



# Mechatronik & Maschinenakustik

**Prof. Dr.-Ing. R. Nordmann**

Fachbereich 16 - Maschinenbau  
Mechatronische Systeme Teil I

Petersenstraße 30 - 64287 Darmstadt - FON 06151-16-2074  
EMAIL - [nordmann@mum.tu-darmstadt.de](mailto:nordmann@mum.tu-darmstadt.de)



Auflage III/2005

Version 3,5 vom 14. März 2005

Studienskripte

**Rainer Nordmann**

**Mechatronische Systeme im Maschinenbau I**

3. überarbeitete Auflage

Shaker Verlag  
Aachen 2005

**Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek**

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

Umschlaggestaltung Veronika Monz

©TU Darmstadt Fachgebiet Mechatronik und Maschinenakustik

Copyright Shaker Verlag 2005

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-8957-2

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407/95 96 - 0 • Telefax: 02407/95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort

Das vorliegende Skript gibt die Inhalte der Vorlesung "Mechatronische Systeme im Maschinenbau I" wieder. In diesem ersten Teil der Gesamtveranstaltung werden nach einer Einleitung zunächst typische mechatronische Systeme vorgestellt. Ein einfaches mechatronisches System besteht im wesentlichen aus der mechanischen Struktur (mechanischer Prozess), dem Sensor, dem Regler (Mikroprozessor) und dem Aktuator mit Verstärker.

Um das dynamische Verhalten des Gesamtsystems analysieren zu können, bedarf es zunächst der Modellierung und Analyse der Einzelkomponenten, die mit ihren typischen Eigenschaften zur Dynamik des Gesamtsystems beitragen. Teil I der Vorlesung konzentriert sich auf den mechanischen Prozess (Strukturdynamik), auf die Regelung mechanischer Systeme und auf die Signale, die den Informationsaustausch zwischen den Komponenten herstellen, wobei auf die Signalerfassung (Messung mechanischer Größen mit Sensoren) und die Signalverarbeitung (Mikroprozessoren) eingegangen wird. Dabei wird die Dynamik der bis dahin noch nicht behandelten Aktoren im Regelkreis zunächst weggelassen bzw. in stark vereinfachter Form berücksichtigt.

Der Vorlesungsteil "Mechatronische Systeme im Maschinenbau II" ist dann dem wichtigen Gebiet der Aktoren gewidmet. Einen Schwerpunkt bilden dabei die elektromechanischen Aktoren, die in elektrodynamische und elektromagnetische Systeme unterteilt werden können. Erst wenn auch diese Systemkomponenten hinreichend bekannt sind, können mechatronische Gesamtsysteme unter Berücksichtigung der Dynamik aller Komponenten ausführlich untersucht werden. Eine dynamische Analyse solcher Gesamtsysteme schließt den zweiten Teil der Vorlesung ab.

Zur Vertiefung der in der Vorlesung erworbenen Kenntnisse werden Übungen angeboten, in denen die rechnerische Analyse mechatronischer Systeme erlernt werden kann.



---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung und Beispielsysteme</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Was ist Mechatronik?.....  | 1         |
| 1.2      | Beispiele für typische Mechatronik-Systeme .....   | 7         |
| 1.2.1    | Elektronische Waage- Stromkompensation .....   | 7         |
| 1.2.2    | Aktiver Fahrzeugsitz für LKW-Fahrer .....  | 15        |
| 1.2.3    | Aktive Magnetlager für rotierende Systeme .....  | 19        |
| <b>2</b> | <b>Mechanische Systeme</b>   | <b>25</b> |
| 2.1      | Strukturdynamik .....  | 25        |
| 2.1.1    | Einleitung .....   | 25        |
| 2.1.2    | Methode der finiten Elemente, Diskretisierung der Struktur .....                         | 27        |
| 2.1.2.1  | Beispiel: Ermittlung der Elementmatrizen für den<br>Bernoulli-Balken 30                  |           |
| 2.1.2.2  | Berücksichtigung der Dämpfung .....  | 33        |
| 2.1.2.3  | Eigenschaften der Systemmatrizen .....   | 35        |
| 2.1.3    | Beurteilung des Systemverhaltens .....   | 36        |
| 2.1.3.1  | Eigenverhalten .....   | 37        |
| 2.1.3.2  | Übertragungsverhalten .....  | 40        |
| 2.1.3.3  | Beispiel .....   | 48        |
| 2.1.4    | Ein Beispiel zur Koordinatenreduktion .....  | 60        |
| 2.1.4.1  | Flugzeuggetragenes Teleskop SOFIA .....  | 60        |
| 2.1.4.2  | Modellbildung für das Teleskopsystem .....   | 62        |
| 2.1.4.3  | Finite Elemente Modell und Reduktion .....   | 63        |
| 2.1.4.4  | Einige Ergebnisse für die mechanische Struktur und das<br>mechatronische Gesamtsystem 64 |           |
| 2.2      | Zustandsraumdarstellung mechanischer Systeme .....                                       | 67        |
| 2.2.1    | Einleitung .....   | 67        |
| 2.2.1.1  | Eigenschaften und Motivation .....   | 67        |
| 2.2.1.2  | Formulierung .....   | 68        |
| 2.2.1.3  | Beispiel: Verknüpfung von Zustandsraumsystemen .....                                     | 70        |
| 2.2.2    | Zustandsraumdarstellung in physikalischen Koordinaten .....                              | 72        |
| 2.2.3    | Modale Zustandsraumdarstellung .....   | 74        |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 2.2.3.1 | Definition .....  | 74  |
| 2.2.3.2 | Beziehung zur modalen Bewegungsgleichung .....  | 76  |
| 2.2.4   | Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit .....   | 79  |
| 2.2.4.1 | Steuerbarkeits-Gramian .....  | 79  |
| 2.2.4.2 | Beobachtbarkeits-Gramian .....  | 80  |
| 2.2.4.3 | Hankelsche Singulärwerte .....  | 81  |
| 2.2.5   | Modellreduktion .....   | 81  |
| 2.2.5.1 | Reduktion durch modales Abschneiden .....   | 82  |
| 2.2.5.2 | Reduktion nach Steuer- und Beobachtbarkeit .....  | 83  |
| 2.2.6   | Literatur .....   | 85  |
| 2.3     | Nicht-lineare Systeme .....   | 87  |
| 2.3.1   | Einführung .....  | 87  |
| 2.3.2   | Ursachen von Nicht-Linearitäten .....   | 91  |
| 2.3.2.1 | Material Nicht-Linearität .....   | 91  |
| 2.3.2.2 | Geometrische Nicht-Linearität .....   | 98  |
| 2.3.2.3 | Nicht-lineare Randbedingungen .....   | 107 |
| 2.3.3   | Rechnerische Behandlung der Nicht-Linearitäten .....                                      | 113 |
| 2.3.3.1 | Linearisierung .....  | 114 |
| 2.3.3.2 | Berechnung der Zeitantwort nicht-linearer Systeme .....                                   | 114 |
| 2.3.4   | Beispiele typischer Berechnungsszenarien .....  | 122 |
| 2.3.4.1 | Ermittlung einer Kennlinie/eines Kennfeldes .....   | 122 |
| 2.3.4.2 | Lineares Verhalten um einen nicht-linearen Arbeitspunkt .....                             | 124 |
| 2.3.4.3 | Systeme mit lokalen Nicht-Linearitäten .....  | 126 |
| 2.3.4.4 | Global nicht-lineare Systeme .....  | 128 |
| 2.3.5   | Literatur .....   | 130 |
| 2.4     | Identifikation (Experimentelle Modellbildung) .....                                       | 131 |
| 2.4.1   | Übersicht .....   | 131 |
| 2.4.2   | Beispiele zur Identifikation aus dem Bereich der Mechanik und der<br>Elektrotechnik ..... | 135 |
| 2.4.3   | Merkmale von Identifikationsverfahren .....   | 140 |
| 2.4.4   | Fehlerkriterien .....   | 140 |
| 2.4.5   | Methode der kleinsten Fehlerquadrate .....  | 142 |

---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>3</b> | <b>Regelung mechanischer Systeme</b>                        | <b>149</b> |
| 3.1      | Einleitung.....   | 149        |
| 3.2      | Regelung starrer Körper.....                                | 151        |
| 3.2.1    | Übertragungsfunktionen des geschlossenen Regelkreises ..... | 155        |
| 3.2.2    | Störübertragungsfunktion .....                              | 156        |
| 3.2.3    | Empfindlichkeitsfunktion .....                              | 159        |
| 3.2.4    | Führungsübertragungsfunktion .....                          | 160        |
| 3.2.5    | Stellübertragungsfunktion .....                             | 164        |
| 3.3      | Mehrgrößenregelung.....                                     | 166        |
| 3.3.1    | Einleitung .....  | 166        |
| 3.3.2    | Darstellungsformen für Mehrgrößensysteme .....              | 171        |
| 3.3.3    | Dezentrale Regelung .....                                   | 173        |
| 3.3.4    | Mehrgrößenregelung durch Entkopplung .....                  | 179        |
| 3.3.5    | Zentrale Regelung .....                                     | 183        |
| 3.4      | Wechselwirkung mit der mechanischen Struktur .....          | 183        |
| 3.4.1    | Pole und Nullstellen .....                                  | 184        |
| 3.4.2    | Kollokation von Sensor und Aktor .....                      | 190        |
| 3.4.3    | Erweiterung der Reglerstruktur um Filter .....              | 193        |
| 3.5      | Zusammenfassung .....                                       | 194        |
| 3.6      | Modellbasierte Reglersynthese .....                         | 194        |
| 3.7      | Literatur .....   | 197        |
| <b>4</b> | <b>Signale</b>  | <b>199</b> |
| 4.1      | Vorbemerkung.....   | 199        |
| 4.2      | Was bedeutet Messen ? - Das Einheitensystem .....           | 199        |
| 4.3      | Das idealisierte Meßsystem .....                            | 200        |
| 4.3.1    | Die Meßkette .....  | 201        |
| 4.4      | Grundbegriffe aus der Meßtechnik .....                      | 202        |
| 4.5      | Meßprinzipien, Meßverfahren, Meßmethoden .....              | 204        |
| 4.5.1    | Beispiel: Messung magnetischer Feldstärke .....             | 204        |
| 4.6      | Das fehlerbehaftete Meßsystem.....                          | 205        |
| 4.6.1    | Fehlerquellen .....   | 205        |

---

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 4.6.1.1 | Beispiel: Spannungs- bzw. Strommessung .....                     | 206 |
| 4.6.2   | Statische Meßabweichungen .....                                  | 207 |
| 4.7     | Störungen des Meßvorgangs .....                                  | 208 |
| 4.7.1   | Kopplungsmechanismen .....                                       | 210 |
| 4.8     | Dynamische Eigenschaften eines Meßsystems .....                  | 217 |
| 4.8.1   | Filterung .....  | 217 |
| 4.8.2   | Beschreibungsmittel für Signale im Zeit- und Frequenzbereich ... | 220 |
| 4.8.2.1 | Stochastische Signale .....                                      | 220 |
| 4.8.2.2 | Beispiel: .....  | 221 |
| 4.8.2.3 | Periodische Signale .....  | 221 |
| 4.8.2.4 | Impulsreihen .....   | 221 |
| 4.8.2.5 | Aperiodische Signale .....                                       | 223 |
| 4.8.3   | Übertragungsverhalten eines Meßsystems .....                     | 223 |
| 4.8.4   | Übertragungsfunktion und Frequenzgang .....                      | 225 |
| 4.8.4.1 | Beispiel: .....  | 226 |
| 4.8.5   | Fundamentale Meßsysteme .....                                    | 227 |
| 4.9     | Hardware zur Signalverarbeitung und Regelung .....               | 229 |
| 4.9.1   | Speicher .....   | 233 |
| 4.9.2   | Prozessor (CPU) .....  | 234 |
| 4.9.3   | Bussysteme .....   | 240 |
| 4.9.4   | Auswahlkriterien .....   | 248 |
| 4.9.5   | Echtzeitprozesse .....   | 253 |
| 4.9.6   | Zeitdiskretisierung .....  | 257 |
| 4.9.7   | Reglerumsetzung .....  | 259 |
| 4.9.8   | Analog/Digital Wandlung .....                                    | 267 |
| 4.10    | Literatur .....  | 270 |