

# Kosmische Jets im Weltall

*Eine Seminarfacharbeit am  
Greselius-Gymnasium Bramsche*



*Abbildung 1: Infrarotaufnahme der Jets von Herbig-Haro 212, aufgenommen von dem European Southern Observatory am 12.10.2015*

Trtovac, Sevda  
Seminarfach Astronomie, Jahrgang 12  
Fachleiter: Florian Riemer  
Abgabetermin: 21.02.2024

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	1
2. Was ist ein Kosmischer Jet? .....	2
2.1 Entstehung und Aufbau eines Jets .....	2
2.2 Wie behält ein Jet seine Struktur über Lichtjahre hinweg? .....	5
3. Überlichtgeschwindigkeit trotz Relativitätstheorie? - Illusionen beim Betrachten der Jets .....	8
3.1 Überlichtgeschwindigkeit trotz Einstein? .....	8
3.2 Weitere Illusionen im Zusammenhang mit dem Betrachter .....	9
4. Radioastronomie.....	12
4.1 Junge Geschichte .....	12
4.2 Wie funktioniert ein Radioteleskop? .....	13
5. Fazit.....	16
6. Anhang.....	
6.1 Literaturverzeichnis .....	
6.2 Abbildungsverzeichnis .....	
6.3 Selbstständigkeitserklärung .....	

# 1. Einleitung

Seit tausenden von Jahren ist die Menschheit von dem Nachthimmel fasziniert. Man sieht den Mond als zentrales Stück am Himmel mit weiteren hellen Flecken, helle Sterne und Galaxien, die allesamt die schwarze Leinwand erleuchten. Aus Neugier nach dem Unerreichbaren entwickelten einige Menschen Teleskope, welche bis heute zu einem genaueren Blick auf unser Universum einladen und die modernen Untersuchungen befeuern. Doch all die frühen Teleskope befinden sich in dem Spektrum des sichtbaren Lichts – dabei bietet das Weltall so weitaus mehr. Ein einziger Blick durch ein nicht-optisches Teleskop enthüllt eine völlig neue Welt des Unsichtbaren. Durch sie können Forscher unser Dasein besser verstehen oder neue Indizien für aufsprießende Theorien und Modelle finden.

Diese Arbeit soll sich mit einem Bereich dieser sonderbaren Welt befassen: Sie sind einer der längsten und schnellsten Objekte im All, jedoch sind nur mit einem Radio- oder Röntgenteleskop erkennbar. Lange Stränge am Himmel, die mehrfach auftauchen und Bestandteil der Radioastronomie sind. Sie sind größtenteils unerforscht und keiner kann mit Gewissheit sagen, wie sie entstehen und was sie bewirken – die kosmischen Jets.

Daher werden in dieser Arbeit mehrere Modelle und Theorien zu ihrer Entstehung, ihrem Aufbau und ihrer Erscheinung besprochen - in der Regel spezifisch auf die Jets von Aktiven Galaktischen Kernen<sup>1</sup> bezogen. Zusätzlich wird anhand der jungen Geschichte und der Funktionsweise von Radioteleskopen aufgezeigt, weshalb dieses Thema so unerforscht ist und warum die Zukunft der Forschung in diesem Bereich sich als besonders interessant herausstellen könnte.

---

<sup>1</sup> Ein Aktiver Galaktischer Kern ist eine zentrale Region innerhalb einer Galaxie, die große Mengen an Strahlung emittiert, welche nicht von einem Stern stammt (Quelle: [https://de.wikipedia.org/wiki/Aktiver\\_Galaxienkern](https://de.wikipedia.org/wiki/Aktiver_Galaxienkern)).

## 2. Was ist ein Kosmischer Jet?

### 2.1 Entstehung und Aufbau eines Jets

Ob nun ein Stern, Schwarzes Loch oder Quasar<sup>2</sup>, einen kosmischen Jet kann man bei vielen Himmelskörpern dieser Arten entdecken. Von seinem Ursprung aus erstreckt sich ein Jet häufig über Lichtjahre hinweg auf einer meist gradlinigen Bahn in das Weltall hinaus. Sie reichen meist weiter als die eigene Galaxie groß ist und dennoch kann man die meisten nicht mit dem bloßen Auge sehen. Ein Jet ist ein eng gebündelter Strahl aus Plasma, also aus ionisiertem Gas, welcher oftmals nur durch seine Aussendung von Radiowellen aufzuspüren ist. Wie ein Jet möglicherweise entsteht und funktioniert wird in Abbildung 2 veranschaulicht.<sup>3</sup>

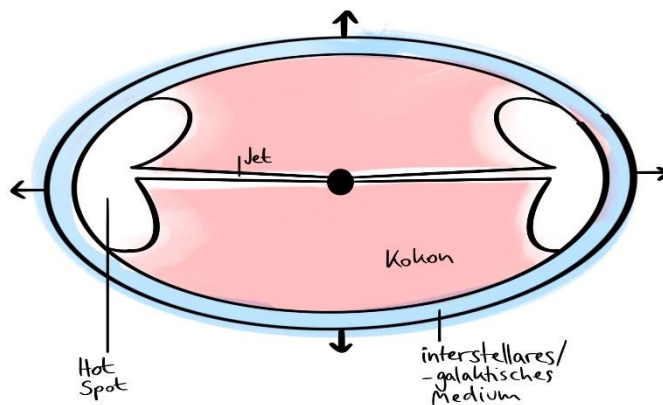


Abbildung 2: Modellhafter Aufbau eines Jets in Verbindung mit dem Interstellaren/-galaktischen Medium (blau) und der Bildung von Hot Spots und einem ‚Kokon‘ (rot)

Eine wichtige Grundlage für das Verstehen der Jets ist die Erkenntnis, dass Sterne und Galaxien nicht inmitten von einem Vakuum existieren. Beide haben ein jeweils interstellares oder intergalaktisches Medium, eine aus Gas und Staub bestehende Materie, die zwischen Sternen und Galaxien vorzufinden ist. Obwohl Staub und Gas in den zwei Medien nur eine geringe Dichte im Vergleich zum weiten Raum aufweisen (ein einzelnes Wasserstoffatom/cm<sup>3</sup> bis hin zu einem einzelnen Wasserstoffatom/1.000.000cm<sup>3</sup>), so sind sie dennoch vorhanden und leisten Widerstand gegen einen Jet, der dadurch auf seinem langen Weg zum Teil abgebremst wird (s. Abb. 2). Der Theorie nach entsteht durch diese Abbremsung, ein „Hot Spot“ (dt. „heißer Fleck“), da nachkommendes Material, welches weniger

<sup>2</sup> Ein Quasar ist der aktive Kern einer Galaxie (Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Quasar>).

<sup>3</sup> Vgl. Begelman, Blandford, Rees 1987, S. 148.

Widerstand erleidet und somit schneller ist, gegen das langsamere Material stößt und nun selbst rapide an Geschwindigkeit verliert. Hier wird die zuvor fast komplett kinetische Energie (Bewegungsenergie) nun zum Teil zu der von relativistischen Elektronen<sup>4</sup> und zu der von dem Magnetfeld, welches einen Jet umkreist umgewandelt. Diese beiden Energien bilden die Synchrotronstrahlung, eine elektromagnetische Strahlung, die bei der Umlenkung von geladenen Teilchen aus einer geraden Bahn heraus entsteht und sich im Bereich der Radiowellen befindet. Diese wird mit einem Radioteleskop aufgezeichnet. Zusätzlich zu der Synchrotronstrahlung bildet sich auch eine durch den gesamten Jet ziehende Stoßwelle. Jene Stoßwelle führt dazu, dass die Materie in den eben erwähnten Hot Spots sich wie eine Blase verteilt und über die Zeitspanne von zehntausend bis eine Million Jahren eine Art Kokon in Richtung Galaxie bildet. Hier sind die Hot Spots der am meisten Radiostrahlung emittierende Teil. Bei einigen Jets tritt der Fall auf, dass die Hot Spots nicht gebildet werden, da die nötige Geschwindigkeit nicht erreicht wird. Stattdessen zerstreuen sich die Enden des Jets in eine Art Nebel, ähnlich wie bei dem Kokon (s. Abb. 2).<sup>5</sup>

Dabei ist es unklar, wie solch ein Jet entsteht. Zurzeit gibt es drei Modelle, die einen Ansatz anbieten und jeweils mit Grafiken veranschaulicht werden.

Das erste Modell geht davon aus, dass sich im inneren einer kühlen Gaswolke ein Zentrum von heißerem Gas gebildet hat. Dies könnte durch externe Körper, wie ein Schwarzes Loch, erhitzt worden sein, sobald es in die Reichweite deren Anziehungskräfte gekommen ist. An der Rotationsachse würde das wärmere und somit weniger dichte Gas entweichen, da dort der geringste Widerstand herrscht. Durch den geringeren Druck des heißen Gases, kann die kalte Gaswolke diese optimaler umschließen, bevor der Jet so stark gebündelt ist, dass dieser als eine Art Verlängerung der Rotationsachse ausgestoßen wird. Doch gibt es einige Konflikte mit dieser Theorie: Von einer Gaswolke, die so eine große Beschleunigung bzw. einen so großen Druck aufbauen könnte und selbst eine Röntgenquelle sein müsste, fehlen in der Messung die Beweise. Auch müsste solch eine Gaswolke klein sein, wenn man die Länge der Jets in Betrachtung zieht,

---

<sup>4</sup> Sich annähernd an Lichtgeschwindigkeit bewegende Elektronen.

<sup>5</sup> Vgl. Begelman, Rees 1997, S. 151-154.

und trotzdem müssten sie genug Energie haben, um die Jets auf das Nötige zu beschleunigen.<sup>6</sup>

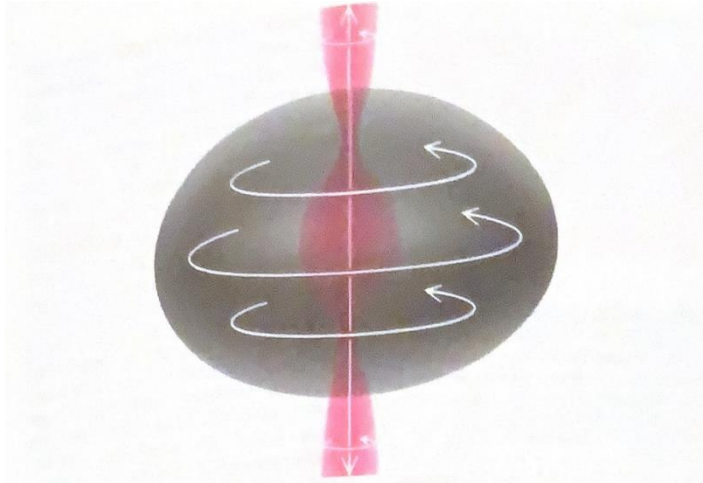


Abbildung 3: Das Düsenmodell, Eine kalte Gaswolke rotiert sich um heißeres Gas im Inneren

Das zweite Modell basiert auf ein rotierendes Schwarzes Loch, bei welchem der Strahlungsdruck bzw. der Druck des heißen Gases das Innere der Gasscheibe um das Schwarze Loch herum aufbläht. Nicht nur dies würde dem Gas eine Beschleunigung geben, sondern auch ein mögliches Magnetfeld innerhalb der Gasscheibe könnte mit der Richtung der Rotation dem Jet eine Beschleunigung geben. Gegen dieses Modell spricht die Kurzlebigkeit des Drucks, sobald das Gas im Jet entweicht, würde dieses keinen stabilen Jet bilden können.<sup>7</sup>



Abbildung 4: Das Torusmodell, hier ‚drückt‘ sich Gas aus einer Umgebung aus Gas heraus in Form eines Jets

Das dritte und neueste der erwähnten Modelle geht von einer beliebigen rotierenden Quelle, stellar oder galaktisch, aus, solange eine Akkretionsscheibe mit innerem Magnetfeld besteht. Durch die entstehende Zentrifugalkraft der Akkretionsscheibe wird Materie aus eben dieser geschleudert und beschleunigt.

<sup>6</sup> Vgl. Begelman, Blandford, Rees 1987, S. 156-157.

<sup>7</sup> Vgl. Begelman, Blandford, Rees 1987, S. 157-158.

Nun bündelt diese Materie sich zu zwei entgegengesetzten Jets entlang der Rotationsachse zusammen, was durch das vorhandene Magnetfeld in der Scheibe zustande kommt und beschleunigend wirkt. Dieses Magnetfeld befindet sich ebenfalls um die Jets selbst, wo es sich spiralartig um das heiße Plasma windet und dieses umklammert.<sup>8</sup>

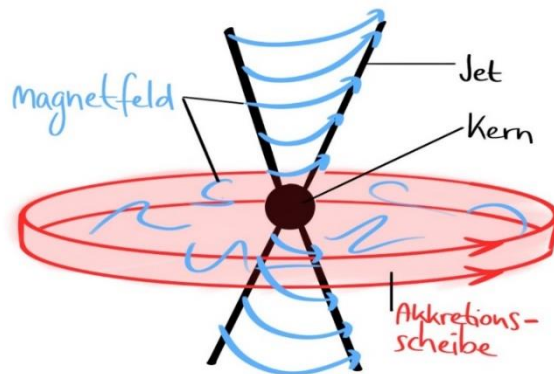


Abbildung 5: Modellhafte Darstellung der bisher anerkanntesten Theorie zur Entstehung eines Jets. Eine Akkretionsscheibe und ein Magnetfeld sind hier die Schlüssel zur Entstehung eines Jets.

Die drei Modelle weisen Gemeinsamkeiten auf: Es gibt ein großes Objekt im Zentrum, welches diese Jets durch eine rotierende Gasscheibe (oder äußerst unwahrscheinlicher: -wolke) aussondert. Auch hängt bei allen die Größe und Dichte jener Scheibe mit der des Jets zusammen, da immer neue Materie durch diesen Strom des ionisierten Gases und der Magnetfelder nachgeführt wird. Also entsteht bei jedem Modell eine Wechselwirkung zwischen dem Magnetfeld, der Materie und dem elektrischen Strom, die sich in Form einer düsenartigen Beschleunigung durch den Druck der Magnetohydrodynamik zeigt und einen Jet bildet<sup>9</sup>.

## 2.2 Wie behält ein Jet seine Struktur über Lichtjahre hinweg?

Die Länge und Stabilität eines Jets sind wissenschaftlich gesehen erstaunlich. Wie kommt es zu einer solch gradlinigen Bahn, die in dem Extremfall der Galaxie CGCG 049-933 bis auf 1,5 Millionen Lichtjahre in ihrer Länge aufweist?<sup>10</sup> Dies lässt sich auf das Magnetfeld, welches sich wie eine Spirale um den Jet wickelt,

<sup>8</sup> Vgl. Fendt 2021, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=YqshmyhS48k>

<sup>9</sup> Wikipedia: Magnethydrodynamik, URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetohydrodynamik>

<sup>10</sup> Vgl. Gache 2007, URL: <https://news.softpedia.com/news/Galactic-Jet-Stream-Longest-Ever-Discovered-73252.shtml>

zurückführen. Es könnte das Plasma sozusagen einkapseln, da ringförmige Magnetfelder sich zusammenziehen und somit in einer Linie beibehalten.<sup>11</sup>

Doch ist längst nicht jeder Jet gradlinig. Einige, besonders die von aktiven galaktischen Kernen, sind auch oftmals am Ende des Strahls abgelenkt und punktsymmetrisch. Der Grund für abgelenkte Strahlen könnten externe Faktoren sein, die das Magnetfeld übertrumpfen. Am naheliegendsten hierbei ist eine Galaxie, die mit hoher Geschwindigkeit ihre Jets nachzieht, während sie durch Gaswolken schwebt. Wenn ein Jet generell durch ein Medium fließt, dann nennt man den Druck, der auf den Jet durch das äußere Medium einwirkt, einen Staudruck (eng. „Ram Pressure“), der in manchen Fällen zu einem abgelenkten Jet führt. Bei Galaxien innerhalb eines Clusters, also eine große Ansammlung an Galaxien nah zueinander, ist die Wahrscheinlichkeit für solch eine Gaswolke, die dicht genug ist, um einen Jet abzulenken, am größten. Computersimulationen von der University of Wisconsin-Madison unterstützen diese Theorie, da sie einen Trend der Ablenkung des Strahls bei den Galaxien aufzeigen, die nahe bei mindestens drei anderen Galaxien sind. Zum Vergleich sind die meisten Galaxien mit Jets ohne Kurven alleinstehend oder mit nur in der Nähe einer weiteren Galaxie. Innerhalb dieser Cluster scheint es ebenso eine Hierarchie zu geben: Die massiveren und meist auch helleren Galaxien sind oftmals im Zentrum eines Clusters und beschleunigen durch die Gravitation die umliegenden, leichteren Galaxien. Diese Galaxien in Zentren der Cluster sind zu 90% die, die auch keine gekrümmten Jets hat, da sie sich nicht schnell genug bewegen. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es ein Zusammenspiel der Geschwindigkeit der Jets von aktiven galaktischen Kernen und die Dichte des Gases um sie herum ist, die eine Krümmung der Bahn erzeugen.<sup>12</sup>

Auch gibt es ein Phänomen, welches in einer Computersimulation von dem College of Charleston zu sehen ist. Nachdem ein Jet in dieser Simulation zur Erforschung des Verhaltens von Jets in verschiedenen Winkeln einen neuen Winkel einnimmt, der ihn aber instabil werden lässt, geschieht eine Art Neuorientierung. Der simulierte Jet hat dann intern abrupt eine neue Richtung einschlagen, nur um dann den Prozess zu wiederholen. Dieses Phänomen scheint aber nur dann einzutreten, wenn der Jet eine Stelle durchquert, in welcher er bereits vorher gewesen ist und demnach auch dichtere Materie als nur das intergalaktische vorherrscht. Der Staudruck ist demnach um Einiges reduzierter,

---

<sup>11</sup> Vgl. Fendt 2021, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=YqshmyhS48k>

<sup>12</sup> Vgl. Barncard 2022, URL: <https://news.wisc.edu/speed-and-dense-gas-bend-jets-of-matter-streaming-away-from-some-galaxy-centers/>



da es keinen großen Unterschied zwischen dem Jet und der verbliebenen Materie in ihrer Dichte gibt. Wie diese Neuorientierung jedoch zustande kommt, ist wie Vieles in diesem Bereich ungewiss.<sup>13</sup>

Nicht nur die Form eines Jets muss man beachten, wenn man die Erhaltung eines Jets untersucht. Der Blick zur Versorgung eines Jets ist ebenso zu beachten, wobei hier wichtig ist, dass Jets nach heutigem Verständnis keine hohe Dichte haben. Dazu kann man sich die Kannibalismustheorie ansehen. Diese Theorie dient hauptsächlich der Frage nach der stetigen Materie und Energieversorgung eines Jets. Am Anfang des Universums waren nahegelegene Galaxien zueinander keine Seltenheit, so auch in Galaxienhaufen. Sie wirken aufeinander ein. Durch gegenseitige Anziehungskräfte konnte diese Wirkung zwischen zwei Galaxien so weit gehen, dass eine Galaxie (der „Missionar“) von der anderen (dem „Kannibalen“) ‚verschluckt‘ wird. Angenommen dieser Kern der Galaxie ist ein Supermassereiches Schwarzes Loch, welches nun alles, was nicht in das Loch selbst fällt, in einer Akkretionsscheibe sammelt. Dieser Prozess dauert so lange, dass ein Jet problemlos über eine lange Zeit mit neuer Materie zum Hinausschießen versorgt werden kann. So ist es also die Akkretionsscheibe, der stetig neue Materie zukommt, die wiederum dem Jet dann etwas Materie überträgt.<sup>14</sup>

---

<sup>13</sup> Vgl. Nolting 2021, URL: <https://www2.mpia-hd.mpg.de/jets2021/index2.html>

<sup>14</sup> Vgl. Verschuur 1988, S. 77-78.

### 3. Überlichtgeschwindigkeit trotz Relativitätstheorie? - Illusionen beim Betrachten der Jets

#### 3.1 Überlichtgeschwindigkeit trotz Einstein?

Es gibt ein Phänomen, welches bei der Betrachtung von Kosmischen Jets als Wichtig zu erachten ist. Beobachtet man einen sogenannten „Knot“ (dt. „Knoten“), also eine Ansammlung von Materie innerhalb eines Jets, dessen Ursache ein großer Bestandteil der Forschung und somit ungeklärt ist, über längere Zeit, so meint man aus der Differenz der Quotienten der Punkte zu erkennen, dass ein Jet auf ein Vielfaches der Lichtgeschwindigkeit in eigener Geschwindigkeit kommt. Dies steht im direkten Kontrast zu Einsteins Relativitätstheorie, die unter anderem besagt, dass nichts Schnelleres als das Licht selbst existieren kann. Wie kann das also sein? Die Antwort findet sich in einer Illusion, abhängig zum Standpunkt des Betrachters. <sup>15</sup>

Ist ein Jet der Erde nicht komplett senkrecht zugewandt und ebenso mit relativistischer Geschwindigkeit unterwegs, so bildet sich das Phänomen der scheinbaren Überlichtgeschwindigkeit. Zum Verständnis eignet sich hier eine Grafik.

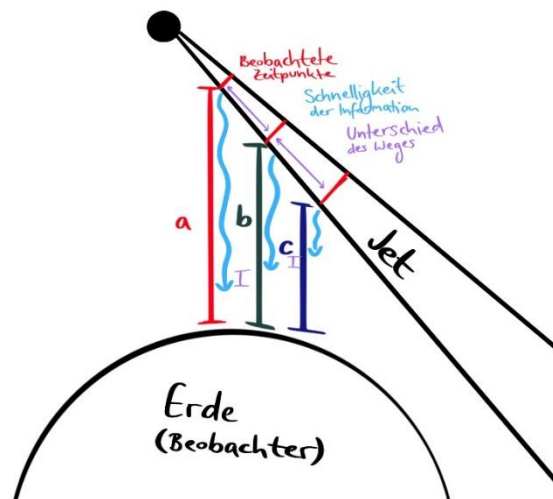


Abbildung 6: Der Weg eines Knots in einem zu dem Betrachter gerichteten Jet in Verbindung mit dem zurückgelegten Weg. Dieser unterscheidet sich durch die hohen Geschwindigkeiten und immer kürzer werdenden Abstände zum Betrachter kaum, obwohl in Wahrheit zeitlich eine große Spanne zwischen den Punkten liegt.

Die Grafik stellt die Erde, von der aus ein relativistischer Jet beobachtet wird, dar. Hierbei stehen die roten Striche im Jet für die Position eines Knots. Nun bewegt

<sup>15</sup> Vgl. Lesch 2020, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=t8Xjs1A7CE>

sich diese Art von Jet wie bereits erwähnt mit bis zu 99% der Lichtgeschwindigkeit, wohingegen die Information in Form von Licht, und zwar dass dieser Jet überhaupt existiert, mit Lichtgeschwindigkeit reist. Also ist die Quelle der Information nur ein wenig langsamer als die Information selbst, welches gleich ins Spiel kommt. Dass die zeitlichen Intervalle, in welchen wir den Standort beobachten, uns immer kleiner erscheinen, dürfte wohl am Weg liegen, den diese Information zu der Erde braucht. Dieser wird immer kürzer und wird knapp schneller als die Informationsquelle selbst zum Beobachter ausgesendet (s. Abb. 3 a bis c), weshalb diese fast zeitgleich bei dem Beobachter ankommen. Somit ergibt sich rechnerisch die Illusion der Überlichtgeschwindigkeit, da der Jet selbst anscheinend bei kürzerer Zeit den gleichen Weg geschafft hat, den diese neue Information zur Erde braucht im Vergleich zur vorherigen (s. Abb. 3 in lila Gekennzeichnetes).<sup>16</sup>

In einem Beispiel von dem Astrophysiker Harald Lesch kann man es so zusammenfassen: Eine Kutsche (Der Jet) und ein Bote (Die Information) reisen in ein weit entferntes Dorf (Beobachter/Erde), zu welchem man mehrere Stunden reisen muss. Der Bote kommt zuerst an und verkündet, dass die Kutsche losgefahren sei. Doch nur wenige Minuten später ist diese auch schon eingetroffen. Nun fragt man sich wie diese Kutsche in nur wenigen Minuten die gesamte Strecke zurücklegen konnte. In Wahrheit ist diese Kutsche jedoch die ganze Zeit nur knapp hinter dem Boten gewesen und hat sich nicht ungeheuerlich schnell bewegt wie vorerst angenommen. Das lässt sich auch auf einen Jet übertragen.<sup>17</sup>

### 3.2 Weitere Illusionen im Zusammenhang mit dem Betrachter

Hat man einen Jet, der nicht senkrecht in die Richtung des Betrachters zeigt, so gibt es im Regelfall einen zweiten Jet, der sich vom Betrachter wegbewegt (s. Abb. 8). Dieser erscheint nicht nur langsamer, wenn man die vorherige Illusion umkehrt (Die Strecke der Information wird länger), sondern er erscheint auch weniger leuchtstark oder gar unsichtbar, wie im Beispiel der Galaxie Messier 87<sup>18</sup>. Das liegt an der relativistischen Aberration, die besagt, dass je näher die Geschwindigkeit einer Strahlungsquelle an der Geschwindigkeit des Lichts ist, desto konzentrierter ist die Strahlung selbst (s. Abb. 7). Das heißt, dass ein äußerst schneller Jet nur eine Strahlung in einer Art Vorwärtskegel aufzeigt, die also für abgewandte

---

<sup>16</sup> Vgl. Begelman, Blandford, Rees 1987, S. 154-155; Vgl. Begelman, Rees 1997, S. 168.

<sup>17</sup> Vgl. Lesch 2020, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=t8Xjs1A7CE>

<sup>18</sup> Vgl. Kovalev et al 2007, URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/522603/fulltext/>

Betrachter unsichtbar erscheint. Bei langsameren Jets ist dies nicht allzu extrem, weswegen man diese noch schwach erkennt. Umgekehrt scheinen auch Jets, je näher sie senkrecht zur Erde weisen, heller zu sein als der abgewandte.<sup>19</sup>

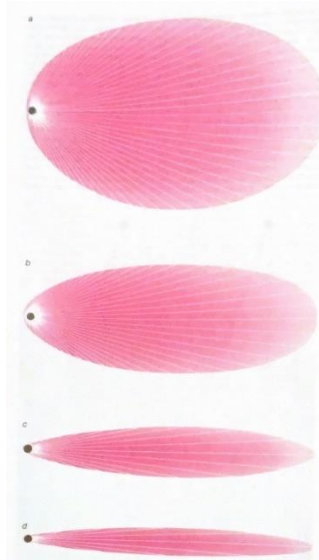


Abbildung 7: Relativistische Aberration in Bezug auf Geschwindigkeit, Die Geschwindigkeit nimmt von oben (50% der Lichtgeschwindigkeit) nach unten (98% der Lichtgeschwindigkeit) zu.

Auch gibt es andere Ausrichtungen eines Jets, die Täuschungen vorweisen. Ist ein Jet senkrecht zum Betrachter ausgerichtet, so erscheint ein Jet diesem als gebündelter Kern mit schwächerer Außenstrahlung (s. Abb. 8). Ist ein Jet waagrecht zum Betrachter, so erscheint dieser fast gar nicht, da die relativistische Aberration, die, wie zuvor erklärt, die Strahlung wie eine Art Kegel beschleunigt und so nur Bruchteile der Radiostrahlung bei dem Beobachter ankommt (s. Abb. 8).<sup>20</sup>

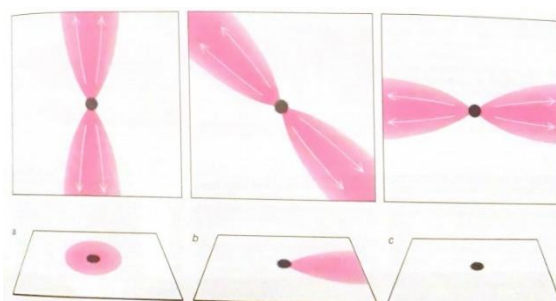


Abbildung 8: Jets aus verschiedenen Winkeln (oben) und wie sie bei dem Betrachter erscheinen (unten)

<sup>19</sup> Vgl. Begelman, Blandford, Rees 1987, S. 154-155; Begelman, Rees 1997, S. 171.

<sup>20</sup> Vgl. Begelman, Blandford, Rees 1987, S. 154-155.

Auch können insbesondere richtungsändernde Jets fälschlicherweise zu verschiedenen Fanaroff-Riley Klassifizierungen zugehören, obwohl sie in Wahrheit derselben zugeordnet werden müssten, nur sind sie eben aus verschiedenen Winkeln beobachtet worden. Die Klassifizierungen sind nur auf zwei Bereiche eines Jets aufzuteilen: Die erste (FR1) ist ein Jet, der nahe dem eigenen Ursprung eine große Ausströmung an Radiowellen aufweist und eher im Nebel verschwindet statt wie bei der zweiten in Hot Spots am Ende des Jets aufgeht.<sup>21</sup>

Diese möglicherweise fälschliche Einteilung in verschiedenen Klassifikationen liegt an dem Standpunkt des Betrachters. Die in der Abbildung linke Simulation von dem College of Charleston zeigt genau den gleichen Zeitpunkt eines Jets wie die rechte, nur wurde die Richtung in Bezug zum Betrachter um  $90^\circ$  verschoben. So erkennt man links vermeintlich einen FR1-klassifizierten Jet, da dieser im Ursprung am hellsten ist und am Ende eher zerstreut aufgefunden wird statt wie rechts bei dem vermeintlich FR2-klassifizierten Jet, der in scheinbaren Hot Spots endet. Diese Täuschung kommt durch eben diesen anderen Blickwinkel auf, doch liegt dies lediglich in der Geometrie statt in der relativistischen Aberration, auch ein  $90^\circ$  nach rechts gedrehtes ‚S‘ erscheint dem Betrachter wie ein ‚I‘.<sup>22</sup>

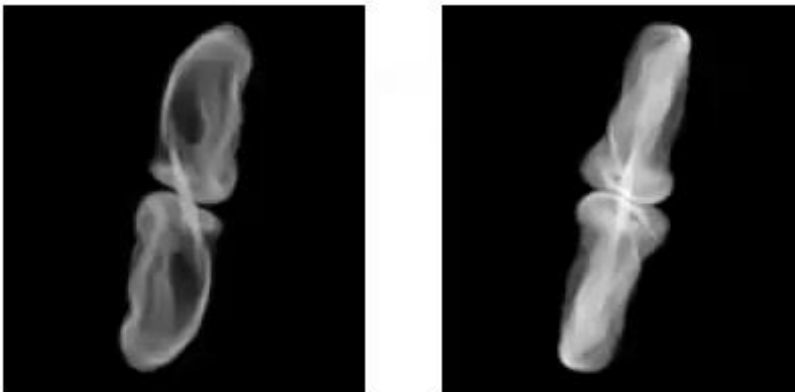


Abbildung 9: Ein simulierter Jet im Original (links) und seitlich um  $90^\circ$  rotiert (rechts)

---

<sup>21</sup> Vgl. Wikipedia: Fanaroff.Riley Classification, URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fanaroff%E2%80%93Riley\\_classification](https://en.wikipedia.org/wiki/Fanaroff%E2%80%93Riley_classification)

<sup>22</sup> Vgl. Nolting 2021, URL: <https://www2.mpia-hd.mpg.de/jets2021/index2.html>

## 4. Radioastronomie

### 4.1 Junge Geschichte

Die junge Geschichte der Radioastronomie beginnt erst im 20. Jahrhundert, als 1917 Heber Curtis einen optisch sichtbaren Jet bei der elliptischen Galaxie M87 entdeckt und diesen in seiner Veröffentlichung „Descriptions of 762 Nebulae and Clusters Photographed with the Crossley Reflector“ aus dem Jahre 1918 schriftlich vermerkt. Jedoch schien diese Entdeckung bis auf Weiteres kein großes Aufsehen erregt zu haben, da erst mit Karl Janskys Entdeckung eines Jets im Jahre 1931 die Forschung in der Radioastronomie Fahrt aufnahm.

Seine Entdeckung bestand in Verbindung mit der Telekommunikation, denn diese wies Störungen im Bereich von transatlantischen Telefonaten auf, denen Jansky auf den Grund gehen sollte. Mit einer selbstgebauten Antenne bemerkte er eine Störung des Signals, die im 24 Stunden Takt (genau genommen im 23 Stunden und 56 Minuten Takt, die Spanne eines Sterntags) aufzukommen schien<sup>23</sup>. Schnell stellte sich heraus, dass dies in Verbindung mit der Milchstraße war und er extraterrestrische Radiowellen, deren Quellen viele Lichtjahre entfernt sind, entdeckte. Dies brachte ihn auf das Titelblatt der New York Times.

1942 veröffentlichte der Amerikaner Grote Reber ebenso seine Ergebnisse in Form von Himmelskarten, die die Radiowellen von nicht nur der Milchstraße, sondern auch nach heutigem Verständnis die Radiowellen von den uns bekannten stärksten Quellen Cygnus A, einer Radiogalaxie<sup>24</sup>, und Cassiopeia A, einem Überrest einer Supernova<sup>25</sup>, aufzeichnete.

Diese ersten Radioteleskope waren in ihrer Auflösung sehr schlecht, warum dies der Fall ist, soll im nächsten Abschnitt erklärt werden. Jedoch nahm man 1953 mit dem ersten Netzwerk aus Radioteleskopen von den Nuffield Radio Astronomy Laboratories bessere Auflösungen auf, da sie sich die Radiointerferometrie zunutze machten, auf die ebenso detaillierter eingegangen werden wird.<sup>26</sup>

Die Interferometrie wurde mit dem „Very Large Array“ (VLA) von dem National Radio Astronomy Observatory, welches heute noch im Betrieb ist, ausgeweitet, als sie 1976 zum ersten Mal eine Beobachtung mithilfe dieser Technik durchführte<sup>27</sup>.

---

<sup>23</sup> Vgl. Wikipedia: Sterntag, URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sterntag>

<sup>24</sup> Eine Radiogalaxie ist eine Galaxie, wessen Radiostrahlung beobachtet werden kann (Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Radiogalaxie>).

<sup>25</sup> Eine Supernova ist der explosive Tod eines Sterns, oftmals durch seine helle Leuchtkraft zu bemerken (Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Supernova>).

<sup>26</sup> Vgl. Begelman, Rees 1997, S. 146-150; Sternengeschichten 2017, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=E39FcRQ0Ik>

<sup>27</sup> Vgl. The National Radio Astronomy Observatory 2024, URL: <https://public.nrao.edu/telescopes/vla/>

Anfang 1977 kam auch die „Space Very Long Baseline Interferometry“ (Space VLBI oder auch nur VLBI) als eigene Technik hinzu, die beispielsweise in der „European VLBI Network“ (EVN) oder in dem „Very Long Baseline Array“ (VLBA) in den Vereinigten Staaten auch heutzutage noch genutzt wird<sup>28,29</sup>.

## 4.2 Wie funktioniert ein Radioteleskop?

Doch wie funktioniert ein Radioteleskop und die Radiointerferometrie? Zuerst sollte man sich also mit den Voraussetzungen für das Beobachten von Radiowellen auseinandersetzen.

Die erste Voraussetzung ist, dass die schwachen Radiowellen aus dem Kosmos nicht von den alltäglich genutzten Radiowellen gestört werden dürfen, also muss man sich einen Ort aussuchen, der ungestört von dem Menschen und der Natur zugleich ist.<sup>30</sup>

Die zweite Voraussetzung ist, dass die Apertur, also der Durchmesser der Öffnungsweite, durch die das Signal empfangen wird, um ein Vielfaches größer sein muss als die zu beobachtende Wellenlänge. Je größer der Unterschied zwischen der Länge der Wellenlänge und die der Apertur, desto besser kann das Bild nämlich aufgelöst werden. Bei der Radioastronomie, in welcher man die Radiowellen mit Längen von wenigen Zentimetern bis hunderte Meter (Durch die Reflektion von Radiowellen der Erdatmosphäre werden irdisch meist nur Wellenlängen von 30m bis 3mm genutzt) misst, müsste eine Schüssel also mehrere Kilometer breit sein<sup>31</sup>. Dies haben Curtis und Jansky nicht verwirklichen können, weshalb ihre Auflösungen im Vergleich zu heutigen Radioteleskopen eher unzureichend sind. Dennoch sind heutige Radioteleskope nicht viele Kilometer breit, sondern messen bei dem VLA als Beispiel nur 25 Meter im Durchmesser der Schüssel. Trotzdem erreichen sie Winkelgenauigkeiten von 0,2 bis 0,04 Bogensekunden<sup>32</sup>. Dies ist durch die sogenannte Radiointerferometrie möglich.<sup>33</sup>

---

<sup>28</sup> Vgl. The European VLBI Network 2022, URL: <https://www.evlbi.org/telescopes>; The National Radio Astronomy 2024, URL: <https://public.nrao.edu/telescopes/vlba/>

<sup>29</sup> Vgl. The National Radio Astronomy Observatory 2024, URL: <https://public.nrao.edu/telescopes/vlba/>

<sup>30</sup> Vgl. The National Radio Astronomy Observatory 2024, URL: <https://public.nrao.edu/telescopes/vla/>

<sup>31</sup> Vgl. Wikipedia: Radioastronomie, URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Radioastronomie>

<sup>32</sup> Eine Bogensekunde ist eine Winkleinheit und entspricht 1/3600 Grad (Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Winkelsekunde>).

<sup>33</sup> Vgl. The European Space Agency 2024, URL: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Observations\\_Very\\_Long\\_Baseline\\_Interferometry\\_VLBI](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Observations_Very_Long_Baseline_Interferometry_VLBI); The National Radio Astronomy Observatory 2024, URL: <https://public.nrao.edu/telescopes/vla/>

Statt also ein großes Teleskop zu bauen, entschied man sich also für ein Netzwerk aus mehreren kleineren Teleskopen, die in Paaren allesamt miteinander verbunden sind. Sie alle messen die Radiowellen am Himmel und ein Computersystem vergleicht die einzelnen Ergebnisse, um sie zu einem einzelnen Bild zu kombinieren. Hat man ein Paar, so muss die Entfernung zwischen den einzelnen Teleskopen hierbei groß genug sein, um die Richtung, aus welcher die Radiowellen stammen, bestimmen zu können. Die weiteste Distanz zwischen zwei einzelnen Geräten bezeichnet man als Basislinie (eng. „Baseline“), anhand der man erkennen kann, welche Apertur einer gigantischen Schüssel hier simuliert wird.<sup>34</sup>

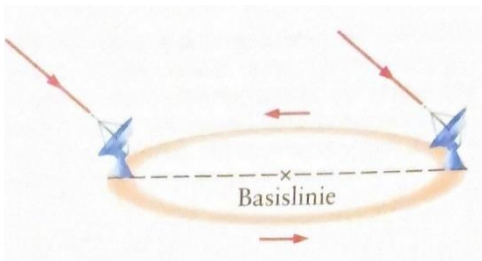


Abbildung 10: Darstellung eines Rotationsweges von einem einzelnen Paar anhand der Basislinie.

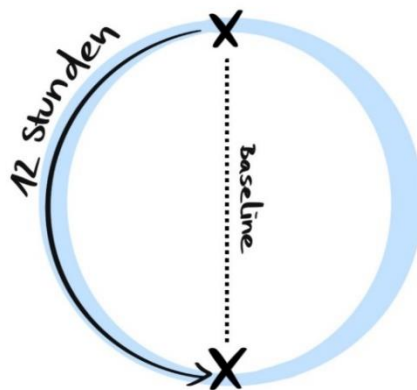


Abbildung 11: Ausführung von Abbildung 10 aus der Vogelperspektive

Nun wissen wir aber von dem Problem der unterschiedlichen Betrachtungsstandpunkte und deren Wirkung auf die Erscheinung der Jets. Wenn also ein Teleskop nur einen Winkel und nur einen Betrachterstandpunkt abdeckt, so müssen umso mehr einzelne Teleskope weitere Winkel und Standpunkte zum Ausgleich einnehmen. Dies würde in einer großen Anzahl an Teleskopen resultieren, gäbe es nicht eine Lösung für dieses Problem: Man wartet. Durch die Erdrotation rotieren sich die Basislinien der einzelnen Paare mit und ergeben einen Ring (s. Abb. 10). Theoretisch könnte man diese nun nach allen zwölf Stunden (zwölf, da man nur die halbe Strecke des Rings braucht, die andere Hälfte ist schon von der anderen Schüssel bestritten worden) neu positionieren, bis man diesen Ring in einen großen Kreis ausgefüllt hat (s. Abb. 11). Da dies aber zu lange dauern würde, baute man viele Paare, die von ganz allein den Kreis vervollständigen.<sup>35</sup>

<sup>34</sup> Vgl. Begelman, Rees 1997, S. 149-151; Perley 2023, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=ZTYMHRVrGuE>

<sup>35</sup> Vgl. Begelman, Rees 1997, S. 149-151



Das VLA, welches sich auf einer weiten flachen Ebene in New Mexiko in Texas befindet, hat eine Y-förmige Aufteilung ihrer 28 Teleskope, wobei der Nördliche Arm sich auf ca. 18 Kilometer erstreckt, wohingegen die anderen beiden auf ca. 21 Kilometer in ihrer Länge kommen. Die einzelnen Teleskope kann man sogar nach Belieben verschieben, um sie für einige Messungen anzupassen.<sup>36</sup>

Die EVN hingegen erstreckt sich international über ein Netz aus 22 Teleskopen, die vorwiegend in Europa und in Asien mit der Ausnahme von einem Teleskop in Puerto Rico und eines in Südafrika stationiert sind. Verbunden sind sie durch eine speziell dafür erbaute Einrichtung in Europa, die „European VLBI Network Data Processor“, wo auch die Signale von einem Computersystem verarbeitet werden.<sup>37</sup>

Ein fertiges Bild könnte demnach wie folgt aussehen:

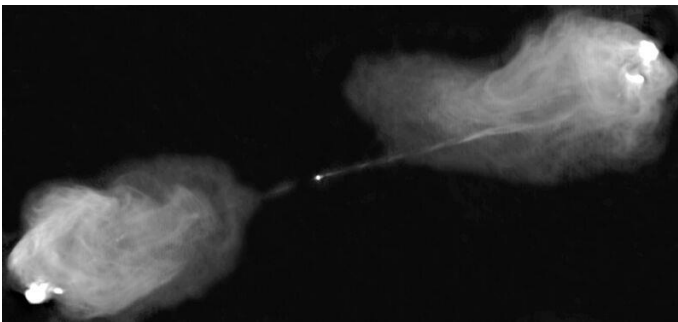


Abbildung 12: schwarz-weiße Aufnahme der Jets von Cygnus A, aufgenommen von dem VLA am 01.02.1983

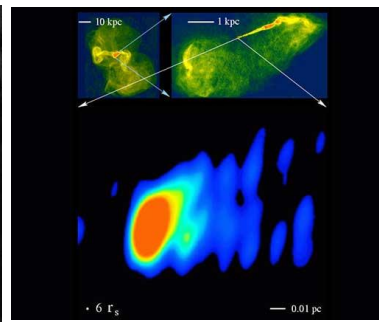


Abbildung 13: Farbige Darstellung von Jets der M87 Galaxie (oben) und eine dazugehörige Nahaufnahme (unten), aufgenommen von dem VLA und dem VLBA im Jahre 1990

Das linke Bild zeigt hier eine schwarz-weiße Aufnahme von den Jets der Radiogalaxie Cygnus A. Je heller hier ein Punkt ist, desto stärker ist die Radiostrahlung. Dasselbe gilt auch bei dem rechten Bild von der Galaxie Messier 87. Jedoch ist hier der Unterschied, dass die Farben nachträglich eingefügt worden sind, um die Kontraste visuell besser hervorzuheben und durch das Zuschreiben einer Farbe zu einem relevanten Wertebereich besser einteilen zu können.<sup>38</sup>

<sup>36</sup> Vgl. The National Radio Astronomy Observatory 2024, URL: <https://public.nrao.edu/telescopes/vla/>

<sup>37</sup> Vgl. The European VLBI Network 2022, URL: <https://www.evlbi.org/telescopes>

<sup>38</sup> Vgl. Fendt 2021, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=YqshmyhS48k>

## 5. Fazit

Wenn man in Betracht zieht, dass die Radioastronomie geschichtlich gesehen so jung ist und wie weit sie sich die kurze Zeit entwickelt hat, dann kann man nicht anders als staunen. In dieser Arbeit sind Quellen aus sowohl dem späten zwanzigsten Jahrhundert als auch aus dem letzten Jahr kombiniert. Man merkt allein an den Quellen, wie weit sich die Radioastronomie von Modellen und vagen Beobachtungen zu Messungen im Bereich von Bruchteilen einer Bogensekunde innerhalb von zwanzig oder dreißig Jahren entwickelt hat.

Dennoch ist der Bereich nach wie vor größtenteils unerforscht. Wir können nicht in die Aktiven Galaktischen Kerne schauen oder einer Galaxie bei der Entstehung über Milliarden von Jahren zuschauen, doch Jets scheinen ein guter Anfang zur Enthüllung der Entstehung des Universums zu sein. Wie sie mit ihrem Umfeld interagieren, kann Rückschlüsse zu der Bildung verschiedener Galaxien oder Erklärung anderer Phänomene erlauben. Jets zu verstehen kann uns demzufolge ein großes Stück weiterführen in unserer Neugier nach dem Vergangenen.

Auch bieten neue oder zukünftige Technologien Hoffnung für weiterführende Forschungsergebnisse. Selbst das James-Webb-Weltraumteleskop nahm im September letzten Jahres ein Bild von den zwei bipolaren Jets des jungen Sterns Herbig-Haro 211 auf und dies wird sicherlich nicht das Letzte sein, was wir von einem Jet sehen werden.<sup>39</sup>

Eventuell werden diese kommenden Entwicklungen in der Radioastronomie auch zurzeit noch offene Fragen wie zum Beispiel die Frage nach der Bildung eines Magnetfelds in der Akkretionsscheibe oder die Frage nach der Entstehung der Knoten einem Schritt näherkommen.

Es wird sich also als spannend herausstellen, diesen Bereich der Astronomie weiterhin zu verfolgen, denn es gibt nämlich noch Vieles, was dort draußen auf uns wartet.

---

<sup>39</sup> Vgl. NASA 2023, URL: <https://www.nasa.gov/missions/webb/nasas-webb-snaps-supersonic-outflow-of-young-star/>

## 6. Anhang

### 6.1 Literaturverzeichnis

#### Schriftliche Quellen

Begelman, Mitchell C., & Rees, Martin J. (1997). *Schwarze Löcher im Kosmos - Die magische Anziehungskraft der Gravitation*. Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag.

Begelman, Mitchell C., Blandford, Roger D., & Rees, Martin J. (1987). Kosmische Jets, in: Spektrum der Wissenschaft, Gravitation, Heidelberg, S. 148-159.

Verschuur, Gerrit. L. (1988). *Die phantastische Welt der Radioastronomie*. Boston; Berlin: Birkhäuser: Springer Basel AG.

#### Elektronische Quellen

**(Sämtliche Quellen wurden zuletzt am 18.02.2024 aufgerufen)**

Barnard, Chris: Speed and dense gas bends jets of matter streaming away from some galaxy centers (13.06.2022), URL: <https://news.wisc.edu/speed-and-dense-gas-bend-jets-of-matter-streaming-away-from-some-galaxy-centers/>

Prof. Dr. Fendt, Christian: Astrophysikalische Jets: Kosmische Düsentriebwerke – Christian Fendt bei #FasziAstroOnline (07.09.2021), URL: <https://www.youtube.com/watch?v=YqshmyhS48k>

Gache, Gabriel: Galactic Jet Stream – Longest Ever Discovered! (08.12.2007), URL: <https://news.softpedia.com/news/Galactic-Jet-Stream-Longest-Ever-Discovered-73252.shtml>

Kovalev, Yuri Y. et al: The Inner Jet of the Radio Galaxy M87 (25.09.2007), URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/522603/fulltext/>

Lesch, Harald: Jets mit Überlichtgeschwindigkeit – Einstein widerlegt? | Harald Lesch (08.04.2020), URL: <https://www.youtube.com/watch?v=t8Xjsl1A7CE>

NASA: NASA's Webb Snaps Supersonic Outflow of Young Star (14.09.2023), URL: <https://www.nasa.gov/missions/webb/nasas-webb-snaps-supersonic-outflow-of-young-star/>

Nolting, Chris: Precessing Radio Galaxy Jets: Simulations & Observable Signatures (2021), URL: <https://www2.mpia-hd.mpg.de/jets2021/index2.html> (a/s Video unter Day 3 aufzufinden)

Perley, Rick: A visit to the Very Large Array near Magdalena, New Mexico (11.06.2023), URL: <https://www.youtube.com/watch?v=ZTYMHrVrGuE>

Sternengeschichten: Sternengeschichten Folge 223: Die Geschichte der Radioastronomie (07.03.2017),  
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=E39FcRQ0lkc>

The European Space Agency (2024),  
URL: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Observations\\_Very\\_Long\\_Baseline\\_Interferometry\\_VLBI](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Observations_Very_Long_Baseline_Interferometry_VLBI)

The European VLBI Network: Telescopes (2022),  
URL: <https://www.evlbi.org/telescopes>

The National Radio Astronomy Observatory: Very Large Array (2024),  
URL: <https://public.nrao.edu/telescopes/vla/>

The National Radio Astronomy Observatory: Very Large Baseline Array (2024),  
URL: <https://public.nrao.edu/telescopes/vlba/>

Wikipedia: Fanaroff-Riley Classification (zuletzt 2023 bearbeitet),  
URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fanaroff%E2%80%93Riley\\_classification](https://en.wikipedia.org/wiki/Fanaroff%E2%80%93Riley_classification)

Wikipedia: Magnetohydrodynamik (zuletzt 2023 bearbeitet),  
URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetohydrodynamik>

Wikipedia: Radioastronomie (zuletzt 2023 bearbeitet),  
URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Radioastronomie>

Wikipedia: Sterntag (zuletzt 2022 bearbeitet),  
URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sterntag>

## 6.2 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Infrarotaufnahme der Jets von Herbig-Haro 212, aufgenommen von dem European Southern Observatory am 12.10.2015 (Quelle: <https://www.eso.org/public/images/potw1541a/> ; letzter Aufruf: 19.02.2024).....0
- Abbildung 2: Eigen erstellte Grafik zur Vereinfachung, nach: Begelman, Mitchell C., & Rees, Martin J. (1997). Schwarze Löcher im Kosmos - Die magische Anziehungskraft der Gravitation. Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag. S. 153 Abb. 6.7 .....2
- Abbildung 3: Düsenmodell aus: Begelman, Mitchell C., Blandford, Roger D., & Rees, Martin J. (1987). Kosmische Jets, in: Spektrum der Wissenschaft, Gravitation, Heidelberg, S. 158 Abb. 10 .....4
- Abbildung 4: Torusmodell aus: Begelman, Mitchell C., Blandford, Roger D., & Rees, Martin J. (1987). Kosmische Jets, in: Spektrum der Wissenschaft, Gravitation, Heidelberg, S. 158 Abb. 10 .....4
- Abbildung 5: Eigen erstellte Grafik zur Vereinfachung, nach: Prof. Dr. Fendt, Christian in: Astrophysikalische Jets: Kosmische Düsentrriebwerke – Christian Fendt bei #FasziAstroOnline (07.09.2021) beginnend bei Minute 27, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=YqshmyhS48k> .....5
- Abbildung 6: Eigen erstellte Grafik zur Ausführung, nach: Lesch, Harald: Jets mit Überlichtgeschwindigkeit – Einstein widerlegt? | Harald Lesch (08.04.2020) beginnend bei Minute 9, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=t8Xjsl1A7CE..8>
- Abbildung 7: Relativistische Aberration in Bezug auf Geschwindigkeit, aus: Begelman, Mitchell C., Blandford, Roger D., & Rees, Martin J. (1987). Kosmische Jets, in: Spektrum der Wissenschaft, Gravitation, Heidelberg, S. 154 Abb. 6.....10
- Abbildung 8: Jets aus verschiedenen Winkeln, aus: Begelman, Mitchell C., Blandford, Roger D., & Rees, Martin J. (1987). Kosmische Jets, in: Spektrum der Wissenschaft, Gravitation, Heidelberg, S. 155 Abb. 7 .....10

Abbildung 9: Ein Jet im Original und um 90° rotiert, aus: Nolting, Chris:  
Precessing Radio Galaxy Jets: Simulations & Observable Signatures (2021),  
URL: <https://www2.mpia-hd.mpg.de/jets2021/index2.html> (als Video unter Day 3  
aufzufinden) ..... 11

Abbildung 10: Darstellung aus: Begelman, Mitchell C., & Rees, Martin J. (1997).  
Schwarze Löcher im Kosmos - Die magische Anziehungskraft der Gravitation.  
Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag. S. 149 Abb. 6.5.... 14

Abbildung 11: Eigen erstellte Grafik zur Ausführung von Abbildung 7 aus der  
Vogelperspektive, nach: Begelman, Mitchell C., & Rees, Martin J. (1997).  
Schwarze Löcher im Kosmos - Die magische Anziehungskraft der Gravitation.  
Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag. S. 149 Abb. 6.5.... 14

Abbildung 12: schwarz-weiße Aufnahme der Jets von Cygnus A, aufgenommen  
von dem VLA am 01.02.1983 (Quelle:  
<https://www.nrao.edu/archives/items/show/33384> , letzter Aufruf: 19.02.2024)...15

Abbildung 13: Farbige Darstellung von Jets der M87 Galaxie (oben) und eine  
dazugehörige Nahaufnahme (unten), aufgenommen von dem VLA und dem  
VLBA im Jahre 1990 (Quelle: <https://www.nrao.edu/archives/items/show/33341> ,  
zuletzt aufgerufen am 19.02.2024).....15

### 6.3 Selbstständigkeitserklärung

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, 19.02.2024

Trtovac