

BestMasters

RESEARCH

Rebecca Maksimović

# Allgemeine Relativitätstheorie und die Darstellung Schwarzer Löcher in interaktiven Medien

Eine Analyse am Beispiel des  
Computerspiels „Elite Dangerous“

MOREMEDIA



Springer Spektrum

---

# 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.

---

Rebecca Maksimović

# Allgemeine Relativitätstheorie und die Darstellung Schwarzer Löcher in interaktiven Medien

Eine Analyse am Beispiel des  
Computerspiels „Elite Dangerous“



Springer Spektrum

Rebecca Maksimović  
Darmstadt, Deutschland

ISSN 2625-3577

ISSN 2625-3615 (electronic)

BestMasters

ISBN 978-3-658-39252-9

ISBN 978-3-658-39253-6 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-39253-6>

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 an 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

An erster Stelle möchte ich mich bei Prof. Dr. Stefan Scherer bedanken, der mich mit seiner herausragenden Betreuung durch diese Masterarbeit geführt hat. Er war stets schnell erreichbar, erklärte mir komplexe Sachverhalte auf sehr verständliche Art und entwirrte so einige meiner Gedankenknoten. Dankbar bin ich auch, dass er sich auf das etwas ungewöhnliche Thema einließ.

Ein weiterer Dank geht an meine Eltern Iris und Wolfgang Prawitz, die mich während meines gesamten Studiums und während dieser Arbeit durchgehend voll unterstützt haben und mir immer das Gefühl gaben, dass ich stolz auf meine Leistungen und Erfolge sein kann.

Vielen Dank auch an Julia Dittmann, Leonie Mettler, Laura Sandner und Julian Parrino, die mich durch ihre Korrekturen an dieser Arbeit vor einigen sprachlichen, formalen und inhaltlichen Fettnäpfchen bewahrt haben.

Ein besonderer Dank geht an meinen Ehemann und „Raumschiffpiloten“ David Maksimović, der mich zu dem Thema dieser Arbeit inspiriert hat. Er hat mich in allen technischen Belangen, insbesondere bei den Messungen, unterstützt. Außerdem konnte ich alle meine Ideen und Gedankengänge mit ihm besprechen. Er hat mir geholfen, den Spaß und die Motivation über den gesamten Arbeitszeitraum zu behalten, und mich auch dazu gebracht hin und wieder Pausen einzulegen.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	1
<b>2</b>	<b>Allgemeine Relativitätstheorie</b>	3
2.1	Die Newton'sche Gravitationstheorie und ihre Grenze	3
2.2	Einsteins Idee und Prinzipien der ART	5
2.3	Die Einstein-Gleichungen	9
2.4	Der metrische Tensor	11
2.4.1	Tensoren und deren Transformation	11
2.4.2	Spielen mit dem Satz des Pythagoras	13
2.5	Bewegung im Gravitationsfeld	17
2.5.1	Geodätengleichung	17
2.5.2	Christoffel-Symbole	19
2.5.3	Näherung der Newton'schen Bewegungsgleichung	22
2.6	Kovariante Ableitung	24
2.7	Die Krümmung des Raums	28
2.7.1	Krümmung anschaulich: Parallelverschiebung	28
2.7.2	Riemannscher Krümmungstensor, Ricci-Tensor und Krümmungsskalar	30
2.8	Energie-Impuls-Tensor	36
2.9	Zusammensetzung der Einstein-Gleichungen	39
2.10	Schwarzschild-Lösung	44
2.10.1	Lösung der Vakuum-Feldgleichungen	44
2.10.2	Eigenschaften der Schwarzschild-Lösung	51
<b>3</b>	<b>Schwarze Löcher und Effekte der ART</b>	57
3.1	Schwarze Löcher	57
3.2	Bewegung im Zentralfeld	58

---

3.3	Lichtablenkung im Gravitationsfeld .....	64
3.4	Gravitative Rotverschiebung .....	67
<b>4</b>	<b>Schwarze Löcher in „Elite Dangerous“ .....</b>	<b>71</b>
4.1	Kurze Vorstellung des Spiels .....	71
4.2	Gravitationslinseneffekt in „Elite Dangerous“ .....	72
	4.2.1 Methode der Messung .....	73
	4.2.2 Rechnung .....	76
4.3	Gravitative Rotverschiebung in „Elite Dangerous“ .....	84
4.4	Fazit .....	89
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>95</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>97</b>



# Einleitung

# 1

Schwarze Löcher sind in der populären Kultur im Genre Science-Fiction weit verbreitet. Sie werden in Büchern beschrieben<sup>1</sup> und in Filmen<sup>2</sup> und Videospielen wie „Elite Dangerous“ dargestellt. Das Wissen der meisten Menschen über Schwarze Löcher stammt darum sehr wahrscheinlich aus diesen Medien. Deshalb stellt sich die Frage, wie wissenschaftlich genau diese Darstellungen sind. In dieser Arbeit wird genau dieser Frage nachgegangen. Dafür werden speziell zwei Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie, die Lichtablenkung und die gravitative Rotverschiebung, betrachtet und ihre Umsetzung in dem interaktiven Videospiel „Elite Dangerous“ untersucht.

In dieser Arbeit wird von dem Wissensstand, den ich als Physik-Lehramtsstudentin erreicht habe, ausgegangen und von dort aus werden die benötigten Grundlagen für die Untersuchung erarbeitet. In Kapitel 2 der vorliegenden Arbeit wird deshalb die Allgemeine Relativitätstheorie dargestellt. Das Kapitel beginnt dafür mit einer kurzen Vorstellung der Newton’schen Gravitationstheorie und ihrer Grenze, worauf aufbauend die grundlegenden Prinzipien der Allgemeinen Relativitätstheorie und Einsteins neue Ideen qualitativ erläutert werden. Dabei wird die Kenntnis der Speziellen Relativitätstheorie vorausgesetzt. Es schließt sich eine Vorstellung der Einstein-Gleichungen an. Die verschiedenen Komponenten der Gleichungen (Metrischer Tensor, Christoffelsymbole, Riemann’scher Krümmungstensor, Ricci-Tensor und Energie-Impuls-Tensor) werden im Verlauf des Kapitels hergeleitet und dargelegt. Aus diesen Komponenten wird dann in Abschnitt 2.9 die

---

<sup>1</sup> Zum Beispiel in dem Buch „Der Abgrund jenseits der Träume“ von Peter F. Hamilton, Piper Verlag, 2015.

<sup>2</sup> Zum Beispiel in dem Film „Star Trek – Die Zukunft hat begonnen“ (2009).

Zusammensetzung der Einstein-Gleichung begründet. Am Ende des Kapitels folgt dann eine Lösung der Einstein-Gleichungen: die Schwarzschild-Lösung.

Auf der Allgemeinen Relativitätstheorie basierend werden in Kapitel 3 Schwarze Löcher kurz vorgestellt. Außerdem werden die Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie, die Lichtablenkung und die gravitative Rotverschiebung am Schwarzen Loch, theoretisch diskutiert und dazu praktische Beispiele genannt.

Daran schließt sich mit Kapitel 4 die eigentliche Untersuchung des Spiels an. Diese geschieht im Spiel an dem Schwarzen Loch „HIP 34707 B“. Nach einer kurzen Skizzierung des Spiels folgt für beide Effekte jeweils eine Beschreibung, wie sie untersucht werden und wie und welche Daten dafür aus dem Spiel, zum Beispiel durch Bildschirmaufnahmen, entnommen werden. Unter Verwendung der Resultate aus Kapitel 3 kann dann bestimmt werden, wie sich die Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie im Spiel theoretisch darstellen sollten. Dies lässt sich dann damit vergleichen, wie sich der Effekt in dem Spiel tatsächlich präsentiert. Aus diesem Vergleich kann geschlossen werden, ob und inwieweit die Darstellung von Schwarzen Löchern in dem Videospiel „Elite Dangerous“ wissenschaftlich akkurat ist.