

Horst Czichos

Mechatronik

Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme

2. Auflage

STUDIUM



**VIEWEG+
TEUBNER**

Horst Czichos

Mechatronik

Horst Czichos

Mechatronik

Grundlagen und Anwendungen
technischer Systeme

2., aktualisierte und erweiterte Auflage

Mit 296 Abbildungen und 12 Tabellen

STUDIUM



VIEWEG+
TEUBNER

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

1. Auflage 2006
- 2., aktualisierte und erweiterte Auflage 2008

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2008

Lektorat: Thomas Zipsner | Imke Zander

Der Vieweg+Teubner Verlag ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Druck und buchbinderische Verarbeitung: MercedesDruck, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0373-3

Vorwort

Die Mechatronik ist mit der systemtechnischen Kombination von Mechanik, Elektronik und Informatik heute die grundlegende interdisziplinäre Ingenieurwissenschaft für die Entwicklung und Anwendung technischer Systeme.

Die erste Auflage dieses Mechatronik-Buches fand erhebliches Interesse, so dass bereits im Folgejahr die zweite Auflage erforderlich wurde. Hierfür wurden die Grundlagen vertieft, die Zahl der Anwendungsbeispiele erhöht und weitere für mechatronische Systeme relevante Themen prägnant in Text und Bild integriert. Die folgenden Stichworte geben dazu eine Übersicht:

- Grundlagen: • Mikrosensorik • Mikroaktork • Informatik in mechatronischen Systemen • Halbleiterspeicher • Magnetelektronik • Optoelektronik • Softwaretechnik • Eingebettete Systeme • Entwicklungsmethodik Mechatronik.
- Anwendungen: • Mikrosystemtechnik • Aufbau- und Verbindungstechnik • Elektrophysikalisch-fluidische Aktork in Tintenstrahldruckern • Feinwerktechnisch-mechatronischer Fahrscheinautomat • Bildstabilisierung in Fotokameras und Ferngläsern • Fokussierung und Spursicherung in CD/DVD-Playern • Roboterfunktionalität.

Außerdem wurde das Kapitel *Mechatronik in der Medizintechnik* neu aufgenommen, so dass der Inhalt der zweiten Auflage um ca. 50 Seiten zum Umfang der ersten Auflage angewachsen ist.

Das Buch ist ein *Mechatronik-Kompendium* für Studierende und Ingenieure aller Technikbereiche. Es führt historisch getrennt entstandene physikalische und technologische Elemente systemtechnisch bewertet zusammen. Die Konzeption des Buches und die Besonderheiten der interdisziplinären Darstellung sind im Vorwort zur ersten Auflage (Seite VI) sowie bei den Literatur- und Quellenhinweisen (Seite 255) erläutert.

Das Kompendium vermittelt kompaktes Grundlagenwissen, unterstützt den Dialog zwischen den in der Mechatronik zusammenfließenden Einzeldisziplinen und illustriert das breite Anwendungsspektrum mechatronischer Systeme – sie entstehen als Innovationen häufig an den Schnittstellen von Disziplinen.

Für die zahlreichen konstruktiven Kommentare und Hinweise zur Vertiefung und Erweiterung des Inhalts dieses Buches sowie zur Bild- und Textgestaltung danke ich sehr herzlich – insbesondere meiner Kollegin Frau Prof. Christiane Mirow (*Entwicklungsmethodik Mechatronik*) und meinem Kollegen Prof. Dr. Peter Hussels (*Elektromechanische Aktoren*) sowie Prof. Dr. Peter Hess, Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg (*Robotik*). Ebenso herzlich gilt mein Dank Herrn Thomas Zipsner und dem Technik-Lektorat des Vieweg-Verlages für die wiederum ausgezeichnete Zusammenarbeit.

Berlin, Januar 2008

Horst Czichos

Vorwort der 1. Auflage

Die Mechatronik betrifft heute die gesamte Technik. Ein Wissenschaftsmagazin formulierte dies so: *Vom Synonym für komplexe Regelkreisläufe, in denen elektronische Schaltungen oder datenverarbeitende Systeme mechanische Vorgänge steuern, hat sich die Mechatronik in den letzten 30 Jahren zu einer handfesten „Zukunftswissenschaft“ gewandelt.*

Dieses Buch ist ein *Kompendium* – ein kurzes Lehrbuch und Nachschlagewerk. Es verfolgt das Ziel einer ganzheitlichen Darstellung der Mechatronik und führt dazu Teilbereiche verschiedener Ingenieurdisziplinen und der Physik integrierend und teilweise vereinfachend im systemtechnischen Rahmen zusammen. Einbezogen sind Erkenntnisse aus der Tätigkeit als Physiker und Ingenieur in der fachübergreifenden Forschung und Lehre sowie interdisziplinäre Beiträge aus Wissenschaft und Industrie, wofür ich besonders folgenden Kolleginnen und Kollegen herzlich danke:

- Grundlagen: Dr. G. Bachmann, VDI-Technologiezentrum: *Nanotechnologie*; Prof. Dr. M. Kochsiek, Dir. u. Prof. Dr. R. Schwartz, PTB: *Messen mechanischer Größen, Kraftmess- und Wägetechnik*; Dr. Anita Schmidt, BAM: *Messunsicherheit*; Dr. M. Koch, Uni Stuttgart: *Grenzwertbeurteilungen*; Dr. W. Hässelbarth, BAM: *Referenzmaterialien, Referenzverfahren*; Dr. K. Dobler, Dr. E. Zabler, BOSCH: *Sensorik*; Dr. J. Goebels, BAM: *Computertomographie*; Dr. W. Habel, BAM: *Faseroptik-Sensoren*; Dr. H. Sturm, BAM: *Rasterkraftmikroskopie*; Dr. W. Daum, BAM: *Embedded Sensors*; Dr. M. Golze, BAM: *Qualitätsmanagement*.
- Anwendungen: Prof. Dr. W. Gärtner, Dipl. Ing. R. Neumann, TFH Berlin: *Fotokamera*; Prof. Dr. F. Talke, University of California, San Diego: *Audio-Video-Computertechnik*; H. Petri, Dr. R. Herrtwich, Dr. W. Enkelmann: DaimlerChrysler: *Fahrzeugtechnik*; Prof. Dr. R. Tränkler, Institut für Mess- und Automatisierungstechnik, UniBW München: *Gebäudetechnik, Sensorik, Aktorik*; Dr. Christiane Maierhofer, Dr. W. Rücker, Dr. H. Wiggerhauser, BAM: *ZfP Baulicher Anlagen*.

Das Buch ist mit der Einteilung in *Grundlagen* und *Anwendungen* modular gegliedert und kann je nach Interesse – *Informieren, Lernen, Anwenden* – vielfach genutzt werden. Um eine übersichtliche, knappe Darstellung zu erzielen wurden die Textpassagen kurz gehalten und die jeweils wichtigsten Informationen als „Wort-Bild-Graphik-Kombinationen“ in den Abbildungen des Buches konzentriert. Studenten können das Buch sowohl beim Bachelor-Studium (Grundlagen-Kapitel plus studiengangorientierte Anwendungs-Kapitel) als auch beim Diplom- bzw. Master-Studium (gesamtes Buch) verwenden. Die Bilder können dabei als zusammenfassende Repetitoriums-Unterlagen dienen. Für berufliche Anwendungen gibt das Buch kompakte Grundlagen-Zusammenstellungen und Beispiele zum Stand der Technik in einer zum Nachschlagen geeigneten Form.

Für die Realisierung des Buches in der Reihe *Viewegs Fachbücher der Technik* und die hilfreichen Hinweise zur Gliederung und Gestaltung danke ich Herrn Ewald Schmitt und Herrn Thomas Zipsner vom Vieweg Verlag.

Inhaltsverzeichnis

Teil A Grundlagen

1 Übersicht	1
1.1 Definition und Beispiele der Mechatronik	1
1.2 Mechatronik in der Makro/Mikro/Nano-Technik	5
1.3 Mechatronik als Wissenschafts- und Technikgebiet	8
2 Einführung in die systemtechnische Methodik	9
2.1 Klassifikation technischer Systeme	11
2.2 Funktion technischer Systeme	13
2.3 Struktur technischer Systeme	15
2.4 Kombination von Systemelementen zu System-Modulen	16
2.5 Systemeigenschaften	18
2.5.1 Technische Systemeigenschaften	18
2.5.2 Allgemeine Systemeigenschaften	19
3 Modellbildung mechatronischer Systeme	21
3.1 Modellierungsmethodik	21
3.2 Mechanik in mechatronischen Systemen	23
3.3 Elektronik in mechatronischen Systemen	26
3.4 Informatik in mechatronischen Systemen	30
3.5 Beschreibung mechatronischer Systeme:	34
3.5.1 Modellierungsgrundlagen aus der Physik	34
3.5.2 Zeitbereich	34
3.5.3 Bildbereich	36
3.5.4 Zustandsraum	38
3.6 Gestaltung mechatronischer Systeme	39
3.6.1 Systemtechnische Gestaltungsgrundlagen	40
3.6.2 Entwicklungsmethodik Mechatronik	47
4 Regelung und Steuerung	51
4.1 Prinzipien der Regelung und Steuerung	52
4.2 Regelfunktionen und Regler-Module	54

4.3	Mehrgrößen-Regelung	56
4.4	Binäre Steuerungstechnik	57
4.5	Steuerung und Regelung in der Mechatronik.....	59
5	Sensorik	61
5.1	Messtechnische Grundlagen	62
5.1.1	Metrologie: Fachgebiete und Standards	62
5.1.2	Metrologische Begriffe	64
5.1.3	Messunsicherheit und Messunsicherheitsbudget	65
5.1.4	Grenzwert-Beurteilungen von Messwerten	66
5.1.5	Präzision und Richtigkeit von Messungen; Messstrategie	67
5.1.6	Qualitätsmanagement im Mess- und Prüfwesen	68
5.2	Sensortechnisch-physikalische Grundlagen	69
5.2.1	Physikalische Sensoreffekte.....	70
5.2.2	Funktion und Kennzeichen technischer Sensoren	72
5.3	Messkette	73
5.4	Sensorik geometrischer Größen	74
5.4.1	Längenmesstechnik, Form- und Maßsensorik	74
5.4.2	Faseroptische Sensorik	78
5.4.3	Dehnungsmessstreifen (DMS)-Technik	81
5.5	Sensorik kinematischer Größen	84
5.5.1	Positionssensorik (Wege, Winkel)	84
5.5.2	Geschwindigkeitssensorik	91
5.5.3	Drehzahlsensorik	92
5.5.4	Beschleunigungssensorik	94
5.6	Sensorik dynamischer Größen	96
5.6.1	Kraftsensorik	96
5.6.2	Drehmomentsensorik	101
5.6.3	Drucksensorik	102
5.7	Sensorik von Einflussgrößen	104
5.7.1	Temperatursensorik	105
5.7.2	Feuchtesensorik	107
5.8	Strukturintegrierte Sensorik: Embedded Sensors	109
5.9	Mikrosensorik	113
5.10	Sensorsignalausgabe	117

6 Aktorik	119
6.1 Elektromechanische Aktoren	120
6.1.1 Funktionsprinzipien elektromechanischer Aktoren	120
6.1.2 Elektromotoren als Aktoren	122
6.2 Piezoelektrische Aktoren	125
6.3 Fluidmechanische Aktoren	128
6.4 Thermomechanische Aktoren	130
6.5 Aktoreigenschaften und Kenndaten: Übersicht	133
6.6 Sensor-Aktor Prozessorik	134
6.6.1 Sensor-Aktor-Signalverarbeitung	135
6.6.2 Anwendungsspezifische Signalverarbeitung	137
6.7 Adaptronik	139
6.8 Mikroaktorik	140

Teil B Anwendungen

7 Maschinenbau	145
7.1 Maschinenelemente	145
7.2 Mechatronische Maschinenelemente	146
7.2.1 Mechatronischer Feder-Dämpfer-Modul	147
7.2.2 Automatisiertes Getriebe	148
7.3 Tribologische Systeme	152
8 Positionierungstechnik und Robotik	157
8.1 Mechatronische Positionierungstechnik	158
8.2 Handhabungs- und Robotertechnik	161
9 Produktionstechnik	171
9.1 Mechatronik in Werkzeugmaschinen	172
9.2 Mikroproduktionstechnologien	174
9.3 Mikrotechnologien für Sensoren und Aktoren	181
10 Feinwerktechnik	183
10.1 Mikrosystemtechnik	184
10.2 Mechatronisches System Waage	185
10.3 Mechatronisches System Fotokamera	191

11 Audio-Video-Technik	197
11.1 Optische Datenspeicher	198
11.2 Mechatronisches System CD/DVD-Player	199
12 Computertechnik	205
12.1 Magnetische Datenspeicher	206
12.2 Mechatronisches System Festplattenlaufwerk	206
13 Fahrzeugtechnik	211
13.1 Funktion Fahren: Fahrdynamik und Fahrwerk	212
13.2 Funktion Lenken: Elektronisches Stabilitätsprogramm	214
13.3 Funktion Bremsen: Bremssysteme	219
13.4 Funktion Tasten: Distanzsensorik	223
13.5 Funktion Beleuchten: Adaptive Lichttechnik	225
14 Bauliche Anlagen	227
14.1 Bauwerksüberwachung mit ZfP, Sensorik und Aktorik	228
14.2 Sensorik historischer Baustrukturen	233
14.3 Mechatronik in der Gebäudetechnik	236
14.4 Bauwerksdynamik	240
15 Medizintechnik	243
15.1 Biosignale und Biosensorik	244
15.2 Mechatronik in der medizinischen Gerätetechnik	247
Literatur und Quellen	257
Sachwortverzeichnis	261

1 Übersicht

1.1 Definition und Beispiele der Mechatronik

Der Ende der 1960er Jahre in Japan geprägte Begriff *Mechatronik* hat sich in den letzten Jahren in der Technik weltweit eingeführt. Er steht aufgrund seiner allgemeinen Bedeutung heute mit folgender Definition im Brockhaus:

Mechatronik: Interdisziplinäres Gebiet der Ingenieurwissenschaften, das auf Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik aufbaut. Im Vordergrund steht die Ergänzung und Erweiterung mechanischer Systeme durch Sensoren und Mikrorechner zur Realisierung teilintelligenter Produkte und Systeme.

Technische Systeme sind allgemein durch die Funktion gekennzeichnet, Stoffe (Materie), Energie und/oder Information umzuwandeln, zu transportieren und/oder zu speichern. Mechatronische Systeme basieren auf dem systemtechnischen Zusammenwirken von Mechanik, Elektronik und Informatik. Sie können in Funktionsgruppen unterteilt werden, die meist Regelkreise bilden und aus Modulen mit mechanisch-elektrisch-magnetisch-thermisch-optischen Bauelementen, *Sensorik* zur Erfassung von Messgrößen des Systemzustandes, *Aktorik* zur Regelung und Steuerung sowie *Processorik* und *Informatik* zur Informationsverarbeitung bestehen, siehe Bild 1.1.

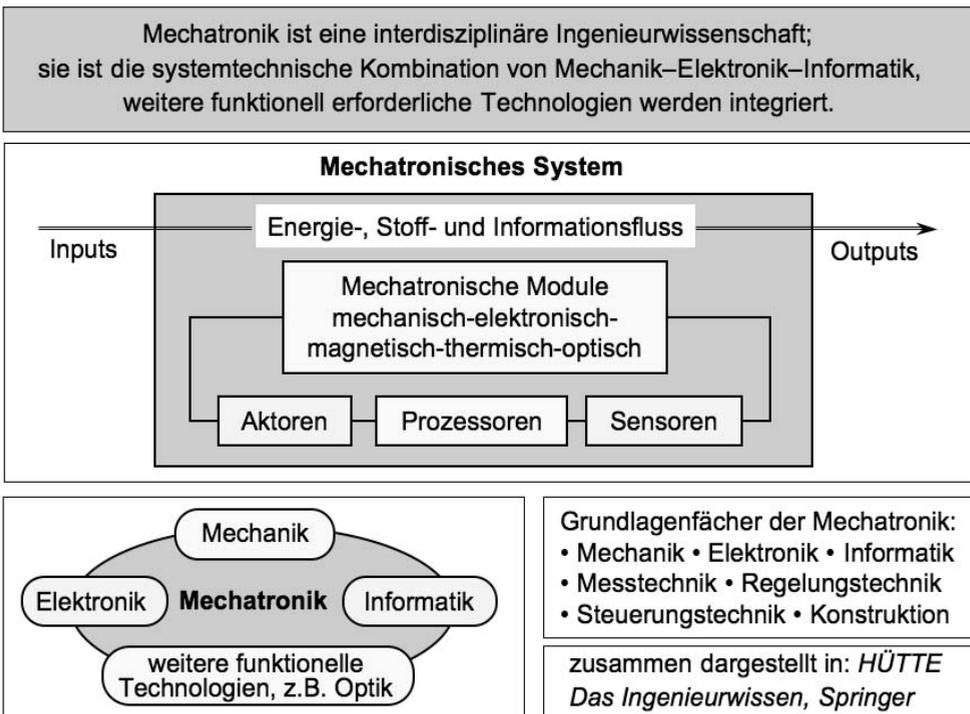


Bild 1.1 Stichwortartige Übersicht über die Mechatronik

Die Mechatronik ist eine in der Technik allgemein anwendbare Ingenieurwissenschaft. Zur einführenden Darstellung der Vielfalt der Mechatronik sind im Folgenden einige typische mechatronische Systeme mit Beispielen aus den Technikbereichen

- Feinwerktechnik-Optik-Elektronik
- Fahrzeugtechnik
- Robotertechnik
- Computertechnik

in einer exemplarischen Zusammenstellung in den Bildern 1.2 bis 1.5 wiedergegeben.

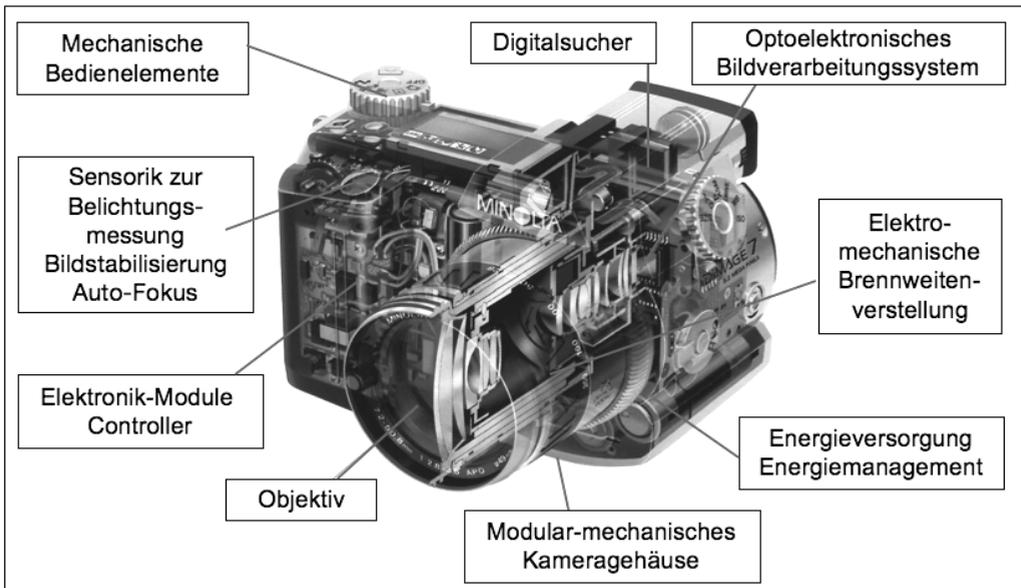


Bild 1.2 Mechatronisches System Fotokamera

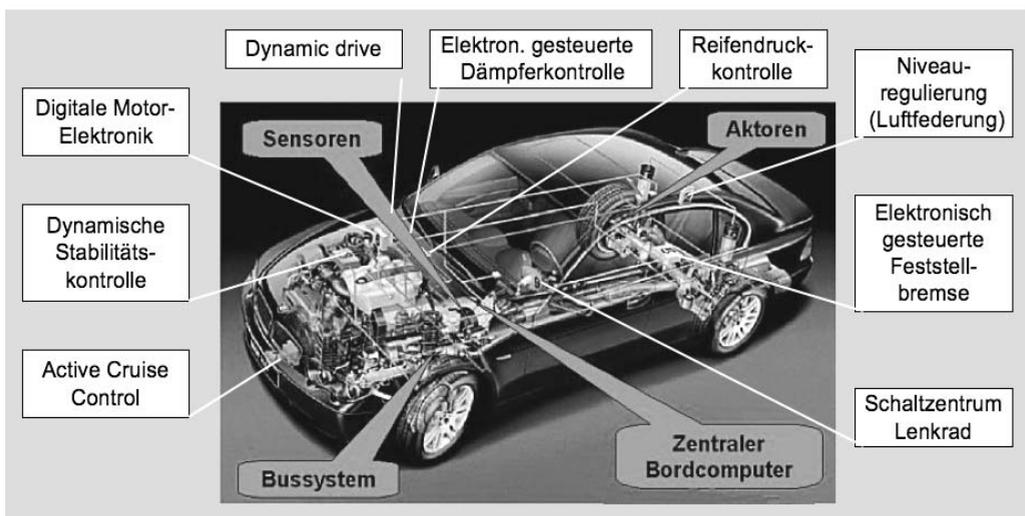


Bild 1.3 Mechatronisches System Automobil

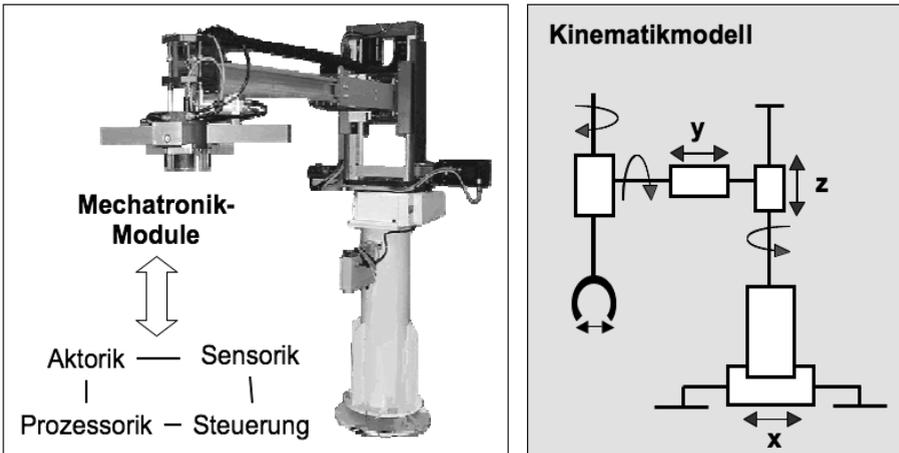


Bild 1.4 Mechatronisches System Roboter

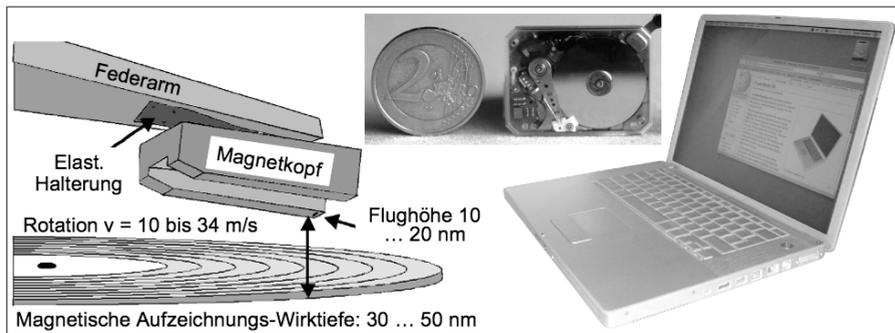


Bild 1.5 Mechatronisches System Computer-Festplattenlaufwerk

Die stille Revolution der Mechatronik

Unter dieser Überschrift erläuterte ein Wissenschaftsmagazin die Entwicklung der Mechatronik zur *Zukunftswissenschaft* mit folgenden Beispielen:

Mechatronik im Automobil

In den Anfängen der Automobiltechnik kam ein PKW mit 3 Elektromotoren für Anlasser, Lichtmaschine und Scheibenwischer aus. Mit der Entwicklung des Anti-Blockier-Systems, ABS, 1978/79 haben mechatronische Komponenten in den Fahrzeugbau Einzug erhalten. Die Anti-Schlupf-Regelung, ASR, und das Elektronische Stabilitätsprogramm, ESP, sind zwei weitere von vielen Neuerungen die den Kraftstoffverbrauch gesenkt und die Sicherheit erhöht haben. 95 Prozent der in Deutschland getretenen Pedale leiten die Bremswünsche als „brake-by-wire“, d.h. via Kabel an elektronische Steueranlagen weiter. Die Maschine reagiert in der Regel 400 Millisekunden schneller als der Fahrer. Mechatronik ist die Triebfeder in der Automobilindustrie: 30 Prozent der Herstellungskosten und 90 Prozent aller Innovationen eines neuen PKW entfallen heute auf mechatronische Systeme. Rund 75 Steuerprozessoren verarbeiten circa 200 Megabyte Software. Organisiert in 5 Netzwerken bewegen sie bis zu 150 Elektromotoren für Komfort und Sicherheit. Wichtige Systeme sind immer redundant ein-

gebaut, um mögliche Ausfälle eines einzelnen Systems zu kompensieren. Ein moderner PKW ist das Ergebnis einer 25 jährigen mechatronischen Evolution und die ist noch lange nicht zu Ende.

Mechatronik in der Luft

Moderne Flugzeuge sind mit „fly-by-wire“ ausgestattet. Der Ausschlag des Steuers wird nicht mehr direkt in eine Ruderbewegung umgesetzt. Der Pilot gibt den neuen Kurs in den Computer ein. In Sekundenbruchteilen ermittelt der die optimalen Ruderbewegungen unter Berücksichtigung aller Nebeneffekte. Geschwindigkeitsänderungen durch das Ausfahren des Fahrwerks oder Turbulenzen verursachen eine Änderung des Auftriebs an den Tragflächen und damit eine Kursänderung. Das Fly-by-Wire gleicht diese Veränderungen automatisch aus. Der Pilot erhält so mehr Zeit für die Überwachung der anderen Instrumente. Die Manövrierfähigkeit der „fly-by-wire“ Flugzeuge hat mit einer Drehrate von 15 Grad pro Sekunde fast „Kampffjet-Charakter“. Um einem Ausfall vorzubeugen sind mechatronische Systeme in Flugzeugen dreifach redundant eingebaut.

Mechatronik erweitert die Möglichkeiten für Schienenfahrzeuge

Das European Train Control System, ETCS, verlagert die Informationen von Signalanlagen an der Strecke in den Führerstand. Kleine Signalgeber in den Gleisen erfassen die Zugposition. Die Streckeninformationen werden direkt an Lokführer und Zentrale weitergegeben. Würde die Eisenbahn heute noch einmal erfunden, sähe sie wahrscheinlich wie das Rail-Cap aus, ein modular aufgebautes "Schienentaxi". Weichen müssen nicht mehr gestellt werden. Mit Sensoren an den Rädern sucht sich das Rail-Cap selber seinen Weg. Ohne bewegliche Teile erhöht sich die Lebensdauer der Weichen beträchtlich. Die völlig neu konstruierte Feder-Neige-Technik ist Kernstück des Fahrgastkomforts. Sensoren messen die Erschütterungen des unteren Fahrzeugteils. Ein Computer ermittelt die entsprechenden Gegenkräfte, die die Aktoren umsetzen. Die Fahrgastkabine selbst bleibt damit völlig ruhig. Wandernde Magnetfelder, ähnlich wie beim Transrapid, ziehen das Fahrzeug mit. Das Nachrüsten von bestehenden Trassen ist kein Problem. Damit wird die Mechatronik auf der Schiene zu dem was sie auf der Straße längst ist: eine Grundbedingung im modernen Fahrzeugbau.

Mechatronik für die Robotertechnik

Roboter sind Mechatronik pur. Sie vereinen Mechanik, Kinematik, Informatik und Elektrik in sich. Beim Bau eines Roboters muss interdisziplinär – also mechatronisch gedacht werden. Die Bedeutung der Roboter wird weiter zunehmen. Eine „technische Revolution“ haben vollautomatische Systeme in der produzierenden Industrie ausgelöst. Das Ergebnis dieser Entwicklungen: der sechsachsige Roboterarm. Flexibler als ein menschlicher Arm kann ihm fast jeder Arbeitsablauf einprogrammiert werden. Ein funktionaler Umbau ist mit dem einfachen Austauschen der "Werkzeughand" erledigt. Produktivität bedeutet viele Teile pro Zeiteinheit mit konstanter Qualität herzustellen. Mit Mechatronik produziert heute z.B. eine vollautomatische Fertigungsstraße alle 16 Sekunden ein pneumatisches Ventil in 60 einzelnen Arbeitsschritten. 3000 gefertigte Ventile pro Tag entsprechen einem Produktionszuwachs von 1000 Prozent gegenüber 300 Stück bei manueller Herstellung. Der Weltmarkt fordert Produktionsanlagen, die hochkomplexe Aufgaben schnell erledigen, dabei aber einfach zu bedienen und robust sind. Bei gut eingesetzter Mechatronik ist das komplizierte Zusammenspiel von Elektrik, Pneumatik, Mechanik und Informatik nicht zu erkennen.

1.2 Mechatronik in der Makro/Mikro/Nano-Technik

Das Aufgabengebiet der Mechatronik in der Technik betrifft heute technische Erzeugnisse und Konstruktionen, deren geometrische Dimensionen mehr als 10 Größenordnungen umfassen. Die Übersichtsdarstellung von Bild 1.6 illustriert – ausgehend vom klassischen Urmeter – dass das Größenverhältnis Meter/Nanometer vergleichbar ist mit dem Größenverhältnis des Erddurchmessers zum Durchmesser einer Haselnuss.

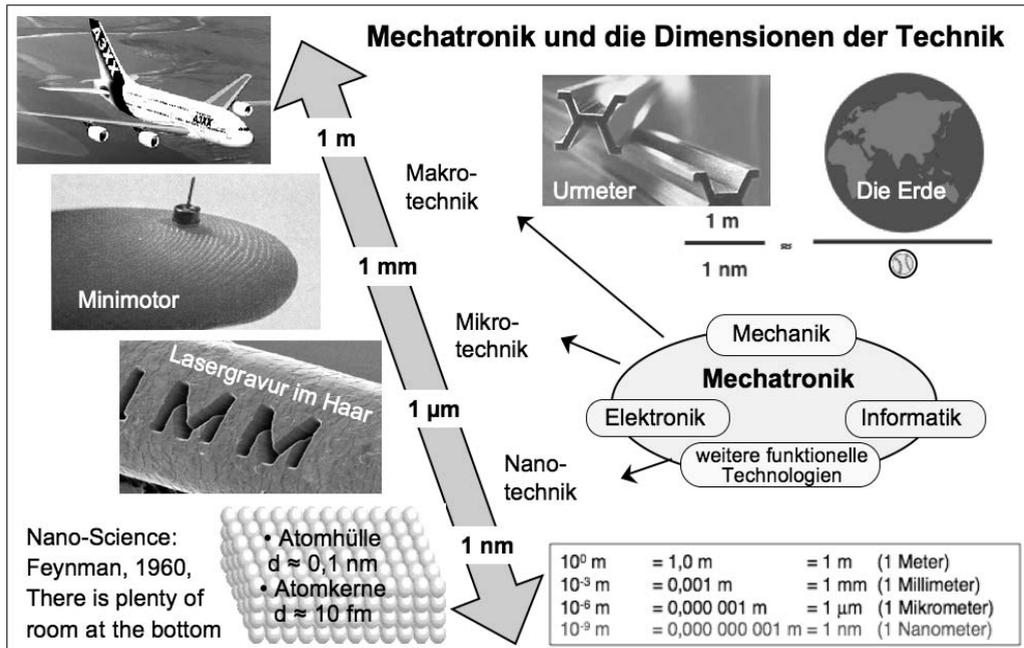


Bild 1.6 Dimensionsbereiche der heutigen Technik: Makrotechnik, Mikrotechnik, Nanotechnik

Makrotechnik mit cm/m-Dimensionen ist die Technik der Geräte, Apparate, Maschinen und technischen Anlagen. Kennzeichnend für die Mechatronik ist die Erweiterung der klassischen Elektromechanik durch elektronische Schaltkreise und datenverarbeitende Module sowie der Ersatz mechanischer Energie- und Signalflüsse durch Elektrik, Elektronik, Magnetik, Optik.

Mikrotechnik mit mm/µm-Bauteilabmessungen ist das Gebiet der Feinwerktechnik und Mikrosystemtechnik. Ein Mikrosystem vereint mit Mikro-Fertigungstechnik und miniaturisierter Aufbau- und Verbindungstechnik Funktionalitäten aus Mikromechanik, Mikrofluidik, Mikrooptik, Mikromagnetik, Mikroelektronik.

Nanotechnik nutzt nanoskalige Effekte der Physik, Chemie und Biologie. Die Nanowissenschaft wurde 1960 durch Feynman (Physik-Nobelpreisträger 1965) begründet. Beispiele der nano-mechatronischen Gerätetechnik sind das Rastertunnelmikroskop (siehe Bild 1.7) und das Rasterkraftmikroskop (siehe Bild 5.44 und 5.45). Sie ermöglichen durch mechatronische Piezo-Aktorik die Darstellung von Materialoberflächen im atomaren Maßstab und die Bestimmung nanoskaliger Kräfte, z.B. zur Optimierung magnetischer Datenspeicher und elektronischer Mikrochips.

Beispiele der Makro-, Mikro- und Nanotechnik in der Mechatronik zeigt Bild 1.7.