

Seminararbeit

Wurmlöcher – Realität oder nur

Fantasie ?

Darius Kettler

Greselius Gymnasium Bramsche

Jahrgang 12

Seminarfach Astronomie

Fachlehrer: Herr Riemer

Abgabe: 07.03.2022

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	3
2 Grundvoraussetzung	3
2.1 Relativitätstheorie.....	3
3 Was ist ein Wurmloch?.....	4
4 Erforschungen von Wurmlöchern.....	5
4.1 Schwarzschild-Metrik.....	5
4.2 Einstein-Rosen-Brücken.....	5
4.3 Forschungen von John Wheeler und Robert Fuller.....	6
4.4 Erkenntnisse des Physikers Kip Thorne.....	6
4.5 Exotische Materie.....	7
4.6 Quantenfluktuationen.....	7
4.7 Casimir-Effekt.....	7
4.7.1 Negative Energie unter Berücksichtigung der Quantenungleichungen.....	8
4.8 Wurmlöcher durch die Verbindung von Relativitätstheorie und Quantenmechanik.....	9
4.8.1 Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon.....	10
4.8.2 Verschränkung von schwarzen Löchern.....	10
4.8.3 Wurmlöcher mithilfe der Dirac-Gleichung.....	12
5 Was ermöglichen Wurmlöcher für uns Menschen?.....	13
6 Ausblick und Fazit.....	14
7 Literaturverzeichnis.....	15
8 Quellenverzeichnis.....	15
9 Versicherung der selbstständigen Erarbeitung.....	16
10 Einverständniserklärung zur Veröffentlichung.....	16

1 Einleitung

In bekannten Science-Fiction-Filmen, wie „Interstellar“ oder „Event Horizon“, werden immer mal wieder sogenannte „Wurmlöcher“ in die Geschichten eingebaut, um mithilfe von Raum-Zeit-Krümmungen interstellare Reisen durch Raum und Zeit anzutreten. Statt dem „normalen“ Weg kann nun eine Abkürzung genommen werden. Doch dabei stellt man sich die Frage, ob es solche „Raum-Zeit-Tunnel“ in der Realität auch wirklich geben kann, wie sie entstehen und ob sie womöglich auch künstlich hergestellt werden könnten. Obwohl Wurmlöcher noch nie richtig beobachtet wurden, stellt es immer wieder ein interessantes Themenfeld für viele Physiker dar. In dieser Seminararbeit soll es sich um die aufgeführten Fragestellungen gehen und eine Übersicht über das Thema Wurmlöcher geben.

2 Grundvoraussetzung

Für das Thema Wurmlöcher bedarf es als Grundvoraussetzung das Wissen der allgemeinen Relativitätstheorie von Albert Einstein.

2.1 Relativitätstheorie

Die Relativitätstheorie versteht die Raum-Zeit, die uns umgibt, als einen vierdimensionalen, flexiblen Raum. Drei Raumdimensionen und eine Zeitdimension¹ Dabei kann, wenn genügend Energie aufgebracht wird, durch Gravitationskräfte die Raumzeit verändert werden². Das heißt, je stärker die Energie (z.B. Masse, Licht, elektrische Ladung³), desto stärker wird die Raumzeit gekrümmt. Der flexible Raum lässt sich auch durch das Beispiel eines Trampolins verdeutlichen. Je größer die Masse, die auf das Trampolin trifft, desto mehr wird das Trampolin (also die Raumzeit)

1 <https://www.derstandard.de/story/2000125390927/wurmloecher-durch-zeit-und-raum-ganz-ohne-exotische-materie>

2 <https://de.wikipedia.org/wiki/Relativit%C3%A4tstheorie>

3 <https://de.wikipedia.org/wiki/Wurmloch>

eingedrückt. Dabei bestimmt die Raumzeit-Krümmung ebenfalls wie sich Massen zu dieser verhalten⁴.

3 Was ist ein Wurmloch?

Ein Wurmloch stellt prinzipiell eine Verbindung zwischen zwei Orten in der Raumzeit dar. Diese beiden Orte sind durch einen „Tunnel“ in der Raumzeit miteinander verbunden. Diese Verbindung wird durch starke Gravitationskräfte ausgelöst, wie z. B. durch schwarze Löcher. Ein Modell kann dabei das Prinzip eines Wurmlochs genauer darstellen. Man stellt sich die Raumzeit als ein Blatt Papier vor. Wenn nun zwischen zwei Punkten auf dem Papier eine Verbindung entstehen soll, ist es nötig das Blatt Papier (also die Raumzeit) zu krümmen. Befestigt man nun z. B. einen Strohhalm durch das gekrümmte Papier und verbindet somit die beiden Punkte auf dem Papier, erhält man ein verständliches Modell eines Wurmlochs⁵. Statt den normalen Weg zwischen den beiden Punkten in der Raum-Zeit zu nehmen, kann nun eine Abkürzung genommen werden, indem sich diese Raumzeit-Krümmung zu Nutze gemacht wird. Theoretisch wären auch Zeitreisen durch Wurm Löcher möglich, da nicht nur der Raum sondern auch die Zeit gekrümmt wird. Jedoch könnten Zeitreisen das grundlegende Prinzip der Kausalität verletzen⁶, da durch Zeitreisen diverse Paradoxen entstehen könnten. Wurm Löcher könnten auch Reisen zwischen Dimensionen möglich machen und damit die Existenz eines Multiversums begründen⁷

4 <https://www.youtube.com/watch?v=DGfzjUfCSmM&t=12s>

5 <https://www.scinexx.de/dossierartikel/kosmische-abkuerzung/>

6 <https://www.final-frontier.ch/kuenstlichewurmloecher>

7 <https://www.youtube.com/watch?v=YdLRHbP6DT8>

4 Erforschungen von Wurmlöchern

Ludwig Flamm stellte 1916 zum ersten mal in der Physik die Hypothese von Wurmlöchern auf⁸.

4.1 Schwarzschild-Metrik

Die Schwarzschild-Metrik, die von dem Physiker Karl Schwarzschild im Jahr 1916 aufgestellt wurde, gilt als eine der ersten Lösungen der Feldgleichungen von Albert Einstein, die im Rahmen der Relativitätstheorie aufgetreten sind. Die Schwarzschild-Metrik beschreibt die Gravitation einer ungeladenen und nicht-rotierenden Punktmasse und wird üblicherweise dazu verwendet um den Außenraum von schwarzen Löchern zu beschreiben. Die Schwarzschild-Metrik diente als Grundlage zur Beschreibung der Einstein-Rosen-Brücken, die im nächsten Abschnitt erläutert werden.⁹

4.2 Einstein-Rosen-Brücken

Im Jahr 1935 beschrieben Albert Einstein und Nathan Rosen das Modell eines Wurmlochs. Beide Forscher gingen, aufgrund der von Einstein erschlossenen Relativitätstheorie, davon aus, dass eine Verbindung von zwei schwarzen Löchern mathematisch ein Wurmloch begründen könnten. Als Grundlage diente hierfür die vorher erwähnte Schwarzschild-Metrik. Die Schwarzschild-Metrik würde jedoch auf Grenzen treffen, wenn schwarze

8 <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/4029462/Wurmloecher.pdf>

9 <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/schwarzschild-loesung/431>

Löcher aus explodierenden Sternen betrachtet werden¹⁰. Zudem würden die Einstein-Rosen-Brücken unter Berücksichtigung der Schwarzschild-Metrik nur aus gekrümmter Raumzeit bestehen und nicht aus Materie, was einem schwarzen Loch widersprechen würde¹¹. Dabei kann eine Verbindung nicht nur zwischen zwei schwarzen Löchern bestehen, sondern auch zwischen einem schwarzen Loch und einem sogenannten weißen Loch. Ein weißes Loch stellt dabei den Gegenpol zu einem schwarzen Loch dar. Statt Materie aufzunehmen, wie das schwarze Loch, gibt das weiße Loch Materie ab. Das heißt diese Art Wurmloch wäre nur einseitig durchquerbar und würde eine Heimkehr unmöglich machen.¹²

4.3 Forschungen von John Wheeler und Robert Fuller

Im Jahr 1962 fanden die beiden Physiker John Wheeler und Robert Fuller zusätzlich zu den Erkenntnissen von Albert Einstein und Nathan Rosen heraus, dass Wurmlöcher im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie durch die massiven Gravitationskräfte ziemlich instabil wären und in sich zusammenfallen würden. Sie fanden außerdem heraus, dass Wurmlöcher theoretisch nicht dauerhaft offen sind, sondern sich, ähnlich eines Zyklus, regelmäßig öffnen und schließen würden, was das Betreten eines Wurmlochs schwierig machen würde.¹³

4.4 Erkenntnisse des Physikers Kip Thorne

Während der Physiker Kip Thorne im Jahr 1985 an dem Drehbuch zum Film „Contact“ mitwirkte, beschäftigte er sich aufgrund des Films, wie Wurmlöcher durchquerbar sein könnten. Er stieß genauso wie John Wheeler und Robert Fuller auf das Problem, dass Wurmlöcher aufgrund der massiven Gravitationskräfte, die für die Krümmung sorgen, ziemlich instabil wären und somit einen Transfer unmöglich machen würde. Da normale Materie

10 <https://www.scinexx.de/dossierartikel/weg-ohne-wiederkehr/>

11 <https://www.spektrum.de/magazin/verschraenkte-schwarze-loecher/1432726>

12 Siehe 7

13 Siehe 8

den Raum zusammenzieht, wird Materie benötigt die das Gegenteil bewirkt, also den Raum abstößt. Dazu wird eine negative Energiedichte benötigt, um diesen Effekt zu erzielen¹⁴.

4.5 Exotische Materie

Materie mit negativer Energie wird auch exotische Materie genannt, die dem Kollaps eines Wurmlochs entgegen wirken kann.¹⁵

4.6 Quantenfluktuationen

Eine Art exotische Materie könnte theoretisch sogar künstlich erzeugt werden. Dafür werden sich die sogenannten Quantenfluktuationen im Vakuum des Weltraums zu nutze gemacht. Das Vakuum des Weltraums ist nämlich nicht energielos, sondern behält ständig ein bestimmtes Energieniveau bei. Im Weltraum entstehen und vergehen ständig Paare von Teilchen und Antiteilchen. Dieses Vorgehen kann die Erzeugung einer negativen Energiedichte ermöglichen. Dabei kann der Casimir-Effekt angewendet werden.¹⁶

4.7 Casimir-Effekt

Dadurch, dass im Vakuum des Weltalls ständig Paare von Teilchen und Antiteilchen zerstört werden und das Energieniveau des Weltraums 0 beträgt, kann sich der Casimir-Effekt zur Gewinnung von negativer Energie zu nutze gemacht werden. Dabei wird der Raum, wo Paare von Teilchen und Antiteilchen entstehen können, eingegrenzt. Das führt dazu, dass sich die Quantenfluktuation nicht mehr gänzlich entfalten kann und nur noch bestimmte Wellenlängen an Quantenfluktuationen zugelassen werden. Dadurch ist die Energie innerhalb der Platten geringer als außerhalb. Da der Energiegehalt des Weltraums, wie vorher erwähnt 0 beträgt, ist nun die Energie innerhalb der Platten negativ. Gemäß der Theorie könnte damit ein

14 <https://www.final-froniter.ch/kuenstlichewurmloecher>

15 siehe 7

16 <https://www.scinexx.de/dossierartikel/exotische-stabilisatoren/>

Wurmloch offen gehalten werden. Doch dabei würden sich jedoch auch Probleme bemerkbar machen. Negative Energie wäre schwierig so zu manipulieren, sodass die Öffnung eines Wurmlochs offengehalten wird. Zusätzlich müsste die von dem Casimir-Effekt gewonnene negative Energie in einer ausreichenden Masse vorliegen.¹⁷ Da beim Casimir-Effekt lediglich eine geringe Menge an negativer Energie gewonnen werden könnte, würde das die Offenhaltung eines Wurmlochs einschränken. Um ein Wurmloch mit negativer Energie zu stabilisieren, wäre eine negative Masse vom Ausmaß des Jupiters nötig.¹⁸

4.7.1 Negative Energie unter Berücksichtigung der Quantenungleichungen

Es stellt sich jedoch ein weiteres Problem bei der Erzeugung von negativer Energie heraus, wenn die Quantenungleichungen berücksichtigt werden. Diese besagen, dass die räumliche Ausdehnung von negativer Energie kleiner ist, je größer die negative Energie wird. Eine weitere Abhängigkeit von der Größe der negativen Energie stellt außerdem die Zeit dar. Je größer die Dichte der negativen Energie, desto kürzer ist die zeitliche Ausdehnung dieser. Das heißt, dass viel negative Energie nur kurz andauern kann. Wenn wir uns nun wieder den Casimir-Effekt anschauen, stellt sich heraus, dass für die Erzeugung einer großen negativen Energiedichte ein möglichst kleiner Plattenabstand benötigt wird und die negative Energie nur für eine kurze

¹⁷ Siehe 16

¹⁸ Siehe 4

Zeitspanne erzeugt werden könnte. Wenn also Wurmlöcher mit mithilfe des Casimir-Effekts für eine längere Zeit offen gehalten werden sollen, müssten diese mikroskopisch klein sein. Es besteht jedoch noch ein weiteres Problem unter der Berücksichtigung der Quantenungleichungen. Nämlich das auf einen negativen Energiepuls ein größerer positiver Energiepuls folgen muss. Diese Erkenntnis würde zu dem Schluss führen, dass sich die negative Energie und die daraus resultierende positive Energie wieder ausgleichen würde. Dadurch, dass letztendlich, bei der Erzeugung von negativer Energie, mehr positive Energie als negative entsteht, würde ein Wurmloch schnell wieder kollabieren. Auch bei dem Versuch den negativen Energiepuls von dem positiven Energiepuls zu trennen zeigten sich Probleme. Wenn der Versuch unternommen werden würde einen negativen Energiepuls einzufangen und z.B. in einem Behälter festzuhalten, bevor der positive Energiepuls folgt, würde das Problem auftreten, dass durch das Schließen des Behälters, in dem sich die negative Energie befindet, wieder ein positiver Energieschwall entstehen würde, wodurch sich die negative und die positive Energie wieder ausgleichen würde¹⁹.

4.8 Wurmlöcher durch die Verbindung von Relativitätstheorie und Quantenmechanik

Ein weiterer Ansatz, um die Existenz von Wurmlöchern zu begründen, stellt die Verbindung von Relativitätstheorie und Quantenmechanik dar. Der Ansatz ist auch unter dem Namen ER=EPR bekannt. Das ER steht für die Einstein-Rosen-Brücke und das EPR für das Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon, welches im nächsten Kapitel erläutert wird.²⁰ Unter der Quantenmechanik versteht man im Allgemeinen eine physikalische Theorie, die sich mit Zuständen und Vorgängen von Materie beschäftigt. Die Quantenmechanik beschäftigt sich dabei eher mit Materien, die von der

¹⁹ Lawrence H. Ford/Thomas A. Roman: Spektrum der Wissenschaft aus dem 3. März 2000 S.42/43

²⁰ <https://www.scinexx.de/7dossierartikel/verschraenkte-raumzeit/>

Größenordnung kleiner sind als Atome.²¹

4.8.1 Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon

Albert Einstein und einige Kollegen beschäftigten sich im Jahr 1935 mit dem Phänomen der Quantenverschränkung. Eine Quantenverschränkung selber beschreibt mehrere Teilchen, die miteinander im Quantensystem gekoppelt sind. Würde sich ein Zustand eines Teilchens in der Verschränkung auf irgendeine Weise verändern, verändern sich auch die Zustände der anderen Teilchen. Die Zustände der verschränkten Teilchen bleiben gleich.²² Albert Einstein jedoch lehnte die Verschränkung von Teilchen ab, da dies gegen das physikalische Gesetz der Lokalität verstoßen würde, weshalb das Phänomen auch als Paradoxon bezeichnet wird.²³ Doch dabei bieten die quantenmechanischen Verschränkungen einen interessanten Ansatz zur Begründung von Wurmlochern, indem z.B. davon ausgegangen wird, dass diese Verschränkung eventuell auch zwei schwarze Löcher betreffen könnte.

4.8.2 Verschränkung von schwarzen Löchern

Wenn davon ausgegangen wird, dass theoretisch auch zwei schwarze Löcher von einer quantenmechanischen Verschränkung betroffen sein könnten, würde das ein Wurmloch begründen können. Zudem würde es ein zentrales Problem in der Physik klären, da Informationen, die den Ereignishorizont (Teil eines schwarzen Lochs bei der eine Information für immer verschwindet) passieren, nicht rekonstruiert werden kann. Die Grundlage für diese Annahme bot die sogenannte Hawking-Strahlung, die in den 70er Jahren von Stephen Hawking entdeckt wurde. Er konnte herausfinden, dass schwarze Löcher „verdampfen“ und dabei Strahlung in Form von Photonen abgeben. Aufgrund der Hawking-Strahlung konnten schwarzen Löchern Temperaturen zugeordnet werden. Dieses führte dazu,

21 <https://de.wikipedia.org/wiki/Quantenmechanik>

22 Siehe 20

23 <https://de.wikipedia.org/wiki/Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon>

dass angenommen werden konnte, dass schwarze Löcher aus vielen Einzelteilen bestehen müssten, dessen Bewegung für die Temperatur eines schwarzen Lochs sorgen würde. Deswegen konnten nun schwarze Löcher als Quantenobjekte betrachtet werden, was eine quantenmechanische Verschränkung zwischen schwarzen Löchern ermöglichen würde. Es könnte eine Information oder Teilchen die vom ersten schwarzen Loch aufgenommen wurde, augenblicklich im verschränkten zweiten schwarzen Loch registriert werden, da das Aufnehmen der Information im ersten schwarzen Loch eine Zustandsänderung zur Folge hat, die das zweite schwarze Loch ebenfalls durch die quantenmechanische Verschränkung beeinflussen würde. Dadurch kann die eine Information, die in das erste schwarze Loch gefallen ist, im zweiten wieder registriert werden. Dieser Effekt hätte Ähnlichkeiten mit einer Quantenteleportation.²⁴ Einige Forscher versuchten auch die Verschränkung von schwarzen Löchern in einem Labor zu simulieren. Dazu benutzten sie einen Schaltkreis aus ultrakalten Ionen. Als ultrakalte Ionen benutzten die Forscher in ihrem Experiment Ytterbium-Ionen. Da die Quantenphysik darlegt, dass Informationen niemals verloren gehen, wird davon ausgegangen, dass Informationen, bei Eintritt in das schwarze Loch, durcheinander gemischt werden. Diese Form der Quantenverschlüsselung versuchten die Forscher in ihrem Experiment ebenfalls zu berücksichtigen. Jedoch bereitete dabei die sogenannte Dekohärenz Probleme. Die Dekohärenz tritt ein, wenn Teilchen mit Partikeln in der Umgebung wechselwirken. Dadurch würde die Information eines Quantensystems entweichen und verloren gehen. Um der Dekohärenz zu entgehen und gleichzeitig eine Quantenverschlüsselung zu simulieren, benutzten die Forscher ein System aus sieben verschränkten Ytterbium-Ionen, wobei sie die verschränkten Ionen in zwei Teilsysteme mit jeweils drei Ionen aufteilten. Ein Ytterbium-Ion blieb übrig, welches dann für die Quantenteleportation verwendet wurde. Nun störten die Forscher die beiden Teilsysteme, um die Informationen der Systeme durcheinander zu mischen.

²⁴ Siehe 11

Dies sollte die Quantenverschlüsselung darstellen. Um nachzuweisen das Informationen der Teilsysteme wirklich vermischt wurden und nicht die Dekohärenz die Informationen verschlüsselt hatte, wurde nun das übrig gebliebene Ytterbium-Ion an die beiden Enden der Teilsysteme teleportiert. Dadurch, dass die Teleportation möglich war, konnte nachgewiesen werden, dass die Informationen der Teilsysteme durch die gezielten Störungen vermischt und nicht durch die Dekohärenz hervorgerufen wurden. Die Ionen waren also weiterhin miteinander verschränkt. Auch wenn das Experiment vielversprechend sein mag und die quantenmechanische Verschränkung von schwarzen Löchern möglich machen könnte, muss berücksichtigt werden, dass bei einer Verschränkung von schwarzen Löchern die Quantensysteme in einem vereinfachten Universum betrachtet werden (Anti-de-Sitter-Raum – negativ gekrümmter Raum) und nicht eine realistische Betrachtung des Universums berücksichtigt wird.²⁵

4.8.3 Wurm Löcher mithilfe der Dirac-Gleichung

Ein moderner Ansatz stellt die Begründung von Wurmlöchern mithilfe der Dirac-Gleichung dar. Die Dirac-Gleichung, die 1928 von Paul Dirac aufgestellt wurde und auf eine Verbindung von Relativitätstheorie und Quantenmechanik abzielt²⁶, beschreibt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Teilchens, z. B. dies eines Elektrons. Studenten von der Universität Oldenburg beschäftigten sich ebenfalls mit der Dirac-Gleichung und konnten berechnen, dass mathematisch unter der Berücksichtigung der Relativitätstheorie und der Quantenphysik, Elektronen ein Wurmloch durchqueren könnten. Jedoch nur unter der Voraussetzung, dass die Ladung der Elektronen und die Masse des Wurmlochs in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen. Es könnten dabei lediglich, laut der Rechnung, nur Elektronen ein Wurmloch durchqueren. Größere Objekte

25 <https://www.spektrum.de/news/wurmloecher-im-labor/1750274>

26 <https://de.wikipedia.org/wiki/Dirac-Gleichung>

wären in dieser mathematischen Herangehensweise nicht berücksichtigt ²⁷.

5 Was ermöglichen Wurm Löcher für uns Menschen?

In den vorherigen Kapiteln zu der Erforschung von Wurmlöchern wurde bereits darauf hingedeutet, dass die Existenz und die künstliche Erzeugung eines Wurmlochs zahlreichen Problemen unterliegt. Doch nehmen wir an, es gäbe Wurmlöcher wirklich oder wir könnten sich künstlich auf der Erde erschaffen, dann hätte das drastische Auswirkungen auf die Entwicklung der Menschen. Wie schon bereits erwähnt könnten durch Wurmlöcher Zeitreisen möglich sein. Doch Zeitreisen würden die kausale Struktur unseres Universums verletzen und wären deswegen womöglich unwahrscheinlich. Durch Wurmlöcher lassen sich jedoch auch weite Distanzen zurücklegen und somit wären wir in der Lage die Weiten des Universums zu erkunden. Stellen wir uns beispielsweise vor, dass Wurmlöcher von Menschen künstlich hergestellt werden könnten und dass wir Raumschiffe auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigen könnten, so könnten wir ein Ende eines Wurmlochs auf die Erde und das andere auf das Raumschiff platzieren. Wenn nun das Raumschiff beispielsweise zur Andromeda-Galaxie fliegt und dabei mit Lichtgeschwindigkeit beschleunigt, würde die Zeit, laut der Relativitätstheorie auf dem Raumschiff langsamer verlaufen. Das Raumschiff würde somit die Andromeda-Galaxie in 15 Jahren erreichen. Da jedoch die Zeit auf dem Raumschiff durch das Erreichen der Lichtgeschwindigkeit langsamer ist als auf der Erde, wären auf der Erde, wenn das Raumschiff die Andromeda-Galaxie erreicht rund 2,5 Millionen Jahre vergangen. Doch die Relativität der Zeit könnte sich durch Wurmlöcher „überlisten“ lassen. Dadurch, dass das Raumschiff mit einem Wurmloch mit der Erde verbunden ist, könnten Menschen auf der Erde ebenfalls in 15 Jahren die Andromeda-Galaxie erreichen, wenn das Wurmloch durchquert wird. Es zeigt sich also, dass durch die Erzeugung

²⁷ Siehe 1

von Wurmlöchern sich entfernte Orte im Universum erreichen lassen könnten, die wir sonst zu Lebzeiten nie erreichen würden.²⁸

6 Ausblick und Fazit

Insgesamt lässt sich sagen, dass Wurmlöcher, wie wir sie aus Science-Fiction-Geschichten kennen, weiterhin eine Theorie bleiben, die nur mathematisch unter bestimmten Voraussetzungen möglich sein könnten. Auch wenn es interessante Ansätze zur Beschreibung von Wurmlöchern gibt, sind sie immer noch nicht in der Natur bewiesen worden. Auch ein Transport von Menschen durch ein mathematisches Wurmloch würde sich als komplizierter herausstellen als eigentlich angenommen. Letztendlich werden sich Wurmlöcher wohl mit der Relativitätstheorie und der Quantenphysik vertragen müssen, um in der Realität existieren zu können. Würden sie jedoch existieren, hätte das enorme Folgen für die Menschheit.

²⁸ Siehe 1

7 Literaturverzeichnis

- Lawrence H. Ford/Thomas A. Roman: Wurmlöcher und Überlichtantriebe in Spektrum der Wissenschaft, 3/2000, S.40-41

8 Quellenverzeichnis

- <https://www.derstandard.de/story/2000125390927/wurmloecher-durch-zeit-und-raum-ganz-ohne-exotische-materie>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Relativit%C3%A4tstheorie>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Wurmloch>
- <https://www.youtube.com/watch?v=DGfzjUfCSmM&t=12s>
- <https://www.scinexx.de/dossierartikel/kosmische-abkuerzung/>
- <https://www.final-frontier.ch/kuenstlichewurmloecher>
- <https://www.youtube.com/watch?v=YdLRHbP6DT8>
- <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/4029462/Wurmloecher.pdf>
- <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/schwarzschild-loesung/431>
- <https://www.scinexx.de/dossierartikel/weg-ohne-wiederkehr/>
- <https://www.spektrum.de/magazin/verschraenkte-schwarze-loecher/1432726>
- <https://www.final-froniter.ch/kuenstlichewurmloecher>
- <https://www.scinexx.de/dossierartikel/exotische-stabilisatoren/>
- <https://www.scinexx.de7dossierartikel/verschraenkte-raumzeit/>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Quantenmechanik>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon>
- <https://www.spektrum.de/news/wurmloecher-im-labor/1750274>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Dirac-Gleichung>

Alle Internetadressen wurden am 06.03.2022 überprüft.

9 Versicherung der selbstständigen Erarbeitung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken (auch aus dem Internet) entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe. Verwendete Informationen aus dem Internet sind nach Absprache mit der Fachlehrerin bzw. dem Fachlehrer vollständig im Ausdruck zur Verfügung zu stellen.

Bramsche, den _____

Unterschrift der Schülerin / des Schülers

10 Einverständniserklärung zur Veröffentlichung

Hiermit erkläre ich, dass ich damit einverstanden bin, wenn die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Bramsche, den _____

Unterschrift der Schülerin / des Schülers