
BestMasters

Mit „**BestMasters**“ zeichnet Springer die besten Masterarbeiten aus, die an renommierten Hochschulen in Deutschland, Österreich und der Schweiz entstanden sind. Die mit Höchstnote ausgezeichneten Arbeiten wurden durch Gutachter zur Veröffentlichung empfohlen und behandeln aktuelle Themen aus unterschiedlichen Fachgebieten der Naturwissenschaften, Psychologie, Technik und Wirtschaftswissenschaften. Die Reihe wendet sich an Praktiker und Wissenschaftler gleichermaßen und soll insbesondere auch Nachwuchswissenschaftlern Orientierung geben.

Springer awards “**BestMasters**” to the best master’s theses which have been completed at renowned Universities in Germany, Austria, and Switzerland. The studies received highest marks and were recommended for publication by supervisors. They address current issues from various fields of research in natural sciences, psychology, technology, and economics. The series addresses practitioners as well as scientists and, in particular, offers guidance for early stage researchers.

Weitere Bände in der Reihe <https://link.springer.com/bookseries/13198>

Marvin Horst

Allgemeine Relativitätstheorie und Sternmodelle

Eine Einführung für
Lehramtsstudierende



Springer Spektrum

Marvin Horst
Oppenheim, Deutschland

ISSN 2625-3577

ISSN 2625-3615 (electronic)

BestMasters

ISBN 978-3-658-36136-5

ISBN 978-3-658-36137-2 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-36137-2>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2022

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: Marija Kojic

Springer Spektrum 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

Danksagung

Mit dieser Arbeit und dem damit verbundenen Ende meines Studiums möchte ich einige dankenden Worte aussprechen.

An erster Stelle möchte ich Herrn Prof. Scherer danken, der mit seiner Betreuung und seinem Engagement all dies erst ermöglicht hat. Wenn auch der Start aufgrund der COVID-19 Situation nicht ganz einfach verlief, schafften wir es schnell regelmäßige Videokonferenzen zu organisieren. Diese äußerst angenehmen, zielführenden und gewinnbringenden Treffen sorgten dafür, dass ich mich kontinuierlich mit den Inhalten auseinandergesetzt habe. Weiterhin wurden in diesen intensiven, gerne mal zwei Stunden dauernden, Gesprächen einige Probleme und Unklarheiten aufgedeckt. Ein besonderes Dankeschön möchte ich für die Zeit, die Herr Prof. Scherer sich generell für mich und die Arbeit genommen hat, aussprechen. Verständlicherweise soll auch Herr Prof. Reuter für seine Arbeit als Zweitgutachter gedankt werden.

Schließlich gebührt mein Dank auch meinen Kommilitonen und Freunden, die das Studium unvergesslich gemacht haben. Seien es die Lerneinheiten vor anstehenden Prüfungen oder der ein oder andere gemeinsame Abend. All diese Situationen haben die vergangenen fünf Jahre unbeschreiblich wertvoll gemacht. In diesem Zusammenhang möchte ich meiner Freundin Katharina danken, die in jeder noch so stressigen Situation während des Studiums an meiner Seite stand, immer zu Helfen wusste und stets einen kühlen Kopf bewahren konnte.

Zu guter Letzt danke ich meiner Mutter, meiner Oma und insbesondere meinem Opa, der unglücklicherweise die zweite Hälfte meines Studiums nicht mehr miterleben konnte. Dennoch ist und bleibt er mein Vorbild und begleitet mich in meinem Herzen auf jedem noch bevorstehenden Wege. Meine Familie war und ist auch außerhalb des Studiums in jeglicher Situation mit Rat und Tat für mich da.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
Teil I Allgemeine Relativitätstheorie		
2	Vorläufer der modernen Gravitationstheorie	7
2.1	Grundgesetze der Newton'schen Mechanik	7
2.2	Inertialsysteme und Relativitätsprinzip	9
2.3	Die erste Gravitationstheorie	10
3	Spezielle Relativitätstheorie	15
3.1	Von der Galilei- zur Lorentz-Transformation	15
3.2	Ergebnisse der SRT	22
3.3	Tensoren im Minkowski-Raum	26
4	Die ersten Schritte	31
4.1	Ziele der ART	31
4.2	Äquivalenzprinzip	34
4.3	Krümmung und Riemann'scher Raum	38
4.4	Bewegung im Gravitationsfeld und Christoffel-Symbole	47
4.5	Geodätengleichung	55
5	Mathematische Verallgemeinerungen auf gekrümmten Räumen	63
5.1	Tensoren im Riemann'schen Raum	64
5.2	Kovariante Ableitung	68
5.3	Parallelverschiebung	72
5.4	Krümmungstensor und seine Kontraktionen	74

6	Die ART und die Einstein'schen Feldgleichungen	83
6.1	Kovarianzprinzip	84
6.2	Energie-Impuls-Tensor	84
6.3	Die Einstein'schen Feldgleichungen	86
6.4	Schwarzschild-Metrik	91
Teil II Sternmodelle		
7	Thermodynamische Grundlagen und Hydrodynamik	101
7.1	Ideales Gas und thermodynamische Zustandsgleichungen	102
7.2	Kontinuitätsgleichung und Euler-Gleichung	105
7.3	Relativistische Hydrodynamik	109
8	Der Sternalltag	113
8.1	Sternentstehung und Brennphasen	113
8.2	Endstadien der Sternentwicklung	127
9	Statische Sternmodelle	137
9.1	Sternaufbaugleichungen	138
9.2	Lane-Emden-Gleichung	144
9.3	Tolman-Oppenheimer-Volkoff-Gleichung	151
9.4	Grenzmassen kompakter Objekte	161
10	Dynamische Sternmodelle	171
10.1	Zeitabhängige Metrik und Birkhoff-Theorem	171
10.2	Gravitationskollaps	174
11	Fazit und Ausblick	185
Literaturverzeichnis		191