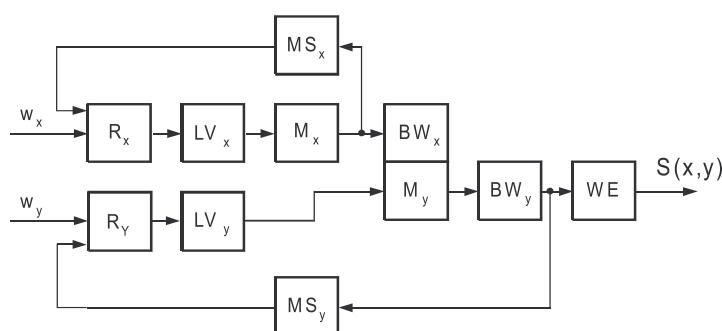
conditions. The positions of the cylinders, of the valve slides and the spring excursions are measured, and the measuring signals are fed via an A/D converter to a digital signal processor. There, the control algorithms are calculated and the signals are output via D/A converter cards to the activation valves in the real subsystem.

By means of the mechatronic development methodology (cf. Section 3.1), the active spring/tilting module was first investigated in theory, in that the system behavior was replicated in a computer and, on this basis, the hierarchical control concepts were stipulated. With the aid of test stand investigations, the designed multivariable control was realized digitally and the system validated. The investigation results showed that the riding comfort and safety are significantly improved by the active suspension technique.

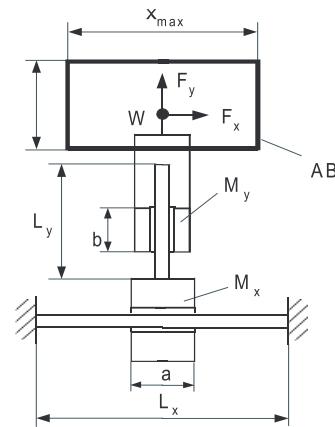
4.4 Design of integrated multicoordinate drives

4.4.1 Structures

Drive systems which can produce freely programmable movements in the plane (degree of freedom 1, 2, 3) with high dynamics and accuracy are increasingly required. Classic solutions were realized by the individual movement axes being coupled to one another in series. In this case, linear axes comprising a rotation motor including a movement converter (spindle) were arranged one above the other (see Figure 4-27).



R Regler/Controller
 LV Leistungsverstärker/power booster
 M Motor/motor
 BW Bewegungswandler/movement converter
 WE Wirkelement/operating element
 MS Messsystem/measuring system



a,b Motorlänge/length of motor
 AB Arbeitsbereich/working range
 F Kraft/force
 L Läuferlänge/length of rotor
 M Motor/motor
 W Werkzeug/tool

Bild 4-27. Zweikoordinatenantrieb mit serieller Kinematik [ZT98]

Derartige Antriebsstrukturen, die sehr weit verbreitet sind, weisen eine Reihe von Vor- und Nachteilen auf, die in Tabelle 2 zusammengefasst sind [KSS99]:

Im Vergleich dazu weisen Antriebsstrukturen mit paralleler Verkopplung der Antriebsachsen Vorteile hinsichtlich der erreichbaren Dynamik und Positioniergenauigkeit auf.

Tabelle 2. Vor- und Nachteile von Antriebsstrukturen mit serieller Verkopplung

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • hohe Beweglichkeit • großer Arbeitsraum • modular/standardisierte Elemente • servicefreundliche Struktur 	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Steifigkeit • schwierige Justage • geringe Positioniergenauigkeit • bewegte Massen • ungünstige Fehlerverkettung • geringe Bandbreite • Umkehrspiel

Diese Vorteile können noch stärker ausgeprägt werden, wenn in einem mechatronischen Designprozess jeweils die kraftzeugenden Strukturen, die messenden Strukturen und die Führungsstrukturen räumlich integriert werden [KBS97]. Damit entstehen Antriebsstrukturen, die für Mehrkoordinatenhybridschrittmotoren in Bild 4-28 dargestellt sind.

Nachfolgend soll die Anwendung des Prinzips der räumlichen Integration auf elektrodynamische Mehrkoordinatenantriebe näher dargestellt werden.

Fig. 4-27. Two-coordinate drive with serial kinematics [ZT98]

Such drive structures, which are very widespread, have a series of advantages and disadvantages, which are summarized in Table 2 [KSS99]:

In comparison with this, drive structures with parallel coupling of the drive axes have advantages with regard to the achievable dynamics and positioning accuracy.

Table 2. Advantages and disadvantages of drive structures with serial coupling

Advantages	Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> • high mobility • large working space • modular/standardized elements • easy-to-service structure 	<ul style="list-style-type: none"> • low rigidity • difficult adjustment • low positioning accuracy • moved masses • unfavorable cumulative effect of errors/defects • small bandwidth • backlash

These advantages may be even more pronounced if the force-generating structures, the measuring structures and the guiding structures are respectively spatially integrated in a mechatronic design process [KBS97]. This produces drive structures which are represented in Figure 4-28 for multicoordinate hybrid stepping motors.

The application of the principle of spatial integration to electrodynamic multicoordinate drives is to be presented in more detail below.

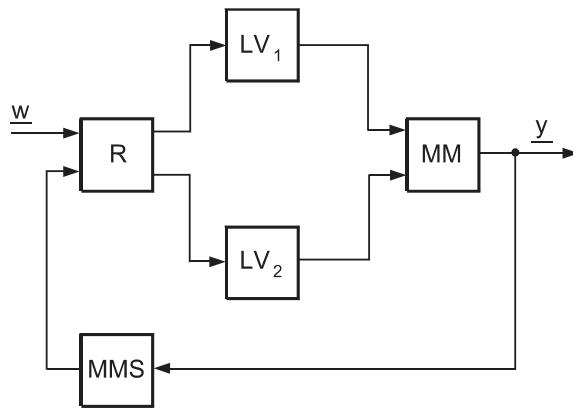


Bild 4-28. Integrierter Mehrkoordinatenantrieb im Freiheitsgrad 2

MM Mehrkoordinatenmotor
MMS Mehrkoordinatenmesssystem

4.4.2 Entwurfsprozess für Systeme mit Volumenintegration

Vorgehensweise

Das Ziel, das zu entwerfende mechatronische System als Ganzheit zu optimieren, stellt eine hohe Anforderung an den Entwurfsprozess, da sowohl mechanische, elektrische und informationstechnische Elemente gleichwertig berücksichtigt werden müssen. In der Literatur sind verschiedene Vorgehensweisen beschrieben, die auf den Konstruktionsmethoden des Maschinenbaus aufbauen u.a. [KBS97; Küm99; Bri01]. Das vorliegende Beispiel orientiert sich am Vorgehen in Abschnitt 3.1 (Bild 4-29):

Frühe Phasen des Entwurfs von integrierten Mehrkoordinatenantrieben

Bei einem Top-Down-Entwurf geht man grundsätzlich von der vorgegebenen Aufgabenstellung aus. Daraus kann die Gesamtfunktion mit Hilfe einer Präzisierung abgeleitet werden, woraus sich in einem weiteren Entwurfsschritt die Funktionsstruktur (Teilfunktionen und deren Verkettung) ergibt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Aufgabenstellung vollständig und widerspruchsfrei ist. Im Falle eines planaren Mehrkoordinatenmotors wird eine Bewegung in drei Bewegungscoordinaten (x, y, φ) gefordert. Dazu ist die Erzeugung von Kräften bzw. Momenten in den Bewegungsrichtungen erforderlich.

Eine technische Lösung besteht darin, dass die im Anker integrierten linearen kraftzeugenden Elementen (siehe Bild 4-30) die Bewegungen in den Bewegungscoordinaten erzeugen. Die Kräfte werden mit magnetischen Feldern erzeugt, die Kopplung der Wirkflächenpaare für die Antriebskräfte ist starr.

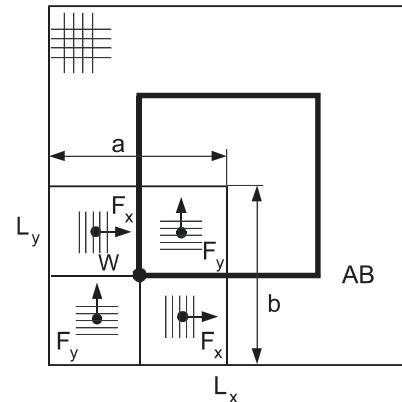


Fig. 4-28. Integrated multicoordinate drive with degree of freedom 2

MM multi-coordinate motor
MMS multi-coordinate measuring system

4.4.2 Design process for systems with volume integration

Procedure

The aim of optimizing in its entirety the mechatronic system that is to be designed demands much of the design process, since not only mechanical elements but also electrical elements and information-processing elements have to be given equivalent consideration. Various procedures which are based on the construction methods of mechanical engineering are described in the literature, including [KBS97; Küm99; Bri01]. The present example is based on the procedure in Section 3.1 (Figure 4-29):

Early phases of the design of integrated multicoordinate drives

In the case of a top-down design, the defined task that is prescribed is taken in principle as a basis. With the aid of precisioning, the task can be used to derive the overall function, from which the function structure (subfunctions and how they are linked together) is obtained in a further design step. In this case, it must be ensured that the defined task is complete and free from contradictions. In the case of a planar multi-coordinate motor, a movement is required in three movement coordinates (x, y, φ). For this purpose, it is necessary to generate forces or moments in the directions of movement.

One technical solution consists in that the linear force-generating elements integrated in the armature (see Figure 4-30) generate the movements in the movement coordinates. The forces are generated by magnetic fields, the coupling of the pairs of effective areas for the drive forces is rigid.

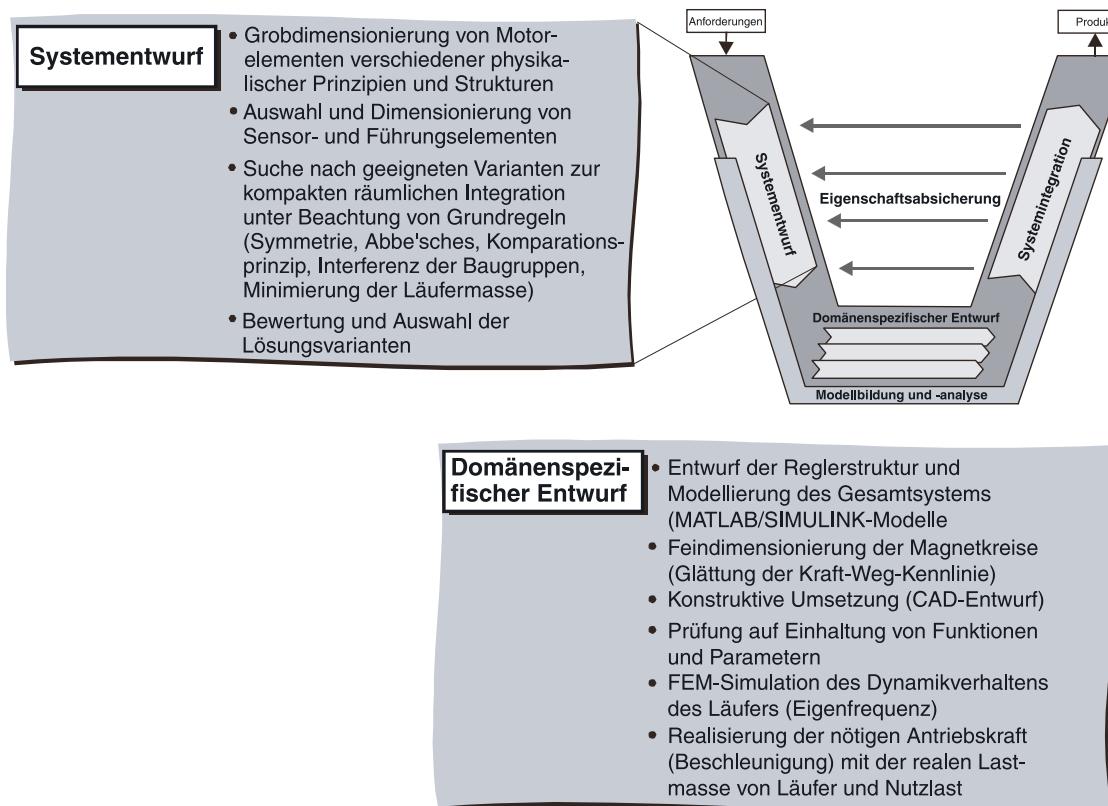


Bild 4-29. Systementwurf und domänen spezifischer Entwurf eines Mehrkoordinatenantriebs

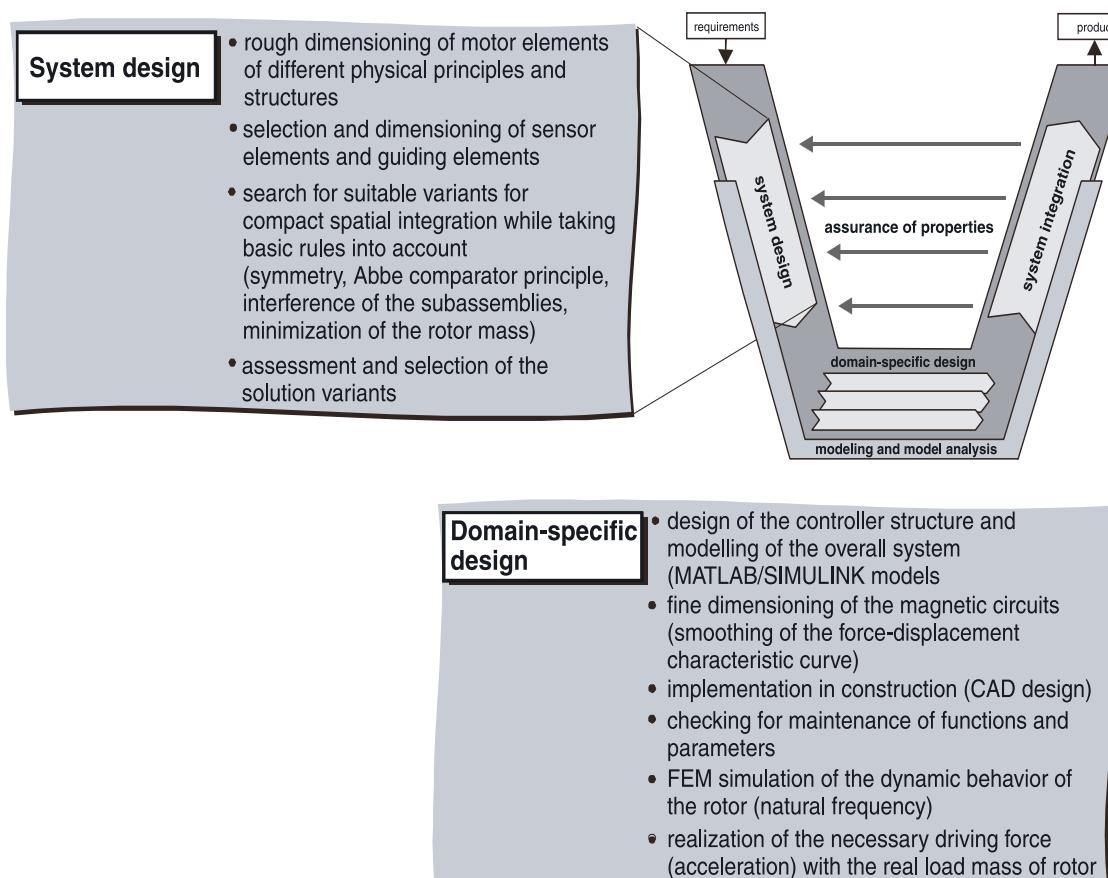


Fig. 4-29. System design and domain-specific design of a multicoordinate drive

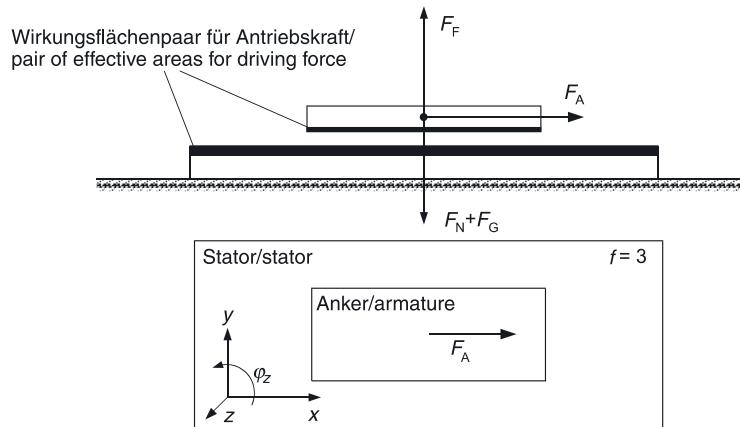


Bild 4-30. Struktur eines krafterzeugenden Elements für planare integrierte Mehrkoordinatenmotoren

- F_N Normalkraft
- F_A Antriebskraft
- F_F Kraft zur Führung des Ankers
- F_G Gewichtskraft

Grundsätzlich ist der Übergang vom Funktionselement zum Prinzipiellelement mehrdeutig. So können z.B. die krafterzeugenden Elemente auf folgenden Prinzipien beruhen:

- Gleichstromlinearmotor
- Gleichstromlinearmotor mit Halbach array
- Reluktanzlinearmotor
- Synchronlinearmotor
- linearer Reluktanzschrittmotor
- linearer Hybridschrittmotor

Alle Motoren besitzen spezielle Vor- und Nachteile. Damit der Anker des Mehrkoordinatenmotors den gewünschten Bewegungsfreiheitsgrad $f = 3$ realisieren kann, müssen die Aktorelemente nach ihrer Integration in allen drei Bewegungskoordinaten beweglich bleiben. Wenn die Kraftvektoren nicht durch den Ankerschwerpunkt verlaufen, werden auch Drehmomente erzeugt, die entweder zur Krafterzeugung dienen oder gegebenenfalls kompensiert werden müssen.

Im Hinblick auf eine spätere Integration ist es zweckmäßig, in der Phase der Prinzipauswahl nicht nur die Geometriegrößen zu berücksichtigen, sondern auch alle weiteren Größen, die bei der Volumenintegration von Interesse sind.

Der Übergang von der Funktionsstruktur zur Baustuktur (siehe Bild 4-31) ist ein Syntheseprozess, das heißt er ist nicht eindeutig. Die Funktionsstruktur besteht aus miteinander verknüpften Funktionselementen, die die gewünschte Gesamtfunktion realisieren. Indem jedem Funktionselement ein technisches Prinzip zugeordnet wird, entsteht die Wirkstruktur, die die Verkopplung der Wirkelemente umfasst.

Fig. 4-30. Structure of a force-generating element for planar integrated multicoordinate motors

- F_N normal force
- F_A driving force
- F_F force for guiding the armature
- F_G force of weight

In principle, the transition from the functional element to the basic element is multivalued. For example, the force-generating elements may be based on the following principles:

- DC linear motor
- DC linear motor with Halbach array
- reluctance linear motor
- synchronous linear motor
- linear reluctance stepping motor
- linear hybrid stepping motor

All motors have specific advantages and disadvantages. In order that the armature of the multicoordinate motor can realize the desired degree of movement $f = 3$, the actor elements must remain movable in all three movement coordinates after their integration. If the force vectors do not run through the center of gravity of the armature, torques are also generated and either have to serve for generating force or possibly have to be compensated.

With regard to later integration, it is expedient in the phase of selecting a principle to consider not only the geometry variables but also all further variables that are of interest in the volume integration.

The transition from the function structure to the building structure (see Figure 4-31) is a synthesis process, i.e. it is not single-valued. The function structure comprises function elements that are linked to one another and realize the desired overall function. The fact that a technical principle is assigned to each function element has the effect of producing the operating structure, which comprises the coupling of the operating elements.

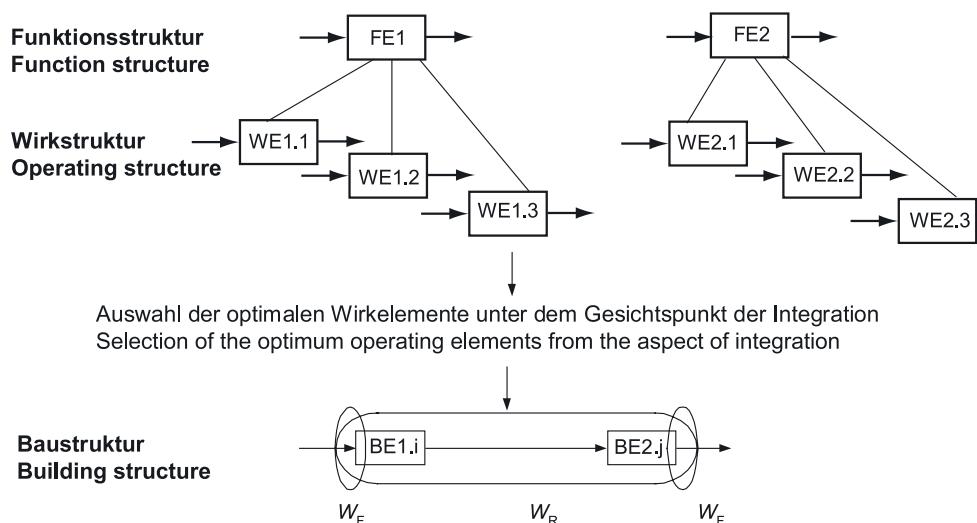


Bild 4-31.Übergang von der Funktions- zur Baustuktur

F_E Funktionselement
 W_E Wirkelement
 B_E Bauelement
 W_F Wirkfläche
 W_R Wirkraum

Fig. 4-31. Transition from the function structure to the building structure

F_E function element
 W_E operating element
 B_E building element
 W_F effective area
 W_R effective space

Infolge der Integration treten neben den funktionsrelevanten Größen E_f und A_f auch nicht funktionsrelevante Größen E_n und A_n auf, die die Gesamtfunktion z.B. als Störgrößen (Erwärmung, Streufelder) beeinträchtigen können.

Nach der Wirkstruktur ist die Bestimmung der Baustuktur erforderlich, die z.B. auf der Grundlage eines parametrischen Entwurfs durchgeführt werden kann. Auf diese Weise können unter Nutzung von Parametern Konstruktionsvarianten im Sinne einer Grobgestalt gefunden werden. Mit der Grobgestalt wird auch die Geometrie der Einzelemente, der Wirkflächen, der Wirkflächenpaarungen sowie des Wirkraums festgelegt.

4.4.3 Konstruktiver Aufbau

Zur Erzeugung einer linearen Bewegung nach dem elektrodynamischen Prinzip in einem Mehrkoordinatenmotor können nur solche krafterzeugenden Elemente benutzt werden, die quer zur Krafterzeugungsrichtung eine Bewegung zulassen. Das in Bild 4-32 dargestellte krafterzeugende Element erfüllt diese Forderungen, wenn beispielsweise die Spulenstränge wesentlich länger als die Magnete sind. Bild 4-33 zeigt die Integration von vier krafterzeugenden Gestaltelementen in einem Mehrkoordinatenmotor.

As a result of the integration, there occur not only the function-relevant variables E_f and A_f but also non-function-relevant variables E_n and A_n , which can impair the overall function, for example as disturbances (heating, stray fields).

After the operating structure, the determination of the building structure is required, and this can be carried out for example on the basis of a parametric design. In this way, construction variants in the sense of a rough form can be found by using parameters. With the rough form, the geometry of the individual elements, the effective areas, the effective area pairings and the effective space is fixed.

4.4.3 Structural setup

For producing a linear movement on the electrodynamic principle in a multicoordinate motor, only those force-generating elements which allow a movement transversely to the direction of force generation can be used. The force-generating element represented in Figure 4-32 satisfies these requirements if, for example, the coil lines are much longer than the magnets. Figure 4-33 shows the integration of four force-generating forming elements in a multicoordinate motor.

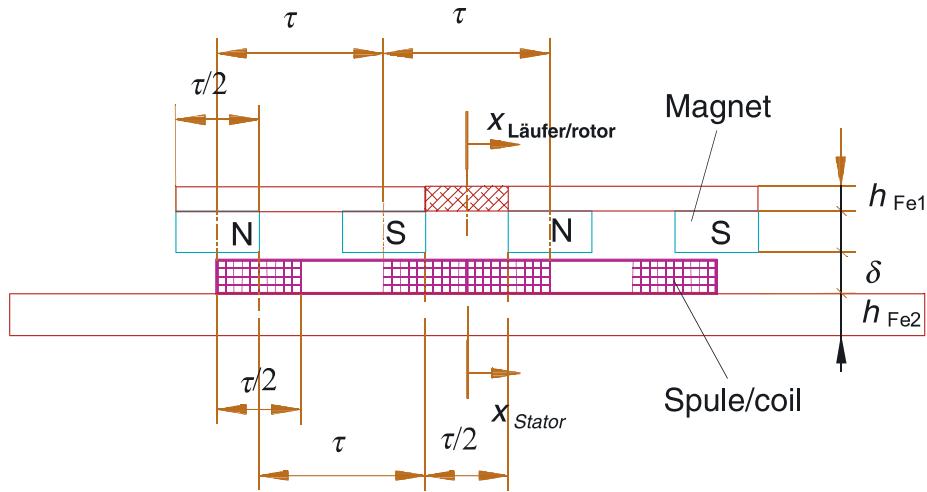


Bild 4-32. Prinzipskizze eines Krafterzeugungselements

Fig. 4-32. Basic diagram of a force-generating element

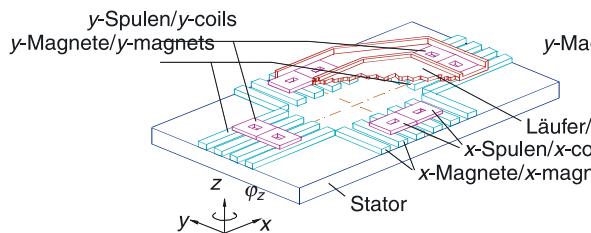


Bild 4-33. Antrieb mit bewegten Spulen (links im Bild) und mit bewegten Magneten (rechts im Bild)

Durch die Bewegung des Läufers ändert sich der Überdeckungsgrad der Spulen-Magnetpaare, bleibt aber für die gesamte Anordnung nahezu konstant, wodurch eine Kraftschwankung kleiner 1 % erreicht werden kann.

Von den beiden Möglichkeiten bewegte Spulen/ruhende Dauermagnete bzw. ruhende Spulen/be wegte Dauermagnete (siehe Bild 4-33) ist die letztere günstiger, weil dadurch die Zuführung des Erregerstromes zum beweglichen Anker entfallen kann und außerdem durch Montage der Erregerwicklung auf dem Stator die Wärmeverlustleistung gut abgeführt werden kann.

Im Sinne einer räumlichen Integration sind jeweils die Erregerspulen bzw. die Permanentmagnete im Stator oder im Anker fixiert, wodurch sich weitere Vorteile im Vergleich zu der seriellen Anordnung der einzelnen Antriebsachsen ergeben, die über bewegliche Koppelemente miteinander verbunden sind.

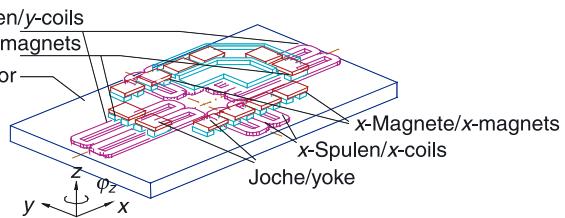


Fig. 4-33. Drive with moved coils (on the left in the figure) and with moved magnets (on the right in the figure)

The movement of the rotor causes the degree of coverage of the pairs of coil magnets to change, but it remains virtually constant for the arrangement as a whole, whereby a force fluctuation of less than 1 % can be achieved.

Of the two possibilities, moved coils/stationary permanent magnets or stationary coils/moved permanent magnets (see Figure 4-33), the latter is more favorable, because it makes it possible to dispense with feeding the exciter current to the movable armature and also allows the heat loss to be dissipated well by mounting the exciter winding on the stator.

For the purposes of spatial integration, the exciter coils or the permanent magnets are respectively fixed in the stator or in the armature, whereby further advantages are obtained in comparison with the series arrangement of the individual drive axes which are connected to one another via movable coupling elements.

Elektrodynamische Motoren können nur für Positionieraufgaben verwendet werden, wenn ein Lage- regelkreis aufgebaut wird. Bild 4-34 zeigt das im vorliegenden Fall ebenfalls volumenintegrierte Mehrkoordinatenmesssystem, das aus drei am Ständer angeordneten Abtasteinheiten und einem im Läufer angeordneten Kreuzrastermaßstab besteht.

Die beiden y-Messsysteme gestatten auch einen begrenzten Verdrehwinkel φ ($\varphi_{\max} = 3^\circ$) zu erfassen, wenn die Abtastgeometrie so optimiert wird, dass das Messsystem unempfindlich gegen Verdrehung wird.

Der konstruktive Aufbau des integrierten Mehrkoordinatenmotors ist in Bild 4-35 dargestellt. Die Führung des Ankers wird über vier magnetisch vorgespannte Luftführungselemente erreicht, die in einem konstruktiv vorgegebenen Bereich eine Bewegung mit dem Freiheitsgrad 3 in x -, y - und φ_z -Richtung zulassen. Damit entfallen Reibung, Spiel und Stick-Slip, die für konventionelle Gleit- und Wälzführungen charakteristisch sind.

4.4.4 Steuerung

Der integrierte Mehrkoordinatenmotor ist auf Grund der infolge der Volumenintegration stärkeren inneren Verkopplungen ein sehr komplexes System, dessen Potenzial nur mit einer leistungsfähigen Hard- und Software ausgeschöpft werden kann. Aus Regelungs- technischer Sicht ist der Mehrkoordinatenantrieb ein Dreigrößensystem (x , y , φ) mit jeweils zwei Zuständen (Weg, Geschwindigkeit) pro Regelgröße. Die Kopplungsstruktur des Regelkreises ist in Bild 4-36 dargestellt.

Steuerung

Eine leistungsfähige DSP-Steuerung (Hardwarestruktur siehe Bild 4-37) ermöglicht eine vollsynchrone, mikrometergenaue Bewegung in den Koordinatenachsen bei hohen Bahngeschwindigkeiten. Look-ahead ermöglicht gleichmäßige Fahrgeschwindigkeiten. Eine schleppfehlerfreie Bewegung wird durch Geschwindigkeits- und Beschleunigungs- vorsteuerung erreicht.

Regelung

Zum Einsatz kommen inkrementelle Eingrößen-Zustandsregler für jede der drei Achsen, deren Struktur (Bild 4-38) durch die Minimierung des Gütefunktionalen

Electrodynamic motors may only be used for positioning tasks if a position control loop is set up. Figure 4-34 shows the multicoordinate measuring system, which in the present case is likewise volume-integrated and which comprises three sampling units arranged on the stator and a cross-grid scale arranged on the rotor.

The two y measuring systems also allow a limited twisting angle φ ($\varphi_{\max} = 3^\circ$), if the sampling geometry is optimized in such a way that the measuring system is insensitive to twisting.

The structural setup of the integrated multicoordinate motor is represented in Figure 4-35. The guidance of the armature is achieved by means of four magnetically biased air guiding elements, which allow in an area predetermined by the construction a movement with the degree of freedom 3 in the x , y and φ_z directions. This dispenses with friction, play and stick-slip, which are characteristic of conventional sliding and rolling guides.

4.4.4 Control

On account of the stronger internal couplings because of the volume integration, the integrated multicoordinate motor is a very complex system, the potential of which can only be exploited with powerful hardware and software. From a control engineering viewpoint, the multicoordinate drive is a three-variable system (x , y , φ) with two states in each case (displacement, speed) per controlled variable. The coupling structure of the control loop is represented in Figure 4-36.

Open-loop control

A powerful DSP control (see Figure 4-37 for hardware structure) makes a fully synchronous, micrometre-exact movement possible in the coordinate axes with high path speeds. Look-ahead permits more uniform traversing speeds. A movement without contouring errors is achieved by speed and acceleration precontrol.

Closed-loop control

Used for each of the three axes are incremental single-parameter state controllers, the structure of which (Figure 4-38) is determined by the minimizing of the quality functional

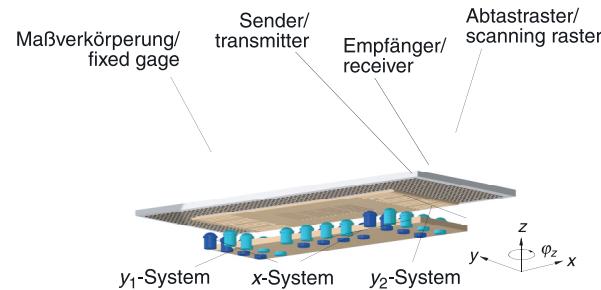


Bild 4-34. Prinzipdarstellung des Messsystems

Fig. 4-34. Basic representation of the measuring system

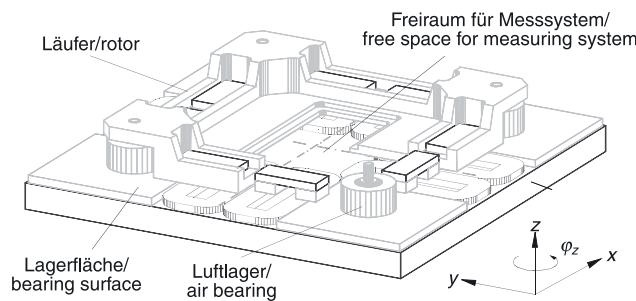


Bild 4-35. Konstruktiver Aufbau des Mehrkoordinatenmotors

Fig. 4-35. Structural setup of the multicoordinate motor

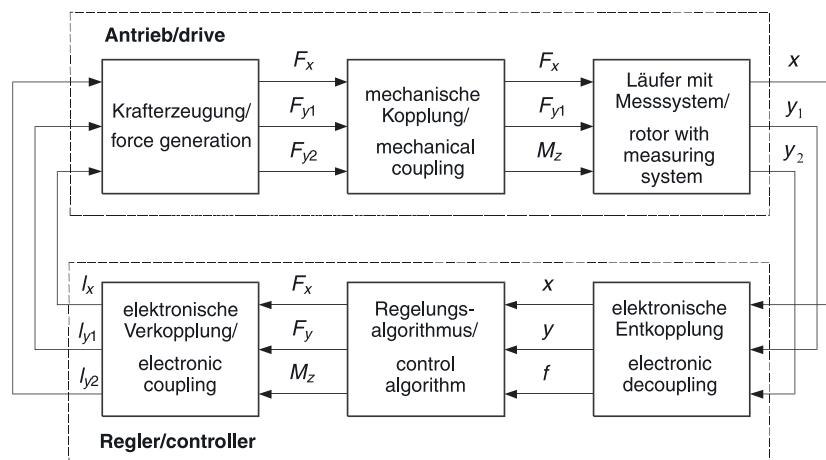


Bild 4.36. Kopplungsstruktur des Regelkreises

Fig. 4-36. Coupling structure of the control loop

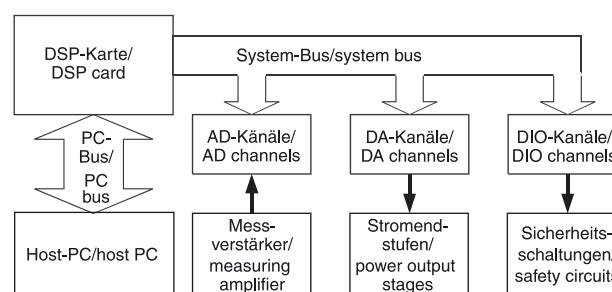


Bild 4-37. Hardwarestruktur der Steuerung

Fig. 4-37. Hardware structure of the control

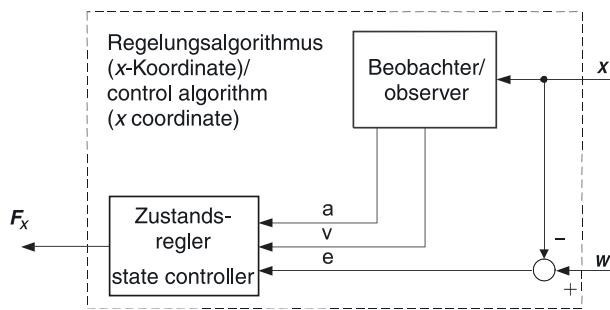


Bild 4-38. Reglerstruktur

Fig. 4-38. Controller structure

$$\psi = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} q e_{k+i}^2 + r(u_{k+i} - u_{k+i-1})^2$$

Dabei ist

N Länge des Optimierungshorizontes
 q Gewichtung des Regelfehlers
 r Gewichtung der Stellgrößenänderung

e Regelfehler
 u Stellgröße
 l Reglerkoeffizient des Regelfehlers
Index k aktueller Abtastzeitpunkt der Regelung
Index i Laufvariable des Optimierungshorizontes

unter der Nebenbedingung der Systemgleichung zu

$$u_k = u_{k-1} + k(x_k - x_{k-1}) + l e_k$$

mit

x Zustandsvektor
 k Vektor der Reglerkoeffizienten der Zustandsrückführung

bestimmt ist (zeitdiskreter inkrementeller Riccati-Regler mit endlichem Optimierungshorizont).

Die Reglerparameter k und l wurden ausgehend von den Ergebnissen der Optimierung am Motor auf maximale Geschwindigkeit bei überschwingfreien Übergangsvorgängen eingestellt, da das der Optimierung zu Grunde liegende Modell des Prozesses nur approximiert war.

Die erste Rückwärtsdifferenz des Zustandsvektors wird nach Differenzieren der Regelgröße über einen Zustandsbeobachter gewonnen [SSK98].

$$\psi = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} q e_{k+i}^2 + r(u_{k+i} - u_{k+i-1})^2$$

Where

N length of the optimization horizon
 q weighting of the control error
 r weighting of the change in the manipulated variable
 e control error
 u manipulated variable
 l controller coefficient of the control error
index k current sampling point of the control

index i running variable of the optimization horizon

under the secondary condition of the system equation to give

$$u_k = u_{k-1} + k(x_k - x_{k-1}) + l e_k$$

where

x state vector
 k vector of the control coefficients of the state feedback

(time-discrete incremental Riccati controller with finite optimization horizon).

On the basis of the results of the optimization on the motor to the control parameters k and l were set to the maximum speed without transient overshooting, since the model of the process on which the optimization was based was only approximated.

The first feedback difference of the state vector is obtained after differentiating the control variable by means of a state observer [SSK 98].

4.4.5 Parameter

Im vorliegenden Fall werden Genauigkeit und Auflösung infolge der Volumenintegration und Krafteinleitung nicht durch den mechanischen Aufbau begrenzt, sondern durch das Messsystem und die Informationsverarbeitung bestimmt [KS00].

Tabelle 3. Parameter des Mehrkoordinatenantriebs

Parameterbezeichnung	Einheit/Wert
Fahrbereich	x, y 204 mm
Drehwinkel	φ_z ± 1
Genauigkeit	x, y 1 (0,2)*) μm φ_z 4" φ_x, φ_y 3"
Auflösung	x, y 20 (1)*) nm φ_z 0,2"
Kraft	F_x, F_y 260 N
Beschleunigung	a_x, a_y 20 ms^{-2}
Geschwindigkeit	v_x, v_y 200 mms^{-1}
Masse	m 800 kg
Maße ($b \times h \times t$)	960 \times 880 \times 800 mm^3
Programmzeilen	G-Code (unbegrenzt)
Reinraumkompatibel	

*) Die in Klammern stehenden Parameter werden mit einem Laserinterferometer erreicht.

4.4.6 Anwendungsfelder

- Schnelle Laserschneid- und Graviersysteme höchster Genauigkeit
- Messsysteme mit optischer und mechanischer Abtastung
- Mikromontagesysteme
- Waferinspektion und -bearbeitung

In einem Anwendungsfall wurden in einer Zeit von 19 s 100 Mikrobohrungen mit einem Durchmesser von 200 μm und einer Genauigkeit von $\pm 0,5 \mu\text{m}$ mit einem Laserstrahl in ein 0,2 mm dickes Stahlblech geschnitten.

4.4.5 Parameters

In the present case, because of the volume integration and force introduction, accuracy and resolution are not limited by the mechanical setup but are determined by the measuring system and the information processing [KS00].

Table 3. Parameters of the multicoordinate drive

Parameter designation	Unit/value
Traveling range	x, y 204 mm
Rotating angle	φ_z ± 1
Accuracy	x, y 1 (0.2)*) μm φ_z 4" φ_x, φ_y 3"
Resolution	x, y 20 (1)*) nm φ_z 0.2"
Force	F_x, F_y 260 N
Acceleration	a_x, a_y 20 ms^{-2}
Speed	v_x, v_y 200 mms^{-1}
Mass	m 800 kg
Dimensions ($w \times h \times d$)	960 \times 880 \times 800 mm^3
Program lines	G code (unlimited)
Clean-room compatible	

*) The parameters in parentheses are achieved with a laser interferometer.

4.4.6 Fields of application

- High-speed laser cutting and engraving systems of extreme accuracy
- Measuring systems with optical and mechanical scanning
- Microassembly systems
- Wafer inspection and machining

In one application, 100 micro-bores with a diameter of 200 μm and an accuracy of $\pm 0,5 \mu\text{m}$ were cut in a 0.2 mm thick steel sheet with a laser beam in a time of 19 seconds.

Schrifttum/Bibliography

Technische Regeln/Technical rules

ISO 10 303 Industrial automation systems and integration; Product data representation and exchange (Industrielle Automatisierungssysteme und Integration; Produktdatendarstellung und -austausch)

PAS 1013 : 2001-07 MechaSTEP – STEP data model for simulation data of mechatronic systems (CD-ROM) (MechSTEP – STEP-Datenmodelle zur Simulation mechatronischer Systeme (CD-ROM). Berlin: Beuth Verlag

VDI 2221 : 1993-05 Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte (Systematic approach to the development and design of technical systems and products). Berlin: Beuth Verlag

VDI 2225 Blatt 3 : 1998-11 Konstruktionsmethodik; Technisch-wirtschaftliches Konstruieren; Technisch-wirtschaftliche Bewertung. (Design engineering methodics; Engineering design at optimum cost; Valuation of costs). Berlin: Beuth Verlag

VDI/VDE 2422 : 1994-02 Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik (Systematical development of devices controlled by microelectronics). Berlin: Beuth Verlag

VDI 3633 : 1996-11 Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen; Begriffsdefinitionen (Simulation of systems in materials handling, logistics and productions; Clarification of terms). Berlin: Beuth Verlag

Literatur/Literature

- [Agg89] Aggateky, B.: Fabrikplanung, Bd. 2: Betriebsanalyse und Feasibility-Studie. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1989
- [Arm89] Armstrong, J.R.: Chip-Level Modeling with VHDL, Prentice Hall, 1989
- [Art94] Arthur D. Little (Hrsg.): Management erfolgreicher Produkte. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1994
- [Bei95] Beims, H.D.: Praktisches Software-Engineering – Vorgehen, Methoden, Werkzeuge. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1995
- [Ber01] Bertram, T.: Modellbildung und Simulation in der Entwicklung mechatronischer Systeme für das Kraftfahrzeug, zweites Fachforum Mechatronik – funktions- und kostenoptimierte Systemlösungen. Regensburg, 2001
- [Ber02] Bertram, T.: Eine Erfolgsgeschichte – von der mechanischen zur mechatronischen Bremse. 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Maschinienbau und Nanotechnik – Hochtechnologien des 21. Jahrhunderts, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, 2002
- [BGH96] Bleck, A.; Goedecke, M.; Huss, S.; Waldschmidt, K.: Praktikum des modernen VLSI-Entwurfs. Stuttgart: Teubner Verlag, 1996
- [Boe88] Boehm, B.W.: A Spiral Model of Software-Engineering – Vorgehen, Methoden, Werkzeuge. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1988
- [Bor96] Bormann, J.-G.: Internationales unternehmensinternes Projektmanagement. Aachen: Shaker Verlag, 1996
- [Bri01] Brix, T.: Feature- und constraintbasierter Entwurf technischer Prinzipien. Dissertation, TU Ilmenau, 2001
- [Brö95] Bröhl, A.-P. (Hrsg.): Das V-Modell – Der Standard für die Softwareentwicklung, 2. Aufl. München: Oldenbourg Verlag, 1995
- [Bru96] Brussel, H. M. J. Van: Mechatronics – A Powerful Concurrent Engineering Framework. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 1, No. 2, 1996, S. 127–136
- [BSD97] Bertram, T.; Schröder, W.; Dominke, P.; Volkart, A.: CARTRONIC – ein Ordnungskonzept für die Steuerungs- und Regelungssysteme in Kraftfahrzeugen, Systemengineering in der KFZ-Entwicklung. VDI-Berichte 1374, Düsseldorf: VDI Verlag 1997

- [Buc01] Buchenrieder, K.J. (Hrsg.): Hardware/Software-Code-sign (2. Auflage), IT Press Schriftenreihe Informationsverarbeitung und Technische Informatik, IT Press Verlag, 2001
- [Con01] Continental AG (Hrsg.): http://www.conti-online.com/de/contiteves/the men/press_services/presse_de.html
- [CR92] Corsten, H.; Reiß, M.: Integrationsbedürfnisse im Produktenstehungsprozess, in Integrationsmanagement für neue Produkte. Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung (zfbf), Sonderheft 30, hrsg. v. R.A. Hansen u. W. Kern (Hrsg.). Düsseldorf: Verlagsgruppe Handelsblatt, 1992
- [Dan98] Dangelmaier, W.: Fertigungsplanung. Berlin: Springer Verlag, 1998
- [DH94] Daenzer, W.F.; Huber, F.: Systems Engineering – Methoden und Praxis. 8. verbesserte Auflage, Zürich: Verlag Industrielle Organisation, 1994
- [DK00] Donges, C.; Krastel, M.: Das MechaSTEP Projekt – ein Statusbericht; in: Produktdatenjournal, Nr. 1, 5/2000, ProSTEP Verein zur Förderung internationaler Produktdatennormen e.V., Darmstadt, 2000
- [Dör89] Dörner, D.: Die Logik des Mißlingens – Strategisches Denken in komplexen Situationen. Hamburg: Rowohlt Verlag, 1989
- [Dör94] Dörner, D.: Gedächtnis und Konstruieren. In: Pahl, G. (Hrsg.): Psychologische und Pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren, Ergebnisse des Landenburger Diskurses, Mai 1992 bis Oktober 1993, TÜV Rheinland, Köln, 1994
- [Dün02] Dünkel, A.: Bremse des Benz Patent-Motorwagen Modell 1, Unternehmensgruppe Dünkel holding, 88433 Schemmerhofen, 2002
- [Dürr99] Dürr, R.: Kopplungsansätze mechatronischer Systeme. In: Modellierung und Simulation. Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 1, Nr. 310, Düsseldorf: VDI Verlag, 1999
- [EBL95] Eversheim, W.; Bochtl, W.; Laufenberg, L.: Simultaneous Engineering – Erfahrungen aus der Industrie für die Industrie. Berlin: Springer Verlag, 1995
- [EDG01] Eppinger, A.; Dieterle, W.; Georg, K.: Mechatronik – Mit ganzheitlichem Ansatz zu erhöhter Funktionalität und Kundennutzen. ATZ/MTZ/Automotive Engineering Partners, Sonderausgabe „Automotive Electronics“, Ausgabe September 2001, S. 12
- [Ehl00] Ehlers, K.: Problemfelder der integrierten Elektronik-Entwicklung im Produktentstehungsprozess. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 102 (2000) 10, S. 878/887
- [Ehr95] Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung – Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1995
- [EM00] Enge, O.; Maißer, P.: Virtuelles Prototyping elektromechanischer Systeme. IfM-Report 06/2000, Institut für Mechatronik e.V., TU Chemnitz, 2000
- [ENS00] Eversheim, W.; Niemeyer, R.; Schernikau, J.; Zohm, F.: Unternehmerische Chancen und Herausforderungen durch die Mechatronik in der Automobilzulieferindustrie, Materialien zur Automobilindustrie Band 23. Frankfurt a. M.: VDA-Verlag, 2000
- [ES99] Eversheim, W.; Schuh, G.: Produktionsmanagement, Bd. 3: Gestaltung von Produktionssystemen. Berlin: Springer Verlag, 1999
- [Esc93] Eschermann, B.: Funktionaler Entwurf digitaler Schaltungen – Methoden und CAD-Techniken, Berlin: Springer Verlag, 1993

- [Eve92] *Eversheim, W.*: Flexible Produktionssysteme. In: *Frese, E.* (Hrsg.): Handwörterbuch der Organisation, Stuttgart: Poeschel Verlag, 1992, Sp. 2059
- [Eve93] *Eversheim, W.* et al: Simultaneous Engineering: Integrierte Produktentwicklung mit einem zeitparallelen Ansatz. In: *CIM-Management*, 1993, H. 2, S. 4/9
- [Fel89] *Felix, H.*: Unternehmens- und Fabrikplanung – Planungsprozesse, Leistungen und Beziehungen, München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1998
- [FKM00] *Flath, M.; Kespoli, H.; Möhringer, S.; Oberschelp, O.*: Entwicklung mechatronischer Systeme. In: *Gausemeier, J./Lückel, J.* (Hrsg.): Entwicklungsumgebungen Mechatronik – Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 80, Paderborn, 2000
- [FöI94] *Föllinger, O.*: Regelungstechnik – Einführung in die Methoden und ihre Anwendung. 8. überarbeitete Aufl., Heidelberg: Hüthig Verlag, 1994
- [GEK01] *Gausemeier, J.; Ebbesmeyer, P.; Kallmeyer, F.*: Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2001
- [GGK99] *Gausemeier, J.; Grasemann, M.; Kespoli, H.D.*: Verfahren zur Integration von Gestaltungs- und Berechnungssystemen, in: VDI-Berichte Nr. 1487, Düsseldorf: VDI Verlag, 1999
- [GL00] *Gausemeier, J.; Lückel, J.*: Entwicklungsumgebungen Mechatronik – Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 80, Paderborn, 2000
- [GM01] *Gausemeier, J.; Möhringer, S.*: Integration der Funktions- und Prinziplösungsmodellierung mechatronischer Systeme. In: *Meerkamm, H.* (Hrsg.): Design for X, 12. Symposium, Neukirchen, 11./12. Okt. 2001, Erlangen, 2001
- [Gru00] *Grundig, C.-G.*: Fabrikplanung. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2000
- [HG99] *Henke, M.; Grotstollen, H.*: Regelung eines Langstator-Linearmotors für ein spurgeführtes Bahnhofahrzeug. SPS/IPC Drives, Nürnberg, 1999
- [Hil83] *Hiller, M.*: Mechanische Systeme – Eine Einführung in die analytische Mechanik und Systemdynamik. Berlin: Springer Verlag, 1983
- [HK96] *Henn, G.; Kühnle, H.*: Strukturplanung. In: *Eversheim, W.; Schuh, G.* (Hrsg.): Betriebshütte – Produktion und Management, Berlin: Springer Verlag, 1996, S. 9/59 ff.
- [HSB02] *Hirzinger, G.; Sporer, N.; Butterfaß, J.; Schedl, M.; Grebenstein, M.* et al.: Eine neue Generation von Leichtbau-Robotern mit mehrfingrigen Händen. ROBOTIK 2002, Forum am Schlosspark, Ludwigsburg, 19./20. Juni 2002, Düsseldorf: VDI Verlag, 2002
- [HTF96] *Harashima, F.; Tomizuka, M.; Fukuda, T.*: Mechatronics – „What Is It, Why, and How?“ An Editorial. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 1 (1996) 1, pp. 1/4
- [Hua02] *Huang, M.*: Funktionsmodellierung und Lösungsfindung mechatronischer Produkte. Diss., Institut für Rechneranwendung in Planung und Konstruktion, Universität Karlsruhe, Aachen: Shaker Verlag, 2002
- [IBH02] *Isermann, R.; Breuer, B.; Hartnagel, H.L.* (Hrsg.): Mechatronische Systeme für den Maschinenbau – Ergebnisse aus dem Sonderforschungsbereich „Integrierte mechanisch-elektronische Systeme für den Maschinenbau (IMES)“. Deutsche Forschungsgemeinschaft, Weinheim: Verlag Wiley-VCH, 2002
- [Ise88] *Isermann, R.*: Digitale Regelsysteme. Band 1: Grundlagen, Deterministische Regelung. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Berlin: Springer Verlag, 1988
- [Ise99] *Isermann, R.*: Mechatronische Systeme – Grundlagen. Berlin: Springer Verlag, 1999
- [KBG96] *Kallenbach, E.* et al.: Design mechatronischer Systeme – Methoden und Anwendungsbeispiele. In: Mechatronik-Workshop, 13./14. Mai 1996, Stuttgart, 1996
- [KBS97] *Kallenbach, E.; Birli, O.; Saffert, E.; Schäffel, C.*: Zur Gestaltung integrierter mechatronischer Produkte. in: Tagung Mechatronik im Maschinen- und Fahrzeugbau, Moers, 10.–12. März 1997, VDI Berichte 1315, Düsseldorf: VDI Verlag, 1997, S. 1/14
- [Kas02] *Kasper, R.*: Mechatronisches Design integrierter Piezotaktoren. 21.–22. März 2002, IOM 2002 „Innovative Antriebstechnik“, Chemnitz, 2002, S. 379/392
- [Ket84] *Kettner, H.* et al.: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1984
- [KG92] *Krettek, O.; Grjner, J.*: Die Luftfeder, ihre Berechnung und dynamischen Eigenschaften, Federungs- und Dämpfungssysteme. Vieweg Verlag, 1992
- [KKR97] *Kiesewetter, W.; Klinkner, W.; Reichelt, W.; Steiner, M.*: Der neue Brake Assist von Mercedes-Benz – aktive Fahrerunterstützung in Notsituationen. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 99 (1997) 6, S. 337
- [Koc00] *Koch, W.*: Eine interaktive Entwurfsplattform für mechatronische Systeme auf der Basis von Komponentensoftware. Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 20, Nr. 320, Düsseldorf: VDI Verlag, 2000
- [KA01] *Kortüm, W.; Arnold, M.*: Integrierte dynamische Simulation – ein Beitrag zur virtuellen Produktentwicklung. 5. Automobiltechnische Konferenz 2001, Wiesbaden, 17./18. Mai 2001, Proceedings, ATZ, MTZ, 2001
- [Kov01] *Kovalev, S.*: Magnetisch geführter Mehrkoordinaten-Präzisionsantrieb, Diss., TU Ilmenau, Ilmenau, 2001
- [KOV86] *Kranach, M. von; Ochsenbein, G.; Valach, L.*: The Groupe as Selfactive System: Outline of a Theorie of Groupeaction. European Journal of Social Psychology 16 (1986), pp. 193/229
- [KS00] *Kallenbach, E.; Saffert, E.*: Nanopositionierungen mit integrierten Mehrkoordinatenmotoren, tm – Technisches Messen 67(2000) 7–8, S. 1/6
- [KSS99] *Kallenbach, E.; Saffert, E.; Schäffel, Chr.*: Multi-coordinate Drive Systems – Opportunities and Limits, 3rd International Heinz Nixdorf Symposium, May 1999, Paderborn, Proceedings pp. 11/24
- [KüM99] *Kümmel, A.M.*: Integration von Methoden und Werkzeugen zur Entwicklung von mechatronischen Systemen, Dissertation, Universität-Gesamthochschule Paderborn 1999
- [KZB01] *Kallenbach, E.; Zöppig, V.; Birli, O.; Feindt, K.; Ströhla, T.; Saffert, E.; Schmidt, J.*: Integration mechatronischer Systeme. In: Innovative Produktentwicklungen, 4. VDI-Mechatronik Tagung, 12./13. Sept. 2001, Frankenthal, VDI-Berichte 1631, Düsseldorf: VDI Verlag, 2001
- [LKS00] *Lückel, J.; Koch, T.; Schmitz, J.*: Mechatronik als integrative Basis für innovative Produkte. In: VDI-Tagung: Mechatronik – Mechanisch/Elektrische Antriebstechnik, 29./30. März 2000, Wiesloch; Düsseldorf: VDI Verlag, 2000
- [LLJ00] *Liu-Henke, X.; Lückel, J.; Jäker, K.-P.*: Ganzheitlicher mechatronischer Entwurf eines aktiven Feder-/Neigemoduls. in: VDI-Tagung Mechatronik – Mechanisch/Elektrische Antriebstechnik, 29./30. März 2000, Wiesloch, Düsseldorf: VDI Verlag, 2000
- [LW00] *Lindemann, U.; Wulf, J.*: Technological Lock-In in Mechatronic Engineering and Ways of overcoming it. In: Proc. of the 5th World Conference on Integrated Design and Process Technology (IDPT 2000), Dallas (USA), 04.–08.06.2000, Society for Design and Process Science (SDPS), 2000

- [MG02] Möhringer, S.; Gausemeier, J.: An Interface Specification for Principle Solutions Supporting the Cross-Domain Design of Mechatronic Systems. Proceedings of the 7th International Design Conference DESIGN 2002, May 14/17, 2002, Dubrovnik – Croatia, Vol. 1, Zagreb, 2002
- [Moo65] Moore, G.: Cramming more components onto integrated circuits. *Electronis.* 38 (1965) 8
- [NN02] N.N.: Photo des Benz Patent-Motorwagen Modell 1, Deutsches Museum München, Bild-Nr. *38528, 2002
- [Nor01] Nordmann, R.: Maschinenelemente und Mechatronik, 2. Auflage, Aachen: Shaker Verlag, 2001
- [Oes98] Oesterreich, B.: Objektorientierte Softwareentwicklung – Analyse und Design mit der Unified Modeling Language. 4. Auflage, München, Wien: Oldenbourg Verlag, 1998
- [Pan84] Panther, M.: Identifikation physikalischer Systemparameter mechanisch-hydraulischer Mehrgrößensysteme. *Fortschr.-Ber. VDI-Z*, Reihe 8, Nr. 76, Düsseldorf: VDI Verlag, 1984
- [PB96] Pomberger, G.; Blaschek, G.: Software-Engineering, 2. Auflage, München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1996
- [PB97] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung. 4. Auflage, Berlin: Springer Verlag, 1997
- [Pre94] Pressmann, R.S.: Software Engineering – a practitioner's approach. 3. Auflage, McGraw-Hill, 1994
- [Rob89] Robert Bosch GmbH (Hrsg.): Bosch Technische Unterichtung: Pkw-Bremsanlagen, 1989, S. 21
- [Rod97] Roddek, W.: Einführung in die Mechatronik. Stuttgart: Teubner Verlag, 1997
- [Rot00] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. 3. Auflage, Berlin: Springer Verlag, 2000
- [Sch85] Schmidt, B.: Systemanalyse und Modellaufbau. Heidelberg: Springer Verlag, 1985
- [Sch89] Schweitzer, G.: Mechatronik – Aufgaben und Lösungen: VDI-Berichte Nr 787, Düsseldorf: VDI Verlag, 1989, S. 1/15
- [Sch95] Schmidgalla, H.: Fabrikplanung – Begriffe und Zusammenhänge: München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1995
- [Sch99] Schwarz, R.: Bremskraft-Rekonstruktion für elektromechanische Fahrzeugbremsen, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 101(1996) 6, S. 402
- [Sch00] Schernikau, J.: Gestaltung von mechatronikgerechten Organisationen in der Produktentwicklung. Dissertation an der RWTH Aachen, Shaker Verlag, 2000
- [SFB01] N.N.: Prozesssynchronisation für unternehmensübergreifende „mechatronische“ Produktentwicklungsprozesse, Arbeits- und Ergebnisbericht zum SFB 361 in Teilprojekt A3, Eigendruck, 2001, S. 184/194
- [SSK98] Schäffel, Chr.; Saffert, E.; Kallenbach, E.: Regelung eines integrierten Mehrkoordinatenantriebes. 41. Internationales wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau, 23.–26.9.1996, Bd. 2, S. 170/177
- [Ste00] Steinmetz, E. (Hrsg.): Mechatronik im Automobil – aktuelle Trends in der Systementwicklung für Automobile, Renningen-Malmsheim: Expert-Verlag, 2000
- [Tom00] Tomizuka, M.: Mechatronics: From the 20th to 21th Century. 1. IFAC Conference on Mechatronic Systems, Vol. I, 2000, S. 1/10
- [Uni02] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization: <http://mecha.ee.boun.edu.tr/>
- [Ver94] Versteegen, G.: Softwareerstellung nach dem V-Modell – Von Amts wegen. iX (1994) 11, S. 162/165
- [WB01] Westkämper, E.; Briel, R. v.: Continous Improvement and Participative Factory Planning by Computer Systems. *Annals of th e CIRP* 50 (2001), S. 347/352
- [Wil98] Wildemann, H.: Die modulare Fabrik – Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung. TCW, München, 1998
- [WK97] Wallaschek, J.; Kümmel, M.: Mechatronik – Neue Impulse für die Produktentwicklung. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): *TRANSMECHATRONIK – Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik*. 1. Aufl., HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 23, Paderborn, 1997, S. 3/20
- [WS00] Wulf, J.; Schuller, J.: Entwicklungsmethodik für mechatronische Karosseriesysteme. In: VDI-Tagung Mechatronik – Mechanisch/Elektrische Antriebstechnik, 29./30. März 2000, Wiesloch, Düsseldorf: VDI Verlag, 2000
- [WT98] Wikander, J.; Törngren, M.: Mechatronics as an engineering science, *Mechatronics 98*, Proceedings, Skövde, Schweden, 1998
- [Wul98] Wulf, J.: Mechatronic Engineering in Car Body Design. In: Kivikoski, M. (Eds.): Proc. of the ICMA'98, 2nd Intern. Conference on Machine Automation, Advanced Mechatronics: first-time-right, Tampere (Finnland), 15.–18.09.1998, Tampere University of Technology, Tampere, 1998
- [ZEB97] Zanten, van A.Th. et al.: Simulation bei der Entwicklung der Bosch-Fahrdynamikregelung. In: Tagung Mechatronik im Maschinen- und Fahrzeubau, 10.–12. März 1997, Moers, VDI Berichte 1315, Düsseldorf: VDI Verlag, 1997
- [ZEP94] Zanten, A. v.; Erhardt, R.; Pfaff, G.: FDR – Die Fahrdynamikregelung von Bosch. *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 96 (1994) 11, S. 687
- [ZT98] Zirm, O.; Treib, T.: Similarity Laws of Serial and Parallel Manipulators for Machine Tools. *MOVIC '98* Zürich, Switzerland, 25.–28. August 1998, Vol. 3 pp. 865/870
- Weiterführende Literatur zur Mechatronik (Auswahl)/Further bibliography on mechatronics (selection):
- Bolton, W.: Mechatronics – Electronic control systems in mechanical engineering. Second edition, Addison Wesley Longman Publishing, New York, 1999
- Heimann, B.; Gerth, W.; Popp, K.: Mechatronik – Komponenten, Methoden, Beispiele. 2. Aufl., München, Wien: Fachbuchverlag Leipzig im Hanser Verlag, 2001
- Popovic, D.; Vlasic, L.: Mechatronics in engineering design and product development. Marcel Dekker, Inc., New York 1999
- Shetty, D.; Kolk, R.A.: Mechatronics system design. PWS Publ., Boston et al., 1997

Glossar

Aktor bzw. Aktuator

Aktoren dienen zur gezielten Beeinflussung von Zustandsgrößen in mechatronischen Systemen. Der Begriff „Aktor“ geht damit über den Begriff „Antrieb“ (engl. „actuator“) hinaus und umfasst alle Arten von Ausgabeelementen für Bewegungen und Kräfte [Rod97].

CORBA

Common Object Request Broker Architecture (CORBA) ist der zu Microsoft® konkurrierende Ansatz verteilter Systementwicklung der OMG (Object Management Group). Mittels geeigneter Schnittstellen-Sprachen (Interface Description Language – IDL) und eines gemeinsam spezifizierten Datenbusses (Object Request Broker – ORB) wird die Interobjekt-Kommunikation verteilter Systeme realisiert.

Distributed Component Object Model (DCOM)

Für die Programmierung verteilter Softwaresysteme bietet Microsoft® verschiedene Dienste und Komponenten an. Bisherige objektorientierte Ansätze zur Kommunikation wie OLE sind Teil des so genannten „Component Object Model“. Die Kommunikation basiert auf Objekten bzw. Gruppen von Objekten (Komponenten) und Server-Diensten.

Eigenschaftsabsicherung

Ist ein Bestandteil der Qualitätssicherung und umfasst die beiden Aspekte → Verifikation und → Validierung. Die Qualitätssicherung dient allgemein dem Nachweis der Erfüllung vorgegebener Anforderungen, der präventiven Vermeidung von Mängeln und der Sicherstellung einer Prozessqualität, wobei sowohl die Methoden wie die begleitenden Prozesse berücksichtigt werden. Unter der Qualität wird nach DIN EN ISO 8402 die Gesamtheit von Merkmalen einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen, definiert.

Entwurf

„Die Erahnung eines Ganzen, eines Lösungskonzepts, das Erkennen bzw. Finden der dazu erforderlichen Lösungselemente und das gedankliche, modellhafte Zusammenfügen und Verbinden dieser Elemente zu einem tauglichen Ganzen“ [DH94, S. 158]. Diese Vorstellung umfasst auch das so genannte „Konzipieren“ und weicht damit von der im Maschinenbau eingeführten Terminologie ab. Das Entwerfen ist demnach ein Vorgang, der ausgehend von den Anforderungen zu einer Konkretisierung eines technischen Systems führt. Diese Konkretisierung drückt sich in Komponenten der Mechatronik sowie dem Zusammenwirken dieser Komponenten aus.“

Glossary

Actor or actuator

Actors serve for the targeted influencing of state variables in mechatronic systems. The term "actor" consequently goes beyond the English term "actuator" and covers all kinds of output elements for movements and forces [Rod97].

CORBA

Common Object Request Broker Architecture (CORBA) is the way devised to compete with Microsoft® for distributed system development of the OMG (Object Management Group). The interobject communication of distributed systems is realized by means of suitable interface languages (Interface Description Language – IDL) and a commonly specified data bus (Object Request Broker – ORB).

Distributed Component Object Model (DCOM)

For the programming of distributed software systems, Microsoft® offers various services and components. Previous object-oriented ways devised for communication such as OLE are part of the so-called „Component Object Model“. The communication is based on objects or groups of objects (components) and server services.

Assurance of properties

Constitutes part of quality assurance and comprises the two aspects of → verification and → validation. Quality assurance generally serves for demonstrating that prescribed requirements are satisfied, that deficiencies are preventively avoided and that a certain quality of a process is ensured, with both the methods and the accompanying processes being taken into consideration. Quality is defined in accordance with DIN EN ISO 8402 as the entirety of features of a unit with respect to their suitability for meeting stipulated and expected requirements.

Design

“The conceiving of a whole, a solution concept, the identifying or finding of the solution elements required for this and the intellectual, model-based joining together and connecting of these elements to form a workable whole“ [DH94, p. 158]. This idea also includes the so-called “conceptual design“ and consequently deviates from the terminology introduced in mechanical engineering. Designing is accordingly a process which, starting from the requirements, leads to a concretization of a technical system. This concretization is expressed in components of mechatronics and the interaction of these components.

Grundsystem

Subsystem, das für das mechatronische System grundlegend ist. In der Regel der Teil des Systems, der bei der Reglerauslegung die zu beeinflussende Strecke (Regelstrecke) darstellt. Das Grundsystem ist damit dasjenige dynamische Subsystem, dessen Größen in gewünschter Weise beeinflusst werden sollen.

Hardware-in-the-Loop (HIL)

Ist die Integration von realen Komponenten (Bauteilen) und Systemmodellen in eine gemeinsame Simulationsumgebung. Die HIL-Nachbildung (→ Simulation) dynamischer Systeme durch physikalische und mathematische Modelle muss dabei in Echtzeit und beispielsweise unter Nachbildung der resistiven, induktiven und kapazitiven Lasten für elektronische Systeme erfolgen. Ein Beispiel ist die Simulation eines Gesamtfahrzeugs am Rechner mit der Anbindung eines realen Steuergerätes und der Aktorik für eine Funktionsregelung zur Fahrstabilitätsregelung. Ein entscheidender Vorteil der HIL ist der Funktions- test des Steuergerätes unter realen Bedingungen bei gleichzeitiger Einsparung zeit- und kostenintensiver Experimente (z.B. Fahrmanöver).

Informationsverarbeitung

Speicherung, Strukturierung, Veränderung und Ausgabe von Informationen. Die Informationsverarbeitung nutzt vorhandene Informationen zur zielgerichteten Erzeugung von Ausgangsinformationen.

JAVA

Objektorientierte, in starkem Maße an C++ angelehnte betriebssystem- und plattformunabhängige Programmiersprache, die 1995 von der Firma Sun Microsystems (USA) entwickelt wurde. JAVA ist eine Sprache für in Netzen verteilbare Anwendungen, bei denen nicht nur Datensätze, sondern auch Programmteile (so genannte „Applets“) in den Rechner geladen und ausgeführt werden können. Damit wird die in der Informationstechnik und speziell im Internet äußerst wichtige Forderung nach Systemunabhängigkeit erfüllt. JAVA-Programme können auf beliebigen Rechnern ausgeführt werden. Dazu übersetzt ein Compiler den Programmtext nicht in die Sprache eines bestimmten Prozessors, sondern in eine Zwischensprache, die sich sehr schnell in die Maschinensprachen der jeweiligen Prozessoren umwandeln lässt.

Layoutplanung

Die Layoutplanung ist eine Phase des Fabrikplanungsprozesses. In dieser Phase werden die Anordnung der Betriebsbereiche und Produktionsysteme festgelegt. Im Rahmen der Anordnung werden die Struktureinheiten, die erforderlichen Funktionseinheiten (Aggregaträume, Sperrflächen, Energieversorgung etc.) sowie die indirekten Be-

Basic system

Subsystem which provides the basis for the mechatronic system. Generally the part of the system which represents the system to be influenced (controlled system) in the controller design. The basic system is consequently that dynamic subsystem of which variables are to be influenced in the desired way.

Hardware-in-the-loop (HIL)

Is the integration of real components and system models in a common simulation environment. The HIL replication (→ simulation) of dynamic systems by physical and mathematical models must in this case take place in real time and for example with the resistive, inductive and capacitive loads for electronic systems replicated. An example is the simulation of a entire vehicle on a computer with the connection of a real control device and the actor technology for functional control to provide vehicle stability. A decisive advantage of HIL is the function test of the control device under real conditions while at the same time saving on time- and cost-intensive experiments (for example driving maneuvers).

Information processing

Storing, structuring, amending and outputting information. Information processing uses existing information for the targeted production of output information.

JAVA

Object-oriented operating-system- and platform-independent programming language based to a great extent on C++, which in 1995 was developed by the Sun Microsystems company (USA). JAVA is a language for applications which can be distributed in networks and in which not only data records but also parts of a program (so-called „applets“) can be loaded into a computer and executed. This satisfies the extremely important requirement in information technology, and specifically in the Internet, for system independence. JAVA programs can be run on any computer. For this purpose, a compiler translates the program text not into the language of a specific processor but into an intermediate language which can be transformed very quickly into the machine codes of the respective processes.

Layout planning

Layout planning is a phase of the factory planning process. In this phase, the arrangement of the operational areas and production systems are stipulated. As part of the arrangement, the structure units, the required function units (areas designated for units, prohibited areas, energy supply, etc.) and also the indirect areas for alternative area layouts are arranged.

reiche zu alternativen Flächenlayouts angeordnet. Entsprechend des Detailierungsgrades des zu planenden Produktionssystems wird die Phase der Layoutplanung nach Grob- und Feinlayoutplanung unterschieden [HK96].

Lösungselement

„Ein Lösungselement ist eine realisierte und bewährte Lösung zur Erfüllung einer Funktion. Dabei handelt es sich im Allgemeinen um ein Modul/eine Baugruppe, das/die auf einem Wirkprinzip beruht. Die rechnerinterne Repräsentation eines Lösungselementes besteht aus unterschiedlichen Aspekten wie *Verhalten* und *Gestalt*. Jeder dieser Aspekte weist unterschiedliche Konkretisierungen auf, die den Phasen des Entwicklungsprozesses entsprechen. Der Aspekt *Gestalt* enthält grobe Festlegungen für die Bestimmung der prinzipiellen Lösung und weitergehende Festlegungen für die Bestimmung der Baustruktur. Der Aspekt *Verhalten* weist für den Fall von Software beispielsweise für die frühen Entwicklungsphasen abstrakte Datentypen und für die spätere Entwicklungsphase Code auf“ [GEK01].

Mikrozyklus

Strukturierung des Vorgehens im Entwicklungsprozess auf der Grundlage eines allgemeinen Problemlösungszyklus, z.B. [DH94]. Durch Aneinanderreihen und Verschachteln von Vorgehenszyklen lässt sich die Prozessplanung flexibel an die Eigenheiten jeder Entwicklungsaufgabe anpassen. Der Mikrozyklus soll vor allem den im Prozess stehenden Produktentwickler bei der Bearbeitung vorhersehbarer und damit planbarer Teilaufgaben, aber auch bei der Lösung plötzlich auftretender, unvorhersehbarer Probleme unterstützen.

Makrozyklus

Richtschnur für die makroskopische Planung des Vorgehens anhand des V-Modells, das die *logische Abfolge* wesentlicher Teilschritte bei der Entwicklung mechatronischer Systeme beschreibt. Das V-Modell wurde aus der Softwareentwicklung übernommen und an die Anforderungen der Mechatronik angepasst [Brö95; FKM00]. Es stellt das generische Vorgehen beim Entwurf mechatronischer Systeme dar, das fallweise auszuprägen ist.

Modell

Physikalisch-mathematisches Abbild eines technischen Bauelements, einer Baugruppe oder eines komplexen Systems

According to the degree of detailing of the production system to be planned, for the phase of layout planning a distinction is made between rough layout planning and fine layout planning [HK96].

Solution element

”A solution element is a realized and tried-and-tested solution for performing a function. It is generally a module/subassembly which is based on an operating principle. The computer-internal representation of a solution element comprises different aspects such as *behavior* and *form*. Each of these aspects has different concretizations, which correspond to the phases of the development process. The aspect of *form* comprises rough stipulations for determining the solution in principle and more specific stipulations for determining the building structure. The aspect of *behavior* has for the case of software, for example, abstract data types for the early development phases and code for the later development phase“ [GEK01].

Micro-cycle

Structuring of the procedure in the development process on the basis of a general problem-solving cycle, for example [DH94]. By arranging procedural cycles in series and one within the other, process planning can be flexibly adapted to the peculiarities of any development task. The micro-cycle is intended in particular to support the product developer engaged in the process to work on predictable, and consequently plannable, subtasks, but also to solve suddenly occurring, unforeseeable problems.

Macro-cycle

A guide for the macroscopic planning of the procedure on the basis of the V model which describes the *logical sequence* of important substeps in the development of mechatronic systems. The V model was adopted from software development and adapted to the requirements of mechatronics [Brö95; FKM00]. It represents the generic procedure for designing mechatronic systems, which is to be given a more distinct form from case to case.

Model

Physical-mathematical replication of a technical component, subassembly or a complex system

Modellbildung

Erstellung eines physikalisch-mathematischen → Modells eines vorhandenen Systems oder eines zu entwickelnden Systems

Partitionierung

Aufteilen eines Systems auf mehrere Einheiten/Module, z.B. Funktionserfüllung durch Komponenten verschiedener Hersteller oder Fachdisziplinen; Aufteilen eines Systems in einen Teil, der in Hardware und einen Teil, der in Software implementiert wird (Hardware-Software-Partitionierung)

Problemlösungszyklus

Allgemeine Beschreibung der Schrittfolge zur Lösung eines Problems

Produktionssystementwurf

Umfasst alle Aktivitäten, die durchgeführt werden, um eine Produktion bzw. ein → Produktionssystem zu entwickeln und aufzubauen.

Produktionssystem

Umfasst „alle Elemente und Relationen zwischen den Elementen, die zur vollständigen Erstellung eines Produktes erforderlich sind“ [Eve92].

Prozessbaustein

Eine abgeschlossene Einheit von Tätigkeiten, die dazu dienen, ein bestimmtes Zwischenziel zu erreichen. Ein Prozessbaustein enthält darüber hinaus eine Beschreibung der Eingangs- und Ausgangsinformationen, Klassifizierungskriterien und Zusatzinformationen (wie unterstützende Methoden oder erforderliche Kompetenzen), die das Arbeiten mit dem Prozessbaustein unterstützen.

Sensor

Ein Sensor wandelt eine Zustandsgröße eines technischen Prozesses, deren Qualität sich nicht als Signal eignet, in ein übertragbares, weiterverarbeitbares und registrierbares Signal um.

Software-in-the-Loop (SIL)

Die Integration von Systemmodellen in eine gemeinsame Simulationsumgebung mit dem Prozess (Regelstrecke). Die SIL-Nachbildung (→ Simulation) dynamischer Systeme durch mathematische Modelle muss dabei nicht in Echtzeit erfolgen, siehe HIL. Ein entscheidender Vorteil der SIL ist der Funktionstest unter simulierten Bedingungen bei gleichzeitiger Einsparung zeit- und kostenintensiver Experimente (z.B. Fahrmanöver).

Modeling

Creation of a physical-mathematical → model of an existing system or of a system to be developed

Partitioning

Dividing a system between a number of units/modules, for example functions being performed by components of different manufacturers or technical disciplines; dividing a system into a part which is implemented in hardware and a part which is implemented in software (hardware-software partitioning)

Problem-solving cycle

General description of the sequence of steps for solving a problem

Production system design

Comprises all activities which are carried out to develop and set up production or a → production system.

Production system

Comprises "all elements and relationships between the elements which are required for the complete creation of a product" [Eve92].

Process module

A self-contained unit of activities which serve the purpose of achieving a specific interim objective. A process module additionally comprises a description of the input and output information, classification criteria and additional information (such as supporting methods or required competences) which support working with the process module.

Sensor

A sensor converts a state variable of a technical process of a quality which is not suitable as a signal into a signal which can be transmitted, further processed and registered.

Software-in-the-loop (SIL)

The integration of system models in a common simulation environment with the process (controlled system). The SIL replication (→ simulation) of dynamic systems by mathematical models does not have to take place in real time, see HIL. A decisive advantage of SIL is the function test under simulated conditions while at the same time saving on time- and cost-intensive experiments (for example driving maneuvers).

Simulation

Berechnung des Verhaltens eines Systemmodells in Abhängigkeit von Zeit, System- und Umgebungs-zustand. Die Simulation liefert Vorhersagen über das Verhalten des realen Systems mit Hilfe eines im Rechner ausführbaren Modells.

Systemanalyse

Untersuchung der vorhandenen Eigenschaften eines Systems; das System kann real oder als → Modell vorliegen.

Systementwurf

Ziel ist die Festlegung eines domänenübergreifenden Lösungskonzepts, das die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zukünftigen Produktes beschreibt. Hierzu wird die Gesamtfunktion eines Systems in wesentliche Teilstufen zerlegt. Diesen Teilstufen werden geeignete Strukturen zugeordnet und die Funktionserfüllung im Systemzusammenhang geprüft.

Validierung

Ursprünglich die Gültigkeitsprüfung einer Messmethode in der empirischen Sozialforschung, das heißt inwieweit die Testresultate tatsächlich das erfassen, was durch den Test bestimmt werden soll. Übertragen auf technische Systeme ist hierunter die Prüfung, ob das Produkt bezogen auf seinen Einsatzzweck geeignet ist bzw. den gewünschten Wert erzielt, zu verstehen. Hier geht die Erwartungshaltung des Fachexperten und des Anwenders ein. Die Validierung beinhaltet z.B. die Prüfung, ob die Beschreibung eines Algorithmus mit dem zu lösenden Problem übereinstimmt. Sie ist im Allgemeinen nicht formal durchzuführen. Umgangssprachlich ist die Validierung die Beantwortung der Frage: Wird das *richtige* Produkt entwickelt?

Verifikation

Allgemein der Nachweis der Wahrheit von Aussagen. Übertragen auf technische Systeme ist hierunter die Überprüfung zu verstehen, ob eine Realisierung (z.B. ein Software-Programm) mit der Spezifikation (in diesem Fall die Algorithmenbeschreibung) übereinstimmt. Bei der Überprüfung der Gültigkeit eines Programms wird in diesem Zusammenhang auch von der Programmverifikation gesprochen. Die Verifikation wird im Allgemeinen formal realisiert. Umgangssprachlich ist die Verifikation die Beantwortung der Frage: Wird ein *korrektes* Produkt entwickelt?

Simulation

Calculation of the behavior of a system model in dependence on time, and the state of a system and environment. The simulation provides projections about the behavior of the real system with the aid of a model which can be executed in a computer.

System analysis

Investigation of the existing properties of a system; the system may be real or in the form of a → model.

System design

The aim is to establish a cross-domain solution concept which describes the main physical and logical operating characteristics of the future product. For this purpose, the overall function of a system is broken down into main subfunctions. These subfunctions are assigned suitable structures and the performance of the function is tested in the context of the system.

Validation

Originally checking the validity of a measuring method in empirical social research, i.e. the extent to which test results actually register what is intended to be determined by the test. Transferred to technical systems, it is to be understood as meaning testing whether the product is suitable for its intended purpose or achieves the desired value. The expectations of the technical expert and the user come into the equation here. Validation comprises, for example, checking whether the description of an algorithm coincides with the problem to be solved. It generally does not have to be carried out in a formal manner. In everyday language, validation is the answer to the question: is the *right* product being developed?

Verification

Generally demonstrating the truth of statements. Transferred to technical systems, it is to be understood as meaning checking whether the way in which something is realized (for example a software program) coincides with the specification (in this case with the description of algorithms). When checking the validity of a program, reference is also made in this connection to program verification. The verification is generally realized in a formal manner. In everyday language, verification is the answer to the question: Is a *correct* product being developed?

Virtuelle Produktion/Digitale Fabrik

Bezeichnet den integrierten Prozess der Produktentstehung und Produktionsgestaltung vom Entwurf bis zur Serienfertigung. Ziel ist, die Fertigung mit allen Aspekten im Computer zu planen und zu simulieren, bevor sie errichtet wird. Auf Basis einer zentralen und durchgängigen Datenbasis werden Maschinen, Anlagen und Betriebsmittel in digitaler bzw. auch dreidimensionaler Form abgebildet und ihr dynamisches Verhalten mittels mehrskaliger und hierarchischer Simulation dargestellt [WB01].

Wirkprinzip

„Das Wirkprinzip bezeichnet den Zusammenhang von physikalischem Effekt sowie geometrischen und stofflichen Merkmalen (Wirkgeometrie, Wirkbewegung und Werkstoff). Es lässt das Prinzip der Lösung zur Erfüllung einer Teilfunktion erkennen“ [PB97].

Virtual production/digital factory

Refers to the integrated process of product creation and production formation from design to mass production. The aim is to plan and simulate production with all aspects in a computer before it is set up. On the basis of a central and universal database, machines, plants and operating means are depicted in digital form or else three-dimensional form and their dynamic behavior is represented by means of multi-scalar and hierarchical simulation [WB01].

Operating principle

“The operating principle refers to the interrelationship between physical effect and geometrical and material-related features (effective geometry, effective movement and material). It allows the principle of the solution for performing a subfunction to be identified“ [PB97].