

# Inhaltsverzeichnis

|   |          |
|---|----------|
| <b>1 Einführung in MATLAB®</b>  | <b>1</b> |
| 1.1 Der Desktop, ein Überblick  | 2        |
| 1.2 Online-Hilfe  | 4        |
| 1.3 Einige Bemerkungen zur Arbeitsweise von MATLAB                          | 6        |
| 1.4 MATLAB-Grundlagen   | 7        |
| 1.4.1 Skalare Operationen und Variablenverwaltung                           | 7        |
| 1.4.2 Mathematische Funktionen  | 10       |
| 1.4.3 Vektoren und Matrizen   | 12       |
| 1.4.4 Lineare Gleichungssysteme   | 22       |
| 1.4.5 Datenstrukturen, mehrdimensionale Matrizen, Structure und Cell Arrays | 25       |
| 1.4.6 Vergleichsoperatoren und logische Operatoren                          | 27       |
| 1.4.7 Schleifen und Verzweigungen   | 29       |
| 1.4.8 Daten-Ein- und -Ausgabe   | 32       |
| 1.4.9 Verzeichnispriorität  | 33       |
| 1.5 Programmerstellung, MATLAB Script und Function                          | 34       |
| 1.5.1 MATLAB Editor   | 35       |
| 1.5.2 MATLAB Script   | 36       |
| 1.5.3 MATLAB Function   | 39       |
| 1.5.4 Code-Beschleunigung, der Profiler                                     | 46       |
| 1.6 Grafik  | 48       |
| 1.6.1 Grafikfenster (Figure), Erstellung und Verwaltung                     | 50       |
| 1.6.2 2D-Grafik   | 51       |
| 1.6.3 3D-Grafik   | 64       |
| 1.7 Animation von 2D- und 3D-Modellen                                       | 71       |
| 1.7.1 Modellerstellung  | 71       |
| 1.7.2 Animations-Grafik   | 71       |
| 1.7.3 2D-Animation einfacher Linien-Modelle                                 | 74       |
| 1.7.4 Animation mit geometrischen 3D-Modellen                               | 77       |
| 1.8 Computeralgebra unter MATLAB, die Symbolic Math Toolbox                 | 86       |
| 1.8.1 Online-Hilfe  | 87       |
| 1.8.2 Symbolische Objekte   | 87       |
| 1.8.3 Vereinbarung symbolischer Variablen und Ausdrücke (Objekte)           | 88       |
| 1.8.4 Substitution symbolischer Größen, der subs Befehl                     | 90       |
| 1.8.5 Beispiele aus der Analysis  | 90       |
| 1.8.6 Algebraische Gleichungssysteme, der solve Befehl                      | 91       |
| 1.8.7 Gewöhnliche Differenzialgleichungen, der dsolve Befehl                | 93       |
| 1.8.8 Beispiel aus der linearen Algebra                                     | 96       |
| 1.8.9 Übergang zur Numerik  | 98       |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>2</b> | <b>Modellbildung</b>  | <b>99</b>  |
| 2.1      | Bemerkungen zur Schreibweise . . . . .  | 100        |
| 2.2      | Strukturen der Bewegungsgleichungen . . . . .                                 | 101        |
| 2.3      | Grundlagen . . . . .  | 101        |
| 2.3.1    | Kinematik starrer Körper . . . . .  | 101        |
| 2.3.2    | Kinematik von Mehrkörpersystemen . . . . .                                    | 108        |
| 2.3.3    | Kinetik, Impuls- und Drallsatz . . . . .                                      | 113        |
| 2.4      | Newton-Euler-Methode . . . . .  | 116        |
| 2.4.1    | Rechnerorientierte Vorgehensweise . . . . .                                   | 120        |
| 2.5      | Lagrange'sche Gleichung 2. Art . . . . .                                      | 123        |
| 2.6      | Linearisierung nichtlinearer Bewegungsgleichungen . . . . .                   | 127        |
| 2.7      | Anwendung der Modellerstellung . . . . .                                      | 129        |
| <b>3</b> | <b>Lineare Schwingungsmodelle</b>   | <b>137</b> |
| 3.1      | Bewegungsgleichungen . . . . .  | 138        |
| 3.2      | Eigenschwingungen und freie Schwingungen . . . . .                            | 140        |
| 3.2.1    | Das Eigenwertproblem in MATLAB, allgemeine Betrachtung . . . . .              | 140        |
| 3.2.2    | Numerische Behandlung der Eigenwertprobleme . . . . .                         | 142        |
| 3.3      | Erzwungene Schwingungen . . . . .   | 154        |
| 3.3.1    | Konstante Erregung . . . . .  | 155        |
| 3.3.2    | Harmonisch angeregte mechanische Systeme . . . . .                            | 156        |
| <b>4</b> | <b>Simulation unter Simulink®</b>   | <b>167</b> |
| 4.1      | Zur Funktionsweise . . . . .  | 167        |
| 4.1.1    | Block-Struktur . . . . .  | 167        |
| 4.1.2    | Simulationsablauf . . . . .   | 168        |
| 4.2      | Die Integrationsverfahren . . . . .   | 169        |
| 4.2.1    | Methoden und Bezeichnungen . . . . .  | 171        |
| 4.2.2    | Steifigkeit der Differenzialgleichung . . . . .                               | 175        |
| 4.2.3    | Bemerkungen zur Wahl der Verfahren . . . . .                                  | 176        |
| 4.3      | Simulink-Grundlagen . . . . .   | 177        |
| 4.3.1    | Die Modell-Library . . . . .  | 177        |
| 4.3.2    | Der Simulink-Editor, ein erstes Modell . . . . .                              | 178        |
| 4.3.3    | Einstellung des Integrators und des Datentransfers . . . . .                  | 180        |
| 4.3.4    | Datentransfer über den Workspace . . . . .                                    | 181        |
| 4.3.5    | Simulationsaufruf aus der MATLAB Umgebung . . . . .                           | 181        |
| 4.3.6    | Hilfsmittel zur Modellerstellung und Datenauswertung . . . . .                | 183        |
| 4.4      | Simulink-Modellierung eines einfachen Projekts . . . . .                      | 196        |
| 4.4.1    | 1/4-Fahrzeugmodell mit Reibungsdämpfer und die Bewegungsgleichungen . . . . . | 196        |
| 4.4.2    | Aufbereitung der Bewegungsgleichungen . . . . .                               | 197        |
| 4.4.3    | Das Fahrbahnprofil . . . . .  | 200        |
| 4.4.4    | Parametrisierung des Zustandsmodells im State Space Block . . . . .           | 204        |
| 4.4.5    | Modellierung der Reibelemente . . . . .                                       | 205        |
| 4.4.6    | Die Startroutine für die MATLAB-Umgebung . . . . .                            | 208        |
| 4.4.7    | Simulink-Modelle und Simulationsergebnisse . . . . .                          | 209        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.5      | Algebraische Schleifen in dynamischen Modellen . . . . .                             | 214        |
| 4.5.1    | Algebraische Schleifen . . . . .   | 214        |
| 4.5.2    | System mit algebraischer Schleife . . . . .  | 215        |
| 4.6      | Vektorielle Betrachtungsweise und Modellierung . . . . .                             | 218        |
| 4.6.1    | Simulationsergebnisse, selbsterregte Schwingungen und Mitnahme-Effekte . . . . .     | 219        |
| 4.6.2    | Nichtlineare Gleichungen höherer Ordnung . . . . .                                   | 220        |
| 4.7      | Modellierung mit Hilfe einer S-Function . . . . .                                    | 223        |
| 4.7.1    | M-File S-Function . . . . .  | 224        |
| 4.7.2    | C Mex-File S-Function . . . . .  | 231        |
| <b>5</b> | <b>Simulation unter MATLAB®</b>  | <b>235</b> |
| 5.1      | Struktur der Differenzialgleichungen . . . . .                                       | 235        |
| 5.1.1    | Beispiele für explizite Formulierungen . . . . .                                     | 238        |
| 5.2      | Der grundsätzliche Aufbau eines Simulationsprogramms . . . . .                       | 247        |
| 5.2.1    | Möglichkeiten zum Integratoraufruf unter MATLAB . . . . .                            | 248        |
| 5.3      | Integration von Systemen in Standardform . . . . .                                   | 251        |
| 5.3.1    | Unwuchtiger Motor auf elastischem Fundamentblock . . . . .                           | 252        |
| 5.4      | Differenzial-algebraische Gleichungen . . . . .                                      | 259        |
| 5.4.1    | Mathematische Hintergründe . . . . .   | 259        |
| 5.4.2    | Möglichkeiten unter MATLAB und Simulink . . . . .                                    | 261        |
| 5.4.3    | Mechanische Bewegungsgleichungen mit algebraischen Bindungsgleichungen . . . . .     | 262        |
| 5.4.4    | Überführung in gewöhnliche Differenzialgleichungen . . . . .                         | 270        |
| 5.4.5    | Übergang auf Minimalkoordinaten . . . . .  | 276        |
| 5.5      | Implizite Differenzialgleichungen . . . . .  | 282        |
| 5.6      | Integration gewöhnlicher Differenzialgleichungen mit Unstetigkeiten . . . . .        | 284        |
| 5.6.1    | Beispiele für Unstetigkeiten in den Bewegungsgleichungen . . . . .                   | 285        |
| 5.6.2    | Formulierung von Schaltfunktionen . . . . .  | 287        |
| 5.6.3    | Lokalisierung der Schaltpunkte . . . . .   | 288        |
| 5.6.4    | Beispiele zur Zwei-Punkt-Schaltlogik . . . . .                                       | 290        |
| 5.6.5    | Dreipunkt-Schaltlogik am Beispiel eines Zwei-Massen-Schwingers mit Reibung . . . . . | 299        |
| 5.7      | Randwertprobleme gewöhnlicher Differenzialgleichungen . . . . .                      | 312        |
| 5.7.1    | Grundlagen . . . . .   | 312        |
| 5.7.2    | Standardprobleme am Beispiel der Kettenlinie und des Basketballwurfs . . . . .       | 314        |
| 5.7.3    | Mehrpunkt-Randwertprobleme . . . . .   | 322        |
| 5.7.4    | Periodische Schwingungen nichtlinearer Systeme . . . . .                             | 326        |
| <b>6</b> | <b>Modellierung und Simulation mit dem Stateflow® Tool</b>                           | <b>335</b> |
| 6.1      | Stateflow-Objekte . . . . .  | 335        |
| 6.1.1    | Das Chart . . . . .  | 336        |
| 6.1.2    | Zustand und Zustand-Label . . . . .  | 337        |
| 6.1.3    | Transitionen . . . . .   | 338        |
| 6.1.4    | Default Transition . . . . .   | 340        |
| 6.1.5    | Verbindungspunkte . . . . .  | 340        |
| 6.1.6    | Der Model Explorer . . . . .   | 340        |
| 6.1.7    | Erweiterte Strukturen . . . . .  | 341        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 6.2      | Fahrzeugmodell mit Reibungsdämpfer . . . . .                                     | 342        |
| 6.2.1    | Bewegungsgleichungen und Schaltbedingungen . . . . .                             | 342        |
| 6.2.2    | Simulink-Modell mit Chart . . . . .  | 343        |
| 6.3      | Springender Ball, ein strukturvariables Modell . . . . .                         | 348        |
| <b>7</b> | <b>Physikalische Modelle unter Simulink®</b>                                     | <b>353</b> |
| 7.1      | Modellieren mit Simscape . . . . .   | 354        |
| 7.1.1    | Netzwerkerstellung mit der Foundation Library, ein Beispiel . . . . .            | 355        |
| 7.1.2    | Simscape Sprache, Grundlagen . . . . .   | 358        |
| 7.2      | SimMechanics der ersten Generation . . . . .                                     | 361        |
| 7.2.1    | Funktionsweise . . . . .   | 362        |
| 7.2.2    | Untersuchungsmethoden . . . . .  | 363        |
| 7.2.3    | Erstes SimMechanics-Modell . . . . .   | 363        |
| 7.2.4    | Schwingungen eines Roboter-Modells . . . . .                                     | 367        |
| 7.2.5    | Arbeitsweise des Joint Stiction Actuators . . . . .                              | 372        |
| 7.2.6    | Visualisierung und Animation der Maschine . . . . .                              | 376        |
| 7.2.7    | Einige mathematische Aspekte . . . . .   | 377        |
| 7.2.8    | Anwendungen und Ausblick . . . . .   | 380        |
| 7.3      | SimMechanics der zweiten Generation . . . . .                                    | 381        |
| 7.3.1    | Einige Komponenten aus der Block-Library . . . . .                               | 382        |
| 7.3.2    | Modellierung des Roboters mit hydraulischem Stellzylinder . . . . .              | 387        |
| 7.3.3    | Reibmodell aus Simscape . . . . .  | 390        |
| <b>8</b> | <b>Projekte</b>  | <b>391</b> |
| 8.1      | Permanentmagnet gelagerter Rotor . . . . .                                       | 391        |
| 8.1.1    | Systembeschreibung . . . . .   | 392        |
| 8.1.2    | Rotor- und Magnetmodellierung . . . . .  | 393        |
| 8.1.3    | Die aktive Stabilisierung, Reglerstrukturen . . . . .                            | 394        |
| 8.1.4    | Das kontinuierliche Modell . . . . .   | 395        |
| 8.1.5    | Reglerentwürfe . . . . .   | 396        |
| 8.1.6    | Parametrierung und Reglerkoeffizienten . . . . .                                 | 399        |
| 8.1.7    | Simulink-Modelle . . . . .   | 399        |
| 8.1.8    | Simulationsergebnisse . . . . .  | 400        |
| 8.2      | Störgrößenkompensation harmonischer und konstanter Störungen . . . . .           | 402        |
| 8.2.1    | Grundlagen zur Strecke und zum Beobachterentwurf . . . . .                       | 403        |
| 8.2.2    | Parameterfile und Simulink-Modell . . . . .                                      | 405        |
| 8.2.3    | Beobachter über S-Funktion . . . . .   | 406        |
| 8.2.4    | Analytische Ermittlung der Lösungen . . . . .                                    | 406        |
| 8.2.5    | Ergebnisse . . . . .   | 410        |
| 8.3      | Schwingungstilger mit viskoelastischem Anschlag . . . . .                        | 412        |
| 8.3.1    | Das stationäre System ohne Anschlag . . . . .                                    | 413        |
| 8.3.2    | Entwurf des Simulink-Modells . . . . .   | 415        |
| 8.3.3    | Schwingungsantwort mit einem Sinus-Sweep des Systems ohne/mit Anschlag . . . . . | 420        |
| 8.4      | Axialkolbenverdichter einer Pkw-Klimaanlage . . . . .                            | 422        |
| 8.4.1    | Das Modell . . . . .   | 422        |

|       |  |            |
|-------|--|------------|
| 8.4.2 | Der Hebelmechanismus . . . . .   | 423        |
| 8.4.3 | Bewegungsgleichungen nach Lagrange . . . . .                                   | 424        |
| 8.4.4 | Das M-File, erste Ergebnisse . . . . .   | 427        |
| 8.4.5 | Modellbasierter Entwurf mit SimMechanics, 1. Generation . . . . .              | 427        |
| 8.4.6 | Vergleich der Ergebnisse bezüglich der Gelenkkräfte . . . . .                  | 429        |
| 8.4.7 | Stationäre Lage, die Trimming-Methode . . . . .                                | 430        |
| 8.4.8 | Der Verdichter als SimMechanics-Modell, 1. Generation . . . . .                | 431        |
| 8.5   | Dreifachpendel . . . . .   | 432        |
| 8.5.1 | Lagrange'sche Gleichung 2. Art . . . . .                                       | 434        |
| 8.5.2 | Newton-Euler-Formalismus . . . . .   | 435        |
| 8.5.3 | Übergang zur Numerik und Integration . . . . .                                 | 438        |
| 8.5.4 | Animationsmodell . . . . .   | 439        |
| 8.5.5 | Schwingungsverhalten . . . . .   | 441        |
| 8.5.6 | Vorwärtsdynamik mit SimMechanics . . . . .                                     | 443        |
| 8.5.7 | Inverse Dynamik . . . . .  | 446        |
| 8.6   | Hubschwingungen eines Viertelfahrzeugs mit nichtlinearem Stoßdämpfer . . . . . | 447        |
| 8.7   | Dynamik des Levitron-Kreisels . . . . .  | 449        |
| 8.8   | Balancierender Roboter . . . . .   | 450        |
| 8.8.1 | Motivation . . . . .   | 451        |
| 8.8.2 | Modellvoraussetzungen und Annahmen . . . . .                                   | 451        |
| 8.8.3 | Herleitung der Bewegungsgleichungen . . . . .                                  | 452        |
|       | <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>453</b> |
|       | <b>Stichwortverzeichnis</b>  | <b>457</b> |