

Werner Roddeck

# Einführung in die Mechatronik

4. Auflage

**STUDIUM**

 **Springer Vieweg**

---

# Einführung in die Mechatronik

Aus dem Programm „Grundlagen Maschinenbau“

Elektrotechnik für Maschinenbauer  
von R. Fischer und H. Linse

BWL für Ingenieure und Ingenieurinnen  
von A. Daum, W. Greife u. R. Przywara

English for Materials Science and Engineering  
von I. Eisenbach

Projektmanagement für technische Projekte  
von R. Felkai und A. Beiderwieden

Technische Berichte  
von H. Hering und L. Hering

Mechanical Engineering  
von A. Jayendran

Englisch für Maschinenbauer  
von A. Jayendran

Chemie  
von P. Kurzweil und P. Scheipers

Physik Formelsammlung  
herausgegeben von P. Kurzweil

Elektrotechnik für Maschinenbauer  
von H. Linse und R. Fischer

---

Werner Roddeck

# Einführung in die Mechatronik

4., überarbeitete Auflage

Mit 494 Abbildungen

STUDIUM

 Springer Vieweg

Werner Roddeck  
Hochschule Bochum, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Werner Roddeck lehrt am Fachbereich Mechatronik und Maschinenbau an der Fachhochschule Bochum.

ISBN 978-3-8348-1622-1  
DOI 10.1007/978-3-8348-8626-2

ISBN 978-3-8348-8626-2 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 1997, 2003, 2006, 2012

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

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

*Einbandentwurf:* KünkelLopka GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE.

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

## Vorwort

Der Begriff Mechatronik (engl. mechatronics) ist ein Kunstwort und wurde vor ca. 40 Jahren in Japan von einem Entwickler aus dem Bereich der Robotertechnik geprägt. Er setzt sich aus den beiden Namen der bekannten Disziplinen der Ingenieurwissenschaften - Mechanik oder Maschinenwesen (engl. mechanics) und Elektronik (engl. electronics) - zusammen. In den letzten 20 Jahren ist er auch in Deutschland sehr verbreitet worden und vor 18 Jahren wurde der erste Studiengang mit dem Abschluss „Dipl.-Ing. Mechatronik“ an der Hochschule Bochum eröffnet. Diesem Beispiel sind inzwischen viele Hochschulen gefolgt, indem sie Studiengänge „Mechatronik“ oder Studienrichtungen mit entsprechenden Studienanteilen einrichteten. Seit einigen Jahren ist der „Mechatroniker“ auch ein anerkannter Ausbildungsberuf, was die Nachfrage der Fachdisziplin „Mechatronik“ in der Industrie dokumentiert.

Die Notwendigkeit für diese neue Disziplin der Ingenieurwissenschaften ergibt sich aus der immer weiter zunehmenden Durchdringung maschinenbaulicher Produkte mit Anteilen aus dem Bereich der Elektrotechnik und der Informatik. Dabei werden nicht nur einzelne Komponenten konventioneller Produkte ersetzt, sondern die Entwicklung folgt einem ganz neuen Denkansatz. Man versucht, das Gesamtsystem zu verstehen und zu modellieren und wählt dann für die verschiedenen Teilsysteme solche Komponenten und Methoden aus, die zu einfacheren, preiswerteren und funktionaleren Gesamtsystemen führen. Dies ist nur dann möglich, wenn Produktentwickler fachübergreifende Kenntnisse aus allen genannten Bereichen der Ingenieurwissenschaften besitzen.

Im Prinzip sind alle Methoden und Komponenten, die in der Mechatronik eingesetzt werden, als Teilgebiete bereits bekannt und es gibt darüber umfangreiche Spezialliteratur. Bei Erscheinen der 1. Auflage dieses Buches fehlte jedoch eine Gesamtschau der Mechatronik, die die Teilgebiete in einen Zusammenhang setzte. Diese Lücke will das vorliegende Buch schließen und ist dabei so gestaltet, dass es von vielen Technikern und Ingenieuren sowohl im Studium, als auch in der Berufspraxis verwendet werden kann. Es behandelt das Thema beginnend mit den erforderlichen Analyse- und Synthesemethoden von Systemen, über die Beschreibung einsetzbarer Systemkomponenten bis zur Darstellung ausgeführter Beispiele für mechatronische Systeme.

Das zu Beginn der Hochschulausbildung etablierte Curriculum der Mechatronik hat sich im Laufe der letzten 15 Jahre gewandelt. So bestand es zu Beginn noch aus einer Zusammenstellung bereits bekannter Teilgebiete aus Maschinenbau und Elektrotechnik, von denen man annahm, dass die "Mechatronik" durch Zusammenschau der Teilgebiete in den Köpfen der Studierenden entstehen würde. Da Nomenklatur und Regelwerke in den genannten Wissenschaftsgebieten aber sehr heterogen sind, trat das nicht selbstverständlich ein. Folgerichtig sind zwischenzeitlich Studienfächer ins Curriculum aufgenommen worden, die auch den Begriff "Mechatronik" im Namen führen und in denen versucht wird, die Stoffintegration zum Bestandteil der Ausbildung zu machen.

Leider fehlt noch immer ein gemeinsamer Leitgedanke, der zu mehr Vereinheitlichung der Teilgebiete führen könnte. Mit zu den wichtigsten Fachgebieten der Mechatronik gehören die Modellbildung und Simulation von Systemen. Ich hatte bereits in der 1. Auflage dieses Buches vor 14 Jahren die objektorientierte Modellbildung als einen wichtigen, die Teilgebiete integrierenden Aspekt berücksichtigt. Leider standen zu diesem Zeitpunkt noch keine eingeführten und einfach einsetzbaren Software-Tools zur Verfügung. Heute hat sich das geändert und inzwischen hat die Methodik der Modellierung von mechatronischen Systemen mit Bondgraphen einen Stand erreicht, der es erlaubt, diese Methodik als die gesuchte Klammer für eine Homogenisierung der sehr heterogenen Teilgebiete anzusehen. Es stehen nun auch Programmsysteme und Literatur zur Verfügung, die den Umgang mit dieser Methodik sehr einfach machen. Im Hinblick darauf ist in dieser Auflage die Modellbildung mit Bondgraphen umfassender behandelt worden.

Da die Mechatronik ein sehr umfangreiches Wissensgebiet umspannt, können natürlich im Rahmen eines solchen Buches nicht alle Grundlagen behandelt werden. So sollten dem Leser mathematische Methoden wie die Differential-, Integral- und Matrizenrechnung bekannt sein. Ebenso sind grundlegende Kenntnisse der Physik in den Bereichen Mechanik und Elektrotechnik erforderlich. Aufgrund der Stofffülle können manche Themen nur angerissen werden, so dass der Leser im Bedarfsfall das entsprechende Wissen anhand der angeführten Literatur vertiefen muss.

Die behandelte Themenstellung erstreckt sich über viele Fachgebiete. Daher kann ich natürlich nicht Spezialist für jedes einzelne Thema sein. Ich bitte deshalb schon jetzt die Fachleute einzelner Fachgebiete, denen die Darstellung ihres Spezialgebietes zu kurz oder zu oberflächlich erscheint, um Nachsicht, da ich zugunsten der Gesamtschau an einigen Stellen Kompromisse eingehen musste.

Das Buch wendet sich an Studierende der Ingenieurwissenschaften mit Mechatronik als Studienschwerpunkt an Hochschulen, Berufsakademien und Universitäten, sowie an Ingenieure in der Praxis.

Im Übrigen bin ich den Kollegen, Mitarbeitern und Studierenden an der Hochschule Bochum dankbar, die mich mit Anregungen, Beispielen und Material zu bestimmten Themen unterstützt haben. Durch die Diskussion mit Ihnen und durch die gemeinschaftliche Weiterentwicklung mechatronischer Studiengänge an der Hochschule Bochum konnte auch diese 4. Auflage gegenüber den Vorgängern noch klarer strukturiert, aktualisiert und den Erfordernissen eines Mechatronik- Studiums angepasst werden.

Meiner Frau Renate, die mir durch Ihre Unterstützung die Zeit für die Fertigstellung dieses Buches freimachte, bin ich zu großem Dank verpflichtet. Herrn Thomas Zipsner vom Vieweg+Teubner-Verlag danke ich für die gute Zusammenarbeit und die Anregungen zur Weiterentwicklung des Buches.

Witten, Juli 2011

Werner Roddeck

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Entwicklung von Maschinenbau und Elektrotechnik	1
1.2	Entwicklung der Technik am Beispiel der Werkzeugmaschine	4
1.3	Mechatronik als neues Bindeglied	6
1.4	Maschinenbau und Elektrotechnik - grundsätzlich verschieden?	8
1.5	Unterschiede zwischen Maschinenbau, Elektrotechnik und Mechatronik	16
1.6	Teilgebiete der Mechatronik	21
<b>2</b>	<b>Modellbildung technischer Systeme</b>	<b>25</b>
2.1	Systembegriff	25
2.2	Verfahren der Modellbildung	28
2.2.1	Theoretische Modellbildung	29
2.2.1.1	Allgemein bekannte Modellvorstellungen	29
2.2.1.2	Vorgehensweise bei der Modellbildung	31
2.3	Klassifizierung dynamischer Systeme	38
2.4	Modellierung von Geometrie und Körpereigenschaften	40
2.4.1	Mehrkörpersysteme	41
2.4.2	Systeme mit elastischen Elementen	43
2.5	Modellierung elektrischer Komponenten	44
<b>3</b>	<b>Dynamik mechanischer Systeme</b>	<b>49</b>
3.1	Kinematik des Massenpunktes	49
3.2	Kinematik des starren Körpers	52
3.2.1	Die ebene Bewegung des starren Körpers	52
3.2.2	Die ebene Relativbewegung eines Punktes	58
3.2.3	Die Bewegung des starren Körpers im Raum	60
3.2.3.1	Rotation im Raum	61
3.2.3.2	Relativbewegung eines Punktes des starren Körpers	63
3.2.3.3	Darstellung der Bewegung des starren Körpers in Matrizenschreibweise	64
3.3	Bindungen in Mehrkörpersystemen	75
3.4	Kinetik	86
3.4.1	Impuls-, Schwerpunkt- und Drallsatz	86
3.4.2	Energiesatz	94
3.4.3	Die Prinzipien der Mechanik	97
3.4.3.1	Prinzip der virtuellen Arbeit	97
3.4.3.2	Lagrangesche Bewegungsgleichungen	102
<b>4</b>	<b>Schwingungen</b>	<b>108</b>
4.1	Einmassenschwinger	108
4.1.1	Freie ungedämpfte Schwingungen	110
4.1.2	Freie gedämpfte Schwingungen	112
4.1.3	Erzwungene Schwingungen	115



4.1.3.1	Nichtperiodische Erregung	116
4.1.3.2	Harmonische Erregung	118
4.1.4	Nichtlineare Schwinger	123
4.2	Mehrmassenschwinger	125
4.3	Schwingungsanalyse	132
4.3.1	Reelle Form der Fourier-Reihe	133
4.3.2	Komplexe Form der Fourier-Reihe	138
4.3.3	Fourier-Transformation nichtperiodischer Funktionen	139
4.3.4	Diskrete Fourier-Transformation zur Analyse von Abtastsignalen	141
<b>5</b>	<b>Sensoren</b>	<b>148</b>
5.1	Messtechnik	151
5.1.1	Messgrößen und Maßeinheiten	151
5.1.2	Messgrößenaufnehmer und Messwertwandler	153
5.1.2.1	Messwertanpassung	155
5.1.2.2	Analog-/Digital-Wandler	157
5.1.3	Kenngößen von Messeinrichtungen	159
5.1.3.1	Statische Kenngößen	160
5.1.3.2	Dynamische Kenngößen	162
5.1.3.3	Fehlerkenngößen	164
5.2	Messeffekte	167
5.2.1	Widerstandseffekte	170
5.2.1.1	Ohmsche Widerstandseffekte	170
5.2.1.2	Piezowiderstandseffekt	172
5.2.2	Magnetische Effekte	173
5.2.2.1	Induktionsprinzip	173
5.2.2.2	Galvanomagnetische Effekte	175
5.2.2.3	Magnetoelastische Effekte	177
5.2.3	Kapazitive Effekte	177
5.2.4	Piezo- und Pyroelektrische Effekte	178
7.2.5	Optische Effekte	179
5.3	Sensoren für mechatronische Systeme	182
5.3.1	Bewegungssensoren	182
5.3.1.1	Positionssensoren	182
5.3.1.2	Geschwindigkeitssensoren	190
5.3.1.3	Beschleunigungssensoren	192
5.3.2	Kraft- und Momentensensoren	195
<b>6</b>	<b>Aktoren</b>	<b>198</b>
6.1	Klassische Aktoren	200
6.1.1	Elektromotorische, rotierende Antriebe	200
6.1.1.1	Gleichstrommotoren	202
6.1.1.2	Drehfeldmotoren	213
6.1.1.3	Asynchronmotoren	214
6.1.1.4	Schrittmotoren	220
6.1.2	Elektromotorische Linearantriebe	222
6.1.3	Fluidische Aktoren	223

6.1.3.1	Pneumatische Aktoren	224
6.1.3.2	Hydraulische Aktoren	224
6.1.3.3	Geschwindigkeitsverstellung von hydraulischenAktoren	228
6.2	Neuartige Aktoren	233
<b>7</b>	<b>Automatisierungstechnik</b>	<b>244</b>
7.1	Automatisierungskonzepte	244
7.1.1	Intelligente Maschinen	246
7.1.2	Steuerung und Regelung	248
7.1.3	Schlussfolgern und regelbasiertes Wissen	250
7.1.4	Autonome intelligente Agenten	251
7.1.5	Lernen und Mustererkennung	252
7.1.6	Architektur intelligenter Maschinen	253
	7.1.6.1 Hierarchien	254
	7.1.6.2 Netzwerke	255
	7.1.6.3 Schichtarchitekturen	261
7.2	Steuerungstechnik	261
7.2.1	Boole'sche Algebra	265
	7.2.1.1 Kombinatorische Steuerungen	268
	7.2.1.2 Sequentielle Steuerungen	271
7.2.2	Probleme der Modellbildung digitaler Systeme	275
7.2.3	Mehrwertige und unscharfe Logik (Fuzzy Logic)	277
	7.2.3.1 Fuzzy Mengen	278
	7.2.3.2 Fuzzy- Inferenz	286
7.2.4	Neuronale Netzwerke	293
	7.2.4.1 McCulloch-Pitts-Neuron	295
	7.2.4.2 Perceptron	296
	7.2.4.3 Backpropagation-Netzwerk	299
7.3	Regelungstechnik	301
7.3.1	Beschreibung und Analyse regelungstechnischer Systeme	302
	7.3.1.1 Systembeschreibungen	304
	7.3.1.2 Blockschaltbilder	312
	7.3.1.3 Frequenzgang und Ortskurve	318
	7.3.1.4 Verschiedenartige Übertragungssysteme	320
	7.3.1.5 Frequenzkennlinien	327
	7.3.1.6 Zustandsraumdarstellung	334
	7.3.1.7 Regler	338
	7.3.1.8 Stabilität von Regelkreisen	345
	7.3.1.9 Systemidentifikation	358
7.3.2	Synthese von Regelkreisen	363
	7.3.2.1 Spezifikationen	364
	7.3.2.2 Einstellregeln	366
	7.3.2.3 Mehrschleifige Regelkreise	369
7.4	Prozessdatenverarbeitung mit Mikrorechnern	373
7.4.1	Mikrorechner	374
	7.4.1.1 Aufbau von Mikrorechnern	375
	7.4.1.2 Software für Mikrorechner	384
7.4.2	Anwendungsspezifische Prozessoren und Bauelemente	385

<b>8</b>	<b>Simulation</b>	<b>387</b>
8.1	Numerische Integration	389
8.2	Modellbildung mit Bond-Graphen	395
8.2.1	Elemente von Bond_Graphen	395
8.2.1.1	Träge Komponenten	397
8.2.1.2	Kapazitive Komponenten	398
8.2.1.3	Resistive Komponenten	399
8.2.1.4	Transformer und Gyratoren	399
8.2.1.5	Quellen	400
8.2.1.6	Verzweigungen von Effort und Flow	400
8.2.2	Zusammenführung elementarer Komponenten zu Systemen	401
8.3	Simulationssysteme	404
8.3.1	Simulationssprachen	404
8.3.2	Simulation elektrischer Schaltungen	404
8.3.3	Simulation mechanischer Systeme	406
8.3.4	Modellbeschreibung mit Blockschaltbild-Editoren	406
8.3.5	Objektorientierte Modellbildung	413
8.3.5.1	Dymola	414
8.3.5.2	BondSim	417
8.3.5.3	CAMel-View	419
8.3.6	Hardware-in-the-Loop, Software-in-the-Loop	423
8.3.6.1	Hardware-in-the-Loop	423
8.3.6.2	Software-in-the-Loop	424
8.3.6.3	Kopplung von Modellen und Prototypen	424
8.3.7	Simulationssysteme für Industrieroboter	425
<b>9</b>	<b>Mechatronische Systeme</b>	<b>428</b>
9.1	Wann ist der Einsatz der Mechatronik sinnvoll?	428
9.2	Entwicklung mechatronischer Systeme	431
9.3	Mechatronische Teilsysteme	439
9.3.1	Magnetlager	440
9.3.2	Aktives Fahrwerk	444
9.3.2.1	Aktive Federung mit Hydrozylinder	446
9.3.2.2	Aktive Federung mit Hydrozylinder und aktivem Tilger	448
9.3.3	Mechatronische Anwendungen bei Industrierobotern	451
9.3.3.1	Nachführen eines Roboterarms an einer Freiformfläche	452
9.3.3.2	Zusätzliche Bewegungsachsen für Industrieroboter	457
9.4	Mechatronische Gesamtsysteme	464
9.4.1	Hexapodenkonzepte	464
9.4.2	Fahrrad mit aktiver Neigetechnik	468

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>474</b>
-----------------------------	------------

<b>Wortverzeichnis</b>	<b>476</b>
------------------------	------------

# 1 Einleitung

Der Begriff Mechatronik (engl. Mechatronics) ist ein Kunstwort und wurde vor ca. 40 Jahren in Japan von einem Entwickler aus dem Bereich der Robotertechnik geprägt. Es setzt sich aus den beiden Namen der bekannten Disziplinen der Ingenieurwissenschaften - Mechanik oder Maschinenwesen (engl. Mechanics) und Elektronik (engl. Electronics) - zusammen. Damit ist dieser Name bereits ein Programm und deutet an, dass die Mechatronik Inhalte der beiden oben genannten Disziplinen zusammenfügt. In Japan legt man den Begriff Mechatronics sehr weit aus. In Europa wurde eine eher enge Definition geprägt, die den Eindruck nahelegt, es handele sich bei dem Begriff um eine neue Wissenschaftsdiziplin. Diese Definition lautet:

*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 [1.1]. Eine ähnliche Definition wird auch in [1.2] angeführt:*

*Mechatronics is the synergetic integration of mechanical engineering with electronic and intelligent computer control in the design and manufacturing of industrial products and processes (IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 1996).*

Es scheint hinter dem Aufkommen dieses Begriffes jedoch nicht nur die Notwendigkeit zu stehen, für neuartige Produkte eine neue Beschreibungsmethode oder ein neues Denken zu schaffen. An dem Wort interdisziplinär erkennt man ein tieferes Bedürfnis nach Zusammenarbeit von Disziplinen in Wissenschaft, Forschung und Ausbildung, die heute noch meist strikt voneinander getrennt existieren. Die Ursachen für diese Trennung sind einerseits historisch bedingt und andererseits durch die rasante Entwicklung der Elektrotechnik geprägt. Viele technische Produkte des Maschinenbaus sind heute in so hohem Maße mit elektrotechnischen Komponenten ausgestattet, dass eine interdisziplinäre Zusammenarbeit der ingenieurwissenschaftlichen Gebiete Maschinenbau und Elektrotechnik geradezu zwingend erforderlich ist.

Warum besteht aber überhaupt die Notwendigkeit der Zusammenführung der Disziplinen? Wie war es dazu gekommen, dass ein Bedürfnis entstand, getrennte Disziplinen wieder näher zusammenzubringen?

## 1.1 Entwicklung von Maschinenbau und Elektrotechnik

In der Renaissance und bis ins 18. Jahrhundert hinein waren die Ingenieurwissenschaften durch Künstler-Ingenieure geprägt, Vertreter einer vorwiegend "höfischen" Technik. Sie war auf wenige Bereiche beschränkt und bei den von ihnen entwickelten Objekten bildeten Funktion und künstlerische Formgebung eine Einheit. Erst in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts, in der die Erfindung der selbstständig laufenden Dampfmaschine durch James Watt den Beginn der industriellen Revolution signalisiert, entstand eine "bürgerliche" Technik, deren Entwicklung durch Ökonomie und Funktionalität bestimmt wurde. Die durch die industrielle Revolution ausgelöste sprunghafte Zunahme technischen Wissens verlangte schon bald nach gut ausgebildeten Technikern vor allem im Bereich des Bergbaus, der Architektur aber auch im Mi-

litärwesen. Die ersten Bildungseinrichtungen, die sich ausschließlich der Ausbildung von "Technikern" widmeten, waren die Polytechnischen Schulen und Bergakademien. In Deutschland und im deutschsprachigen Raum wurden solche Einrichtungen an folgenden Orten gegründet: Prag (1806), Wien (1815), Karlsruhe (1825), Braunschweig (1814/35), Clausthal (1810) und München (1827). Sie orientierten sich alle am Modell der französischen *École Polytechnique* in Paris (1794). Der Durchbruch für eine wissenschaftliche Technik erfolgte durch die Industrialisierung um die Mitte des 19. Jahrhunderts. Mit ihr ging eine Professionalisierung der technischen Berufe in entsprechend qualifizierenden Fachstudiengängen einher. Zu diesem Zeitpunkt mehrten sich die Stimmen, den Polytechnischen Anstalten Hochschulcharakter und Universitätsstrukturen zu geben. Eine wichtige Rolle spielte hierbei die Schweiz, die in Zürich 1855 die erste nationale und technische Hochschule schuf. Vorbild der neuen Eidgenössischen Polytechnischen Schule war diejenige in Karlsruhe; im Gegensatz zu dieser erhielt jedoch die Züricher die deutsche Universitätsstruktur mit Fakultäts-einteilung, Senats- und Rektoratsverfassung. Das Beispiel dieser seit 1911 den Hochschulnamen tragenden Anstalt führte in Deutschland zur Aufwertung der Polytechniken zu "Hochschulen", auch wenn sich die Bezeichnung "Technische Hochschule" erst allmählich durchsetzte. Von 1865 bis zum ersten Weltkrieg wurden elf Technische Hochschulen durch Umwandlung älterer Institutionen oder durch Neugründung errichtet: 1864 Graz, 1865/85 Karlsruhe, 1868/77 München, 1870/79 Aachen, 1872/79 Braunschweig, 1876/90 Stuttgart, 1877/95 Darmstadt, 1879 Berlin, 1880 Hannover, 1890 Dresden, 1904 Danzig, 1910 Breslau.

Typisch für deren Einteilung in Fakultäten, also voneinander unabhängigen Wissenschaftsdisziplinen, ist die der TH Aachen im Jahr 1880:

1. Abteilung für Architektur
2. Abteilung für Bauingenieurwesen
3. Abteilung für Maschineningenieurwesen
4. Abteilung für Bergbau- und Hüttenkunde und für Chemie
5. Abteilung für allgemeine Wissenschaften, insbesondere für Mathematik und Naturwissenschaften

Die Elektrotechnik, die einen wesentlichen Aufschwung durch die Erfindung der Dynamomaschine durch Werner Siemens im Jahre 1867 genommen hatte, war anfangs als wissenschaftliche Disziplin an den Technischen Hochschulen nicht vertreten. Bei der Herausbildung der Elektrotechnik als selbstständige technik-wissenschaftliche Disziplin handelt es sich um einen längeren Prozess, der sich etwa zwischen 1880 und dem ersten Weltkrieg vollzog. Dabei kam es zuerst zu einer relativ kurzen Anlehnung an die Physik und anschließend zu einer stärkeren Anlehnung an den Maschinenbau .

Die akademische Etablierung der Elektrotechnik war ausschließlich mit der entstehenden Starkstromtechnik verbunden. Die Schwachstromseite, vertreten durch die Telegraphie und die Telefonie, spielte keine wesentliche Rolle, da die im Maschineningenieurwesen angesiedelte Elektrotechnik sich fast ausschließlich mit Elektromaschinen und der Übertragung elektrischer Energie befasste. Als einer der ersten hatte Werner Siemens in einem Vortrag am 27. Dezember 1881 die Einrichtung elektrotechnischer Lehrstühle angeregt. Nach den ersten Lehrstuhlgründungen (Aachen 1886, Berlin 1884, Darmstadt 1882, Wien 1884) kam es zu einer ausgedehnten Diskussion

darüber, ob Elektrotechnik eigentlich ein eigenes Studium oder nur eine Zusatzqualifikation, vor allem für Maschinenbauer, sein sollte. In dieser Diskussion bezog auch Werner Siemens Stellung und verdeutlichte seinen Standpunkt, dass Elektrotechnik nur als Zusatzqualifikation für alle Ingenieurstudenten dienen solle. Daneben stehe weiterhin als gleichwertiger Ausbildungsgang die Aneignung von Kenntnissen in der industriellen Praxis und durch Selbststudium. Andere Schlussfolgerungen - was die umstrittene Stellung der Elektrotechnik zwischen Physik und Maschinenbau verdeutlicht - zog der gerade nach Karlsruhe berufene Physiker Ferdinand Braun 1883. Braun argumentierte, dass die physikalischen Grundlagen der Elektrotechnik noch so ungesichert seien, dass man den Studenten keine zeitbeständigen Grundlagen für ihr Berufsleben vermitteln könne.

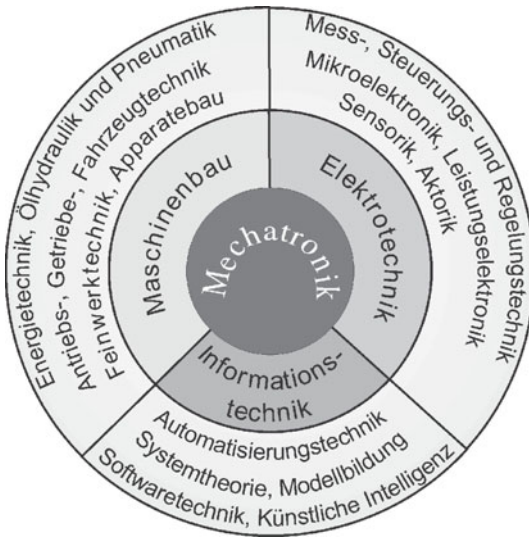
Diese Äußerungen kamen aber nach der Institutionalisierung der Elektrotechnik zu spät, um der Entwicklung eine andere Richtung zu geben. Die Eigendynamik, die mit der Einrichtung eines Faches verbunden ist, brachte es mit sich, dass Elektrotechnik mehr oder weniger schnell an allen Hochschulen als eigenständiges Studienfach etabliert wurde, das man mit dem Diplom abschließen konnte. Allerdings wies das Studium letztendlich große Überschneidungen mit dem Maschinenbaustudium auf. In der ersten Hälfte des Studiums wurde eine breite Maschinenbaugrundlage gelegt, bevor eine allmähliche Spezialisierung auf elektrotechnische Probleme einsetzte. Die Abteilungen für Elektrotechnik blieben meist noch lange in die Fakultät für Maschinenwesen eingegliedert.

In den meisten Fällen verblieb die Elektrotechnik bis zum Ende des zweiten Weltkriegs in der Fakultät für Maschinenwesen. Erst nach der Wiederaufnahme ihrer Lehrtätigkeit am Anfang der 50er Jahre wurden dann an den meisten Technischen Hochschulen eigene Fakultäten für Elektrotechnik eingerichtet (Berlin 1955).

An den meisten Maschinenbau- und Elektrotechnikfakultäten wurde aufgrund der technischen Entwicklung inzwischen ein bunter Strauß von verschiedenartig spezialisierten Ingenieuren ausgebildet. Die immer tiefer greifende Spezialisierung der technischen Wissensgebiete führte dann aber am Anfang der 60er Jahre zu der Tendenz, die Aufsplitterung der Wissenschaften an Universitäten und Technischen Hochschulen generell zurückzuführen und im Bereich der Ingenieurwissenschaften mehr universell einsetzbare Ingenieure auszubilden. Die erste Universitätsneugründung in der Bundesrepublik Deutschland, die Ruhr-Universität Bochum, erhielt daher als erste Universität neben den traditionellen Fakultäten alle ingenieurwissenschaftlichen Abteilungen (Bauingenieurwesen, Elektrotechnik und Maschinenbau). Zwar waren auch hier die Abteilungen konsequent voneinander getrennt, aber innerhalb einer Abteilung wurde nur ein Ingenieurdiplom verliehen. Der Abteilung für Maschinenbau war ein Institut für Automatisierungstechnik angegliedert, das die immer stärker ausgeprägten Ansprüche an elektrische Komponenten im Maschinenbau abdeckte und damit die Rolle übernahm, die die Elektrotechnik in den alten Maschinenbaufakultäten gespielt hatte.

Die gleiche Entwicklung fand bei den Gesamthochschulen statt, in denen neben den traditionellen Universitätsfächern auch die Ingenieurwissenschaften vertreten sind.

Nach Gründung der Fachhochschulen in der Bundesrepublik, die aus den Vorläuferinstitutionen "Ingenieurschulen" hervorgingen, wurden an diesen teilweise sogar eigene



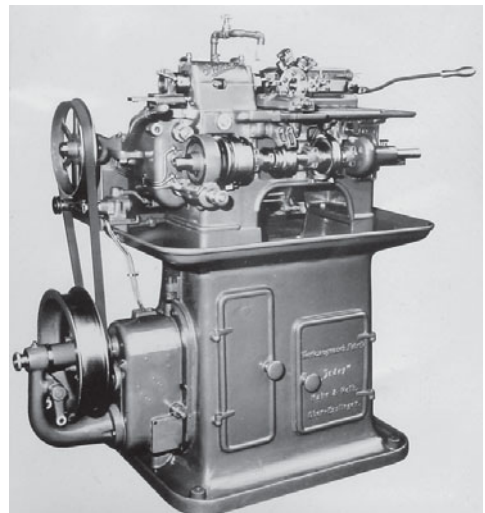
**Bild 1-1:** Mechatronik - Synergie verschiedener Disziplinen

schon in anderen Hochschulstudiengängen vorher vorhanden waren. Aber man hat die wesentlichen Grunddisziplinen von Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik wieder zusammengeführt, so dass nicht Spezialisten für eine bestimmte Technologie, sondern Universalisten ausgebildet werden, die in der Lage sind, heutige hochkomplexe Produkte wie Industrieroboter, Werkzeugmaschinen, aktive Fahrwerkskomponenten und ähnliches in Entwicklung und Anwendung zu beherrschen. Damit scheint sich der Weg anzubahnen, das wieder zusammenzubringen, was durch die historische und technische Entwicklung getrennt wurde.

## 1.2 Entwicklung der Technik am Beispiel der Werkzeugmaschine

Am Beispiel der Werkzeugmaschine lässt sich leicht aufzeigen, wie die technische Entwicklung, ausgehend von einem anfänglich rein maschinenbaulichen Produkt, über einen Zwitterzustand mit elektrischen Antrieben als einzige elektrische Komponenten, zu einem mechatronischen System führte.

In Bild 1-2 ist ein mechanischer Drehautomat aus dem Jahr 1914 mit Riemenvorgelege der Fa. Index abgebildet. Der Hauptantrieb der Arbeitsspindel erfolgt über einen Treibriemen von einer Antriebsmaschine, die wahlweise noch eine Dampfmaschine oder ein Elektromotor sein konnten. Solche leistungsstarken Antriebsmaschinen versorgten gleichzeitig jeweils mehrere Werkzeugmaschinen über lange Transmissionswellen mit Antriebsenergie. Bild 1-3 zeigt einen Blick in



**Bild 1-2:** Drehautomat aus dem Jahre 1914 mit Riemenvorgelege (Index)

Studienrichtungen "Automatisierungstechnik" eingeführt, die die beiden Zweige der Ingenieurwissenschaften Maschinenbau und Elektrotechnik wieder vereinigen.

Am Ende der 80er Jahre kam nun der Begriff der Mechatronik auf und hat an verschiedenen Hochschulen zur Gründung neuer Studienrichtungen oder Studienschwerpunkte geführt. Schaut man sich die Studienpläne von Mechatronikstudiengängen an, so sieht man leicht, was dahintersteckt (Bild 1-1). Es gibt keine wesentlich neuen Studieninhalte, die nicht auch