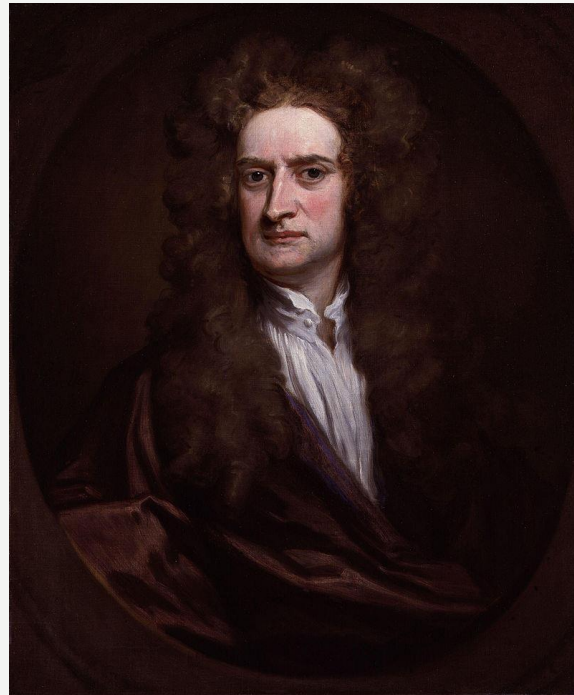


Dr. Jörg Noller

Was ist Zeit?

BA-Seminar
Dienstags, 12-14 Uhr c.t.
Raum E006





Isaac Newton (1642-1726)
Mathematische Prinzipien der Naturlehre



- Was versteht Newton unter der „absoluten Zeit“?
- Wie verhält sich Newtons Zeitverständnis zu dem Zeitverständnis bei Aristoteles und Augustinus?



„Die absolute, wahre und mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig, und ohne Beziehung auf irgend einen äußern Gegenstand. Sie wird so auch mit dem Namen: Dauer belegt.“ (25)



„Die relative, scheinbare und gewöhnliche Zeit ist ein fühlbares und äußerliches, entweder genaues oder ungleiches, Maß der Dauer, dessen man sich gewöhnlich statt der wahren Zeit bedient, wie Stunde, Tag, Monat, Jahr.“ (25)



„Der absolute Raum bleibt vermöge seiner Natur und ohne Beziehung auf einen äußern Gegenstand, stets gleich und unbeweglich. Der relative Raum ist ein Maß oder ein beweglicher Teil des erstern, welcher von unsern Sinnen, durch seine Lage gegen andere / Körper bezeichnet und gewöhnlich für den unbeweglichen Raum genommen wird. Z. B. ein Teil des Raumes innerhalb der Erdoberfläche; ein Teil der Atmosphäre; ein Teil des Himmels, bestimmt durch seine Lage gegen die Erde. Der absolute und relative Raum sind dasselbe an Art und Größe, aber sie bleiben es nicht immer an Zahl. Bewegt sich z. B. die Erde, so ist der Raum unserer Atmosphäre, welcher in Bezug auf unsere Erde immer derselbe bleibt, bald der eine, bald der andere Teil des absoluten Raumes, in welchen die Atmosphäre übergeht und ändert sich so beständig.“ (25 f.)



Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716)
Briefwechsel mit Samuel Clarke



„Was mich angeht, so habe ich mehr als einmal betont, daß ich den Raum für etwas bloß Relatives halte, wie die Zeit; für eine Ordnung des gleichzeitig Bestehenden, wie die Zeit eine Ordnung von Aufeinanderfolgendem ist. Denn der Raum bezeichnet als Ausdruck der Möglichkeit eine Ordnung von Dingen, die zur selben Zeit existieren, insofern sie zusammen existieren, ohne auf ihre besonderen Arten zu existieren einzugehen: und wenn man mehrere Dinge zusammen sieht, so nimmt man diese Ordnung der Dinge untereinander wahr.“ (28)



„daß der Raum lediglich eine Ordnung der Dinge ist, wie die Zeit, und keineswegs eine absolute Wesenheit.“ (48)

„Daß Raum und Zeit nicht die bloße Ordnung von Mengen sind, sondern wirkliche Mengen (was Anordnung und Lage nicht sind)“ (Clarke, 56)

„Offensichtlich ist auch, daß die Zeit nicht nur die Ordnung der Nacheinanderfolge von Dingen ist; denn die Menge der Zeit kann größer oder kleiner sein, und trotzdem bleibt jene Ordnung dieselbe. Die Ordnung des Aufeinanderfolgens von Dingen in der Zeit ist nicht die Zeit selbst: denn sie können in derselben Aufeinanderfolge schneller oder langsamer aufeinander folgen, aber nicht in derselben Zeit. Wenn es keine Geschöpfe gäbe, so wären doch aufgrund der Allgegenwart Gottes und der Dauer seines Seins der Raum und die Zeit genau dasselbe wie jetzt.“ (Clarke, 59)



„Da der Raum an sich wie die Zeit nur eine in der Vorstellung vorhandene Sache ist, so kann der Raum außer der Welt nur eingebildet sein, wie sogar die Scholastiker sehr wohl erkannt haben. Der Fall liegt ebenso mit dem leeren Raum in der Welt, den ich aus den angegebenen Gründen ebenfalls für eingebildet halte.“ (73)



„Da ich bewiesen habe, daß die Zeit ohne Dinge nichts anderes ist, als eine bloße, nur in der Vorstellung vorhandene Möglichkeit, so liegt auf der Hand, daß jemand, der behaupten wurde, daß ebendiese Welt, die wirklich erschaffen worden ist, ohne irgendeine sonstige Veränderung etwas früher hätte erschaffen werden können, nichts Vernünftiges behaupten würde; denn es gibt keinerlei Anzeichen oder Unterschied, woran man erkennen könnte, daß sie etwas früher erschaffen wurde. Deshalb heißt, wie ich schon gesagt habe, anzunehmen, daß Gott dieselbe Welt etwas früher erschaffen hätte, etwas Verstiegenes anzunehmen. Es heißt, aus der Zeit ein absolutes, von Gott unabhängiges Ding zu machen, während doch die Zeit nur unter den Gegenständen der Schöpfung koexistieren kann und / nur in der Ordnung und der Menge ihrer Veränderungen zu begreifen ist.“
(84 f.)

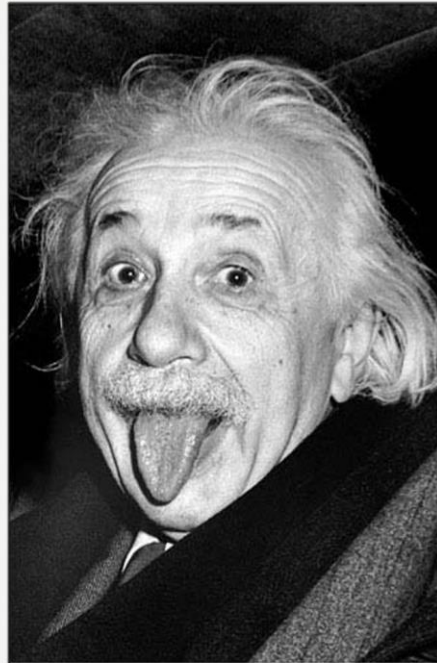


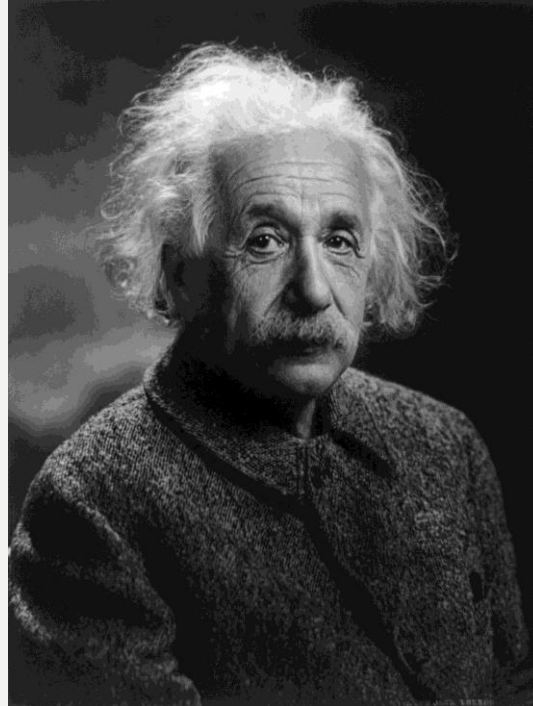
„Man hält mir hier entgegen, daß die Zeit keine Ordnung der aufeinanderfolgenden Dinge sein könne, weil die Menge der Zeit zunehmen oder abnehmen könne, während die Ordnung des Aufeinanderfolgens dieselbe bleibt. Ich antworte, daß das durchaus nicht so ist: denn wenn die Zeit mehr ist, so wird es mehr gleichartige dazwischenliegende Zustände geben, und wenn sie weniger ist, so wird es weniger davon geben, weil es überhaupt nichts Leeres gibt, keine Verdichtung und kein Hereinströmen, sozusagen, hinsichtlich der Zeit sowenig wie hinsichtlich der Orte.“ (98)











Albert Einstein (1879-1955)
Zur Elektrodynamik bewegter Körper (1905)



- Worin besteht der Unterschied zwischen der speziellen und der allgemeinen Relativitätstheorie?
- Was ist ein inertiales Bezugssystem?
- Welches sind die beiden Postulate der speziellen Relativitätstheorie?
- Was versteht man unter dem Relativitätsprinzip?
- Welche paradoxen Konsequenzen hat die Tatsache, dass die Lichtgeschwindigkeit überall gleich ist?
- Welche Konsequenzen hat die Relativitätstheorie für unser Verständnis von Raum und Zeit?
- Wie verhält sich die Relativitätstheorie zu den Zeit-Theorien bei Newton und Leibniz?
- Wie sollen überhaupt Philosophen über Ergebnisse der Physik reden?



Russell Stannard: *Relativitätstheorien / Relativity. A Very Short Introduction*. Oxford / New York: Oxford University Press, 2008



„Wir alle wachsen mit bestimmten Grundvorstellungen über Raum, Zeit und Materie auf, darunter den folgenden:

- Wir leben alle im selben dreidimensionalen Raum.
- Die Zeit vergeht für jedermann gleich schnell.
- Zwei Ereignisse treten entweder gleichzeitig auf, oder das eine findet vor dem anderen statt.
- Mit genügend Antriebskraft gibt es keine Grenze für die Geschwindigkeit einer Bewegung.
- Materie kann weder erzeugt noch zerstört werden.
- Die Summe der Winkel in einem Dreieck beträgt 180° .
- Der Kreisumfang ist 2π multipliziert mit dem Radius
- In einem Vakuum bewegt sich Licht immer geradlinig.“ (7)



Solche Vorstellungen scheinen wenig mehr als gesunder Menschenverstand zu sein.

Aber Vorsicht:

»Der gesunde Menschenverstand ist die Summe der Vorurteile, die man bis zu seinem 18. Lebensjahr angesammelt hat.« (Albert Einstein)“ (7)



„[Einsteins] Theorie hat zwei Teile:

- (1) die spezielle Relativitätstheorie, die 1905 formuliert wurde, und
- (2) die allgemeine Relativitätstheorie, die 1916 erschien.

Erstere handelt von den Wirkungen gleichförmiger Bewegung auf Raum und Zeit. Letztere schließt zusätzlich die Wirkungen der Beschleunigung und der Schwerkraft ein. Erstere ist ein Sonderfall der allumfassenden allgemeinen Theorie.“ (8)



1. Spezielle Relativitätstheorie

Das Relativitätsprinzip und die Lichtgeschwindigkeit



„Stellen Sie sich vor, Sie befinden sich in einem Eisenbahnwaggon, der an einem Bahnhof hält. Aus dem Fenster sehen Sie einen zweiten Zug, der neben Ihrem Zug steht. Die Pfeife ertönt, und schließlich setzen Sie sich in Bewegung. Sanft gleiten Sie an dem anderen Zug vorbei. Dessen letzter Waggon verschwindet aus Ihrem Blickfeld, was Ihnen ermöglicht zu sehen, wie der Bahnhof ebenfalls in der Ferne verschwindet, da auch er zurückgelassen wird. Nur dass der Bahnhof eben nicht verschwindet: Er bleibt einfach an seiner alten Stelle und bewegt sich nirgendwohin - genauso wie Sie im Zug sitzen und sich nirgendwohin bewegen. Allmählich dämmert es Ihnen, dass Sie sich überhaupt nicht bewegt haben: Der andere Zug war es, der sich fortbewegt hat.“ (9)



„Das ist eine simple Beobachtung. Manchmal lassen wir uns alle auf diese Weise täuschen. In Wahrheit können Sie nicht entscheiden, ob Sie sich wirklich bewegen oder nicht - zumindest dann nicht, wenn es sich um eine konstante, gleichförmige, geradlinige Bewegung handelt. Normalerweise, wenn Sie etwa mit dem Auto reisen, wissen Sie, dass Sie sich bewegen. Selbst wenn Sie die Augen geschlossen haben, können Sie fühlen, wie Sie in verschiedene Richtungen gedrückt werden, wenn der Wagen um Kurven und über Schlaglöcher fährt, plötzlich beschleunigt oder abbremsst. Aber in einem Flugzeug, das konstant dahingleitet, hätten Sie, abgesehen von dem Motorengeräusch und den leichten Vibrationen, keine Möglichkeit zu / entscheiden, ob Sie sich bewegen oder nicht. Das Leben innerhalb des Flugzeugs verläuft genauso, als ob das Flugzeug auf der Erde stehen würde. Wir sagen, dass das Flugzeug ein inertiales Bezugssystem darstellt. Damit meinen wir, dass sich Newtons Trägheitsgesetz anwenden lässt, d.h., dass ein von diesem Bezugssystem aus betrachteter Gegenstand weder seine Geschwindigkeit noch seine Richtung ändern wird, wenn keine unausgeglichene Kraft auf ihn wirkt. Beispielsweise bleibt ein vor Ihnen auf dem Ablagetisch stehendes Wasserglas an diesem Ort, bis Sie es mit Ihrer Hand bewegen.“ (9 f.)



„Aber was geschieht, wenn Sie aus dem Flugzeugfenster blicken und sehen, wie die Erde unter Ihnen vorbeigleitet? Sagt Ihnen das nicht, dass sich das Flugzeug bewegt? Nicht wirklich, schließlich ist die Erde nicht stationär, sie bewegt sich auf einer Umlaufbahn um die Sonne, die Sonne selbst befindet sich auf einer Umlaufbahn um das Zentrum der Milchstraßengalaxie, und die Milchstraßengalaxie bewegt sich innerhalb einer Anhäufung von ähnlichen Galaxien. Wir können nur sagen, dass diese Bewegungen alle relativ sind. Das Flugzeug bewegt sich relativ zur Erde, die Erde bewegt sich relativ zum Flugzeug. Es gibt keine Möglichkeit zu entscheiden, wer tatsächlich unbewegt ist. Jeder, der sich gleichförmig relativ zu einem ruhenden anderen bewegt, ist berechtigt, sich selbst als ruhend und die andere Person als bewegt zu betrachten. Das ist deshalb so, weil die Naturgesetze - die Regeln, die alle Ereignisse regieren - für jeden, der sich in konstanter, gleichförmiger Bewegung befindet, d. h. für jeden, der in einem inertialen Bezugssystem ist, dieselben sind. Das ist das *Relativitätsprinzip*.“ (10)



„Und tatsächlich war es nicht Einstein, der dieses Prinzip entdeckte, sondern es geht auf Galileo zurück. Wenn das so ist, warum wurde dann das Wort »Relativität« mit dem Namen von Einstein verbunden? Einstein bemerkte, dass sich unter den Naturgesetzen Maxwells Gesetze des Elektromagnetismus befanden. Maxwell zufolge ist Licht eine Form elektromagnetischer Strahlung. Daher ist es möglich, aufgrund der Kenntnis der Stärken elektrischer und magnetischer Kräfte die Lichtgeschwindigkeit c in einem Vakuum zu berechnen. Die Tatsache, dass Licht eine Geschwindigkeit besitzt, leuchtet nicht unmittelbar ein. Wenn Sie sich in ein abgedunkeltes Zimmer begeben und eine Lampe einschalten, scheint das Licht augenblicklich überall zu sein - an der Decke, den Wänden und auf dem Fußboden. Aber das stimmt nicht. Das Licht braucht Zeit, um von der Glühbirne zu seinem Bestimmungsort zu wandern. Nicht viel Zeit - es ist zu schnell, als dass man die Verzögerung mit bloßem Auge erkennen könnte. Nach diesem Naturgesetz beläuft sich die Lichtgeschwindigkeit c in einem Vakuum auf 299.792,458 Kilometer pro Sekunde (oder mit einem sehr kleinen Unterschied in der Luft). Das ist also das Ergebnis der Geschwindigkeitsmessung.“ (11)



„Was geschieht nun, wenn sich die Lichtquelle bewegt? Man könnte z.B. erwarten, dass sich das Licht wie eine Granate verhält, die von einem vorbeifahrenden Kriegsschiff abgefeuert wurde: Ein Beobachter am Meeresufer würde erwarten, dass die Geschwindigkeit des Schiffes sich zu der Mündungsgeschwindigkeit der Granate hinzuaddieren würde, wenn sie nach vorne abgefeuert wird, und abgezogen werden würde, wenn die Granate vom / Heck abgefeuert wird. 1964 wurde das Verhalten des Lichts in dieser Hinsicht im Genfer CERN-Laboratorium überprüft, indem man winzige subatomare Partikel verwendete, die neutrale Pionen genannt werden. Die Pionen, die sich mit $0,99975 c$ fortbewegen, zerfielen unter Abstrahlung von zwei Lichtpulsen. Man fand heraus, dass beide Pulse innerhalb der Messgenauigkeit von $0,1 \%$ die übliche Lichtgeschwindigkeit c aufwiesen. Also hängt die Lichtgeschwindigkeit nicht von der Geschwindigkeit der Quelle ab.“ (11 f.)

„Sie hängt auch nicht davon ab, ob man annimmt, dass der Beobachter des Lichts sich bewegt oder nicht. Betrachten wir noch einmal den Fall eines sich bewegenden Schiffs. Da -wir schon festgestellt haben, dass Licht sich nicht wie eine Granate verhält, die von einer Kanone abgefeuert wird, könnten wir möglicherweise erwarten, dass es sich so verhält wie Wellen auf dem Wasser. Befände der Beobachter sich nun auf einem sich bewegenden Boot, würde sich die Wellenfront vor dem Boot langsamer zu bewegen scheinen als die Wellenfront, die sich nach hinten ausbreitet — wegen der Bewegung des Bootes und seiner selbst relativ zum Wasser“ (12)

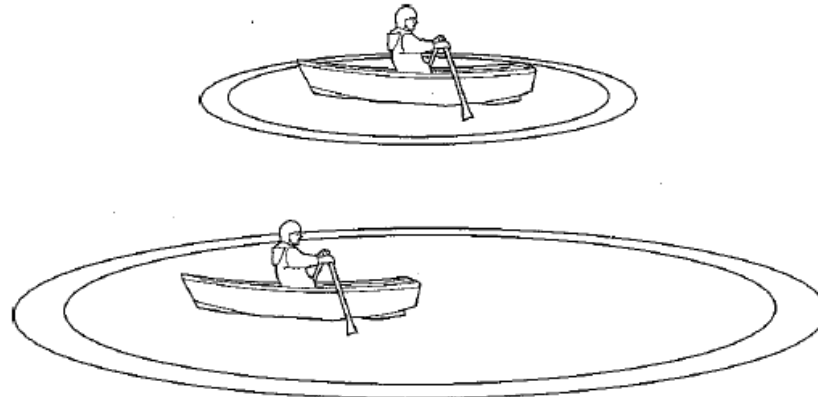


Abb. 1: Wellen, die von einem Boot ausgesandt werden, scheinen sich für einen Beobachter auf dem Boot langsamer nach vorne zu bewegen als nach hinten



„Angenommen, Licht ist eine Welle, die sich durch ein Medium bewegt, das den ganzen Raum durchdringt - ein Medium, das behelfsweise Äther genannt wurde -, dann sollten wir, da die Erde sich ihren Weg durch den Äther bahnt, feststellen, dass die Lichtgeschwindigkeit relativ zu uns Beobachtern, die wir uns gemeinsam mit der Erde bewegen, in verschiedenen Richtungen verschieden ist. Aber in einem berühmten Experiment, das von Michelson und Morley 1887 durchgeführt wurde, stellte man fest, dass / die Lichtgeschwindigkeit in allen Richtungen dieselbe ist. Die Lichtgeschwindigkeit ist also unabhängig davon, ob die Quelle oder der Beobachter als bewegt angesehen werden.“ (12 f.)



Also gelangen wir zu Folgendem:

(1) dem Relativitätsprinzip, das besagt, dass die Naturgesetze für alle inertialen Bezugssysteme dieselben sind;

(2) dem Wert der Lichtgeschwindigkeit in einem Vakuum, der aufgrund dieser Gesetze berechnet werden kann - dieser Wert ist in allen inertialen Bezugssystemen derselbe, unabhängig von der jeweiligen Geschwindigkeit der Quelle oder des Beobachters.

Diese beiden Aussagen wurden als die beiden Postulate (oder Grundprinzipien) der speziellen Relativitätstheorie bekannt.



„Diese Tatsachen galten unter Physikern lange Zeit als Allgemeingut. Es bedurfte des Genies von Albert Einstein, um zu erkennen, dass, obwohl jede der beiden Aussagen sinnvoll war, wenn man sie gesondert betrachtete, sie keinen Sinn zu ergeben schienen, wenn man die beiden Gedanken zusammenfügte. Wenn die erste Aussage wahr ist, schien es, dass die zweite falsch, oder wenn die zweite richtig war, die erste falsch sein muss. Wenn beide richtig sind - was wir anscheinend festgestellt haben -, dann muss etwas sehr Wichtiges nicht stimmen. Die Tatsache, dass die Lichtgeschwindigkeit für alle inertialen Beobachter unabhängig von der Bewegung der Quelle oder des Beobachters dieselbe ist, bedeutet, dass unser gewöhnliches Verfahren der Addition und Subtraktion von Geschwindigkeiten falsch ist. Und wenn mit unserem Begriff von Geschwindigkeit (die schlicht die Entfernung geteilt durch Zeit ist) etwas nicht stimmt, dann folgt daraus wiederum, dass etwas mit unserem Begriff des Raumes oder der Zeit oder beidem verkehrt sein muss. Wir haben es hier nicht mit irgendeiner Besonderheit des Lichts oder elektromagnetischer Strahlung zu tun. Alles, was sich mit derselben Geschwindigkeit wie das Licht fortbewegt, wird für alle inertialen Beobachter denselben Wert im Hinblick auf seine Geschwindigkeit haben. Entscheidend ist die Geschwindigkeit (und die Folgerungen für den zugrundeliegenden Raum und die Zeit) - nicht die Tatsache, dass wir es zufällig mit Licht zu tun haben.“ (14)



Zeitdilatation



„Um zu sehen, was hier nicht stimmt, stellen Sie sich eine Astronautin in einem Hochgeschwindigkeitsraumschiff und eine Person in einer Weltraumflugkontrollstation auf der Erde vor. Beide haben identische Uhren. Die Astronautin soll ein einfaches Experiment durchführen. Auf dem Boden des Raumschiffs soll sie eine Lampe befestigen, die einen Lichtpuls aussendet. Der Puls wandert direkt nach oben im rechten Winkel zur Bewegungsrichtung des Raumschiffs (siehe Abb. 2). Dort trifft der Puls auf eine Zielscheibe, die an der Decke befestigt ist. Nehmen wir an, dass das Raumschiff 4 Meter hoch ist. Da das Licht sich mit der Geschwindigkeit c ausbreitet, stellt die Astronautin fest, dass die Zeit t' , die der Lichtpuls für diese Reise braucht, anhand der Messung ihrer Uhr $t'=4/c$ beträgt.“ (15)

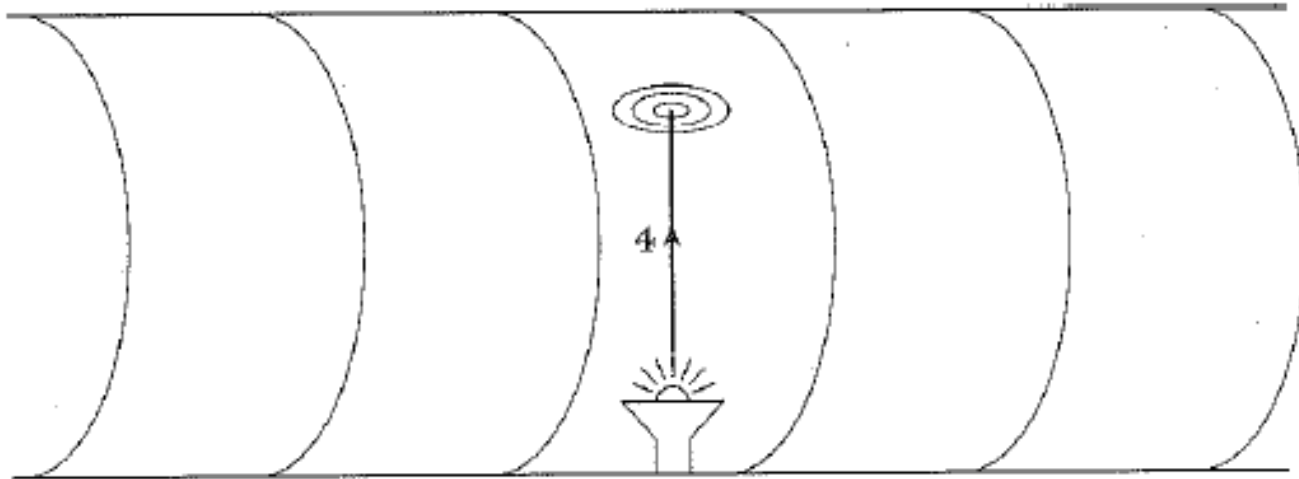


Abb. 2: Die Astronautin richtet einen Lichtpuls auf ein Ziel, so dass das Licht sich rechtwinklig zur Bewegungsrichtung des Raumschiffs bewegt



„Sehen wir uns nun an, wie das Ganze aus der Perspektive der Person in der Raumflugkontrollstation erscheint. Fliegt das Raumschiff über sie hinweg, beobachtet die Per- / son ebenfalls die Reise des Lichtpulses von der Quelle zum Ziel. Aus ihrer Perspektive wird das Ziel sich während der Zeit, die der Puls brauchte, um das Ziel zu erreichen, relativ zu der Stelle, wo es sich befand, als der Puls ausgestrahlt wurde, nach vorne bewegt haben.“ (15 f.)

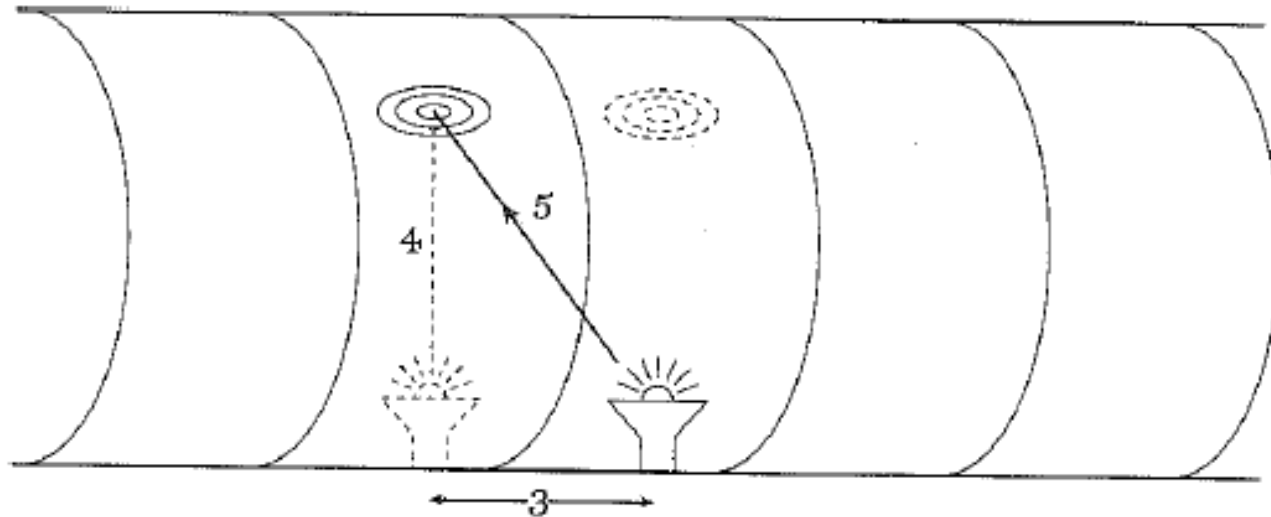


Abb. 3: Fliegt das Raumschiff über ihr vorbei, so bewegt sich das Ziel für die Person in der Raumflugkontrollstation auf der Erde in der Zeit, die der Lichtpuls für seine Reise braucht, vorwärts. Der Puls muss demnach eine diagonale Strecke durchlaufen



„Aus ihrer Sicht ist der Pfad nicht senkrecht, sondern geneigt (siehe Abb. 3). Die Länge dieses geneigten Pfades wird eindeutig größer sein als die Länge des Pfades aus der Sicht der Astronautin. Nehmen wir an, dass das Raumschiff sich in der Zeit, die der Lichtpuls braucht, um von der Quelle zum Ziel zu wandern, um 3 Meter vorwärts bewegt. Unter Verwendung des Satzes von Pythagoras, dem zufolge $3^2+4^2=5^2$ ist, sehen wir, dass die Strecke, die der Lichtpuls durchläuft, um zum Ziel zu gelangen, für die Person in der Kontrollstation 5 Meter beträgt.“ (16)



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!