

Greselius Gymnasium Bramsche

Gravitationslinsen

Arne Hinterding

2024/2025, Astronomie

Herr Riemer

03.03.2025, Bramsche

Abgabetermin: 03.03.2025, Bramsche



Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	2
2 Grundlagen.....	3
2.1 Gravitation.....	3
2.1.1 Newtonsches Gravitationsgesetz.....	3
2.1.2 Allgemeine Relativitätstheorie.....	3
2.2 Lichtausbreitung im gekrümmten Raum.....	4
2.2.1 Elektromagnetische Wellen.....	4
2.2.2 Geodäten.....	5
2.2.3 Energie-Massen-Äquivalenz.....	5
3 Gravitationslinsen.....	6
3.1 Grundlagen der Gravitationslinsen.....	6
3.1.1 Lichtablenkung nach Einstein.....	6
3.1.2 Verschiedene Gravitationslinseneffekte.....	7
3.2 Optische Effekte und Erscheinungsformen.....	8
3.2.1 Mehrfachbilder und Verzerrungen.....	8
3.2.2 Einsteinkreuz.....	9
3.2.3 Einsteinring.....	9
4 Anwendung.....	10
4.1 Entfernungs- und Massenbestimmung.....	10
4.1.1 Berechnung der Masse von Galaxien.....	10
4.1.2 Konstanten und Parameter.....	10
4.2 MACHOs und Dunkle Materie.....	11
4.2.1 Mikrolinseneffekt in der Anwendung.....	11
4.2.2 Hinweise auf Dunkle Materie.....	11
5 Fazit.....	11
6 Anhang.....	12
6.1 Verzeichnisse.....	12
6.1.1 Literaturverzeichnis.....	12
6.1.2 Abbildungsverzeichnis.....	14
6.2 Erklärungen.....	14
6.2.1 Selbstständigkeit.....	14
6.2.2 Veröffentlichung.....	14

1 Einleitung

Die Möglichkeit, die Sterne und den Kosmos zu beobachten, basiert hauptsächlich auf der Erfassung von Licht. Ohne das Licht wäre es nahezu unmöglich das Universum zu erfassen. Die Lichtwellen, die uns erreichen, spiegeln jedoch nicht immer die tatsächliche Verteilung und Beschaffenheit der Himmelsobjekte wider, da sie von zahlreichen Himmelskörpern beeinflusst werden. Ein Beispiel hierfür sind die Gravitationslinseneffekte, welche die Bahnen des Lichts aufgrund hoher Gravitationskräfte von massereichen Himmelskörpern ablenken.

In dieser Arbeit werde ich untersuchen, wie diese Effekte entstehen, wie die Schwerkraft und das Licht miteinander wechselwirken und welche Schlussfolgerungen sich daraus ziehen lassen.

Dazu gehe ich zunächst auf die Grundlagen ein (siehe Kapitel 2), um die Basis für diese Arbeit zu schaffen. Diese unterteile ich in zwei Aspekte. Zum einen in die physikalischen Grundlagen der Gravitation, welche ich in die klassische Physik und die Allgemeine Relativitätstheorie unterteile. Zum anderen in die Grundlagen des Lichts, welche ich grob in die Funktionsweise von elektromagnetischen Wellen, die Natur der Geodäten und in die Energie-Massen-Äquivalenz einteile. Danach werde ich im Hauptteil auf die Gravitationslinsen eingehen (siehe Kapitel 3), dazu erkläre ich zuerst die Grundlagen und führe anschließend die verschiedenen Gravitationslinseneffekte auf. Diese Grundlagen ergänze ich durch die optischen Effekte und Erscheinungsformen. Zudem gehe ich auch noch auf die Anwendungsmöglichkeiten dieser in der Astronomie ein (siehe Kapitel 4), welche ich in die Bestimmung von Entfernungen und Massen, die Beobachtung von toten Sternen und dunkler Materie und in die Kosmologische Anwendung einteile. Zum Abschluss verfasse ich ein Fazit, in welchem ich die wichtigsten Erkenntnisse zusammenfasse und meine persönliche Erfahrung mit der Arbeit bewerte.

2 Grundlagen

2.1 Gravitation

2.1.1 Newtonsches Gravitationsgesetz

In der klassischen Physik wird die Gravitation mithilfe Newtons Gravitationsgesetz beschrieben, welches diese als eine anziehende Fernkraft zwischen zwei Punktmassen darstellt, die von dem Zustand ihrer Materie unabhängig wirkt(vgl. [16]).

So wirken also jede Masse m_1 und jede Masse m_2 , in einer Entfernung r quadratisch abnehmend, mit unendlicher Reichweite und unendlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit mit der Kraft F_G ¹

$$F_G = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

gleichstark aufeinander, jedoch in entgegengesetzter Richtung(vgl. [16]).

Bei Betrachtung der Ablenkung der Lichtbahnen stößt Newtons Modell jedoch an seine Grenzen, da es die Gravitation als Anziehung zweier Punktmassen betrachtet und somit das Licht nur als Teilchen und nicht als elektromagnetische Welle berücksichtigt(vgl. [20]).

2.1.2 Allgemeine Relativitätstheorie

Um die Natur der Lichtablenkung durch die Gravitation ersichtlich zu erschließen wird das Wesen der Gravitation nicht wie in der klassischen Physik als eine durch das Gravitationsfeld erzeugte Fernkraft betrachtet, sondern als eine geometrische Eigenschaft der Raumzeit, welche, wie nach Einsteins allgemeinen Relativitätstheorie beschrieben, durch Materie mit Masse, Energie oder Druck verzerrt wird(vgl. [3]).

Stelle man sich vor, man befinde sich im frei fallenden Aufzug, so würden sich der Aufzug, die in ihm enthaltenen Gegenstände, sowie man selbst als der Beob-

¹ Die Größe G ist die Gravitationskonstante

achter, aus eigener Sicht in Ruhe befinden. Es gebe keine Möglichkeit, auf eine Kraft zu schließen, welche auf dieses System wirkt. Laut Einstein entspricht diese Situation einem identischen System im schwerelosen Weltraum. Die Schwerkraft ist somit lediglich eine Scheinkraft(vgl. [1]).

Diese Scheinkraft ist nun eigentlich eine Eigenschaft der Raumzeitgeometrie, da Materie, welche sich auf geraden Linien bewegt, durch die Krümmung der Raumzeit abgelenkt wird, ohne ihre geradlinige Bahn zu verlassen. Betrachtet man als Analogie hierzu eine zweidimensionale Fläche, auf der zwei Geraden an einem Punkt parallel laufen, so treffen diese niemals aufeinander, betrachtet man jedoch zwei Geraden auf einer Fläche, welche durch ein dritte, höhere Dimension zu einer Kugelform gekrümmt wird, so werden sich diese, auch wenn sie am Äquator parallel laufen, an den Polen der Kugel kreuzen. Sie nähern sich also, wie die Bahnen der bewegten Materie in der gekrümmten Raumzeit, einander an, ohne dass eine zusätzliche Kraft auf diese wirkt(vgl. [1]).

2.2 Lichtausbreitung im gekrümmten Raum

2.2.1 Elektromagnetische Wellen

In der Astronomie ist der Begriff der Lichts im weiteren Sinne synonym zur elektromagnetischen Welle, welche sich ohne Medium im Vakuum mit der Lichtgeschwindigkeit c^2 fortbewegt. Die Lichtgeschwindigkeit c ohne Medium kann aus der elektrischen Feldkonstante ϵ_0 und der magnetischen Feldkonstante μ_0 nach der Formel

$$c = \sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}$$

ermittelt werden. Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist konstant und Kennzeichnet die maximale Geschwindigkeit, mit der sich Informationen ausbreiten können(vgl. [15]).

Das Licht als elektromagnetische Welle setzt sich aus den Schwingungen des elektromagnetischen Feldes zusammen, welche sich durch den Raum ausbreiten. Eine typische linear polarisierte Welle setzt sich aus dem elektrischen und dem

² $c = 2,99 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$

magnetischen Feld zusammen, welche senkrecht aufeinander stehen. Dabei sind die Änderung im Ort des magnetischen Feldes mit der Änderung der Zeit des elektrischen Feldes verknüpft und umgekehrt die Änderung im Ort des elektrischen Feldes mit der Änderung in der Zeit des magnetischen Feldes. Für periodisch wechselnde Felder ergeben diese Verknüpfungen eine fortschreitende Welle(vgl. [15]).

2.2.2 Geodäten

In einer gekrümmten Raumzeit folgt das Licht immer der kürzesten möglichen Raumzeitbahn(vgl. [4]). Diese Bahnen nennt man Geodäten. Sie sind die kürzesten Verbindungen zwischen zwei Punkten in Mannigfaltigkeiten³. In der zweidimensionalen Geometrie unterscheidet man zwischen der euklidischen Geometrie und gekrümmten Fläche, wie zum Beispiel der Oberfläche einer Kugel. So ist die kürzeste Verbindung zweier Punkte auf einer ungekrümmten Fläche stets eine Gerade, jedoch verläuft die kürzeste Verbindungskurve auf einer Kugeloberfläche immer entlang der Großkreise, wie dem Äquator oder den Meridianen(vgl. [2]: 00:00 – 01:30).

Analog dazu unterscheiden sich die Lichtbahnen in einer flachen Raumzeit von denen in einer gekrümmten Raumzeit. In einer flachen Raumzeit bewegen sich Lichtstrahlen entlang gerader Linien. In einer gekrümmten Raumzeit hingegen folgen sie den Geodäten, die durch die Krümmung der Raumzeit beeinflusst werden(vgl. [4]).

2.2.3 Energie-Massen-Äquivalenz

Der Grund, warum die Bahnen des Lichts auch von der Raumzeitkrümmung durch die Gravitation abgelenkt werden, obwohl sie keine Masse besitzen, ist auf die Energie-Massen-Äquivalenz zurückzuführen. Da dem Licht eine Energie zugeordnet ist, kann diesem auch eine Masse zugeordnet werden(vgl. [9]: S. 7).

So wird dem Licht die Energie E_{ph} zugeordnet, welche sich aus dem Planckschen Wirkungsquantum h und der Frequenz f nach der Formel

$$E_{ph} = h \cdot f$$

3 gekrümmte Räume

zusammensetzt(vgl. [8]).

In Verbindung mit der Energie-Massen-Beziehung

$$E = mc^2$$

ergibt sich die zugeordnete Masse des Lichts:

$$E = m_{ph} \cdot c^2 \Leftrightarrow h \cdot f = m_{ph} \cdot c^2 \Leftrightarrow m_{ph} = \frac{h \cdot f}{c^2} \text{ (vgl. [7]).}$$

3 Gravitationslinsen

3.1 Grundlagen der Gravitationslinsen

3.1.1 Lichtablenkung nach Einstein

Basierend auf diesen Grundlagen kann man nun den logischen Schluss ziehen, dass die Himmelskörper im Weltraum aufgrund ihrer hohen Masse die Lichtstrahlen, die wir auf der Erde empfangen, durch ihre Gravitation ablenken. Dadurch wird das Abbild der Lichtquelle, welche wir beobachten wollen, verschoben, verzerrt oder sogar vervielfacht(vgl. [17]).

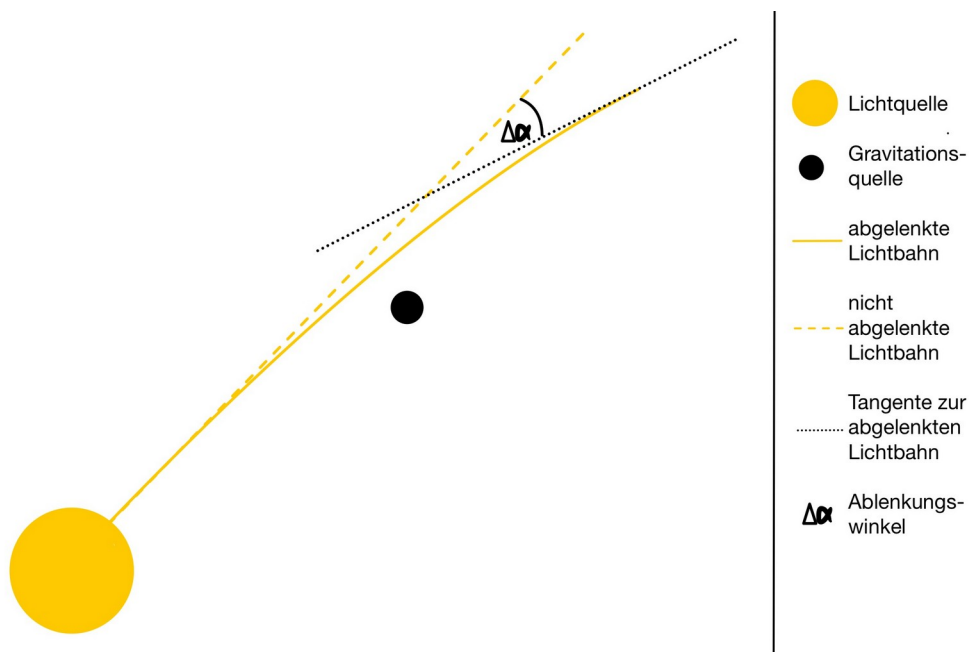


Abbildung 1: Ablenkung einer Lichtbahn (Eigene Darstellung, 2025)

Die Ablenkung des Lichts durch Gravitation kann mit dem Ablenkungswinkel $\Delta\alpha^4$ beschrieben werden, welcher von der Gravitationskonstante G , der Masse des Ablenkenden Himmelskörpers M , dem Abstand⁵ r und der Lichtgeschwindigkeit c abhängig ist. Berechnet wird dieser durch die Formel

$$\Delta\alpha = \frac{4GM}{rc^2} \text{ (vgl. [5])}.$$

Die erste experimentelle Bestätigung dieser Berechnungen und gleichzeitig der erste experimentelle Beweis der Relativitätstheorie erfolgte 1919 durch Arthur Eddington, indem er während einer totalen Sonnenfinsternis⁶ eine geringfügige Verschiebung der Abbildung einiger Sterne aufgrund der Sonne beobachtete (vgl. [17]).

3.1.2 Verschiedene Gravitationslinseneffekte

Der Gravitationslinseneffekt wird in drei verschiedene Arten nach dem Ausmaß ihrer Lichtablenkung aufgeteilt. In abnehmender Reihenfolge sind es der starke, der schwache und der Mikrogravitationslinseneffekt (vgl. [17]).

Der starke Gravitationslinseneffekt, der am einfachsten zu beobachten ist, tritt bei extremen Gravitationsfeldern auf, wie sie von schwarzen Löchern, Galaxien und Galaxienhaufen erzeugt werden. Dieser Effekt ist der Effekt mit der höchsten Ablenkung der Lichtbahnen und erzeugt somit auch die eindrucksvollsten Erscheinungen, wie dem Einsteinkreuz oder dem Einsteinring. (vgl. [17]).

Der schwache Gravitationslinseneffekt verursacht eine wesentlich schwächere Ablenkung des Lichts, weshalb eine Verzerrung durch diesen nicht direkt ersichtlich ist. Da man kein exaktes Abbild des Hintergrundobjekts zum Vergleich hat, muss das Ausmaß des schwachen Gravitationslinseneffekts durch statistische Methoden ermittelt werden. Dabei wird der Hintergrund betrachtet, welcher durch den schwachen Gravitationslinseneffekt verzerrt wird. Unter der Annahme, dass unter normalen Umständen die Rotation der Galaxien im Hintergrund zufällig verteilt

4 Dieser Winkel beschreibt den Winkel, in dem die gekrümmte Lichtbahn zur ursprünglichen Lichtbahn steht

5 Abstand des Punktes auf der Bahn, der dem Himmelskörper am nächsten ist zum Mittelpunkt des Himmelskörpers

6 Die Verschiebung durch unsere Sonne kann nur bei einer totalen Sonnenfinsternis erfolgen, da das Licht unserer Sonne das der zu beobachtenden Sterne überstrahlt

wäre, wird im aufgenommenen Bild nach typischen Mustern gesucht, wie die Ausrichtung von Galaxien entlang eines Rings um eine Gravitationsquelle. Diese Methode ist jedoch fehleranfällig, da die genaue Form der Galaxien unbekannt ist und durch verschiedene Störungen, wie Aufnahmefehler und atmosphärische Turbulenzen, verfälscht werden kann (vgl. [17]).

Auch der Einfluss von einzelnen Sternen oder Exoplaneten kann Lichtbahnen ablenken, auch wenn dieser Mikrolinseneffekt nicht durch eine Verzerrung ausgemacht werden kann, so kann man ihn durch eine Bündelung von Licht und die daraus resultierende Zunahme der Helligkeit ausmachen (vgl. [17]). Dieses Phänomen kann insbesondere beobachtet werden, wenn sich die Lichtquelle und die Gravitationsquelle annähern, da als Konsequenz die Lichtbündelung und folglich die Helligkeit weiter zunehmen. Das Gegenteil, eine Abnahme dieser, kann beobachtet werden, wenn sich Lichtquelle und Gravitationsquelle voneinander entfernen. Die Eigenschaften dieses Ereignisses, wie der symmetrische und einmalige Anstieg und Abfall der Helligkeit oder die Verstärkung des Lichts aller Wellenlängen, hilft dabei dieses Phänomen von anderen Ursachen der Helligkeitserhöhung zu separieren (vgl. [19]). Der Mikrolinseneffekt ist zudem eine große Hilfe bei der Ermittlung von sogenannten MACHOs, Objekten wie schwarze Löcher, extrasolare Planeten oder Zwergsterne, sowie bei der Ermittlung von Dunkler Materie⁷ (vgl. [18]).

3.2 Optische Effekte und Erscheinungsformen

3.2.1 Mehrfachbilder und Verzerrungen

Die Gravitationslinsen erzeugen viele verschiedene Mehrfachbilder und Verzerrungen. Eines davon ist zum Beispiel die erste entdeckte starke Gravitationslinse, der „Zwillingsquasar“ Q0957+561 im Sternbild Ursa. Dieser wird durch eine Gravitationslinse zweifach abgebildet (vgl. [21]).

Die erste Entdeckung einer Gravitationslinse, die aus mehreren Galaxien besteht⁸, geschah 1987 unabhängig von mehreren Astronomen (vgl. [17]). Der Entdeckte Galaxienhaufen war Abell 370 im Sternbild Walfisch, welcher mehrere Objekte

⁷ Mehr hierzu in Kapitel 4

⁸ Auch: Galaxienhaufen

durch seinen Gravitationslinseneffekt beeinflusst, wie „Der Drache“ oder die Galaxie HCM-6A, zur Zeit ihrer Entdeckung das am weitesten entfernte beobachtete Objekt(vgl. [11]).

3.2.2 Einsteinkreuz

Das Einsteinkreuz trägt auch den Namen QSO 2237+0305 und steht im Sternbild Pegasus. Der Quasar mit diesem Namen steht hinter der nach John Huchra benannten Huchras Linse, einer Galaxie in circa 400 Millionen Lichtjahren Entfernung. Das Abbild dieses Quasars wird durch diese Galaxie so verzerrt, dass dieser viermal zu sehen ist und mit dem Galaxienkern ein Kreuz bildet. Ähnliche Objekte sind nicht weit verbreitet, seit der Entdeckung dieses Einsteinkreuzes wurden lediglich circa 50 Himmelskörper gleicher Art entdeckt(vgl. [13]).

3.2.3 Einsteinring

Ein Einsteinring entsteht, wenn ein Objekt zur Beobachtung genau hinter der Gravitationslinse steht, die das Abbild dieses Objektes verformt. Im entstehenden Bild umgibt das zu beobachtende Objekt die Linse in Form eines Rings. Der Radius dieses Rings wird als Einsteinradius bezeichnet und lässt sich mit der Formel

$$r = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{d_{LS} \cdot d_L}{d_S}}$$

ermitteln.

Ein doppelter Einsteinring ist ein seltenes Phänomen das auftritt, wenn zwei Galaxien zum gleichen Zeitpunkt hinter der Linse stehen(vgl [14]).

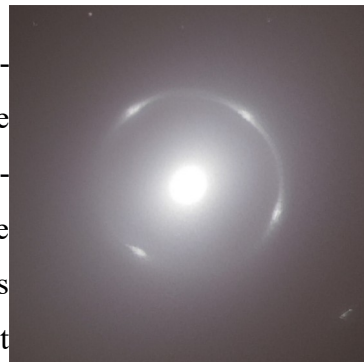


Abbildung 2: Einsteinring um die Galaxie NGC 6505 (Anselmi G., Culliandre J.-C., LiT., 2025)

4 Anwendung

9 Größen wie gehabt, d_{LS} ist Entfernung zwischen Objekt und Linse, d_L ist die Entfernung zwischen Beobachter und Linse, d_S ist die Entfernung zwischen Beobachter und Objekt

4.1 Entfernungs- und Massenbestimmung

4.1.1 Berechnung der Masse von Galaxien

Mithilfe der Gravitationslinseneffekte kann man viele Schlüsse auf das Universum ziehen, wie die Massen der Linsen, die das Licht ablenken. Nach dem Umformen der in Kapitel 3.1.1 benannten Formel zur Berechnung des Ablenk winkels erhält man die Masse M

$$M = \Delta\alpha \cdot \frac{rc^2}{4G} \text{ (vgl. [5])}$$

für die Gravitationslinse. So konnte man zum Beispiel den weißen Zwerg Stein 2051B auf 0,675 Sonnenmassen berechnen, indem man wartete, bis dieser sich vergleichsweise schnell fortbewegenden Stern vor einen Hintergrundstern bewegte. Danach konnte man anhand der Messung des Gravitationslinseneffekts die Masse der Zwergsterns bestimmen(vgl. [10]).

4.1.2 Konstanten und Parameter

Nach gleichem Prinzip kann man nun auch einige Konstanten, wie die Lichtgeschwindigkeit c

$$c = \sqrt{\frac{4GM}{r \cdot \Delta\alpha}}$$

oder die Gravitationskonstante G

$$G = \Delta\alpha \cdot \frac{rc^2}{4M},$$

bestimmen(vgl. [5]).

4.2 MACHOs und Dunkle Materie

4.2.1 Mikrolinseneffekt in der Anwendung

Der Mikrolinseneffekt wird angewendet, um Objekte zu entdecken, die unter anderen Umständen nicht zu entdecken wären, wie zum Beispiel Exoplaneten oder MACHOs, kurz für „Massive Astrophysical Compact Halo Objects“. MACHOs sind Objekte im Halo, also im äußersten Bereich der Galaxien, sie sind kompakt und bestehen aus baryonischer¹⁰ Materie. Das sind zum Beispiel Zwergsterne, Neutronensterne oder schwarze Löcher. Aufgrund ihrer geringen Helligkeit müssen diese, um erfasst zu werden, entweder durch Gravitationslinseneffekte verstärkt werden, oder selbst als Linse agieren, um von uns auf der Erde wahrgenommen zu werden. Die gleiche Methode wird genutzt, um Exoplaneten durch den Mikrolinseneffekt zu entdecken und zu analysieren(vgl. [18]).

4.2.2 Hinweise auf Dunkle Materie

Durch die Gravitationslinseneffekte wurde erstmals auffällig, dass die sichtbare Materie und die Materie, die über die Gravitation wechselwirkt nicht übereinstimmen. Die tatsächliche Masse, die auf Basis der Gravitationslinseneffekt berechnet wurde unterscheidet sich von der Sichtbaren um ein vielfaches (vgl. [6] 04:30 – 05:30). Durch die zuvor genannten MACHOs könnten zwar bis zu 20 % der dunklen Materie erklärt werden, jedoch werden diese Hochrechnung von Wissenschaftlern eher kritisch gesehen(vgl. [18]).

5 Fazit

Die Gravitationslinseneffekte, basierend auf der Vorstellung der Lichtablenkung durch Raumzeitkrümmung aus der Allgemeinen Relativitätstheorie, treten in drei Arten auf. Die starken, die schwachen und die Mikrolinsen unterscheiden sich im Ausmaß der Ablenkung, der Masse der Linse und unserer Möglichkeit dieser wahrzunehmen. Diese Effekte sind nützliche Werkzeuge zur Erforschung des Kosmos, da sie viele Informationen preisgeben, sowohl über die Lichtquelle, als

¹⁰ Materie, die keine dunkle Materie ist

auch über die Gravitationslinse. Besonders die Mikrolinseneffekte sind nützlich, um Exoplaneten, MACHOs und Dunkle Materie zu erforschen.

Bei der Erschließung der Grundlagen der Gravitation, des Lichts und der Gravitationslinsen gab es für mich keine wesentlichen Probleme, lediglich die Auswahl meiner Quellen ist etwas eintönig ausgefallen. Einige wenige Schwierigkeiten hatte ich bei der Darstellung der Anwendung, da ich keine Quellen mit Messwerten einer Gravitationslinse gefunden habe. Das größte Problem bei dieser Facharbeit war für mich mein eigenes Problem mit dem Zeitmanagement. Das Thema der Arbeit hat mir gut gefallen und ich hatte kaum Probleme mit dem Verständnis des Materials. Die Probleme mit der Auseinandersetzung mit dem Schreibprogramm hielten sich ebenfalls in Grenzen.

6 Anhang

6.1 Verzeichnisse

6.1.1 Literaturverzeichnis

- [1] 100SekundenPhysik (2022): Die Schwerkraft-Illusion, [YouTube] <https://www.youtube.com/watch?v=2uTBolGz3Yc>
- [2] Denkbar (2015): Geodätische Linien [Youtube] <https://www.youtube.com/watch?v=We1tkPPj1qk>
- [3] Einstein-Online (o. D.): Gravitation, [online] <https://www.einstein-online.info/explandict/gravitation-2/> [01.03.2025]
- [4] Einstein-online (o. D.): Verbogene Lichtstrahlen, [online] <https://www.einstein-online.info/lichtstrahlen/> [02.03.2025]
- [5] Embacher F. (o. D.): Lichtablenkung im Gravitationsfeld. Universität Wien
- [6] Kalurac Nigoris (2013) Die Physik Einsteins – Teil 5: Die Gravitationslinsen (mit Harald Lesch) [Youtube] https://www.youtube.com/watch?v=4stn6_OVYCY
- [7] LEIFiPhysik (o. D.): Ablenkung von photonen durch die Sonne, [online] <https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/aufgabe/ablenkung-von-photonen-durch-die-sonne#:~:text=Es%20gilt%20E%20%3D%20m%20P,des%20Lichtes%20eventuell%20beobachtbar%20sein> [02.03.2025]
- [8] LEIFiPhysik (o. D.): Quantenobjekt Photon, [online] <https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/Grundwissen/einsteins-theorie-des-lichts#:~:text=Energie%20von%20Photonen,8%20m%20s%20die%20Lichtgeschwindigkeit.> [02.03.2025]
- [9] Steinmeyer, S. (2022): Zeit in der Relativitätstheorie. Astrogarten Bramsche
- [10] Welt der Physik (2017): Stern per Lichtablenkung abgewogen, [online] <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/nachrichten/2017/stern-per-lichtablenkung-gewogen> [02.03.2025]
- [11] Wikipedia (2023): Abell 370, [online] https://de.wikipedia.org/wiki/Abell_370 [02.03.2025]
- [12] Wikipedia (2025): Allgemeine Relativitätstheorie, [online] https://de.wikipedia.org/wiki/Allgemeine_Relativit%C3%A4tstheorie [02.03.2025]
- [13] Wikipedia (2025): Einsteinkreuz, [online] <https://de.wikipedia.org/wiki/Einsteinkreuz> [02.03.2025]
- [14] Wikipedia (2025): Einsteinring, [online] <https://de.wikipedia.org/wiki/Einsteinring> [02.03.2025]
- [15] Wikipedia (2025): Elektromagnetische Welle, [online] https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetische_Welle [02.03.2025]
- [16] Wikipedia (2025): Gravitation, [online] <https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitation> [28.02.2025]
- [17] Wikipedia (2024): Gravitationslinseneffekt, [online] <https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationslinseneffekt> [02.03.2025]

- [18] Wikipedia (2024): MACHO, [online] <https://de.wikipedia.org/wiki/MACHO> [02.03.2025]
[19] Wikipedia (2024): Mikrolinseneffekt, [online] <https://de.wikipedia.org/wiki/Mikrolinseneffekt> [02.03.2025]
[20] Wikipedia (2025): Newtonsches Gravitationsgesetz, [online] https://de.wikipedia.org/wiki/Newtonsches_Gravitationsgesetz. [28.02.2025]
[21] Wikipedia (2024): Q0957+561, [online] <https://de.wikipedia.org/wiki/Q0957%2B561> [02.03.2025]

6.1.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ablenkung einer Lichtbahn (eigene Darstellung, 2025)

Abbildung 2: Einsteinring um die Galaxie NGC 6505 (Anselmi G., Culliandre J.-C., LiT., 2025)

6.2 Erklärungen

6.2.1 Selbstständigkeit

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Facharbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.

Bramsche, 24.02.2025

6.2.2 Veröffentlichung

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

Bramsche, 24.02.2025