
Physik lernen mit Excel und Visual Basic

Dieter Mergel

Physik lernen mit Excel und Visual Basic

Anwendungen auf Teilchen, Wellen,
Felder und Zufallsprozesse

Dieter Mergel
Fakultät für Physik
Universität Duisburg-Essen
Essen, Nordrhein-Westfalen, Deutschland

ISBN 978-3-662-57512-3 ISBN 978-3-662-57513-0 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-57513-0>

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

Springer Spektrum

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

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 dürften.

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.

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Lieber Leser,

Sie finden hier ein Arbeitsbuch mit Übungen, die Sie allein oder in einer Gruppe durchführen können, ähnlich wie bei den Versuchen im Physikalischen Praktikum. Sie sollten mit dem Stoff der ersten beiden Jahre einer universitären Physikausbildung vertraut sein oder dabei sein, sich damit vertraut zu machen. Spezielle Kenntnisse in Mathematik oder Theoretischer Physik benötigen Sie zunächst nicht. Mit den Übungen sollen Sie Physik lernen und Erfahrung in Tabellenkalkulation und numerischer Simulation gewinnen, die Ihnen in Forschung und Beruf nützlich sein kann. Die vorgeschlagenen Lösungen werden so detailliert erläutert, dass sie direkt implementiert werden können. Im Laufe des Kurses werden Sie aber immer stärker ermutigt, nach gestuften Lernhilfen eigene Lösungen zu finden, gemäß der Besenregel:

Ψ So geht's, aber du kannst es genauso gut oder vielleicht sogar besser.

Ihr Autor hat sich in seiner universitären und industriellen Forschung mit Angewandter Physik und einige Jahre mit Informatik befasst und war an der Universität Duisburg-Essen in der Lehrerausbildung engagiert, in Kursen zu EXCEL und in integrierten Vorlesungen zu den Grundlagen der Physik, in denen Experimentalphysik und Theoretische Physik als Einheit betrachtet werden sollen. Dabei hat er die Überzeugung gewonnen, dass es möglich und sinnvoll ist, Physik, Mathematik und Informatik didaktisch als Einheit zu betrachten, die von der Oberstufe weiterführender Schulen durch das Studium hindurch gelehrt werden kann. Mit diesem Buch soll ein Schritt in diese Richtung gemacht werden, mit Übungen zu Teilchen, Wellen, Feldern und statistischer Physik. EXCEL ist dafür gut geeignet, weil es kostengünstig und weit verbreitet ist und in jeder Version bereits eine Entwicklungsumgebung für die Programmiersprache Visual Basic enthält.

Dieses Buch ist eine Fortsetzung des Buches „Physik mit Excel und Visual Basic“ desselben Autors. Ein solcher Titel führt manchmal zu der falschen Vorstellung, es würden lediglich Formeln aus Tabellenwerken in Arbeitsblätter übertragen und Zahlenwerte in Zellen eingesetzt. Ziel der Übungen in beiden Büchern ist es aber, Tabellenrechnungen so zu strukturieren, dass sie physikalischen Konzepten entsprechen. Diesem Band haben wir deshalb den programmatischen Titel „Physik lernen und verstehen mit EXCEL und Visual Basic gegeben“. VBA-Routinen

übernehmen dabei Teile der Rechnung, variieren Versuchsparameter der Tabellenrechnung und protokollieren die Ergebnisse, die in aussagekräftigen Diagrammen dargestellt und physikalisch gedeutet werden sollen.

Es werden im Wesentlichen die Tabellentechniken und numerischen Verfahren des ersten Bandes angewandt. Zellenformeln werden mathematisch formuliert, das heißt mit Namen, die Variablen, Vektoren und Matrizen bezeichnen. Es werden wiederum benutzerdefinierte Tabellenfunktionen entwickelt, die die Tabellenrechnungen von Routineaufgaben entlasten. Nichtlineare Regression mit der SOLVER-Funktion wird eingesetzt, um Variationsaufgaben zu lösen, z. B. optische Strahlengänge nach dem Fermat'schen Prinzip zu ermitteln. Die in Band I eingesetzten Generatoren von eindimensionalen Zufallszahlen werden auf zwei und drei Dimensionen erweitert, sodass Monte-Carlo-Rechnungen in ein, zwei oder drei Dimensionen durchgeführt werden können, z. B. für die Beugung von Wellen an geometrischen Blenden und Elektronenverteilungen. Die Verfahren des ersten Bandes zur Lösung der Newton'schen Bewegungsgleichung werden auf eindimensionale Schwingungen, Bewegungen in der Ebene und die Schrödinger-Gleichung angewandt. Neue Techniken werden eingeführt, um zweidimensionale partielle Differentialgleichungen zu lösen.

Drei Charaktere, der nachdenkliche und fragende *Tim*, der pragmatische *Alac* und der Tutor/die Tutorin *Mag* besprechen Verfahren und Fallstricke der Implementation, decken physikalische Denkfehler auf und diskutieren übergeordnete wissenschaftstheoretische Fragen. Sie lassen dabei Entdeckergeist und Abenteuerlust erkennen und füllen den Anspruch „lernen und verstehen“ mit Leben.

Duisburg/Aachen
im Dezember 2017

Dieter Mergel

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Tim, Alac, Mag kommen wieder zusammen	1
1.2	Didaktisches Konzept	4
1.3	Numerische Techniken	5
1.4	Physikalische Themen	7
1.5	Nomenklatur und physikalische Einheiten	8
1.6	Programmiertechniken	10
2	Eindimensionale Schwingungen	13
2.1	Einleitung: Feder- und Reibungskräfte	13
2.2	Lock-in-Verfahren	15
2.3	Eigenschwingungen eines harmonischen Oszillators mit Reibung	20
2.3.1	Bewegungsgleichung	21
2.3.2	Dämpfung durch viskose Reibung	23
2.3.3	Dämpfung durch trockene Reibung	25
2.3.4	Dämpfung Newton'sche Reibung	27
2.3.5	Entdämpfung eines Oszillators	28
2.3.6	Sinus zur Anpassung an die stationäre Schwingung	30
2.4	Einschwingvorgang und stationäre Lösung der erzwungenen Schwingung	31
2.4.1	Einsatz einer äußeren Erregung	31
2.4.2	Stationäre Schwingung	34
2.4.3	Deutung des Einschwingvorgangs	36
2.5	Resonanzkurve der erzwungenen Schwingung	39
2.6	Oszillation im Morse-Potential	46
2.7	Zwei gekoppelte Pendel	51
2.7.1	Bewegungsgleichung	51
2.7.2	Tabellenrechnung in drei Blättern	53
2.7.3	Berechnung durch eine VBA-ROUTINE	59
2.7.4	Einsatz einer benutzerdefinierten Funktion	60

3	Bewegungen in einer Ebene	63
3.1	Einleitung: Zentralkräfte und geschwindigkeitsabhängige Kräfte	63
3.1.1	Drehimpuls.	64
3.1.2	Kräfte	64
3.1.3	Tabellentechnik	65
3.2	Ballistische Kurve	66
3.3	Oszillator mit winkelabhängiger Zentralkraft	69
3.3.1	Winkelabhängige Federkonstante	69
3.3.2	Ellipsenähnliche Bahnen	70
3.3.3	Energie und Drehimpuls bleiben erhalten	72
3.4	Oszillator in anisotropem Potential	72
3.4.1	Kraftfeld.	73
3.4.2	Bahnkurven	76
3.4.3	Drehimpuls.	78
3.5	Bewegung in einem inhomogenen Magnetfeld	79
3.6	Keplerproblem	81
3.6.1	Integration in kartesischen Koordinaten	81
3.6.2	E und L statt r und v als Anfangsbedingungen.	85
3.6.3	Integration in Polarkoordinaten	87
3.6.4	Effektives Potential für die Radialbewegung	89
3.7	Zwei-Körper-System mit Gravitationswechselwirkung	90
3.7.1	Berechnung der Bahnen in kartesischen Koordinaten	90
3.7.2	Radiale Bewegungsgleichung	98
3.8	Bewegung zweier Körper mit beliebiger Potenz der Wechselwirkung	101
3.8.1	Federkraft, $n = 1$	102
3.8.2	Schwingende Hantel	103
3.8.3	Andere Potenzen des Kraftgesetzes	105
3.8.4	Abstand als Funktion des Winkels	107
4	Schrödinger-Gleichung.	109
4.1	Einleitung: Eigenschaften der Schrödinger-Gleichung und ihrer Lösungen	109
4.2	Potentialtopf.	113
4.2.1	Integration der Schrödinger-Gleichung	113
4.2.2	Wellenfunktionen und Eigenlösungen	118
4.2.3	Drei nützliche Routinen	120
4.3	Harmonischer Oszillator	122
4.4	Schwingungen zweiatomiger Moleküle.	126
4.5	Radiale Eigenfunktionen des Wasserstoffatoms	129
4.5.1	Radiale Schrödinger-Gleichung.	130
4.5.2	Anfangswerte	131
4.5.3	Lösungen	132
4.5.4	Warum so viel Mathematik?	133

5	Partielle Differentialgleichungen	135
5.1	Einleitung: Vier Typen von partiellen Differentialgleichungen zweiter Ordnung	135
5.2	Laplace-Gleichung	137
5.3	Poisson-Gleichung	144
5.3.1	Tabellenaufbau und Makros	145
5.3.2	Poisson-Gleichung bei vorgegebenem Randpotential	145
5.3.3	Poisson-Gleichung bei stromfreiem Rand	148
5.3.4	Superposition von Potentialen	149
5.4	Wärmeleitung	150
5.4.1	Diskretisierung der eindimensionalen Wärmeleitungsgleichung	151
5.4.2	Konstante Randtemperaturen	152
5.4.3	Konstanter Wärmeeinfluss	154
5.4.4	Periodische Temperaturänderung	154
5.5	Wellengleichung	156
5.5.1	Diskretisierung der Wellengleichung	157
5.5.2	Stehende Wellen	158
5.5.3	Resonanzkurve	162
5.5.4	Reflexion einer laufenden Welle an einem offenen und einem festen Ende eines elastischen Mediums	164
5.5.5	Überlagerung von zwei unabhängigen Wellenpaketen	166
6	Elektrische und magnetische Felder	169
6.1	Einleitung: Skalare und vektorielle Addition von Potentialen und Feldern	169
6.2	Äquipotentiallinien von zwei Punktladungen	172
6.2.1	Äquipotentiallinien	172
6.2.2	Feldrichtungsvektoren	176
6.3	Feldverteilung zweier elektrischer Ladungen	178
6.4	Feldlinien	182
6.4.1	Feldlinienbilder für einen Dipol und für zwei gleiche Ladungen	183
6.4.2	Berechnung der Feldlinien	183
6.4.3	Unterschiedlich starke Ladungen	187
6.4.4	Diskussion über Feldlinien	188
6.5	Magnetfeld von geraden Stromfäden	191
6.6	Magnetfelder von Spulen	196
6.6.1	Eine Stromschleife	196
6.6.2	Spulen	199
6.7	Homogenität des Feldes von Helmholtz-Spulen	202

7	Variationsrechnung	205
7.1	Einleitung.	205
7.2	Reflexion an einem ebenen Spiegel	206
7.2.1	Ein Strahl	206
7.2.2	Vier Strahlen	207
7.3	Brachistochrone	208
7.3.1	Zykloide	209
7.3.2	Schnellste Bahn	209
7.3.3	Weitere Tabellen und Programme	212
7.4	Schwingung eines harmonischen Oszillators.	212
7.5	Wurfparabel durch Optimierung der Lagrange-Funktion.	216
7.6	Bahncurven in der Ebene.	218
7.6.1	Harmonischer Oszillator	219
7.6.2	Transformation einer Ellipse auf den Einheitskreis	220
7.6.3	Planetenbahnen	222
8	Geometrische Optik mit dem Fermat'schen Prinzip	227
8.1	Einleitung: Was sagt Fermat?	227
8.2	Gegenstand am Boden eines Wassertroges	229
8.3	Blick durch eine planparallele Platte	232
8.4	Reflexion an einem Hohlspiegel	233
8.5	Reflexion an einem Parabolspiegel	236
8.6	Brennweite und Hauptebenen einer Bikonvexlinse	238
8.6.1	Das Fermat'sche Prinzip	239
8.6.2	Optimierung eines Strahlengangs durch eine Linse	240
8.6.3	Brennpunkt und bildseitige Hauptebene der Linse.	243
8.7	Bildkonstruktion mit zwei Hauptebenen	245
8.8	Brennweiten und Hauptebenen von Bikonkav- und Konkav-konvex-Linsen	246
9	Modellverteilungen durch Simulation	
	physikalischer Prozesse	249
9.1	Einleitung: Verteilungen durch Zufallsprozesse	249
9.2	Normalverteilung als Verteilung von Mittelwerten	251
9.3	Spontaner Zerfall von Atomen, Poisson-Verteilung	256
9.4	Stoßzeiten von Molekülen	260
9.5	Glücksspiel auf einer Party	263
9.5.1	Kontinuierliches Kapital	264
9.5.2	Diskretes Kapital und diskreter Würfel	267

9.6	Verbreiterung von Emissionslinien durch Molekülstöße	268
9.6.1	Simulation	269
9.6.2	Mathematische Ableitung der Spektralform	271
9.7	Ziffernverteilung in einem großen Zahlenwerk	275
10	Stochastische Bewegung	279
10.1	Einleitung.	279
10.2	Diffusionsroutine für ein eindimensionales Gitter.	280
10.3	Deltafunktion als Anfangsverteilung	283
10.3.1	Ein Vorversuch.	284
10.3.2	Erweiterter Versuch	285
10.3.3	Ein Zufallsgenerator aus dem Internet.	288
10.4	Sinus- und rechteckförmige Verteilung	289
10.4.1	Sinusförmige Verteilung.	289
10.4.2	Rechteckprofil	291
10.5	Halbdurchlässige Membran	291
10.6	Ising-Modell des Ferromagnetismus	293
10.6.1	Programm-Struktur	293
10.6.2	Ergebnisse der Simulation	295
10.6.3	Weitere Routinen	298
10.7	Reguläre Lösung eines binären Kristalls	299
11	Monte-Carlo-Verfahren	305
11.1	Einleitung: Trägheitsmomente und elektrostatische Energie von Ladungswolken	305
11.2	Zufallsverteilungen in der Ebene.	307
11.2.1	Gleichverteilung innerhalb eines Rechtecks	308
11.2.2	Trägheitsmoment eines Rechtecks.	310
11.2.3	Gleichverteilung innerhalb eines Kreises	312
11.2.4	Trägheitsmomente von Kreisausschnitten	316
11.3	Gauß- und Cauchy-Lorentz-verteilte Koordinaten	319
11.3.1	Gauß-Verteilungen für die x - und die y -Koordinate.	319
11.3.2	Gauß-verteilter Radius.	321
11.3.3	Cauchy-Lorentz-Verteilung (CL).	322
11.3.4	Konvergenz bei Gauß-verteilten und Lorentz-verteilten Radien	324
11.4	Gleichverteilung auf einer Kugeloberfläche und in einer Kugel	324
11.4.1	Zufallsgenerator, der Punkte gleichmäßig auf einer Kugeloberfläche verteilt	324
11.4.2	Zufallsgenerator für die radiale Verteilung in einer Kugel.	325
11.4.3	Gleichverteilung im Kugelvolumen.	326

11.5	Trägheitsmoment und elektrostatisches Potential einer Kugel	332
11.5.1	Trägheitsmoment einer Kugel durch Integration über Kreisscheiben oder Kugelschalen	335
11.5.2	Die Kugel wird vom Nullpunkt weggeschoben	336
11.6	Trägheitstensor eines Quaders	337
11.7	Elektrisches Feld einer geladenen Kugel	339
11.8	Das 1s-Orbital des Helium-Atoms	342
11.8.1	Zufallsgeneratoren	342
11.8.2	Coulomb-Energie des 1s-Orbitals	344
12	Wellenoptik	347
12.1	Einleitung: Das Huygens'sche Prinzip	347
12.2	Zeigerdiagramme	349
12.3	Huygens'sches Prinzip	352
12.4	Zerstörung einer Cornuspirale durch den Zufall	355
12.5	Beugung am Doppelspalt	359
12.6	Airy-Scheibchen	362
12.7	Brennlinie einer idealen Zylinderlinse	364
12.8	Brennpunkt einer idealen Sammellinse	367
12.9	Lichtstreuung an kugelsymmetrischen Verteilungen	370
12.10	Phasengitterantennen in der Funktechnik	373
12.10.1	Dipol	373
12.10.2	Senderreihe	375
13	Statistische Mechanik	379
13.1	Einleitung: Statistische Mechanik als Bilanzrechnung	379
13.2	Quantenstatistik des harmonischen Oszillators	383
13.3	Kinetisches Modell eines idealen Gases	389
13.3.1	Modell des idealen Gases, kinetische Energie	389
13.3.2	Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung	391
13.3.3	Molare Wärmekapazität, Entropie und Druck	394
13.3.4	Makros	396
13.4	Debye-Modell der spezifischen Wärme eines Festkörpers	397
13.5	Wärmekapazität eines Elektronengases	402
13.6	Elektronen und Löcher in Halbleitern	406
14	Mathematische Ergänzungen	411
14.1	Einleitung	411
14.2	Strecken, Drehen, Schieben eines Vektors	412
14.2.1	Zwei Matrizen und ein Vektor	412
14.2.2	Steuerung der Rechnung durch einen Dialog	416

14.3	Euler'sche Drehmatrix	417
14.4	Substitutionsregel der Integration	420
14.5	Wegintegrale über die Schwerkraft	422
14.6	Umlaufintegrale	427
14.7	Chi ² -Verteilung und Chi ² -Test	430
14.7.1	Fünf Tabellenfunktionen mit der Chi ² -Verteilung	430
14.7.2	Simulation einer Chi ² -Verteilung.	431
14.7.3	Der Chi ² -Test und seine Fallen	434
14.7.4	Vierfeldertest	437
14.7.5	Dialogformular für den Vierfeldertest	439
14.8	Dateien, Tabellenblätter, Zellbereiche in VBA ansprechen	441
15	Schlussbetrachtungen	445
15.1	Schönheitswettbewerb	445
15.1.1	Teilchen und Wellen.	445
15.1.2	Felder und Zufallsprozesse	448
15.1.3	Tabellenstruktur und VBA	450
15.1.4	Solver und Monte-Carlo.	452
15.2	Was haben wir gelernt und wie kann es weiter gehen?	454
	Sachverzeichnis	455