

---

# Simulation mechatronischer Systeme

---

Michael Glöckler

# Simulation mechatronischer Systeme

Grundlagen und Beispiele für MATLAB®  
und Simulink®

3., überarbeitete und erweiterte Auflage

Michael Glöckler  
Fakultät für Maschinenbau und  
Verfahrenstechnik, Hochschule Augsburg  
Augsburg, Deutschland

ISBN 978-3-658-42522-7                      ISBN 978-3-658-42523-4 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-42523-4>

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2014, 2018, 2023

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Ellen-Susanne Klabunde

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recyclebar.

---

## Vorwort zur 3. Auflage

Simulation ist heute ein unverzichtbares Hilfsmittel in vielen Bereichen der Technik, aber auch darüber hinaus. Bei der Entwicklung und Konstruktion von Maschinen, Anlagen, Fahrzeugen und vielen anderen technischen Produkten werden Simulationsstudien von Einzelkomponenten des Gesamtsystems durchgeführt. Der Bereich der Simulation ist so breit gefächert, dass es unmöglich ist, alle Teilbereiche in einem Buch abzudecken. In diesem Buch liegt der Fokus auf der Simulation mechatronischer Systeme, die aus mechanischen und elektrischen Komponenten sowie Computer-Hardware und -Software bestehen.

Dieses Lehrbuch richtet sich an Studierende der Fachrichtungen Maschinenbau, Elektrotechnik und Mechatronik sowie an Ingenieure aus der Praxis. Es basiert auf mehreren Lehrveranstaltungen zum Thema Simulation und Virtuelle Produktentwicklung an der Hochschule Augsburg. Das Buch behandelt die Grundlagen der Simulation, einschließlich des typischen Ablaufs eines Simulationsprozesses, des Aufbaus von Simulationsmodellen, der verschiedenen Arten von Modellen und ihrer Darstellung in Form von Gleichungen oder grafischen Darstellungen. Die zugrunde liegende Theorie ist zwar unabhängig von den verwendeten Tools, die Beispiele und Übungen und Musterlösungen wurden jedoch mit MATLAB<sup>®</sup> entwickelt und getestet.

Die aktuelle Auflage wurde um ein neues Kapitel zur Simulation mit Neuronalen Netzen ergänzt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Verarbeitung dynamischer Zeitreihen. Nach einer Einführung in die Grundlagen Neuronaler Netze wird gezeigt, dass ein einzelnes lineares Neuron in Verbindung mit Speicherbausteinen für vergangene Eingangs- und Ausgangsgrößen zur Nachbildung einer Übertragungsfunktion genutzt werden kann. Ebenso kann ein Layer aus mehreren linearen Neuronen in Verbindung mit Speicherbausteinen für vergangene Eingangs- und Zustandsgrößen zur Nachbildung einer Zustandsraumdarstellung verwendet werden. Bei nichtlinearen Übertragungsgliedern braucht man dagegen ein Neuronales Netz, das aus mehreren Layern mit Neuronen besteht. Für die genannten Anwendungsfälle gibt es Programmbeispiele für MATLAB<sup>®</sup> und Simulink<sup>®</sup>, in denen der Entwicklungsprozess nachvollziehbar beschrieben ist. Die Programmbeispiele gehen dabei über die Verwendung von Standardtopologien für Neuronale Netze hinaus.

Mein Dank gilt Frau Ellen Klabunde vom Springer Vieweg Verlag für das Lektorat, die freundliche Betreuung und die Unterstützung bei der Erstellung dieses Buches.

Für die Bereitstellung der Software bedanke ich mich sehr herzlich bei der Firma The MathWorks, Inc., 3 Apple Hill Drive, Natick, MA, 01760-2098 USA.

Augsburg  
im Juni 2023

Michael Glöckler

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	1
1.1	Simulationsvarianten .....	4
<b>2</b>	<b>Der Simulationsprozess</b> .....	9
2.1	Modellkonzept und Modellstruktur .....	10
2.2	Entwicklung des Simulationsmodells .....	12
2.3	Simulation durchführen .....	14
2.4	Überprüfen des Simulationsmodells .....	15
2.5	Dokumentation .....	16
2.6	Kontrollfragen .....	18
2.7	Antworten der Kontrollfragen von Kap. 2 .....	18
	Literatur .....	19
<b>3</b>	<b>Simulationsmodelle</b> .....	21
3.1	Allgemeiner Aufbau von Simulationsmodellen .....	24
3.2	Grafische Darstellung als Wirkungsgraph .....	26
3.3	Verhaltensbeschreibende Modelle .....	28
3.4	Gleichungsbasierte Modelle und deren Merkmale .....	30
3.4.1	Gewöhnliche Differenzialgleichungen .....	31
3.4.2	Partielle Differenzialgleichungen .....	34
3.4.3	Algebraisch-differenzielle Gleichungen .....	35
3.5	Lineare Modelle mit einer Eingangs- und einer Ausgangsgröße .....	35
3.5.1	Übertragungsfunktionen .....	37
3.6	Grafische Darstellung als Blockschaltbild .....	50
3.7	Standardverfahren zur grafischen Modellierung für Systeme gewöhnlicher Differenzialgleichungen .....	59
3.8	Zustandsraumdarstellung .....	64
3.8.1	Regelungsnormform .....	66
3.8.2	Anfangswerte der Zustandsgrößen .....	76
3.8.3	Zustandsraumdarstellung für Systeme mit mehreren Ein- und Ausgängen .....	79

3.9	Kontrollfragen . . . . .	80
3.9.1	Antworten der Kontrollfragen . . . . .	83
	Literatur. . . . .	88
<b>4</b>	<b>Numerische Integrationsverfahren . . . . .</b>	<b>89</b>
4.1	Integrationsverfahren für gewöhnliche Differenzialgleichungen. . . . .	90
4.1.1	Das Euler-Verfahren. . . . .	90
4.1.2	Das Runge–Kutta-Verfahren . . . . .	97
4.1.3	Programmablauf einer numerischen Simulation . . . . .	98
4.1.4	Weitere Integrationsverfahren . . . . .	100
4.1.5	Steife Differenzialgleichungen. . . . .	101
4.2	Integrationsverfahren für partielle Differenzialgleichungen . . . . .	101
4.2.1	Das Finite-Differenzen-Verfahren . . . . .	102
4.2.2	Das Finite-Elemente- und das Finite-Volumen-Verfahren. . . . .	106
4.2.3	Programmablauf einer FEM-Berechnung . . . . .	106
4.3	Wichtige Anforderungen an Integrationsverfahren . . . . .	108
4.3.1	Stabilität . . . . .	109
4.3.2	Genauigkeit . . . . .	111
4.3.3	Rechenzeit . . . . .	112
4.4	Kontrollfragen . . . . .	112
4.5	Antworten der Kontrollfragen . . . . .	113
	Literatur. . . . .	113
<b>5</b>	<b>Zeitdiskrete Systembeschreibung . . . . .</b>	<b>115</b>
5.1	Das Abtasttheorem. . . . .	121
5.2	Kontrollfragen . . . . .	122
5.3	Antworten der Kontrollfragen . . . . .	122
	Literatur. . . . .	122
<b>6</b>	<b>Modellbildung . . . . .</b>	<b>123</b>
6.1	Analytische Modellbildung . . . . .	124
6.2	Experimentelle Modellbildung . . . . .	126
6.2.1	Die Fourier-Analyse. . . . .	128
6.2.2	Sprung- und Impulsantwortanalyse . . . . .	131
6.2.3	Frequenzgangmessung. . . . .	133
6.2.4	Parameterschätzverfahren . . . . .	135
6.3	Anfangswerte festlegen . . . . .	139
6.4	Einheiten und Wertebereiche von Variablen . . . . .	142
6.4.1	SI-Einheiten . . . . .	143
6.4.2	Wertebereich von Variablen . . . . .	144
6.5	Physikalische Modellierung. . . . .	146
6.6	Modelle vereinfachen. . . . .	149
6.6.1	Linearisierung von Modellen. . . . .	149

6.6.2	Ordnungsreduktion . . . . .	152
6.6.3	Diskretisierung . . . . .	159
6.7	Kontrollfragen . . . . .	162
6.8	Antworten der Kontrollfragen . . . . .	163
	Literatur . . . . .	164
<b>7</b>	<b>Einführende Beispiele zur Modellbildung . . . . .</b>	<b>165</b>
7.1	Exponentieller Wachstums- oder Zerfallsprozess . . . . .	166
7.1.1	Modellkonzept und Modellstruktur . . . . .	167
7.1.2	Entwicklung des Simulationsmodells . . . . .	168
7.1.3	Simulation durchführen . . . . .	168
7.1.4	Überprüfen des Simulationsmodells . . . . .	168
7.2	Das Punktpendel, ein einfaches nichtlineares Modell . . . . .	170
7.2.1	Modellkonzept und Modellstruktur . . . . .	170
7.2.2	Entwicklung des Simulationsmodells . . . . .	170
7.2.3	Simulation durchführen . . . . .	171
7.2.4	Überprüfen des Simulationsmodells . . . . .	171
7.3	Hydraulisches Ventil als Beispiel eines verhaltensbeschreibenden Modells . . . . .	175
7.3.1	Modellkonzept und Modellstruktur . . . . .	176
7.3.2	Entwicklung des Simulationsmodells . . . . .	177
7.3.3	Simulation durchführen . . . . .	179
7.3.4	Überprüfen des Simulationsmodells . . . . .	179
7.4	Flugbahn eines Balls beim schiefen Wurf . . . . .	180
7.4.1	Modellkonzept und Modellstruktur . . . . .	183
7.4.2	Entwicklung des Simulationsmodells . . . . .	183
7.4.3	Simulation durchführen . . . . .	186
7.4.4	Überprüfen des Simulationsmodells . . . . .	187
<b>8</b>	<b>Weiterführende Beispiele aus dem Bereich der Mechatronik . . . . .</b>	<b>191</b>
8.1	Mechanik . . . . .	191
8.1.1	Mehrmassenschwinger . . . . .	192
8.1.2	Reibung und Dämpfung . . . . .	194
8.1.3	Kontaktprobleme und Kontaktsteifigkeit . . . . .	199
8.1.4	Mechanischer Festanschlag . . . . .	204
8.2	Hydraulik . . . . .	207
8.2.1	Hydraulikzylinder . . . . .	208
8.2.2	Proportionalventil . . . . .	217
8.2.3	Hydraulischer Antrieb . . . . .	223
8.2.4	Hydraulischer Antrieb mit Physikalischer Modellierung . . . . .	224
8.3	Digitale und zeitdiskrete Systeme . . . . .	227
8.3.1	Zeitquantisierung und Totzeiten . . . . .	228
8.3.2	Amplitudenquantisierung . . . . .	233

8.4	Elektrische Antriebe . . . . .	234
8.4.1	Ungeregelter Gleichstromantrieb . . . . .	234
8.4.2	Strom- und drehzahl geregelter Servoantrieb . . . . .	237
8.4.3	Ungeregelter Gleichstromantrieb mit Physikalischer Modellierung . . . . .	241
8.4.4	Strom- und drehzahl geregelter Servoantrieb mit Physikalischer Modellierung . . . . .	242
8.5	Elektrik . . . . .	246
8.5.1	Dehnungsmessung mit DMS mit Physikalischer Modellierung . . . . .	246
8.6	Tipps und Tricks . . . . .	249
8.6.1	Verwendung differenzierender Bausteine . . . . .	249
8.6.2	Algebraische Schleifen . . . . .	253
8.6.3	Umgang mit Einheiten . . . . .	256
8.6.4	Störgrößen . . . . .	257
8.6.5	Sonderfunktionen in Simulink-Modellen . . . . .	258
	Literatur . . . . .	261
<b>9</b>	<b>Simulation als Teil moderner Entwicklungsprozesse . . . . .</b>	<b>263</b>
9.1	Modellgestützte Softwareentwicklung . . . . .	264
9.1.1	Rapid Controller Prototyping . . . . .	267
9.1.2	Hardware-in-the-Loop . . . . .	269
9.2	Gekoppelte Simulationen . . . . .	271
	Literatur . . . . .	274
<b>10</b>	<b>Simulation mithilfe von künstlichen Neuronalen Netzen . . . . .</b>	<b>275</b>
10.1	Grundlagen Neuronaler Netze . . . . .	275
10.2	Eignung flacher Neuronaler Netze zur Simulation dynamischen Verhaltens . . . . .	279
10.2.1	Übertragungsfunktion bei einem linearen SISO-Glied . . . . .	279
10.2.2	Zustandsraumdarstellung . . . . .	287
10.2.3	Berechnung der Ableitungen der Ausgangsgröße . . . . .	290
10.3	Standardtopologie Neuronaler Netze von Typ NARX . . . . .	292
10.3.1	Erweiterung der Standardtopologie von NARX Netzwerken . . . . .	294
10.3.2	One-Step-Ahead Prediction . . . . .	301
	Literatur . . . . .	302
<b>11</b>	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>303</b>
11.1	Einführung in MATLAB und Simulink . . . . .	303
11.1.1	Numerische Berechnungen mit MATLAB . . . . .	304
11.1.2	Simulink, ein graphischer Editor zur Aufstellung der Systemgleichungen . . . . .	320
11.2	Übertragungsfunktionen im Zeit- und Laplace-Bereich . . . . .	325

---

11.3	Elementare Übertragungsglieder .....	326
11.3.1	PT <sub>1</sub> -Glieder .....	326
11.3.2	PT <sub>2</sub> -Glieder .....	326
11.4	Korrespondenzen der Laplace-Transformation .....	326
11.5	Sprungantwort eines PT <sub>1</sub> -Gliedes .....	327
11.6	Bode-Diagramm für PT <sub>2</sub> -Glieder .....	328
11.7	Wichtige Regelkreisglieder und deren Eigenschaften .....	328
11.8	Diskrete Zustandsraumdarstellung .....	330
	Literatur .....	333
	<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>335</b>

---

# Formelzeichen und Abkürzungen<sup>1</sup>

A	Fläche (m <sup>2</sup> )
a	Ausgangsgröße eines Layers bei einem Neuronalen Netz
ADC	analog digital converter = Analog-Digital-Wandler
b	Bias
c	Federkonstante oder Steifigkeit (N/m) bzw. (Nm/rad)
C	Kapazität (F)
CFD	computational fluid dynamics = numerische Strömungsmechanik
d	Dämpfungskonstante (Ns/m) bzw. (Ns/rad)
D	Dämpfungsmaß
DAC	digital analog converter = Digital-Analog-Wandler
DAE	Differential-algebraic equation = Differenzialgleichung(ssystem) mit algebraischen Nebenbedingungen
E <sub>Öl</sub>	Kompressionsmodul von Öl (N/m <sup>2</sup> )
f	Frequenz (Hz) Transfer Function bzw. Aktivierungsfunktion
F	Kraft (N)
FEM	Finite Elemente Methode
G	Übertragungsfunktion
I, i	Elektrischer Strom (A)
i	imaginäre Einheit für komplexe Zahlen, $i^2 = -1$
Ink	Inkrement
J	Trägheitsmoment (kg m <sup>2</sup> )
K	Konstante
K <sub>E</sub>	Spannungskonstante (Vs) = (Vs/rad)
K <sub>M</sub>	Drehmomentkonstante (Nm/A)

---

<sup>1</sup> Funktionen im Laplace-Bereich werden grundsätzlich in Großbuchstaben, die zugehörigen Funktionen in Zeitbereich in Kleinbuchstaben geschrieben.

Beispiel:  $x(t) \xrightarrow{\text{Laplace}} X(s)$  bzw.  $x \xrightarrow{\text{Laplace}} X$

---

$K_v$	Verstärkung des Lagereglers (1/s) = Geschwindigkeitsverstärkung
L	Induktivität (H)
m	Masse (kg)
M	Drehmoment (Nm)
MKS	Mehrkörper-Simulations-System
MIMO	multiple input multiple output = System mit mehreren Eingangs- und Ausgangsgrößen
N	Ordnung eines Systems oder einer Differenzialgleichung
ODE	ordinary differential equation = gewöhnliche Differenzialgleichung
PRB	Spseudorandom binary sequence = Pseudo-Rausch-Binärsignal
p	Druck (Pa) bzw. (N/m <sup>2</sup> )
q	Volumenstrom (m <sup>3</sup> /s)
R	Ohmscher Widerstand ( $\Omega$ ) Anzahl Features bei Neuronalen Netzen
s	Variable der Laplace-Transformation
S	Anzahl von Neuronen in einem Layer
SISO	single input single output = System mit einer Eingangs- und einer Ausgangsgröße
t	Zeit (s) Targets bzw. Zielwerte
T	Zeitkonstante (s)
$T_{ab}$	Abtastzeit (s)
TDL	Tapped Delay bzw. Speicherkette
W	Weights bzw. Gewichte
$x, \underline{x}$	Zustandsgröße, Zustandsvektor
$y, \underline{y}$	Ausgangsgröße, Ausgangsvektor
$T_r$	Rechenzeit (s)
$T_{tr}$	Rechentotzeit (s)
u	Eingangsgröße bzw. Stellgröße einer Strecke
U	Elektrische Spannung (V)
V	Volumen (m <sup>3</sup> )
x, y, z	Position bzw. Koordinate (m)
$\dot{x}$	Geschwindigkeit (m/s)
$\ddot{x}$	Beschleunigung (m/s <sup>2</sup> )
y	Ausgangsgröße
$y_v$	Ventilschieberstellung
z	Operator der z-Transformation

## Griechische Zeichen

$\Phi$	magnetischer Fluss (As)
$\vartheta$	Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\mu_{\text{D}}$	Gleitreibungskoeffizient (D = dynamisch)
$\mu_{\text{S}}$	Haftreibungskoeffizient (S = statisch)
$\omega$	Kreisfrequenz (rad/s)

---

## Sonstige Zeichen

>>	Eingabeaufforderung im <i>Command Window</i> von MATLAB
↵	Eingabetaste
<u>A</u>	ein einfacher Unterstrich kennzeichnet einen Vektor
<u><u>A</u></u>	ein doppelter Unterstrich kennzeichnet eine Matrix
.	Dezimaltrennzeichen ist der Punkt, Bsp.: $\pi = 3.1415$
$\dot{x} = \frac{dx}{dt}$	die erste Ableitung nach der Zeit wird durch einen Punkt über der Größe gekennzeichnet
$\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2}$	die zweite Ableitung nach der Zeit wird durch zwei Punkte über der Größe gekennzeichnet