
essentials

Essentials liefern aktuelles Wissen in konzentrierter Form. Die Essenz dessen, worauf es als „State-of-the-Art“ in der gegenwärtigen Fachdiskussion oder in der Praxis ankommt. essentials informieren schnell, unkompliziert und verständlich.

- als Einführung in ein aktuelles Thema aus Ihrem Fachgebiet
- als Einstieg in ein für Sie noch unbekanntes Themenfeld
- als Einblick, um zum Thema mitreden zu können.

Die Bücher in elektronischer und gedruckter Form bringen das Expertenwissen von Springer-Fachautoren kompakt zur Darstellung. Sie sind besonders für die Nutzung als eBook auf Tablet-PCs, eBook-Readern und Smartphones geeignet.

Essentials: Wissensbausteine aus den Wirtschafts, Sozial- und Geisteswissenschaften, aus Technik und Naturwissenschaften sowie aus Medizin, Psychologie und Gesundheitsberufen. Von renommierten Autoren aller Springer-Verlagsmarken.

Bernd Sonne

Allgemeine Relativitätstheorie für jedermann

Grundlagen, Experimente und
Anwendungen verständlich
formuliert



Springer Spektrum

Bernd Sonne
Hamburg
Deutschland



ISSN 2197-6708
essentials

ISBN 978-3-658-12001-6

DOI 10.1007/978-3-658-12002-3

ISSN 2197-6716 (electronic)

ISBN 978-3-658-12002-3 (eBook)

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 Fachmedien Wiesbaden 2016

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Fachmedien Wiesbaden ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort

Schon wieder ein Buch über Einsteins Theorien? Davon gibt es doch schon so viele! Ja, das ist richtig. Die meisten davon sind Lehrbücher, zu deren Verständnis ein gehöriges Maß an Mathematik erforderlich ist bzw. vorausgesetzt wird. Besonders die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) ist deshalb schwer zu verstehen. Dies war auch der Grund, weshalb nur wenige Physiker sich nach der Veröffentlichung (Ende 1915) damit befassten.

Neben den Lehrbüchern gibt es eine Reihe von Sachbüchern. Sie haben zwar nicht den Anspruch eines Lehrbuches, sind aber dennoch mit Mathematik in verschiedenen Schwierigkeitsgraden „gefüllt“. Und dann findet man noch populärwissenschaftliche Bücher, die keine Mathematik enthalten, sondern viele Themen der ART mehr im Erzählstil bringen, ohne jedoch die Grundlagen der ART genauer zu beleuchten.

Dieses *essential* enthält auch so gut wie keine Formeln. Aber es soll dazu beitragen, die physikalischen Grundlagen der ART gedanklich zu erfassen. Außerdem sollen die Ergebnisse von Experimenten und Anwendungen erklärt werden. Deshalb richtet sich das *essential* nicht an Fachleute, wenngleich manche Erklärungen auch für sie hilfreich sein können. Es sollen hauptsächlich Schüler, Studenten, Ingenieure und jeder interessierte Laie angesprochen werden, also alle, die schon mal etwas von Relativitätstheorie gehört haben, aber nicht so recht etwas damit anzufangen wussten. Deshalb wird zu Beginn auch ein sehr kurzer Abriss über Einsteins Spezielle Relativitätstheorie (SRT) gegeben, der zum Verständnis der ART wichtig ist.

Wie bin ich zu Einsteins Relativitätstheorien gekommen? Schon als Schüler hatte mich Einsteins Wirken interessiert, weshalb ich mir Bücher von und über ihn besorgt hatte. Insbesondere hatte mich das Zwillingsparadoxon fasziniert, das man sogar mit Schulmathematik verstehen kann. Später hatte ich in meinem Physikstudium in Hamburg das Glück, bei zwei sehr renommierten Wissenschaft-

lern, Pascal Jordan und Wolfgang Kundt, Vorlesungen über die SRT und ART zu hören.

Während meines Berufslebens hatte ich jedoch kaum etwas damit zu tun. Erst viele Jahre später kam ich darauf zurück und machte die Relativitätstheorie zu meinem Hobby, das schließlich zusammen mit einem Co-Autor zu einem Sachbuch führte: Einsteins Theorien – Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie für interessierte Einsteiger und zur Wiederholung – von Bernd Sonne und Reinhard Weiß. Das Buch ist ebenfalls bei Springer Spektrum erschienen. Es enthält viele ausführliche Rechnungen und Erläuterungen, die man auch nachvollziehen kann. Es behandelt sehr viele Themen dieses *essentials* und kann deshalb bei Bedarf zu Rate gezogen werden.

Für die kritische Durchsicht des Manuskriptes sowie für Hinweise auf Kürzungen oder Ergänzungen danke ich sehr Herrn Reinhard Weiß.

Ich danke dem Verlag Springer-Spektrum, dass er mir die Gelegenheit gegeben hat, dieses *essential* zu schreiben, sowie für die redaktionelle und inhaltliche Betreuung durch Frau Harsdorf, Frau Kanjwani und Frau Maly.

Einige Abbildungen enthalten Cliparts der Firma Microsoft, deren Verwendung mir bereits für mein vorheriges Buch freundlicherweise erlaubt wurde. Einige Bilder sind auch dem Internet entnommen. Die Quelle ist direkt bei den Bildern angegeben.

Im Oktober 2015

Bernd Sonne

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Einstieg in Einsteins Spezielle Relativitätstheorie	3
2.1	Raum und Zeit bei Newton	3
2.2	Eigenzeit und Koordinatenzeit	5
2.3	Raum-Zeit-Koordinatensystem	6
3	Prinzipien der Speziellen Relativitätstheorie	9
3.1	Äquivalenz von Masse und Energie	9
3.2	Zusammenfassung der Speziellen Relativitätstheorie	10
4	Historie – Wie es zur Allgemeinen Relativitätstheorie kam	11
4.1	Newtons Gravitationstheorie	11
5	Gedankenexperimente	13
5.1	Der aufsteigende Fahrstuhl	13
5.2	Der fallende Fahrstuhl	14
5.3	Die rotierende Scheibe	16
6	Grundlagen der ART	19
6.1	Das Mach'sche Prinzip	19
6.2	Das Äquivalenzprinzip	20
6.3	Das Kovarianzprinzip	22
6.4	Das Korrespondenzprinzip	23
6.5	Was ist in den Theorien endlich, relativ oder absolut?	26
6.6	Geometrie und Materie: gekrümmter Raum	26

7 Experimentelle Bestätigungen und Anwendungen der ART	29
7.1 Periheldrehung des Planeten Merkur	29
7.2 Lichtablenkung im Gravitationsfeld	30
7.3 Gravitative Rotverschiebung	32
7.4 Global Positioning System (GPS)	34
7.5 Gravitationswellen	35
7.6 Schwarze Löcher	37
7.7 Zeitreisen	39
8 Entwicklung des Universums: Weltmodelle	41
8.1 Das kosmologische Prinzip	41
8.2 Das Olbers'sche Paradoxon	42
8.3 Zeitliche Entwicklung des Universums	42
8.4 Heutiges Modell	44
9 Das Anthropische Prinzip	47
9.1 Wir beobachten nur das, was uns erlaubt zu existieren!	47
10 Zusammenfassung ART	49
11 Einsteins Werke	51
Anhang	55
Literatur (kleine Auswahl)	59