LEHRBUCH

Michael Kaschke · Holger Cartarius

Fingerübungen der Physik: Himmelsmechanik Astrodynamik

Repetitorium und Übungsbuch mit Lösungen und MATLAB-Programmen

EXTRAS ONLINE

Springer Spektrum

Michael Kaschke und Holger Cartarius

Fingerübungen der Physik

Himmelsmechanik - Astrodynamik

Repetitorium und Übungsbuch mit Lösungen und MATLAB-Programmen

Unter Mitwirkung von Ulrich Potthoff

26. August 2024

Springer Nature

Für alle Studenten und Studentinnen, die uns mit ihren neugierigen Fragen immer wieder zeigen, dass es in der Physik auch in den kleinsten Nischen ganz viel zu entdecken gibt und

für alle, die Freude an der Schönheit und der großartigen Vielfalt der Physik gefunden haben oder vielleicht auch mit Hilfe dieses Buches für sich entdecken mögen.

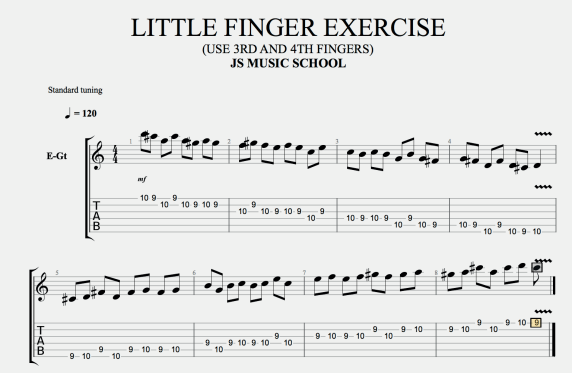
Michael Kaschke und Holger Cartarius

Für meine akademischen Lehrer Bernd Wilhelmi und Fritz-Peter Schäfer,

die mir halfen, die Faszination der Physik zu begreifen.

Michael Kaschke

Vorwort



Nach der positiven Aufnahme unseres ersten Bandes der „Fingerübungen der Physik“ legen wir hiermit mit der gleichen Intention den Band II vor. Für einen Physiker[1] gilt dasselbe wie für einen Pianisten: Übt dieser nicht ständig, wird auch die Hand eines Starpianisten irgendwann nicht mehr die Meisterwerke flüssig spielen können. Und natürlich macht es am meisten Spaß, Stücke zu spielen, die interessant und herausfordernd sind.
Bei uns gehören in diesem Band die Themen Himmelsmechanik und Astrodynamik dazu, die im Curriculum des Physikstudiums eher selten oder oft nur wenig ausführlich behandelt werden. Das sind aber gerade Themen, die viele Physikstudenten besonders interessieren, vielleicht sogar ursprünglich die Motivation für die Aufnahme eines Studiums der Physik waren. Es sind auch Bereiche, die sehr oft in den Leistungskursen der Physik/Naturwissenschaften in den Gymnasien behandelt werden und auch dort oft bestimmend für die Stimulation und Motivation der Schüler für die Naturwissenschaften sein können. Wie

[1] Die im Text verwendeten Formen des generischen Maskulinums (z. B. „Physiker“, „Studenten“, „Leser“) usw. schließen alle anderen Geschlechtsformen (z. B. „Physikerin“, „Studentin“ usw.) ausdrücklich mit ein.

kaum ein anderes Gebiet geeignet sind diese beiden Gebiete auch geeignet, die Schönheit der Physik zu erfassen und zu vermitteln.
Obwohl sich unsere Reihe primär an Studenten und Doktoranden der Physik, Mathematik und Ingenieurswissenschaften richtet, haben wir deshalb in diesem Band bewusst auch die Zielgruppe des Lehramts für naturwissenschaftliche Fächer im Blickfeld gehabt und hoffen, dass diese in diesem Buch einen Fundus an Übungen, Beispielen und Anregungen für sich und für Problemstellungen und Projekte für Ihre Schüler gewinnen mögen. Wir haben auch aus diesem Grund in weiten Teilen dieses Bands das Grundlagenwissen etwas unterhalb des Bachelors Physik angesetzt. Das Wissen aus Band I ist hilfreich, aber nicht notwendig für das Verständnis dieses Bandes, der sich wiederum gleichermaßen zum Selbststudium wie auch zur Begleitung in Tutorien/Übungen eignet. Die hier vorgestellte Himmelsmechanik und Astrodynamik sind als in sich weitgehend abgeschlossene Kapitel konzipiert und leiten in die vertiefenden Übungen mit und ohne Computer ein. Wie im Band I sind die theoretischen Grundlagen im Sinne eines Repetitoriums zunächst zusammengefasst. Diese Zusammenfassung kann und soll kein vollständiger Ersatz für ein Lehrbuch und eine tiefere Einarbeitung sein, weswegen wir auch immer auf entsprechende weiterführende Lehrbücher verweisen.

Wie im Band I (Mechanik) ausführlich dargelegt, sind wir der festen Überzeugung, dass die heute Studierenden im Rahmen ihres Fachstudiums vielfältige numerische Methoden kennenlernen und praktische Erfahrungen damit sammeln müssen. Deswegen liegt gerade in diesen Gebieten der Himmelsmechanik und Astrodynamik ein Schwerpunkt auf der numerischen Berechnung der behandelten physikalischen Phänomene und Beispiele. Wir stimmen auch mit Rubin Landau (Am. J. Phys., **76**, 296-306 (2008)) überein, der bereits 2008 argumentierte, dass Computermethoden neben Theorie und Experiment einen dritten „Pfad“ der physikalischen Erkenntnis darstellen und dass computergestützte Physik als eine Synthese von Physik, angewandter Mathematik und Informatik zu verstehen sei. Dennoch muss immer die physikalische Modellierung und analytischen Beschreibung der Probleme im Vordergrund stehen. Diese stellen wir deshalb der numerischen Berechnung stets voran.

Es gibt mittlerweile eine Reihe sehr guter Bücher für Studenten zur computergestützten Physik auf Basis der Programmiersprache ***Python***. Wir haben uns aber weiterhin wie der Untertitel des Buches schon sagt, für MATLAB entschieden, weil es in weiten Teilen der Industrie und der Forschung die Standardsoftware darstellt. MATLAB ist hervorragend zur Lösung vieler mathematischer, physikalischer und technischer Probleme und zur grafischen Darstellung der Ergebnisse geeignet. Die akademische Bindung ist durch relativ preisgünstige Studentenversionen bis heute erhalten geblieben und ist auch ein Grund für den großen Erfolg und die weite Verbreitung der Software. Ferner gibt es eine sehr gute Plattform MATLAB Central (`https://de.mathworks.com/matlabcentral/`), die einen offenen Austausch für die Community der MATLAB-Benutzer bietet und viele Programmpakete zum Download bereithält. Es gibt zahlreiche gute Einführungen besonders für Physiker und Ingenieure in die Programmierung mit MATLAB. Hinweise finden sich im Literaturverzeichnis.

Prinzipiell spricht aber nichts dagegen, auf andere Softwarepakete zurückzugreifen, die Übertragung der MATLAB-Skripte stellt i. A. kein Problem dar. ***GNU Octave*** (https://octave.org/) ist vermutlich die beste Alternative zu MATLAB. Octave läuft auf Linux, Windows, und Mac. Für viele Projekte ist ein MATLAB-Skript auch unter GNU Octave ohne große Modifikationen lauffähig. Die Funktionskompatibilität von GNU Octave zur Basisversion von MATLAB (ohne Toolboxen) ist weitgehend gegeben. Der Source Code von GNU Octave kann von der GNU Website heruntergeladen werden.
Python (https://www.python.org/) ist wie erwähnt eine universelle Programmiersprache. Mit ihr lässt sich ähnlich wie mit MATLAB gut lesbarer, teils auch recht knapper Code erzeugen, der in seiner Struktur sehr ähnlich zu MATLAB ist. Die Sprache ist mittlerweile in vielen Ländern Teil des Curriculums an Schulen und Hochschulen. Python unterstützt die objektorientierte und die funktionale Programmierung, und kann auch wie MATLAB als Skriptsprache genutzt werden. Die Handhabung ist damit vergleichbar zu MATLAB. Die Sprache und die wissenschaftlichen Programmpakete sind für Linux, Windows, und Mac OS X verfügbar. Ansonsten verweisen wir auf unsere Ausführung zur computergestützten Physik im Band I und in den online verfügbaren Zusatzmaterialien.

Ein solches mehrbändiges Projekt ist ohne die Hilfe vieler Menschen nicht zu realisieren. Es ist hier unmöglich allen zu danken.

Ganz besonderer Dank aber gebührt unserem Koautor der online verfügbaren Zusatzmaterialien, Herrn Dr. Ulrich Potthoff, für seine wertvolle Mitarbeit bei den Lösungen und den MATLAB-Programmen. Ohne ihn wäre insbesondere der Umfang des Arbeitsbuches, in welchem umfangreiche Lösungsvorschläge inklusive der zugehörigen MATLAB-Programme zusammengefasst sind, nicht möglich gewesen. Sein sorgfältiges und kritisches Korrekturlesen, sowie umfangreiche Kontrollrechnungen und MATLAB-Implementierungen haben viele wertvolle Verbesserungen erbracht.
Herrn Dr. Johannes Kaschke verdanken wir viele wertvolle Diskussionen und Anregungen zur MATLAB-Programmierung. Frau Sylvia Kaschke hat uns nicht nur bei der Erstellung vieler Abbildungen, sondern auch moralisch bei manchen Durststrecken und mit vielen Fragen und Diskussionen unterstützt.
Ebenso gebührt besonderer Dank Herrn Dr. Michael Rill für die vielen Diskussionen und die Unterstützung bei der Erstellung der LaTeX-Dateien sowie vieler Abbildungen.
Dr. Andreas Dorsel, Dr. Rudolf von Bünau, Bernd Geh, Dr. Michael Kempe, Dr. Johannes-Maria Kaltenbach und vielen anderen sind wir für zahlreiche Anregungen und Diskussionen sehr dankbar.
Besonderer Dank gebührt auch dem Springer Verlag und hier vor allem Frau Dr. Gabriele Ruckelshausen und Herrn Ramkumar Padmanaban für die gute Zusammenarbeit und die vielen wertvollen Hinweise.

Ohne die Studenten und Studentinnen, an die sich das Buch ja vornehmlich richtet – genannt seien besonders Jan Albicker, Kenneth von Bünau, Lennart Hoffmann, Paul Pitzel, Hauke Rehr, Philipp Simon, Juliane Vetter und Anne Weber – wäre das Projekt nicht zu Ende gekommen. Ihnen allen gilt unser herzlicher Dank.

Wir wünschen uns, dass auch dieser Band einen breiten Leserkreis findet und dass besonders auch Dozenten, Tutoren und Lehrer viele Anregungen für weiterführende Übungen und Projektarbeiten in diesem Buch finden. Die online unter den Links https://www.fingeruebungen-physik.de bzw. https://github.com/sn-code-inside/fingeruebungen-physik zur Verfügung gestellten Materialien sollen gerade auch Projektarbeiten ermöglichen.

Michael Kaschke und Holger Cartarius (2024)

Auszüge aus dem Vorwort zum Band I

Wie kam es zur Idee für dieses Buch?

An der Universität Jena kursierte vor etlichen Jahren unter uns Studenten der folgende Witz: Für Absolventen der Universität ist ein Wettbewerb ausgeschrieben, bei dem es gilt einen Projektvorschlag für die Erstellung eines Melkkarussells zu machen und ein Modell vorzustellen. Nach einiger Zeit werden der Kommission drei Arbeiten eingereicht, die eines Maschinenbau-Ingenieurs, die eines Betriebswirtschaftlers und die eines Physikers. Der Ingenieur kommt mit einem perfekt funktionierenden 1:10-Modell und einer langen Liste technischer Parameter. Die Kommission ist beeindruckt. Der Betriebswirtschaftler präsentiert Kostenrechnungen, eine Trendanalyse des Milchpreises und vor allem eine überzeugende Gewinnberechnung. Begeistert davon erwartet die Kommission den dritten Bewerber. Der Physiker kommt nur mit einem Stück Kreide, geht an die Tafel, malt einen Kreis und sagt: ‚Als Modell habe ich die Kuh als Kugel und die Milch als homogen verteilt angenommen. Daraus ergibt sich folgende Differentialgleichung ...'.
Uns gefällt der Witz noch heute, beschreibt er doch treffend, wozu die Physikausbildung befähigt: Abstraktion, Modellbildung, und die Ableitung von Prinzipien, um auf deren Basis eine geeignete mathematische Beschreibung und damit eine Erklärung von Phänomenen zu finden. Charakteristika, auf die der Physiker zurecht stolz ist und die den geradezu legendären Ruf seiner universellen Einsetzbarkeit begründen. Allerdings haben Physiker während des Studiums – abgesehen vielleicht vom physikalischen Praktikum – wenig Gelegenheit und Zeit, konkrete Problemstellungen aus dem Alltag detailliert zu berechnen und damit experimentell verifizierbar zu machen. Gern behilft sich der Physiker dann mit den sogenannten „back of the envelope"-Rechnungen[2], um eine Abschätzung zu erhalten. Wir sind ebenfalls große Anhänger dieser Methode, da sie oft den ersten Zugang zum Verständnis eines physikalischen Problems darstellt. Allerdings ist es immer schade, wenn weder Zeit noch Methodik zur Verfügung stehen, solch faszinierende Probleme wie z. B.

[2] Siehe die Bücher von C. Swartz, Back-of-the-Envelope Physics (The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 2003), S. Mahajan, The Art of Insight in Science and Engineering (The MIT Press, Cambridge, 2014) und A. Zee, Fly by Night Physics: How Physicists Use the Backs of Envelopes (Princeton University Press, Princeton, 2020)

den Fehlgang einer Pendeluhr, die Dauer eines Fallschirmsprungs aus der Stratosphäre, die genaue Farbverteilung in einem Regenbogen oder einem Halo genau zu berechnen. Natürlich kann jeder Physiker diese Phänomene erklären, ebenso wie eine Sonnenfinsternis oder die grundsätzliche Physik des Segelns. Aber kann er auch die genaue Uhrzeit und den Ort der Sonnenfinsternis berechnen oder die Maximalgeschwindigkeit eines Segelbootes? Mit diesem Buch wollen wir eine Auswahl *schöner* Physikprobleme behandeln. Dabei ist uns bewusst, dass das Kriterium der Schönheit immer ein subjektives Empfinden beinhaltet. Es sind aber vor allem aber Themen, die sonst selten oder wenig ausführlich behandelt werden. Wir schauen dabei auf ganz verschiedene physikalische Bereiche und Phänomene, die vielleicht auch den Nichtphysiker interessieren und deren Berechnung und Erklärung dem Physiker erlauben, die Schönheit der Physik zu erfassen und auch anderen zu vermitteln.
Ziel des Buches ist es, anhand in sich abgeschlossener Kapitel diese ausgewählten einzelnen physikalischen Probleme, Phänomene oder auch nur Alltagsthemen so zu behandeln, dass sowohl das physikalische Grundverständnis vermittelt und geschärft wird, als auch eine möglichst genaue und detaillierte quantitative Analyse und numerische Berechnung auf dem Computer durchgeführt werden kann. Mit diesen kann dann der Physiker beim oben beschriebenen Wettbewerb auch mit seinen Konkurrenten in Bezug auf Detail und Realitätsnähe mithalten.

Für wen ist dieses Buch gedacht?

Ganz einfach gesagt richtet es sich an alle, die Freude an der Physik haben und diese auch für allseits interessierende Probleme und Fragestellungen anwenden wollen. Primär adressiert es Studierende und Doktoranden der Physik, Mathematik und Ingenieurswissenschaften ebenso wie des Lehramtes für naturwissenschaftliche Fächer. Genauso ist es für Dozenten und Lehrer der Physik gedacht, die aus dem Fundus der Übungen und Beispiele Anregungen für eigene Problemstellungen und Projekte gewinnen mögen. Die Physik, wie sie im Studium zum Bachelor-Abschluss erreicht wird, stellt in etwa die Grundlage dar, auf der das Buch aufbaut. Es eignet sich gleichermaßen zum Selbststudium wie zur Benutzung in Tutorien/Übungen. Es ist nicht als eigentliches Lehrbuch gedacht. Die einzelnen Kapitel sind aber in sich geschlossen und können daher als Repetitorium und Kurzusammenfassung verstanden werden, sie leiten im Allgemeinen in die vertiefenden Übungen ein. .
Wir haben es als „Fingerübungen der Physik“ betitelt. Für einen Physiker gilt dasselbe wie für einen Pianisten: Übt dieser nicht ständig, wird auch die Hand eines Starpianisten irgendwann nicht mehr die Meisterwerke flüssig spielen können. Mit Fingerübungen der Physik ist gemeint, dass wir das gesamte Handwerkszeug des Physikers wie Modellbildung, Analysis und Algebra, Abschätzungen, Störungsrechnungen usw. benutzen wollen, um damit spannende und interessante physikalische Alltagsprobleme zu erklären und quantitativ zu beschreiben.

Warum gerade diese Auswahl der Themen?

Jede Auswahl ist subjektiv. Dennoch haben wir versucht, bei der Auswahl auch objektive Kriterien einfließen zu lassen. Die Probleme und Phänomene

1. sollen sich sinnvoll zu größeren Kapiteln bündeln lassen. Diese sind wiederum in sich relativ geschlossen und werden durch eine Zusammenfassung der grundlegenden Theorie eingeführt.
2. erlauben eine schrittweise Erläuterung, Einführung oder auch Wiederholung der zugrundeliegenden Theorie.
3. sind allgemein bekannt oder können zumindest zu verwandten Problemen in Bezug gesetzt werden.
4. werden selten oder nur oberflächlich im Physik-Studiengang (bis zum Bachelor) behandelt.
5. können gut in MATLAB oder anderen Programmiersprachen wie GNU Octave oder Python bearbeitet werden und erlauben die Berechnung nachprüfbarer Ergebnisse.
6. bieten eine Basis für weitere und tiefergehende Fragestellungen und Übungen.

Warum numerische Berechnungen und MATLAB?

Wir sind der Überzeugung, dass numerische Verfahren zur Lösung realitätsnaher Problemstellungen unverzichtbar sind. Diese werden aber ebenso wie die oben genannten „seltenen“ Kapitel in der Lehre und in Büchern kaum behandelt. Hingegen beobachtet man in letzter Zeit im Internet eine Flut von Apps, die mehr oder weniger fertige Darstellungen und durchaus graphisch ansprechende Simulationen von physikalischen Vorgängen und Phänomenen zeigen. Sie erzeugen daher sicher eine gute Anschaulichkeit und auch ein gutes Grundverständnis. Sie erlauben häufig mit einigen interaktiven Elementen auch eine gewisse spielerische Simulationsbandbreite, ermöglichen aber fast nie einen Einblick in die zugrundeliegenden Algorithmen. Daher halten wir das Konzept, Grundlagenthemen der Physik anhand spannender realitätsnaher Beispiele und Probleme zu erläutern und mit numerischen Methoden zu verbinden, für sehr wichtig.
MATLAB ist aus unserer Sicht das geeignete und ergänzende Handwerkszeug, um auf Basis der Problemanalyse und des gut strukturierten Lösungsansatzes zu anschaulichen, quantitativen und gut visualisierbaren Ergebnissen zu kommen. Es vereint eine relativ einfache, anschauliche Programmiersprache mit vielen hinterlegten mathematischen Funktionen und Prozeduren sowie einer mächtigen Bibliothek graphischer Ausgaberoutinen. Vielen Studenten wird MATLAB oder verwandte Programmpakete und Programmiersprachen wie z. B. GNU Octave oder Python aus dem Studium gut bekannt sein. Deswegen sind die mitgelieferten Programme einfach zu lesen und zu verstehen. Es ging uns nicht darum, die beste und kürzeste MATLAB-Realisierung zu liefern, der Leser sollte vielmehr die physikalische Modellierung in der Realisierung des numerischen Programms bzw. der Simulation mit MATLAB wiedererkennen. Daher sind die Programme nicht auf „best programming style“ optimiert, jedoch zum größten Teil das Verständnis fördernd kom-

mentiert. Der Leser kann diese Programme beliebig weiter optimieren, vereinfachen oder auch erweitern.

Warum Übungen?

Das Sprichwort sagt: „Übung macht den Meister“. Die zahlreichen Übungen sind didaktisch als Fortsetzung der einzelnen Kapitel gedacht und daher die eigentlichen „Fingerübungen“. Es wird sehr empfohlen, diese durchzuarbeiten oder aber zumindest die Lösungsvorschläge nachzuvollziehen. Das Schöne an der Physik ist ja, dass es zur Lösung eines Problems oft mehrere Zugänge und Wege gibt. Bei der Auswahl der Lösungsvorschläge haben wir uns deshalb weitgehend von didaktischen Gesichtspunkten und häufig auch der einfachen Übersetzbarkeit in ein MATLAB-Programm leiten lassen, wohl wissend, dass es manchmal auch andere deutlich kompaktere und elegantere Ansätze gibt. Die MATLAB-Skripte sind quasi die kostengünstigen Experimente für den Leser zu den einzelnen, eher theoretischen, Abschnitten des Buches.

Wie sollte man dieses Buch lesen?

Das ist wirklich jedem selbst überlassen. Die einzelnen Kapitel sind bewusst in sich abgeschlossen. Das gilt dank der durchgerechneten Beispiele bei entsprechenden Vorkenntnisse selbst für einzelne Abschnitte innerhalb der Kapitel. Querverweise dienen eher dem Nachschlagen, als dass sie zum Verständnis der einzelnen Abschnitte notwendig sind. Wir haben uns auch bewusst für eine umfangreiche Angabe von oft auch englischsprachiger Originalliteratur entschieden. Zum einen wollen wir damit auch in einem eher für Studierende gedachten Buch so weit möglich und bekannt Erstpublikationen und Erstautoren für die behandelten Probleme bekannt machen, zum anderen soll die verwiesene Literatur auch zum vertieften Selbststudium und zur Erweiterung und Übertragung der behandelten physikalischen Probleme auf andere Themen anregen.
Wir – d. h. alle am Projekt Beteiligten – hoffen, dass die Leser genauso viel Freude an den behandelten Problemen empfinden wie wir beim Schreiben, und dass sie mit dem Buch die Schönheit der Physik auf ihre ganz eigene Art und Weise erleben können. Gibt es etwas Schöneres als die Welt um uns herum verstehen und erklären zu können?

Michael Kaschke und Holger Cartarius (2023)

Inhaltsverzeichnis

1 Physik der Bewegung von Körpern 1

2 Physik des Kontinuums 5

3 Himmelsmechanik 11

3.1 Motivation . . . 11
3.2 Raum und Zeit . . . 13
3.2.1 Raum-Koordinatensysteme . . . 13
3.2.2 Zeitdefinition . . . 22
3.3 Bewegungsgleichung der Himmelsmechanik . . . 31
3.3.1 Herleitung der Kepler-Gleichung . . . 31
3.3.2 Geometrische Deutung und Ableitung der Kepler-Gleichung . . . 41
3.4 Lösung der Kepler-Gleichung . . . 44
3.4.1 Iterationsverfahren . . . 44
3.4.2 Reihenentwicklung . . . 46
3.4.3 Mittelpunktsgleichung . . . 47
3.5 Himmelsmechanik unseres Sonnensystems . . . 50
3.5.1 Erdbahn (Ekliptik) . . . 50
3.5.2 Berechnung der Kulmination der Sonne (Analemma) und ihrer Auf- und Untergänge . . . 53
3.5.3 Berechnung von Planetenbahnen . . . 77
3.5.4 Das Mehrkörperproblem . . . 90
3.5.5 Periheldrehung des Merkurs . . . 98
3.5.6 Kometen . . . 110
3.6 Berechnungen zu Sonnenfinsternissen . . . 115
3.6.1 Mondbahn und Ekliptik – Auftreten der Finsternisse . . . 115
3.6.2 Schattengrößen und Orte einer totalen Sonnenfinsternis . . . 118
3.6.3 Berücksichtigung der Abplattung der Erde . . . 121
3.6.4 Finsternisdauer . . . 122
3.6.5 Zusammenfassende Darstellung des Algorithmus in MATLAB . 123
3.7 Gezeiten . . . 127
3.7.1 Übergang von Punktmassen zu ausgedehnten Körpern . . . 127
3.7.2 Gezeiten im Erde-Mond-(Sonne)-System . . . 129
3.7.3 Gezeitentheorie nach Newton . . . 131

3.7.4 Grundlagen der Potentialtheorie der Gravitation 135
3.7.5 Grundidee der Gezeitentheorie nach Laplace 141
3.7.6 Gezeitenreibung 144
3.8 Himmelsmechanik unseres Sonnensystems über lange Zeiträume . . . 154
3.8.1 Bahnparameter der Planeten in ihrer zeitlichen Entwicklung . . 154
3.8.2 Berechnungen über einen Zeitraum von 10000 Jahren 155
3.8.3 Zeiträume von Millionen von Jahren – Klimaeffekte 156
3.9 Übungen zu Kapitel 3 – Himmelsmechanik 160
3.9.1 Übungen zu Raum und Zeit in der Himmelsmechanik 160
3.9.2 Übungen zur Kepler-Gleichung 162
3.9.3 Übungen zur Bewegung der Erde in der Ekliptik und zu Himmelsbeobachtungen von der Erde 164
3.9.4 Übungen zu Himmelsbeobachtungen von anderen Planeten aus . 168
3.9.5 Übungen zu Monden, Kometen und Asteroiden 171
3.9.6 Übungen zu Gezeiten 177
3.9.7 Übungen zu Stabilität von Planetenbahnen, zur Periheldrehung des Merkurs und zu Sonnenfinsternissen 182
3.9.8 Weiterführende Zusatzaufgaben und Probleme 184
3.10 Tabellen 187
Glossar 194
Literaturverzeichnis 201

4 Astrodynamik 205
4.1 Motivation 205
4.2 Grundlagen der Raketenphysik 208
4.2.1 Raketen-Gleichung 208
4.2.2 Nutzlast-Überlegungen 211
4.2.3 Prinzip der Stufenrakete 213
4.3 Umlaufbahnen von künstlichen Himmelskörpern 217
4.3.1 Grundlegende Beziehungen aus der Himmelsmechanik für Satellitenbahnen um die Erde 217
4.3.2 Bestimmung der Bodenspuren künstlicher Satelliten 219
4.3.3 Topographische Beziehungen für die Beobachtungen künstlicher Satelliten 221
4.3.4 Bestimmung der Bahn künstlicher Satelliten vom Boden aus . . 223
4.4 Manöver im Weltraum 230
4.4.1 Manöver mit impulsiven Schubphasen 231
4.4.2 Interplanetare Raumflüge zu den Nachbarplaneten der Erde . . 239
4.4.3 Lambert-Problem (Lambert-Transfer) 242
4.4.4 Manöver mit kontinuierlichem Schub 247
4.4.5 Gravity-Assist-Manöver 251
4.4.6 Interplanetarer Raumflug zur Sonne 261
4.5 Rendezvous im Weltall 266
4.5.1 Dynamik und Kinematik eines Kopplungsmanövers 266
4.5.2 Rendezvous Space Shuttle und ISS 273

4.5.3 Wiederankopplung LM und CSM von Apollo 11 277
4.6 Start aus der Erdatmosphäre und Wiedereintritt 281
4.6.1 Kräfte im erdnahen Weltall 281
4.6.2 Raketenstart von der Erde 284
4.6.3 Wiedereintritt eine Raumschiffs in die Erdatmosphäre 289
4.7 Übungen zu Kapitel 4 – Astrodynamik 301
4.7.1 Übungen zu Grundlagen der Raketenphysik 301
4.7.2 Übungen zu Umlaufbahnen 303
4.7.3 Übungen zu Manövern im Weltall 310
4.7.4 Übungen zu Rendezvous im Weltall 315
4.7.5 Start aus der Erdatmosphäre und Wiedereintritt 317
4.7.6 Weiterführende Zusatzaufgaben und Probleme 323
4.8 Tabellen 328
Glossar 329
Literaturverzeichnis 333

Abbildungsverzeichnis **335**

Übungsverzeichnis **339**

Stichwortverzeichnis **342**

Personenverzeichnis **347**