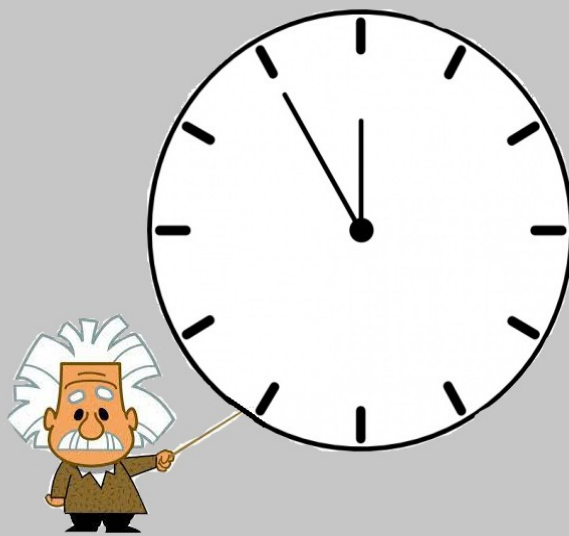


Steffen Steinmeyer

# Zeit in der Relativitätstheorie



Bramsche den 07. März 2022  
Florian Riemer

Greselius-Gymnasium Bramsche  
2021/2022 Seminarfach Astronomie

# Inhaltsverzeichnis

1) Einleitung.....	3
2) Raum und Zeit.....	4
2.1 Das Wesen der Zeit.....	4
2.1.1 Was ist Zeit?.....	4
2.1.2 Die imaginäre Zeit.....	5
2.2 Die Raumzeit.....	7
2.2.1 Was ist die Raumzeit?.....	7
2.2.2 Gekrümmte Lichtbahnen.....	8
2.3 Die Relativität von Raum und Zeit .....	9
3) Zeitdilatation.....	11
3.1 Zeitdilatation durch Geschwindigkeit.....	11
3.1.1 Die bewegte Lichtuhr.....	11
3.1.2 Das Myonenexperiment.....	13
3.2 Zeitdilatation durch Gravitation .....	14
3.2.1 Äquivalenzprinzip.....	14
3.2.2 Zeitreisen.....	16
4) Was lernen wir daraus?.....	18
5) Anhang.....	19
5.1 Verzeichnisse.....	19
5.1.1 Literaturverzeichnis.....	19
5.1.2 Abbildungsverzeichnis.....	20
5.2 Register.....	21
5.2.1 Sachwortregister.....	21
5.2.2 Formelregister und Konstanten.....	22
5.3 Erklärungen:.....	23
5.3.1 Selbständige Anfertigung.....	23
5.3.2 Veröffentlichung.....	23

## 1) Einleitung

Was ist Zeit? Wie sieht sie aus? Wie verhält sie sich? Alle diese Fragen möchte ich versuchen zu beantworten. Dabei werden wir einen Blick auf grundlegende physikalische Vorgänge werfen. Wir werden die Gesetze der Physik an ihre Grenzen bringen und die Grenzen des menschlichen Verstandes berühren.

Die größten Physiker und Philosophen haben sich Gedanken über das Wesen der Zeit gemacht: Platon, Newton, Einstein – sie alle haben ihren Beitrag zu unserem Verständnis der Zeit gebracht und ich werde versuchen, ihre Erkenntnisse zusammenzubringen. Dabei konzentriere ich mich im Besonderen auf die Zeit in der Relativitätstheorie. Wie verhält sich die Zeit in verschiedenen Situationen? Wie kann man die Zeit verlangsamen? Natalie Wolchover sagte einst: *„Das Konzept der Zeit ist eines der größten Rätsel der Wissenschaft: Wir scheinen uns auf einer hauchdünnen Grenzschicht zwischen Vergangenheit und Zukunft fortzubewegen, doch diese Gegenwart erscheint seltsamerweise in keinem der bestehenden physikalischen Gesetze.“*<sup>1</sup> Die Kuriosität der Zeit nimmt zu, je näher man sie betrachtet. Je intensiver man sich mit ihr beschäftigt, desto paradoxer erscheint sie uns. Bis hin zu dem Punkt, wo man die Zeit an sich anzweifelt.

Ich lade Sie ein auf eine Reise in Zukunft und Vergangenheit und was auch immer dazwischen liegen mag. Kommen Sie mit auf eine Reise durch die Raumzeit und sehen Sie echte Zeitreisen, Zeitschleifen und paradoxe Situationen nahe der Lichtgeschwindigkeit.

---

1 Wolchover, Natalie: Theoretische Physik- Eine neue Mathematik der Zeit. In: Spektrum der Wissenschaft, 04/21, S.62-67

## 2) Raum und Zeit

Raum und Zeit sind untrennbar miteinander verbunden. In diesem Kapitel möchte ich deshalb darauf eingehen, was Zeit ist und wie sie in Verbindung zum Raum steht. Jeder von uns hat seine Vorstellung von Zeit und Raum und doch ist unser allgemeines Bild häufig falsch. Über Jahrhunderte ging man davon aus, dass der Raum statisch und die Zeit unendlich fließend sei. Albert Einstein war es, der mit seiner Relativitätstheorie ein vollkommen neues Licht auf unsere Vorstellung des Universums warf. Er erkannte, dass nicht alle Uhren gleich schnell laufen und ein Meter nicht immer gleich lang ist. Doch warum ist das so und wie kam man zu diesem Schluss?

### 2.1 Das Wesen der Zeit

#### 2.1.1 Was ist Zeit?

Wenn man sich mit Raum und Zeit beschäftigt, stellt man sich früher oder später die Frage, was Zeit eigentlich ist. Das Problem dabei ist, dass sich Zeit anders wie andere physikalische Größen nicht so einfach definieren lässt. Im Alltag verbinden wir Zeit oft mit Bewegung im Raum. Der Astrophysiker und Harvard- Professor Dr. Grant Trembley formuliert diese Erkenntnis so: *„Wenn man es überdenkt, ist unsere Wahrnehmung von Zeit mit einer Bewegung im Raum verknüpft. Wir assoziieren einen Tag mit einem Sonnenauf- und einem Sonnenuntergang. Und eine Stunde mit der Bewegung der Uhrzeiger.“*<sup>2</sup> Mit der Verknüpfung von Zeit und Bewegung lassen sich grundlegende physikalische Vorgänge beschreiben: Sei es der Freie Fall eines Apfels oder die Entladung eines Kondensators. Alle diese Vorgänge sind mit einer Bewegung in einer bestimmten Zeit verknüpft. Diese Art der Definition reicht zurück bis in die Antike. Der griechische Philosoph Platon definiert in seiner Ideenlehre Bewegung als Folge von Abbildern in einer bestimmten Zeit, welche erst durch den menschlichen

---

2 Trembley, Dr. Grant in: ZDFinfo Doku: Das Universum: Zeitreisen - Eine Reise durch Raum und Zeit (06/16); 03:35- 03:49

Geist seine Form erhalten.<sup>3</sup> Zeit sei demnach nur ein Trugbild des Geistes und habe keinen natürlichen Ursprung. Der römische Bischof Augustinus von Hippo unterschied um 400n. Chr. erstmals zwischen Zeit als physikalischer Größe und einem subjektiven Zeitgefühl. Er unterschied auch zwischen Zukunft, Gegenwart und Vergangenheit und prägte damit das gängige Bild der Zeit. „*Ginge nichts vorüber, gäbe es keine vergangene Zeit; käme nichts auf uns zu gäbe es keine zukünftige Zeit; wäre überhaupt nichts, gäbe es keine gegenwärtige Zeit*“<sup>4</sup>, schrieb er in seinen Schriften. Die erste Definition von Zeit, welche losgelöst von Bewegung argumentierte lieferte der britische Physiker Isaac Newton in seinem Buch *Mathematische Prinzipien der Naturlehre*. Er schrieb 1687, „*Die absolute, wahre und mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand.*“<sup>5</sup> Das newtonsche Verständnis der Zeit ist auch heute noch das Weltbild, nach dem wir im Alltag leben. Die Zeit als unendliches Medium, was alles durchdringt. Ein ewiger Fluss, dem alles unterliegt. Allerdings wurde dieses Bild im Jahre 1905 erneut auf den Kopf gestellt.

### 2.1.2 Die imaginäre Zeit

Die Relativitätstheorie Albert Einsteins stellte die Welt der Physik auf den Kopf. Vermeintliche physikalische Tatsachen wurden in Frage gestellt und die Absolutheit der Zeit wurde angezweifelt. Die spezielle Relativitätstheorie sagt aus, dass – je nach Beobachtungsposition und Eigengeschwindigkeit – die Zeit mal schneller oder langsamer verläuft. (Wie dies im Detail funktioniert, werde ich später behandeln.) Auf den Erkenntnissen Einsteins aufbauend, beschäftigte sich der britische Astrophysiker Stephen Hawking zeitlebens mit der Gestalt der Zeit und dem Ursprung des Universums. Da sich unser Konzept der Zeit nur schwer mit

---

3 Nach: Wikipedia Ideenlehre (<https://de.wikipedia.org/wiki/Ideenlehre>) 13.09.12

4 Wikipedia: Augustinus von Hippo ([https://de.wikipedia.org/wiki/Augustinus\\_von\\_Hippo](https://de.wikipedia.org/wiki/Augustinus_von_Hippo)) 08.01.22

5 Wikipedia: Zeit (<https://de.wikipedia.org/wiki/Zeit>) 04.02.22

der Vorstellung Einsteins verbinden lässt, entwickelte er die Theorie der **Imaginären Zeit**. Dazu schrieb er in seinem Buch *Das Universum in der Nussschale*: „Was ist die Zeit? Ist sie ein ewiger Strom [...] oder ist sie ein Schienenweg? Vielleicht enthält sie Schleifen und Verzweigungen, so daß man vorwärts springen oder zu früheren Stationen der Bahnlinie zurückkehren kann.“<sup>6</sup> Doch wie sieht diese Imaginäre Zeit aus und was ist der Unterschied zur Reellen Zeit unseres Alltags?

Während in der Reellen Zeit die Bewegungsrichtung vorgeschrieben ist, ist dies in der Imaginären Zeit nicht der Fall. In ihr kann man sich mit oder gegen den Zeitstrom bewegen und dem Entsprechend auch nicht zwischen Zukunft oder Vergangenheit unterscheiden. Es gibt mathematisch keinen Unterschied zwischen Vorwärts- und Rückwärtsrichtung. Unsere Naturgesetze unterliegen auch der Imaginären Zeit. Kehrt man bei einem Versuch die **Symmetrien C, P und T** um, so erhält man den gleichen Ausgang, nur eben umgekehrt. Lässt man zum Beispiel einen Apfel fallen und kehrt anschließend die Symmetrien um, so fällt der Apfel zunächst schnell nach oben, bis er verlangsamt und schließlich an seiner Ausgangsposition anhält.<sup>7</sup> Wenn man der Theorie der Imaginären Zeit folgt, kann also auch das Universum den Urknall auslösen, obwohl in unserer allgemeinen Vorstellung eine Folge nie ihre Ursache auslösen kann.

Die Theorie der Imaginären Zeit ist zwar nur ein Gedankenexperiment und kann nicht belegt werden, jedoch gibt sie einen guten Eindruck in das kuriose Wesen der Zeit.

---

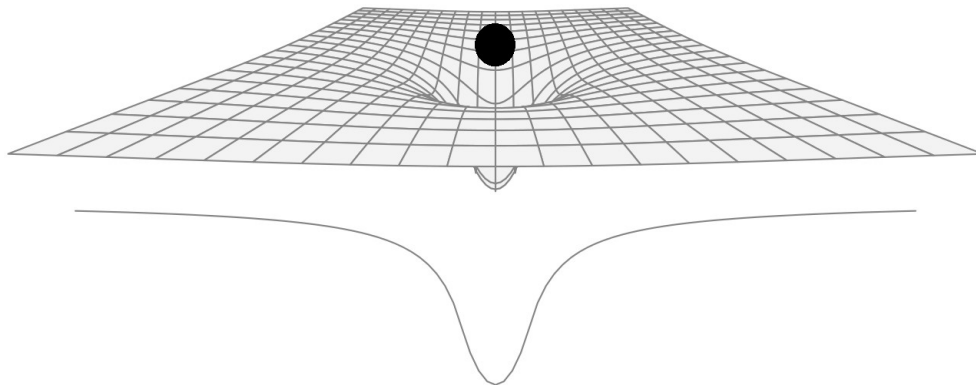
6 Hawking, Stephen: *Das Universum in der Nussschale*, Hamburg 2001 (Hoffmann und Campe) S.39

7 Nach: Hawking, Stephen: *Eine kurze Geschichte der Zeit*, Hamburg 1991 (Rowolth Verlag GmbH) S.41- 43

## 2.2 Die Raumzeit

### 2.2.1 Was ist die Raumzeit?

Unsere Welt besteht aus drei räumlichen Dimensionen: Ein Objekt hat immer eine Länge eine Breite und eine Höhe. Zusätzlich nutzen wir die Zeitkoordinate, um Vorgänge genauer zu beschreiben. „*In der newtonschen Mechanik lässt sich jedes Ereignis durch drei Koordinaten für den räumlichen Ort, sowie einer separaten Zeitkoordinate lokalisieren. Hingegen sind Raum und Zeit in der speziellen Relativitätstheorie untrennbar verwoben.*“<sup>8</sup> Raum und Zeit bilden eine vierdimensionale Raumzeit. Die Idee der Raumzeit stammt aus dem frühen 20. Jahrhundert und erklärt, warum sich Planeten nicht immer so verhalten, wie die **newtonsche Gravitationslehre** es voraussagt. Um das zu verstehen sehen wir uns die gängige Darstellung der Raumzeit an.



*M1) Quelle: Eigene Darstellung*

Die Raumzeit wird als zweidimensionale Fläche dargestellt. Diese Fläche ist jedoch nicht eben, sondern wird durch Massen gekrümmt. Gerät nun ein Objekt in die Gravitationsmulde, so wird dessen Bahn abgelenkt. Materie und Energie krümmen den Raum und die Zeit und zwingen massenreiche Objekte auf gekrümmte Bahnen.<sup>9</sup> Extrem massereiche Objekte können die Raumzeit sogar so stark krümmen, dass sie regelrecht zerrissen wird. Schwarze Löcher sind solche Objekte. In ihrer Gravitationsmulde herrschen

<sup>8</sup> Guéron, Eduardo: Abenteuer in Einsteins Raumzeit. In: Spektrum der Wissenschaft, 06/10, S.41

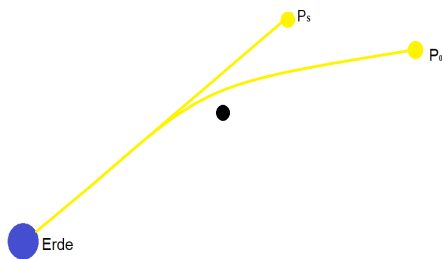
<sup>9</sup> Nach: Ebd. S.34

so extreme Bedingungen, dass sogar die Zeit an sich erlischt.<sup>10</sup> Dabei gilt: Je tiefer man in die Gravitationsmulde eintritt, desto mehr Energie benötigt man, um aus ihr zu entkommen. Das ist auch der Grund, warum nicht einmal Licht aus Schwarzen Löchern entkommen kann. Die benötigte Energie ist einfach zu groß.

Wenn das Licht aber dennoch aus einer schwächeren Gravitationsmulde austritt, findet ein ganz neues Phänomen statt: Die scheinbare Verschiebung von Sternen.

### 2.2.2 Gekrümmte Lichtbahnen

Betrachtet man einen Stern durch ein Teleskop, geht man davon aus, dass sich der Stern dort befindet, von wo das Licht kommt. Aufgrund der Struktur der Raumzeit ist dies allerdings nicht zwangsläufig der Fall:



Wir wissen, dass durch Mulden in der Raumzeit alle Objekte mit Masse abgelenkt werden können. Da Licht eine Energie  $E$  besitzt, kann ihm nach dem **Energie-Masse-Äquivalenz** auch eine Masse  $m$  zugeschrieben werden.

*M2) Quelle: Eigene Darstellung* Sendet ein Stern von der Position  $P_0$  einen Lichtstrahl aus, welcher in eine Gravitationsmulde gerät, so wird die Bahn des Lichtstrahls abgelenkt. Nehmen wir an, dieser Lichtstrahl trifft auf die Erde und ein Astronom beobachtet diesen. Er geht davon aus, dass sich der Lichtstrahl linear bewegt hat und vermutet den Stern an der Position  $P_s$ .<sup>11</sup> Diese Ablenkung von Licht durch Masseneinwirkung nennt man **Gravitationslinseneffekt**.

Da die Ablenkung mit zunehmender Masse stärker wird, kann man auf diese Art auch die Masse eines Sterns bestimmen. 2013 bis 2015 registrierte man

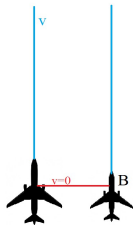
<sup>10</sup> Nach: Musser, George: Kann die Zeit enden? In: Spektrum der Wissenschaft: Highlights, 03/13 S.56  
<sup>11</sup> Nach: Hawking, Stephen: Das Universum in der Nussschale, Hamburg 2001 (Hoffmann und Campe) S.29



dafür zuvor die genaue Position eines Hintergrundsternes. Anschließend wartete man, bis der Stern 2051B sich vor diesen bewegte und maß anschließend die Position des Hintergrundsternes erneut. Aus der Ablenkung ließ sich die Masse von 2051B auf 0,675 Sonnenmassen berechnen.<sup>12</sup>

### 2.3 Die Relativität von Raum und Zeit

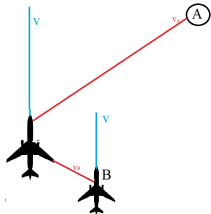
Um zu verstehen, warum Zeit und Raum relativ sind, stellen wir uns folgende Situationen vor: Zwei Beobachter ( Beobachter A und Beobachter B) betrachten ein Flugzeug, welches am Himmel fliegt.



Ⓐ

Situation 1: Beobachter A ist dabei ruhend, während Beobachter B in einem Flugzeug parallel zum betrachteten Flugzeug fliegt. Die Geschwindigkeit des Flugzeuges hängt von jeweiligen Betrachtungsstandort ab. Beobachter A nimmt eine Bewegung wahr, während Beobachter B das Flugzeug als ruhend betrachtet.

M3) Quelle: Eigene Darstellung

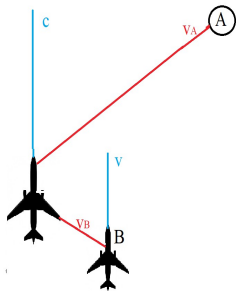


Situation 2: Beobachter B fliegt mit einer geringeren Geschwindigkeit als das beobachtete Flugzeug. Beobachter B nimmt genau so wie Beobachter A eine Bewegung wahr. Allerdings ist die wahrgenommene Geschwindigkeit aus Sicht von B kleiner als die aus Sicht A. Es gilt:

$$v_F > v_A > v_B$$

M4) Quelle: Eigene Darstellung

<sup>12</sup> Kayser, Reiner: Stern per Lichtablenkung gewogen, (<https://www.weltderphysik.de/gebiete/universum/nachrichten/2017/stern-per-lichtablenkung-gewogen/>) 07.06.17



Situation 3: Das beobachtete Flugzeug fliegt mit Lichtgeschwindigkeit und Beobachter B fliegt mit normaler Geschwindigkeit. Beide Beobachter nehmen die Geschwindigkeit als gleich schnell wahr, unabhängig von ihrer Eigengeschwindigkeit. Es gilt:

$$v_F = c$$

M5) Quelle: Eigene Darstellung

$$v_A = v_B = v_F$$

Anhand der drei Situationen lässt sich klar erkennen, dass die Geschwindigkeit eines Objektes von der Eigenbewegung abhängig ist. Anders ist dies bei der Lichtgeschwindigkeit. Sie ist immer gleich und erscheint auch immer gleich schnell. Doch wie kann das sein?

Eine Geschwindigkeit berechnet sich Weg durch Zeit. Da das Flugzeug in allen drei Situationen relativ zum Beobachter eine unterschiedliche Strecke  $s$  zurückgelegt hat, lassen sich die unterschiedlichen Strecken mit  $s_A$  und  $s_B$  benennen. Da die Lichtgeschwindigkeit aus Sicht beider Beobachter gleich schnell erscheint, muss  $v$  für beide Beobachter gleich sein. Auf den ersten Blick ein mathematischer Widerspruch. Doch es gibt eine Lösung für die Gleichung:<sup>13</sup>

$$c = \frac{s_A}{t} \neq \frac{s_B}{t} \quad \text{Wenn für beide Beobachter die Zeit } t \text{ gleich ist, geht die}$$

Gleichung nicht auf. Daraus folgt:  $t_A \neq t_B$

Die Zeit muss sich je nach Eigengeschwindigkeit verändern. Wenn man von einer relativen Zeit ausgeht, geht die Gleichung auf:

$$c = \frac{s_A}{t_A} = \frac{s_B}{t_B} \quad \text{Diesen Effekt nennt man **Zeitdilatation**.$$

<sup>13</sup> Nach: 100SekundenPhysik: Die Kuriosität der Zeit (<https://www.youtube.com/watch?v=0nt4jjw8Gmg&t=4s>)

### 3) Zeitdilatation

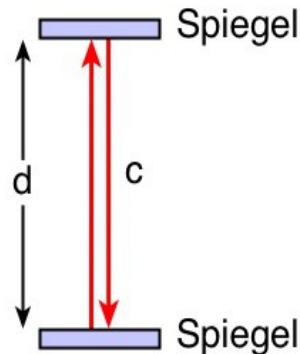
Zeitdilatation beschreibt den veränderten Ablauf der Zeit in einem bewegten System. Zeitdilatation hat zwei Auslöser: Geschwindigkeit und Gravitation. Beide Effekte treten in unserem alltäglichen Leben auf, sind jedoch nur in so kleinem Maßstab zu finden, dass die für unser Leben keine Rolle spielen. Doch wie kann man etwas messen, was zunächst nur durch theoretische Überlegungen entstanden ist und dessen Auswirkungen nur in kleinsten Bereichen spürbar sind?

#### 3.1 Zeitdilatation durch Geschwindigkeit

##### 3.1.1 Die bewegte Lichtuhr

In unserem Alltag gehen wir davon aus, dass alle Uhren immer gleich schnell laufen. Eine Stunde ist demnach für jeden Menschen gleich lang. Die spezielle Relativitätstheorie besagt allerdings, dass nicht alle Uhren immer gleich schnell laufen. Mit Lichtuhren ist dieser Effekt messbar.

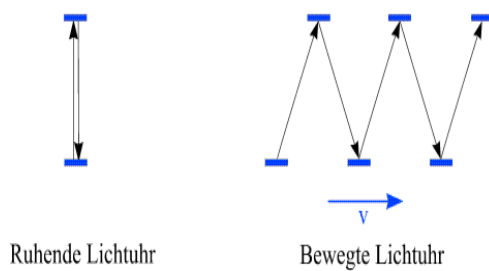
Eine Lichtuhr besteht aus zwei gegenüberliegenden Spiegeln, welche mit **Photorezeptoren** ausgestattet sind. Zwischen den Spiegeln wird ein Lichtimpuls hin und her gesendet. Bei einem Kontakt mit den Spiegeln, wird der Impuls zurückgesendet und die Photorezeptoren messen den Zeitpunkt des



Kontaktes. Aus diesen zwei Zeitpunkten (Kontakt mit oberen/ unteren Spiegel) lässt sich eine Zeitspanne  $\Delta t$  bestimmen. M6) Quelle: Physikunterricht Online

Wenn wir die Zeitdilatation messen wollen, müssen wir von den zwei **Einsteinschen Postulaten** ausgehen. Diese sagen aus, dass 1. in allen

**Inertialsystem** alle Vorgänge gleich ablaufen und Bewegungen relativ sind, sowie 2. die Lichtgeschwindigkeit konstant ist.<sup>14</sup>



Nehmen wir also an, wir hätten zwei solcher Lichtuhren. Eine davon lassen wir in der **Ruhelage**, während wir die andere mit einer konstanten Geschwindigkeit  $v$  bewegen.

M7) Quelle: Universität Wien

Aus Sicht eines nebenstehenden

Bobachters fliegt der Lichtimpuls in der ruhenden Uhr gleichmäßig auf und ab, während der Lichtimpuls in der bewegten Uhr eine Zickzack- Bewegung ausführt. Da wir wissen, dass die Lichtgeschwindigkeit konstant ist und sich die Impulse mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, stoßen wir auf eine ähnliches Problem, wie in unserer Situation mit dem Flugzeug. Wenn wir allerdings berücksichtigen, dass Zeit nicht konstant, sondern relativ ist, stellen wir fest: Die **Eigenzeit** des Lichtimpulses in der bewegten Uhr muss verlangsamt ablaufen.<sup>15</sup> Anhand der Lichtuhren lässt sich auch erkennen, wie sich die Zeit eines bewegten Objektes genau verändert:

Mit Hilfe der **Lorentztransformation** lässt sich die Zeitdilatation mit dem

so genannten **Lorentzfaktor**  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \geq 1$  beschrieben.

<sup>14</sup> Wikipedia: Einsteinsche Postulate

([https://de.wikipedia.org/wiki/Einsteinsche\\_Postulate](https://de.wikipedia.org/wiki/Einsteinsche_Postulate)) 23.01.22

<sup>15</sup> Nach: Sexl, Roman/ Schmidt, Herbert: Raum Zeit Relativität, Braunschweig 1989 (Vieweg- Verlag) S.31-32

### 3.1.2 Das Myonenexperiment

Die Zeitdilatation spielt aber nicht nur bei Lichtuhren eine Rolle. Auch in der Elementarphysik ist sie ein wichtiger Bestandteil. Welchen Einfluss die Zeitdilatation auf Elementarteilchen hat zeigt das Myonenexperiment.

**Myonen** sind **Elementarteilchen**, welche instabil sind und nach circa  $2,2 \cdot 10^{-6}$  Sekunden zerfallen. Sie entstehen in 10km Höhe, wenn kosmische Strahlung in die Erdatmosphäre eintritt und mit Atomen in den oberen Luftschichten reagieren. Von dort aus bewegen sie sich senkrecht zur Erde und erreichen dabei Geschwindigkeiten von bis zu 99,8% der Lichtgeschwindigkeit. Aus ihrer Zerfallsdauer  $\tau$  (Tau) und der Lichtgeschwindigkeit  $c$  lässt sich errechnen, welche Strecke  $s$  sie dabei zurücklegen:

$$s = v \cdot \tau = (0,998 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}) \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s} \approx 659 \text{ m}$$

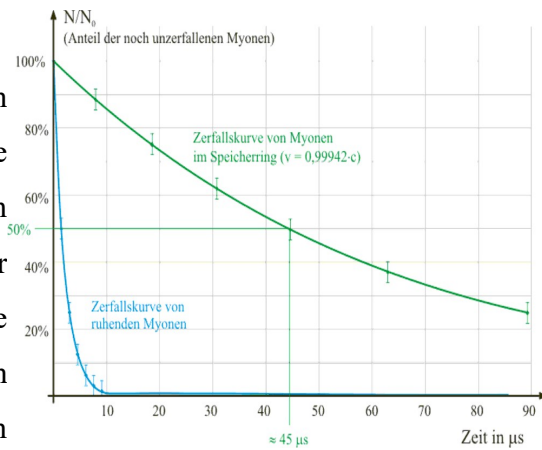
Dem entsprechend dürften in unteren Luftschichten keine Myonen mehr messbar sein, da alle zerfallen sein müssten. In der Realität lassen sich jedoch noch auf 1.900m Myonen feststellen. Dies erkannte man, als man auf einem Berg den Myoneneinfall pro Stunde maß. Man maß, dass jede Stunde 568 Teilchen auftrafen, von denen nur 27 eine längere Zerfallsdauer aufwiesen, als für die Flugstrecke notwendig wäre. Deshalb maß man erneut den Myoneneinfall, nur dieses mal auf Meereshöhe. Man erwartete, dass nur die 27 Myonen pro Stunde messbar wären. Allerdings maß man einen Wert von 412. Den Messdaten zu Folge hätten diese Myonen die 10km Strecke in circa 0,7 Millisekunden durchlaufen haben müssen.<sup>16</sup>

Aus den Messdaten schlussfolgerte man, dass die Eigenzeit der Myonen um den Faktor 0,9994 langsamer laufen musste, als die allgemeine Zeit.

---

<sup>16</sup> Nach: Schäflein, Horst: Einführung in die spezielle Relativitätstheorie, Würzburg 1979 (Verlag Ludwig Bauer) S.60-61)

Bei späteren Messungen in einem **Teilchenbeschleuniger**, konnte man den Effekt künstlich erzeugen und die Lebensdauer der Myonen messen. Man stellte die Messergebnisse in einem Diagramm dar. In dem Diagramm erkennt man den Anteil der



M8) Quelle: *Leifi Physik*

zerfallenen Myonen in Abhängigkeit der Zeit. Man sieht in der blauen Kurve, dass die ruhenden Myonen bereits nach circa 2 Millisekunden zur Hälfte zerfallen sind, während die bewegten Myonen erst nach 45 Millisekunden zur Hälfte zerfallen sind. Die Myonen in Teilchenbeschleuniger wurden auf 99,94% der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und haben ihre Zerfallsdauer verzwanzigfacht. Übertragen auf unsere Maßstäbe könnte das bedeuten, dass ein Raumschiff mit der selben Geschwindigkeit ein Jahr lang durchs All reisen könnte und bei seiner Rückkehr auf die Erde 10 Jahre in der Zukunft landen<sup>17</sup>

## 3.2 Zeitdilatation durch Gravitation

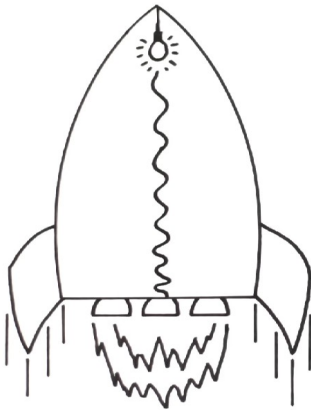
### 3.2.1 Äquivalenzprinzip

Das **Äquivalenzprinzip** ist von zentraler Bedeutung, wenn es um das Verständnis von Zeitdilatation durch Gravitation geht. Es besagt, dass die Schwere einer Masse und ihre Trägheit äquivalent zueinander sind. Wenn zum Beispiel ein Körper auf der Oberfläche eines Planeten steht, die physikalischen Vorgänge äquivalent sind, zu einem Körper in einer beschleunigten Rakete. Lässt man relativ vom Körper eine Kugel fallen, so verhält sie sich in beiden Situationen gleich: Sie fällt gleichmäßig beschleunigt zu Boden.<sup>18</sup>

<sup>17</sup> Nach: Fendt, Walter: Berechnung der Zeitdilatation ([https://www.walter-fendt.de/zd/zd\\_app3.htm](https://www.walter-fendt.de/zd/zd_app3.htm)) 11.01.21

<sup>18</sup> Nach: Wikipedia: Äquivalenzprinzip ([https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%84quivalenzprinzip\\_\(Physik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%84quivalenzprinzip_(Physik))) 17.08.21

Jetzt stellen wir uns vor, eine Rakete beschleunigt mit  $9,81\text{m/s}^2$ . Es herrschen die gleichen physikalischen Voraussetzungen, wie auf der Erde. Senden wir nun einen Lichtstrahl von der Decke der Rakete in Richtung Boden, so wird dieser durch den **optischen Dopplereffekt** gestaucht.



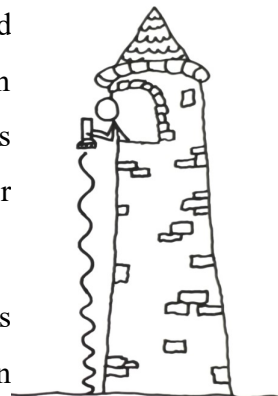
M9) Quelle: Youtube:  
100SekundenPhysik

Der Boden der Rakete bewegt sich auf die Welle zu, wodurch diese gestaucht wird. Der Abstand zwischen den Wellenbergen wird verringert - die Frequenz der Welle erhöht sich. Eine Frequenz berechnet man wie folgt:

$$f = 1/\Delta t$$

Die Frequenz kann sich also nur dann erhöhen, wenn die Zeit am Boden langsamer verläuft, als an der Decke der Rakete.

Wenn man jetzt den Äquivalenzprinzip folgt, muss der gleiche Effekt auch auf der Oberfläche von Planeten messbar sein. Und tatsächlich ist es so. Sendet man einen Lichtstrahl in Richtung der Erde, so wird auch hier die Frequenz des Lichtstrahls erhöht. In Folge dessen muss auch hier die Zeit langsamer verlaufen.



Zusätzlich wissen wir aus der Quantenmechanik, dass die Energie eines **Photons** proportional zu dessen

Frequenz ist. Wenn also die Frequenz erhöht wird, muss auch die Energie des Photons zunehmen.

M10) Quelle:  
Youtube:

100SekundenPhysik

Kurzwelliges Licht ist dem entsprechend energiereicher als langwelliges Licht. Richtet man einen Lichtstrahl von der Erde weg, so wird ihm Energie entzogen. Das liegt daran, da die Zeit näher an der Erde langsamer vergeht, als weiter von ihr entfernt. Mit zunehmenden Abstand zur Erde verläuft also auch die Zeit schneller. <sup>19</sup>

<sup>19</sup> Nach: 100SekundenPhysik: Warum die Erde die Zeit verzerrt.  
(<https://www.youtube.com/watch?v=eZOa6F-t8KE>) 14.05.21

### 3.2.2 Zeitreisen

Wir haben festgestellt, dass Zeit in Nähe von Massen langsamer verläuft. Jetzt stellt sich die Frage, wie man diese Erkenntnisse praktisch anwenden könnte. Seit jeher beschäftigt sich der Mensch mit Zeitreisen. In zahlreichen Filmen, Büchern und Comics werden Zeitmaschinen gebaut, mit denen man munter in Zukunft oder Vergangenheit reisen kann. Doch wie wahrscheinlich ist eine Zeitreise? Dazu möchte ich kurz über zwei Arten von Zeitreise sprechen: Geschwindigkeit und Gravitation.

In den *Zurück-in-die-Zukunft*-Filmen baut der Physiker Dr. Emmet Brown aus einem Sportwagen eine Zeitmaschine. Um diese zu benutzen müssen 140km/h erreicht werden und man kann frei vor oder zurück in der Zeit springen.<sup>20</sup> Die wissenschaftliche Grundlage bildet dabei die Zeitdilatation durch Geschwindigkeit. Obwohl es richtig ist, dass man die Zeit durch Geschwindigkeiten manipulieren kann, ist die im Film gezeigte Vorgehensweise fehlerhaft. Zunächst wäre eine Reise entgegen dem Zeitfluss physikalisch unmöglich. Eine Reise in die Vergangenheit würde unvorhersehbare Konsequenzen mit sich bringen, beispielsweise das **Großvaterparadoxon**. Doch selbst eine Reise in die Zukunft wäre bei einer Geschwindigkeit von 140km/h nicht in der Form möglich, wie sie im Film gezeigt wird. Mit einer so niedrigen Geschwindigkeit lässt sich die Zeit gerade einmal um wenige Bruchteile einer Sekunde verlangsamen – von Sprüngen in eine 30 Jahre entfernte Zukunft ist also vollkommen abzusehen.

Die zweite Art der Zeitreise bietet da schon größere Aussichten: Im Film *Interstellar* besucht eine Gruppe von Raumfahrern einen Planeten in der Nähe eines Schwarzen Loches. Als sie den Planeten verlassen finden sie einen im **Orbit** des Planeten verbliebenen Kollegen um Jahre gealtert vor. Es stellte sich raus, dass die Zeit auf dem Planeten um eine vielfache langsamer verlief, als im Orbit.<sup>21</sup> Hier wird die Zeitdilatation durch

---

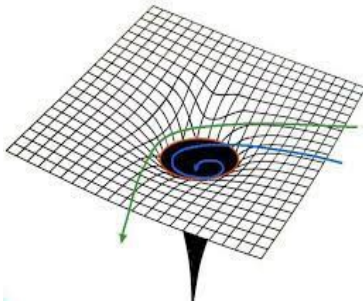
<sup>20</sup> Nach: Wikipedia: Zurück in die Zukunft ([https://de.wikipedia.org/wiki/Zur%C3%BCck\\_in\\_die\\_Zukunft](https://de.wikipedia.org/wiki/Zur%C3%BCck_in_die_Zukunft)) 04.02.22

<sup>21</sup> Nach: Wikipedia: Interstellar (<https://de.wikipedia.org/wiki/Interstellar>) 21.04.21



Gravitation genutzt, um die Zeitreise der Crew zu erklären.

Wie wir bereits wissen, können große Massen die Raumzeit krümmen. Schwarze Löcher gehören zu den dichtesten Objekten im Universum und haben deshalb extreme Auswirkungen auf die Raumzeit.



M11) Quelle: Greiterweb

In der Abbildung sieht man die Raumzeitkrümmung eines Schwarzen Loches. Die rote Linie bildet den **Ereignishorizont**. Alle Materie, die sie überschreitet (blaue Linie), ist für immer verloren. Stellen wir uns vor, ein Raumschiff fliegt nah am Schwarzen Loch vorüber. Es nimmt dabei die Bahn der grünen Linie. Die Kräfte des Schwarzen Loches sind dabei so extrem, dass die Zeit an Bord des Raumschiffen um eine vielfaches langsamer verläuft, als außerhalb. Es ist noch nicht messbar, wie stark die Zeitdilatation nahe eines Schwarzen Lochs tatsächlich ist, aber innerhalb des Ereignishorizonts hört sie vollständig auf. „*Gemäß der Relativitätstheorie erlischt sie [die Zeit; Autor] im Inneren eines Schwarzen Loches, während sie im Rest des Universums weiterläuft.*“<sup>22</sup> Demnach kann man vermuten, dass die Zeit in der Nähe des Ereignishorizonts sehr langsam verlaufen muss. Aus wissenschaftlicher Sicht ist die Zeitreise, wie sie in *Interstellar* dargestellt ist, durchaus möglich.

---

<sup>22</sup> Musser, George: Kann die Zeit enden? In: Spektrum der Wissenschaft: Highlights, 03/13, S.56

#### 4) Was lernen wir daraus?

Wie so oft im Leben ist auch in der Physik nicht immer alles so, wie es scheint. Vermeintlich unantastbare Tatsachen des Lebens werden in Frage gestellt und nichts ist so, wie es scheint.

Zeit ist eben kein gleichförmiger unaufhaltsamer Fluss, sondern eine unförmige Masse, welche an manchen Stellen schneller und an anderen langsamer läuft. An manchen Stellen hört sich auch ganz auf und lässt ein dunkles statisches Universum zurück. Wir werden die wahre Gestalt der Zeit wohl nie ganz verstehen. Aber solange können wir versuchen, uns ein Bild von dieser kuriosen Dimension zu machen. Am Anfang haben wir uns damit beschäftigt, was Zeit ist. Eine klare Antwort darauf liefert nicht einmal der Begründer der Relativitätstheorie selbst. Laut Einstein sei Zeit das, was man an der Uhr ablesen kann. Eine irgendwie unbefriedigende Antwort. Versuchen wir Menschen doch seit Jahrhunderten, die Gestalt der Zeit zu erfassen und doch lässt sie sich nicht greifen. Am Ende müssen wir uns wohl mit der einsteinschen Definition zufriedengeben.

## 5) Anhang

### 5.1 Verzeichnisse

#### 5.1.1 Literaturverzeichnis

##### **0-9**

- 100SekundenPhysik: Die Kuriosität der Zeit  
(<https://www.youtube.com/watch?v=Ont4jjw8Gmg&t=4s>) 12.04.20
- 100SekundenPhysik: Warum die Erde die Zeit verzerrt.  
(<https://www.youtube.com/watch?v=eZOa6F-t8KE>) 14.05.21

##### **F**

- Fendt, Walter: Berechnung der Zeitdilatation ([https://www.walter-fendt.de/zd/zd\\_app3.htm](https://www.walter-fendt.de/zd/zd_app3.htm)) 11.01.21

##### **G**

- Guéron, Eduardo: Abenteuer in Einsteins Raumzeit. In: Spektrum der Wissenschaft, 06/10, S.34- 41

##### **H**

- Hawking, Stephen: Das Universum in der Nussschale, Hamburg 2001 (Hoffmann und Campe)
- Hawking, Stephen: Eine kurze Geschichte der Zeit, Hamburg 1991 (Rowolth Verlag GmbH)

##### **K**

- Kayser, Reiner: Stern per Lichtablenkung gewogen,  
(<https://www.weltderphysik.de/gebiete/universum/nachrichten/2017/stern-per-lichtablenkung-gewogen/>) 07.06.17

##### **M**

- Musser, George: Kann die Zeit enden? In: Spektrum der Wissenschaft: Highlights, 04/21

##### **S**

- Schäflein, Horst: Einführung in die spezielle Relativitätstheorie, Würzburg 1979 (Verlag Ludwig Bauer)
- Sexl, Roman/ Schmidt, Herbert: Raum Zeit Relativität, Braunschweig 1989 (Vieweg- Verlag)

## T

- Trembley, Dr. Grant in: ZDFinfo Doku: Das Universum: Zeitreisen- Eine Reise durch Raum und Zeit (06/16)

## W

- Wikipedia:
  - Augustinus von Hippo ([HTTPS://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/AUGUSTINUS\\_VON\\_HIPPO](https://de.wikipedia.org/wiki/Augustinus_von_Hippo)) 08.01.22
  - Äquivalenzprinzip ([HTTPS://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/%C3%84QUIVALENZPRINZIP\\_\(PHYSIK\)](https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%84QUIVALENZPRINZIP_(PHYSIK))) 17.08.21
  - Einsteinsche Postulate ([HTTPS://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/EINSTEINSCHES\\_POSTULATE](https://de.wikipedia.org/wiki/Einsteinsche_Postulate)) 23.01.22
  - Ideenlehre ([HTTPS://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/IDEENLEHRE](https://de.wikipedia.org/wiki/Ideenlehre)) 13.09.12
  - Interstellar ([HTTPS://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/INTERSTELLAR](https://de.wikipedia.org/wiki/Interstellar)) 21.04.21
  - Zeit ([HTTPS://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/ZEIT](https://de.wikipedia.org/wiki/Zeit)) 04.02.22
  - Zurück in die Zukunft ([HTTPS://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/ZUR%C3%BCCK\\_IN\\_DIE\\_ZUKUNFT](https://de.wikipedia.org/wiki/Zur%C3%BCck_in_die_Zukunft)) 04.02.22
- Wolchover, Natalie: Theoretische Physik- Eine neue Mathematik der Zeit. In: Spektrum der Wissenschaft, 04/21, S.62-67

### 5.1.2 Abbildungsverzeichnis

Deckblatt:

- <https://www.greselius.de/>
- <https://clipart.world/albert-einstein-clipart/>
- [https://de.clipartlogo.com/image/clock-clip-art\\_368964.html](https://de.clipartlogo.com/image/clock-clip-art_368964.html)

M1-5) Eigene Darstellung

M6) (<https://physikunterricht-online.de/jahrgang-12/zeitdilatation/>)

M7) (<https://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/SRT/Zeitdilatation.html>)

M8) (<https://www.leifiphysik.de/relativitaetstheorie/spezielle-relativitaetstheorie/versuche/myonen-experiment-cern> )

M9) (<https://www.youtube.com/watch?v=eZOa6F-t8KE>)

M10) (<https://www.youtube.com/watch?v=eZOa6F-t8KE>)

M11) (<http://greiterweb.de/welt-verstehen/0-283-Uber-Schwarze-Locher.htm> )

## 5.2 Register

### 5.2.1 Sachwortregister

**Äquivalenzprinzip:** In allen Inertialsystemen laufen alle Vorgänge gleich ab.

**Dopplereffekt:** Stauchung/ Streckung von Wellen durch Näherung/Entfernung von Objekten.

→ **optischer Dopplereffekt:** Stauchung/Streckung von Lichtwellen.

**Eigenzeit:** Zeit eines Objektes, unabhängig der allgemeinen Zeit.

**Einsteinsche Postulate:** 1. Äquivalenzprinzip; 2. Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

**Elementarteilchen:** subatomare Teilchen, Bestandteile aller Materie

**Energie-Masse-Äquivalenz:** Jeder Masse kann eine Energie zugeordnet werden (siehe Formelregister)

**Ereignishorizont:** Grenze eines Schwarzen Lochs

**Gravitationslinseneffekt:** Ablenkung von Lichtstrahlen durch Massen

**Großvaterparadoxon:** Philosophische Überlegung: Umbringen des eigenen Großvaters bei einer Zeitreise in die Vergangenheit.

**Imaginäre Zeit:** Hawkings Theorie einer neuen Zeitform.

**Inertialsystem:** System ohne äußeren Einfluss von Kräften

**Lorentzfaktor:** Konstante der Zeitdilatation

**Lorentztransformation:** Herleitung des Lorentzfaktors

**Myon:** Elementarteilchen

**Newtonsche Gravitationslehre:** Alle Massen wirken unmittelbar auf andere Massen eine Gravitationskraft aus.

**Orbit:** stabile Umlaufbahn eines Planeten

**Photon:** Lichtteilchen

**Photorezeptoren:** Technische Vorrichtung zum Erkennen von Licht

**Ruhelage:** Lage ohne Bewegung und Krafteinwirkung

**Symmetrien:** Umkehrung von Komponenten eines Vorgangs

→ **C-Symmetrie:** Tausch von Teilchen zu Antiteilchen

→ **P-Symmetrie:** Tausch von Positionen einzelner Teilchen

→ **T-Symmetrie:** Tausch von Bewegungsrichtung von Teilchen

**Teilchenbeschleuniger:** Technische Anlage zur Erforschung von Teilchen

**Zeitdilatation:** Verlangsamung der Zeit durch Gravitations- oder Bewegungseinfluss

## 5.2.2 Formelregister und Konstanten

### Formeln:

Energie-Masse-Äquivalenz:  $E = mc^2$  Das Energie-Masse-Äquivalenz beschreibt, dass jeder Masse eine bestimmte Energie zugeordnet werden kann. Das EMÄ ist ausschlaggebend für die Relativitätstheorie.

Frequenz:  $f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{t_2 - t_1}$  Die Frequenz ist der Kehrwert aus einer Zeitdifferenz. Diese entsteht aus zwei Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$ .

Geschwindigkeit:  $v = s/t$  Legt man eine bestimmte Strecke in einer bestimmten Zeit zurück, so bezeichnet man dies als Geschwindigkeit. Durch umformen erhalten wir zudem:  $s = v * t$

Gravitationskraft:  $F_G = G * \left(\frac{M * m}{r^2}\right)$  Die Gravitationskraft beschreibt nach Newton die Kraft, welche zwei Massen M und m aufeinander ausüben. Die größere Masse wird dabei mit M gekennzeichnet. Je größer der Abstand der Massen ist, desto kleiner ist die Gravitationskraft. In der Gleichung wird dies mit  $r^2$  dargestellt. Zusätzlich benötigt man die Gravitationskonstante G.

### Konstanten:

Gravitationskonstante:  $G = 6,67 * 10^{-11} \frac{m^3}{kg * s^2}$

Zerfallsdauer Myon:  $2,2 * 10^{-6} s$  Dauer, nach der 50% aller Myonen einer Menge n zerfallen sind.

Lichtgeschwindigkeit im Vakuum:  $3 * 10^8 m/s$

Lorentzfaktor:  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$  Der Lorentzfaktor beschreibt, wie sich die

Zeit bei Geschwindigkeiten verändert. Er erklärt auch, warum man nicht mit (Über-) Lichtgeschwindigkeit reisen kann. Wäre  $v$  gleich  $c$ , so würde sich die Wurzel auflösen und man müsste durch 0 teilen. Wäre  $v$  größer als  $c$ , so müsste man die Wurzel einer negativen Zahl ziehen. Beides geht mit normalen Rechengesetzen nicht.

### 5.3 Erklärungen:

#### 5.3.1 Selbständige Anfertigung

##### Versicherung der selbstständigen Erarbeitung und Anfertigung der Facharbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlauf 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/ dem Fachlehrer vollständig im Ausdruck zur Verfügung zu stellen.

Bramsche, den

\_\_\_\_\_  
Unterschrift des Schülers/der Schülerin

#### 5.3.2 Veröffentlichung

##### 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 des Schülers/der Schülerin