Relativitätstheorie 2.0

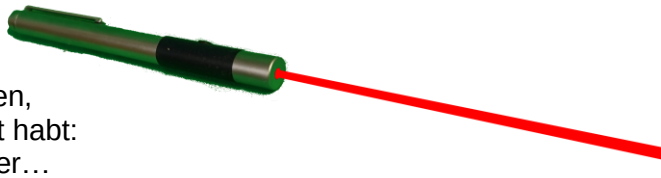
Von Teilchen und Wellen

– 2021 –

Ralf R. Lenke

Version 1.3

Hallo und herzlich Willkommen,
zu einer kurzen, sehr anschaulichen
Einführung in die Relativitätstheorie.
Das Einzige, was wir dazu brauchen,
ist dieser Laserpointer und ein paar
ganz einfache Gedankenexperimente
anhand von Erfahrungen und Erlebnissen,
die ihr alle sicher schon einmal gemacht habt:
z.B. das Läuten der Kirchenglocken, oder…
Wer hat nicht schon einmal die Hand
aus dem fahrenden Auto gestreckt
und mit dem Fahrtwind gespielt.
Und wen überkommt,
wenn er am Meer steht
und hinausblickt auf
Wind und Wellen und
die Weite des Ozeans
bis zum Horizont,
wo Wasser und Himmel verschmelzen,
nicht eine große Sehnsucht nach einem
tieferen Verständnis der Welt?



Um diese Gedankenexperimente noch
etwas anschaulicher zu machen,
habe ich außerdem hier
ein paar Sachen mitgebracht…

Vielleicht hat DIE eine oder DER andere von euch
schon meinen Podcast "Relativitätstheorie 2.0" gehört.
Der ist ja etwas länger und
dauert insgesamt so ungefähr 4h,
was aber hauptsächlich daran liegt,
dass ich dort versucht habe zu erklären,
wie Einstein eigentlich zu seiner Relativitätstheorie kam;
warum sie so ist, wie sie ist, und
dass es durchaus möglich -
und vielleicht so langsam auch notwendig sein könnte -
einmal etwas anders an die Sache heranzugehen.
Diesen ganzen historischen Ballast
lasse ich in diesem Vortrag aber mal weg
und erzähle hier nur das Wesentlich,
nämlich, wie man die Relativitätstheorie
fast ganz ohne Mathematik auch verstehen kann.
Außerdem betrachte ich im Folgenden
nur die SRT (**S**pezielle **R**elativitäts-**T**heorie).
Eine anschauliche Herangehensweise an die ART (**A**llgemeine RT),
insbesondere eine mögliche Antwort auf die Frage:
„Was ist Gravitation“,
findet ihr im 4. Teil meines Podcasts.

Trotzdem wird sich der erste und
größte Teil meines Vortrags doch
zuerst einmal um die Frage drehen:
Was ist denn überhaupt das Problem?
Denn, wie so meistens, ist es auch hier:
Hat man erst einmal das Problem RICHTIG verstanden,
dann ist die Lösung oft gar nicht mehr so schwierig.
Und ihr werdet sehen:
Das, worum es bei der Relativitätstheorie geht,
ist tatsächlich gar nicht so kompliziert;
nur auf den ersten Blick, vielleicht etwas
…sagen wir mal, ungewohnt.
Deshalb mein Ratschlag:
Wenn ihr im Folgenden irgend etwas
nicht richtig verstanden habt,
einfach nochmal anhören,
das kommt dann schon.
Denn das einzige,
was ich wirklich voraussetze ist:

Neugier!

Dafür verspreche ich euch dann aber auch,
dass ihr am Ende dieses Vortrags die Welt
mit anderen Augen sehen werdet.

Also, Relativitätstheorie:
Worum geht es da eigentlich?
Es geht darum,
dass die Naturgesetze immer gleich sind.
Egal ob wir daheim sind,

oder unterwegs im Zug
oder wie Alexander Gerst
auf der Internationalen Raumstation.
Die Naturgesetze sind immer gleich.
Am Tag und in der Nacht.
Sommers wie winters.
Hier auf der Erde,
auf dem Mond,
oder an irgendeiner anderen Stelle,
zu irgendeinem Zeitpunkt,
in unserem Universum.
Und zwar exakt genau gleich,
bis aufs i-Dipfele,
wie man hier im Schwabenland sagt.

Warum ist das NICHT selbstverständlich?
Weil alles in Bewegung ist:
Die Erde dreht sich am Äquator
mit immerhin 1670km/h um sich selbst,
was aber gar nichts ist,
gegen die 100.000km/h,
mit denen sie um die Sonne kreist.
Und zusätzlich rast unser ganzes Sonnensystem
mit sagenhaften knapp 0,1% der Lichtgeschwindigkeit
um das Zentrum unserer Milchstraße.
Und trotzdem gehen wir davon aus,
und beobachten und messen das auch,
dass die Naturgesetze immer gleich sind.
Das nennt man das RELATIVITÄTSPRINZIP (≠RT!).

Das Relativitätsprinzip ist seit langem bekannt.
Galileo Galilei hat es vor fast 400 Jahren
erstmalig niedergeschrieben.
Zusammen mit den sogenannten Galilei-Transformationen
ist es die Grundlage der klassischen Mechanik,
die die Bewegung von Teilchen und Objekten,
entsprechend unserem Alltagsverständnis beschreibt.
Ein Wort noch zu den Galilei-Transformationen,
das ist nicht weiter kompliziert:
Sie besagen z.B.,
dass sich Geschwindigkeiten einfach addieren.
Wenn ich also in einem fahrenden Zug
den Gang entlang renne,
dann beobachtet jemand auf dem Bahnsteig,
dass ich mich mit einer Gesamtgeschwindigkeit bewege,
die sich aus der Addition der Geschwindigkeit des Zuges
plus der Geschwindigkeit, mit der ich renne, ergibt.
Aber das ist ja, wie schon gesagt,
nichts Besonderes.
Das würde jeder so erwarten.

Gut, das ist also die klassische Mechanik,
mit der die Bewegung von Teilchen und

Objekten beschrieben wird.
Jetzt gibt es um uns herum aber
nicht nur Teilchen und Gegenstände,
also z.B. Autos, Vögel, Menschen,
oder Luft- und Duftmoleküle usw.
sondern noch etwas anderes:
Etwas, das weniger greifbar ist
und doch essenziell:
Da gibt es Geräusche, Sprache, Musik…
und es gibt Farben, Bilder, Dunkelheit und Licht…
und das alles sind KEINE Teilchen,
sondern Wellen.
Und der Raum, der uns umgibt, ist voll davon.
Neben den hörbaren Schall- und sichtbaren Lichtwellen
ist er voll von Schwingungen und elektromagnetischen Wellen,
wovon das sichtbare Licht nur ein kleiner Teil ist.
Es gibt Radiowellen, Fernsehen, Funk, Handy, GPS,
Wärmestrahlung, Röntgenstrahlung usw.
Ich würde sogar so weit gehen und sagen:
Ohne Wellen wäre die Welt nichts.
Und tatsächlich benutzen wir,
ohne uns dessen wirklich bewusst zu sein,
wenn uns etwas wirklich bewegt,
Begriffe die sich auf Wellen beziehen:
„das bringt in mir etwas zum Schwingen“,
„die beiden harmonieren“,
„in Einklang sein“,
„zustimmen“,
„Am Anfang war das Wort“.

Und das Entscheidende ist jetzt:
Auch diese Wellen müssen
das Relativitätsprinzip erfüllen,
d.h. auch die Ausbreitung dieser Wellen
muss unabhängig vom Bezugssystem sein.
Aber da gibt es, wie wir gleich sehen werden,
ein gravierendes Problem.
Passt mal genau auf,
ob ihr dieses Problem auch erkennt.
Um es vorwegzunehmen:
Einstein hat dieses Problem zwar mit seiner RT gelöst,
allerdings nur, sagen wir mal, „mathematisch“,
wirklich VERSTANDEN
haben wir es tatsächlich bis heute nicht.

Was meine ich überhaupt mit „verstehen“?
Gehen wir mal rund 2000 Jahre
in der Menschheitsgeschichte zurück.
Damals glaubten die Menschen,
und allen voran natürlich
die Gelehrten und Philosophen,
an die Vier-Elemente-Lehre.
Danach sind die Grundessenzen allen Seins:

Erde, Wasser, Luft und Feuer.
(Notiz: Ging so bis ins Mittelalter)
Heute wissen wir es natürlich besser.
Wir wissen, dass es Atome gibt
und sogar noch kleinere Bausteine:
Protonen, Neutronen und Elektronen,
die aber auch wieder aus
noch kleineren Bausteinen aufgebaut sind.

Trotzdem sollten wir diese Vier-Elemente-Lehre
nicht einfach so abtun.
Das war einfach das damalige Weltmodell
und mit dieser Vorstellung von der Welt
haben die Menschen auch damals schon
durchaus Großartiges geschaffen.

Und - im Prinzip - sind wir heute
gar nicht mal so viel besser dran:
Nach unserem derzeitigen Verständnis der Natur
haben wir, in gewissem Sinne,
jetzt nämlich ein "2-Elemente-Modell"
mit dem wir unsere Welt erklären.
Wovon rede ich?
Ich rede vom **Welle-Teilchen-Dualismus**.
Wir erklären heutzutage unsere Welt nämlich
zum einen mit einem Teilchenmodell:
z.B. wenn ich einen Apfel hochwerfe,
wenn eine Rakete startet,
oder wenn wir beschreiben,
wie der Mond sich um die Erde dreht…
Das sind alles handfeste Gegenstände,
und die Theorie, mit der wir die
Bewegung dieser relativ großen Objekte
beschreiben, ist die klassische Mechanik;
die dem Relativitätsprinzip
und den Galilei-Transformationen folgt,
wie wir spätestens seit Galilei Galileo wissen.

Wenn wir zu sehr kleinen Teilchen gehen,
zu Atomen und Molekülen,
wird die Sache allerdings etwas komplizierter,
da reicht die klassische Mechanik nicht mehr aus,
und die Quantenmechanik kommt ins Spiel.
Und mit der Quantenmechanik das Wellenmodell.
Wieso jetzt Wellenmodell?
Man hat festgestellt,
dass auf sehr kleinen Skalen
der Aufenthaltsort von Teilchen
nicht mehr genau vorhersagbar ist,
sondern nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit.
Und außerdem entsprechen die möglichen Aufenthaltsorte
nicht mehr unserem normalen
Verständnis von Teilchenbahnen:

Mal sind die Teilchen da,
wo sie eigentlich gar nicht sein dürften,
und mal sind sie NICHT da,
wo sie eigentlich sein SOLLTEN.
Und wieder ein anderes Mal
überwinden sie Energiebarrieren,
die sie eigentlich gar nicht überschreiten können dürften.
Tatsächlich ähnelt die
Wahrscheinlichkeitsverteilung der Teilchen
dem Verhalten von Wellen.
Insbesondere den Interferenzerscheinungen von Wellen,
wie z.B. von Schallwellen in einem schlechten Konzertsaal,
…wobei „schlechter Konzertsaal“ rhetorisch
hier jetzt kein so schönes Beispiel ist…
nehmen wir vielleicht mal … eine Kathedrale…
In diesen Sälen ist die Musik
nicht an jeder Stelle gleich laut.
Was damit zusammenhängt,
dass die Schallwellen
an den Wänden reflektiert werden,
und sich hin- und zurücklaufende Wellen überlagern.
Das kann man übrigens auch sehr schön
an den Wasserwellen sehen,
die gegen eine Hafenmauer schlagen
und von ihr reflektiert werden.
Ich will das hier mal kurz
mit diesen beiden Folien demonstrieren…

Man sagt, die Wellen „interferieren“.
Je nach Art der Überlagerung ist die Musik
dann an manchen Stellen im Saal lauter
und an anderen leiser.
Und so ähnlich ist es mit den Elektronen
in einem Atom oder in einem Molekül.
Man kann nicht mehr genau sagen,
wo sich das Elektron im Raum
um die Atomkerne gerade befindet.
Es ist also NICHT so, wie im ursprünglich angenommenen,
sogenannten Bohrschen Atommodell,
dass die Elektronen um den Atomkern sausen,
wie Planeten um die Sonne.
Man kann nur Wahrscheinlichkeiten angeben,
das Elektron irgendwo zu finden.
Und die Wahrscheinlichkeiten entsprechen
den Intensitäten von sich überlagernden Wellen.
Das ist das sogenannte Orbitalmodell:
Die Elektronen formen - oder sind vielleicht sogar -
Materiewellen um den Atomkern. *(Chemiebuch zeigen)*

Hier mal ein Bild dazu aus meinem alten Chemiebuch:
Das Blaugraue zeigt das Orbitalmodel des Wassers.
Blau, die Elektronenwolken des Sauerstoffs und grau,
die Elektronenwolken der beiden Wasserstoffatome.

Das Schwarze sind die Atomkerne.
Wenn wir jetzt in Gedanken den Raum
um die Atomkerne in lauter kleine Würfel zerteilen,
dann gibt die Intensität der Elektronenwolke
die Wahrscheinlichkeit an, das Elektron in solch
einem kleinen Würfel vorzufinden.
Das Erstaunliche ist jetzt,
dass bei manchen Orbitalen
diese Aufenthaltswahrscheinlichkeit gerade
im Zentrum des Atomkerns am größten ist.
Klassisch betrachtet, also im Teilchenbild,
ist das ja aber gar nicht möglich,
dass sich das Elektron im Atomkern aufhält.
Schon seltsam, oder?
(auch hinsichtlich der elektrostatischen Kräfte)

Allerdings, um was für eine Art von Wellen
es sich bei der Quantenmechanik handelt,
ob sie überhaupt real sind,
oder nur ein Hilfsmittel,
um die Welt der kleinsten Teilchen beschreiben zu können,
das wissen wir bis heute nicht.

So, das war jetzt mal auf die Schnelle
ein kleiner Exkurs in die Quantenmechanik.
Für die eine oder den anderen
war das vielleicht wirklich etwas schnell.
Das macht aber nichts, denn,
das Einzige, was ihr im Hinterkopf behalten müsst ist:
Teilchenwellen - Die Tatsache,
dass sich kleine Teilchen wie Wellen verhalten.

Also Wellen: Was sind überhaupt Wellen?
Schauen wir doch mal,
welche Wellen wir aus dem Alltag kennen?
Da gibt es Wasserwellen,
also z.B. die Wellen auf der Oberfläche eines Teichs;
dann gibt es Schallwellen,
in Luft, aber auch unter Wasser usw...
Und von diesen Wellen wissen wir,
dass sie sich etwas anders verhalten,
als Teilchen, also handfeste Objekte.
Bei Teilchen gelten die Galilei-Transformationen,
d.h. Geschwindigkeiten addieren sich einfach.
Deshalb starten die Raketen,
die ins All geschossen werden,
von Cape Canaveral aus,
was nahe am Äquator liegt.
Am Äquator dreht sich die Erdoberfläche mit 1670km/h;
das ist dann schon mal die Anfangsgeschwindigkeit der Rakete.
Und alles was die Rakete dann selbst an Schub erzeugt,
addiert sich zu dieser Anfangsgeschwindigkeit dazu.
Nur so werden die Raketen dann schnell genug,

um auf einer höheren Bahn
um die Erde kreisen zu können.

Wie ist das jetzt bei Wellen?
Z.B. bei Schallwellen?
Die sind, relativ zu ihrem Trägermedium,
immer gleich schnell,
unabhängig von der Geschwindigkeit der Quelle.
Ihr könnt euch selbst mal überlegen,
was für komische Effekt herauskämen,
wenn dem nicht so wäre,
z.B. im Fall zweier Kinder,
die sich auf einem Karussell gegenübersitzen
und beide gleichzeitig ihrer Mama zurufen.

Allerdings hängt die Geschwindigkeit einer Schall- oder Wasserwelle
von der Geschwindigkeit des Empfängers ab.
Genauer gesagt, von der Geschwindigkeit des Empfängers
relativ zum Trägermedium der Welle.
Das klassische Additionstheorem von Geschwindigkeiten
bezieht sich bei Wellen also,
einerseits auf die Geschwindigkeit
der Welle in ihrem Trägermedium,
und andererseits auf die Relativgeschwindigkeit
zwischen Trägermedium und Beobachter.

Gehen wir nochmal 400 Jahre zurück zu Galileo Galilei.
Seine Überlegungen waren ja,
dass jemand nicht unterscheiden kann,
ob er sich im Innern eines sich bewegenden
Schiffes befindet, oder an Land.
Die physikalischen Gesetze sind in beiden Bezugssystemen gleich.
Nebenbei bemerkt, Galileos Überlegungen setzen schon
ein ganz schönes Abstraktionsvermögen voraus:
Erstens ist ein Segelschiff nicht gerade schnell,
und zweitens schaukelt es auf einem Schiff ganz schön.
Heute würde man z.B. eher ein Zugwaggon
als Bezugssystem annehmen.
Apropos Zugwaggon:
Vielleicht ist es euch da auch schon einmal passiert,
dass ihr nicht wusstet,
ob der Zug auf dem Nachbargleis fährt,
oder euer Zug.
Und genauso könnte es jemand ergangen sein,
der gerade in diesem Nachbarzug saß.
Die Bezugssysteme in beiden Zügen sind also gleichwertig,
egal, welcher Zug gerade fährt.
Das gilt aber nur,
solange alle Fenster im Zug geschlossen sind
oder ihr keine Hand aus dem Fenster streckt.
Denn dann wäre ja sofort klar,
welcher Zug steht und welcher fährt.

So, denken wir mal noch ein bisschen größer
und bauen das Ganze noch weiter aus.
Nehmen wir mal etwas größere Bezugssysteme:
Ich habe hier einmal - Paris… im Jahr 2050,
wenn der Klimawandel schon so weit fortgeschritten ist,
dass es bereits unter Wasser steht.
Dass Paris unter Wasser steht,
soll uns jetzt aber mal nicht weiter stören.
Die Menschen, die dort leben
haben sich damit arrangiert,
und Schallwellen breiten sich jetzt eben
nicht in Luft, sondern in Wasser aus.
Und dann nehmen wir noch ein anderes Bezugssystem…
Wie wäre es mit Heidelberg…
Steht ebenfalls schon unter Wasser.
Wir haben hier also zwei Wasserblasen,
die völlig autark umeinander herum schweben,
also zwei unabhängige Bezugssysteme.
Als Gedankenexperiment ist das übrigens völlig ok.

Genau wie in unserem Zugabteil,
gilt in beiden Wasserblasen das Relativitätsprinzip.
Und solange niemand ein Loch in die Außenhülle bohrt
und die Hand hinausstreckt,
merkt auch keiner,
dass sein Bezugssystem in Bewegung ist.

Aber was ist, wenn die beiden Bezugssysteme
miteinander kommunizieren wollen?
Wenn also z.B. Alice aus Paris
Bob aus Heidelberg etwas zurufen möchte?
Theoretisch ginge das,
denn hier ist ja Luft zwischen den Schneekugeln.
Wenn zwischen den Kugeln kein Medium,
wie die Luft wäre,
dann ginge da gar nichts,
dann könnte Bob Alice gar nicht hören.
Aber wir haben hier jetzt eben Luft dazwischen,
also geht das.
Allerdings sollen sich die beiden Bezugssysteme
zusätzlich gegeneinander bewegen,
wie zwei getrennt Welten.
Die Frage ist dann,
wie es sich in diesem Fall
mit dem Relativitätsprinzip verhält?
Der Schall ginge von Alice mit 1484m/s
durchs Wasser in Paris,
dann mit 343m/s durch die Luft
und dann wieder durchs Heidelberger Wasser zu Bob.
So sähe es aus unserer Sicht,
also sagen wir mal, aus der Sicht eines
absoluten Beobachters aus,
der die absolute Bewegung

aller Bezugssystem kennt.
Aus Bobs Sicht z.B.,
ist das allerdings etwas anders.
Bob sieht die Welt aus seiner Kugel heraus
und misst alle Geschwindigkeiten relativ zur
Geschwindigkeit seiner „Welt“.
Aus Bobs Sicht haben wir also zum einen
die Schallgeschwindigkeit in Alices Wasserblase,
die sich außerdem relativ zu Bob bewegt,
also 1484m/s plus die Geschwindigkeitsdifferenz
zwischen Alice und Bob.
Dann haben wir zwischen den Kugeln
die Schallgeschwindigkeit in Luft plus
die Geschwindigkeit von Heidelberg relativ zur Luft.
und zum Schluss die Schallgeschwindigkeit,
die Bob in seinem eigenen Bezugssystem misst.
Puh! Ganz schön kompliziert, oder?
Wenn unser Satellitennavigationssystem GPS
auf Schallwellen basieren würde,
dann würden wir sicher nie an unserem Ziel ankommen!

Noch komplizierter wird es,
wenn sich ein Bezugssystem
INNERHALB eines anderen bewegt,
wenn also z.B. Alice in Paris
selbst auch eine Schneekugel,
sagen wir mal die Metro,
hin und her schütteln würde.

Tatsächlich sind solche ineinander geschachtelten
Bezugssysteme aber die Realität:
Wenn wir im Zug sitzen,
sitzen wir in einem Bezugssystem,
das sich relativ zur Erdoberfläche bewegt.
Die Erdoberfläche wiederum ist aber ein Bezugssystem,
das sich um den Erdmittelpunkt dreht.
Das Bezugssystem Erde dreht sich um die Sonne
und unser Sonnensystem um das Zentrum der Milchstraße.
Und die Milchstraße?
Die bewegt sich auch…
Lauter ineinander geschachtelte Bezugssysteme,
die sich gegeneinander bewegen.

(PAUSE)

Jetzt fragt ihr euch sicher:
Was sollen diese Überlegungen?
Das ist doch Quatsch!
Natürlich haben wir zwischen den Sternen und Planeten
kein Wasser und keine Luft,
sondern Vakuum,
und die einzelnen Bezugssysteme interagieren
über Licht, also elektromagnetische Strahlung,
und vor allem über die Gravitation *(und Materiewellen)*.
Ach ja, Gravitationswellen kennen wir seit neuestem ja auch,

habe ich noch gar nicht erwähnt.
Aber beschränken wir uns hier mal
auf Licht, also elektromagnetische Wellen.

Was für Wellen sind diese
elektromagnetische Wellen eigentlich?
Das wissen wir nämlich gar nicht.
Und tatsächlich gibt es seit langem
einen großen Streit darüber,
ob es überhaupt ein Medium gibt,
in dem sich diese Wellen ausbreiten.
Aber ohne Trägermedium,
was sollen das für Wellen sein?
Bei einer Schallwelle
schwingen die Luftmoleküle hin- und her,
und bei einer Wasserwelle
schwingt die Wasseroberfläche auf- und nieder.
Bei einer elektromagnetischen Welle misst man ein
oszillierendes elektrisches und magnetisches Feld.
Aber wo das herkommt, wissen wir nicht.
Das ist ungefähr so, als würden wir
ein Boot auf- und nieder schwingen sehen,
und wissen nicht, warum es das tut,
weil wir das Wasser nicht sehen können.
Sehr mysteriös!
Und deshalb gingen bis zu Einsteins Zeiten,
also bis vor rund 120 Jahren,
die meisten Physiker von der Existenz
eines sogenannten „Äthers“ aus,
als Trägermedium für die elektromagnetischen Wellen.
Allerdings sind eben die Konsequenzen
der Annahme eines Äthers,
zusammen mit der Annahme,
dass weiterhin das Relativitätsprinzip
UND die Galileo-Transformationen erfüllt sein müssen,
genau die Überlegungen,
die wir gerade mit diesen beiden
Schneekugeln durchgeführt haben.
Und das wäre doch wirklich sehr verwunderlich,
wenn die Welt so funktionieren würde.

Also fing man an
Experimente zur Lichtgeschwindigkeit zu machen.
Insbesondere suchte man ein ausgezeichnetes Bezugssystem,
relativ zu dem die Lichtgeschwindigkeit konstant ist.
Besonders zu erwähnen in diesem Zusammenhang ist das
Michelson-Morley-Experiment.
Ich gehe da jetzt aber nicht weiter darauf ein,
könnt ihr googlen.
Wichtig ist vor allem das Ergebnis:
Man konnte nämlich beim besten Willen
kein ausgezeichnetes Bezugssystem finden!
Egal wo, wer und wie man misst,
die Vakuumlichtgeschwindigkeit hat IMMER den gleichen Wert!

Anders also, als bei der Schallgeschwindigkeit,
die zwar nicht von der Geschwindigkeit der Quelle,
sehr wohl aber von der Geschwindigkeit des Empfängers
relativ zum Trägermedium der Welle abhängt,
ist die Vakuumlichtgeschwindigkeit immer gleich,
unabhängig von der Geschwindigkeit der Quelle
UND des Empfängers.
Und damit hatten die damaligen Physiker
ein gravierendes Problem!
Denn mit dieser Art von Wellen sind das
Relativitätsprinzip UND die Galilei-Transformationen
nicht mehr unter einen Hut zu bringen.
Das sieht man z.B. sofort am klassischen
Additionstheorem von Geschwindigkeiten:
Schicke ich in einem fahrenden Zug einen
Lichtstrahl den Gang entlang in Fahrtrichtung,
dann hat aus meiner Sicht das Licht Lichtgeschwindigkeit,
für jemanden, der auf dem Bahnsteig steht aber auch.
Nach dem klassischen Additionstheorem von Geschwindigkeiten
hätte für den Beobachter auf dem Bahnsteig das Licht
allerdings Lichtgeschwindigkeit PLUS Zuggeschwindigkeit.
Nach den Ergebnissen des Michelson-Morley-Experiments
misst jeder Beobachter aber immer GENAU Lichtgeschwindigkeit.

Da andererseits eine Verletzung des Relativitätsprinzips
nirgends beobachtet wird und auch völlig unplausibel wäre,
folgt daraus, dass die klassischen Galilei-Transformationen
nicht mehr gültig sein können.

Der Physiker Hendrik Antoon Lorentz leitete dann
aus der Elektrodynamik Transformationsgleichungen ab,
die nach ihm benannten Lorentz-Transformationen,
die das Verhalten elektromagnetischer Wellen
und das Relativitätsprinzip in Einklang bringen.
Diese Lorentz-Transformationen sind bis heute gültig.
Allerdings waren Lorentz‘ eigene Plausibilitätserklärungen
für seine Transformationen in sich nicht konsistent
und so wurde sein Ansatz nicht weiterverfolgt.
Ja, und dann kam Albert Einstein.
Und was machte er?
Er suchte KEIN anschauliches Modell
und schon gar kein Äther-Modell.
Er machte einen rein mathematischen Ansatz
und überlegte sich „einfach“,
was aus einem „strengen“
Ansatz des Relativitätsprinzips,
wozu auch gehört, dass die Vakuumlichtgeschwindigkeit
für jeden Beobachter den gleichen Wert hat,
zwangsweise folgen muss.
Daraus folgen dann ebenfalls die Lorentz-Transformationen
aber auch noch viel mehr,
bis hin zu Schwarzen Löchern und Gravitationswellen.

Jetzt könnte man sagen,
ist doch alles wunderbar.
Passt doch alles.
Schwarze Löcher, Gravitationswellen…
all das wurde in letzter Zeit experimentell bestätigt!
- Ja, bestätigt schon,
aber, haben wir es auch wirklich verstanden?
Fangen wir an mit dem Äther.
Gibt es jetzt einen Äther oder gibt es ihn nicht.
Einstein brauchte für sein mathematisches Modell
logischerweise keinen Äther
und so nahmen und nehmen heute
die meisten Physiker an,
dass es keinen Äther gibt.

Also keine Ätherblasen,
und somit keine Schneekugeln
in unserem Gedankenexperiment.
(Schneekugeln Paris und HD in Kiste zurückstellen)
Überhaupt kein Äther, nirgends,
überall nichts,
überall nur absolut leerer Raum
- und Zeit
…sicher habt ihr schon einmal etwas von dieser
ominösen, sogenannten „Raumzeit“ gehört,
die in Gegenwart von Gravitation auch noch gekrümmt ist?
Aber gekrümmt relativ zu was?
Alles nur „Mathematik“ ?
Alles nur eine logische Konsequenz des Relativitätsprinzips?
Insofern könnte unsere Welt tatsächlich einfach nur
ein Algorithmus in einem gigantischen Supercomputer sein.

(PAUSE)

Ich weiß nicht, wie es euch geht?
Ich finde das unbefriedigend!
Tatsächlich ist, meiner Meinung nach,
die Geschichte mit der NICHT-Existenz des Äthers
eine reine Hypothese und kein Beweis.
Denn tatsächlich ist mir persönlich kein Beweis
für die NICHT-Existenz des Äthers bekannt.
Übrigens, Einstein selber,
machte dazu im Laufe seines Lebens
auch keine eindeutige Aussage.

Dann taucht in Einsteins Theorie,
wie schon gesagt,
diese ominöse Raumzeit auf.
Ich glaube, kein Mensch weiß,
was das wirklich sein soll.
Für mich sieht es so aus,
wie wenn das in Wahrheit
nur ein mathematisches Konstrukt ist,

das sich aus dem verwendeten
mathematischen Ansatz ergibt.
In dem Modell jedenfalls,
das ich im Folgenden vorstellen werde,
taucht diese Raumzeit nirgends auf.
Und so ähnlich ist es auch
mit dem sogenannten „gekrümmten Raum“,
im Zusammenhang mit der Gravitation;
unter dem sich wahrscheinlich
auch niemand wirklich etwas vorstellen kann.
Im 4. Teil meines Podcasts,
in dem es um die ART geht,
stelle ich ein alternatives Modell vor,
bei dem nicht der Raum selbst gekrümmt ist,
sondern sich einfach nur die Maßstäbe des Beobachters
in der Nähe von Gravitationszentren verändern.
Das Ergebnis ist das gleiche,
aber diesen Ansatz mit den „krummen“ Maßstäben,
d.h. Uhren, die in der Nähe von Gravitationszentren
langsamer gehen, und eine durch Gravitationszentren
verursachte Längenkontraktion,
kann man sich viel besser vorstellen,
als einen gekrümmten Raum, denke ich.

Ja, und so geht es weiter:
Wir haben Teilchen,
die sich wie Wellen,
und Wellen,
die sich wie Teilchen verhalten.
Wir haben Wellen mit,
und Wellen ohne Trägermedium:
elektromagnetische Wellen,
Materiewellen,
Gravitationswellen,
von denen wir keine Ahnung haben,
was das eigentlich sein soll.
Wobei, wohlgemerkt,
Wellen keine Teilchen transportieren.
Das Einzige, was Wellen transportieren,
ist Energie und Impuls.
Tatsächlich verhalten sich also
Teilchen und Wellen zueinander,
bzgl. ihren Eigenschaften,
wie Feuer und Wasser.
Insofern ist der Analogieschluss
von der Vier-Elemente-Lehre
zur Zwei-Elemente-Theorie
gar nicht so abwegig, finde ich.

Fazit:
Wir können sehr viel rechnen und plausibel herleiten,
aber verstanden was die, sagen wir mal, „DNS“
unseres Universums ist, haben wir nicht.
Folglich wäre da etwas mehr Demut

gegenüber der Natur durchaus angebracht,
und es ist absolut lächerlich zu glauben
wir würden oder könnten mit unserem
heutigen Wissen die Welt beherrschen,
d.h. in unserem Sinne manipulieren.
Da gibt es noch viel zu tun,
aber auch unendlich … viele … spannende … Fragen.

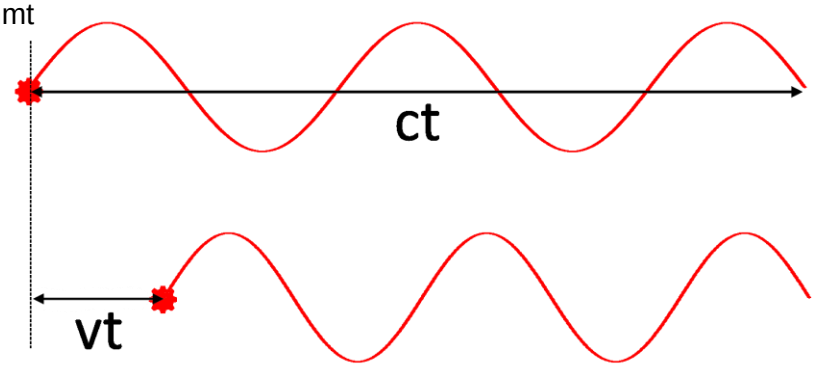
(Pause)

Gut, dann fangen wir mal an!
Gehen wir nochmal zurück zum Relativitätsprinzip.
Das Relativitätsprinzip ist also
DIE essenzielle Eigenschaft unseres Universums.
Vermeintliche Abweichungen davon nahe Lichtgeschwindigkeit
haben auf unser Alltagsverständnis,
also unser intuitives Verständnis der Natur,
allerdings keinen nennenswerten Einfluss,
weil sich um uns alles,
bei relativ kleinen Geschwindigkeiten abspielt.
Man spricht da, wie schon vorher erwähnt,
von der "klassischen Mechanik".
Bei großen Geschwindigkeiten allerdings,
und bei großen Massen, weichen
die Naturgesetzte von der klassischen Mechanik ab,
und es kommt zu so seltsamen Phänomenen,
wie der relativistischen Zeitdilatation
und Längenkontraktion,
Schwarzen Löchern, usw.

Im Folgenden werde ich ein
NEUES Modell für das Relativitätsprinzip vorstellen.
Genau betrachtet, ist es allerdings,
wie ich im Nachhinein festgestellt habe,
eigentlich gar nicht mal so ganz neu.
Teile davon findet man hier und da,
in Einsteins erster Arbeit zur SRT,
bei seinen Zeitgenossen,
wie z.B. Lorentz,
oder rund 20 Jahre später,
in den Arbeiten zur Quantenmechanik.
Die Aufgabe war einfach,
die Puzzleteile so zusammenzusetzen,
dass sich daraus ein in sich konsistentes Bild ergibt.
- Nun denn, schauen wir mal,
was dabei herausgekommen ist.

Beim Relativitätsprinzip geht es,
wie wir in diesem Modell mit den
Schneekugeln gesehen haben,
um bewegte Bezugssysteme,
und speziell bei der Relativitätstheorie
geht es um Licht,
also um elektromagnetische Wellen.
Bisher haben wir, auch bei den Wellen,

immer nur die Geschwindigkeit der Wellen betrachtet.
Das ist aber gar nicht die
herausragende Eigenschaft einer Welle.
Die wichtigsten Eigenschaften einer Welle
sind ihre Wellenlänge und ihre Frequenz.
Und da gibt es etwas im Zusammenhang
mit Wellen und Bewegung, das wir bisher
überhaupt noch nicht berücksichtigt haben,
das ihr aber sicher alle kennt, und vor allem etwas,
das ihr sicher alle schon einmal gehört habt.
Ich rede vom DOPPLER-EFFEKT.
Wie schon gesagt, den Doppler-Effekt
habt ihr sicher alle schon einmal gehört:
z.B., wenn ein Krankenwagen, ein Auto
oder ein Motorrad an euch vorbeifährt:
Wenn es auf euch zukommt
ist der Ton höher,
als wenn es
von euch wegfährt.
Oder bei Kirchenglocken:
Wenn die Glocke
auf euch zu schwingt,
ist der Ton höher,
als wenn sie
von euch weg schwingt:
Also: Ding-Dong.



Das lässt sich auch ganz einfach verstehen:
*(c und v sind die Schallgeschwindigkeit bzw.
Geschwindigkeit der Quelle. In der Zeit t legt die Welle
die Strecke ct und die Quelle die Strecke vt zurück)*
Eine Schallquelle erzeugt eine Schallwelle
und während sich die Schallwelle ausbreitet,
läuft die Quelle hinterher und schiebt quasi
von hinten die Welle zusammen.
Dadurch wird die Wellenlänge kürzer
und die Frequenz höher.
Also lange Wellenlänge - tiefe Frequenz - tiefer Ton
(langenwelligen, langsam oszillierenden Wellenzug mit Finger zeigen)
kurze Wellenlänge - hohe Frequenz - hoher Ton
(kurzwelligen, schnell oszillierenden Wellenzug mit Finger zeigen)

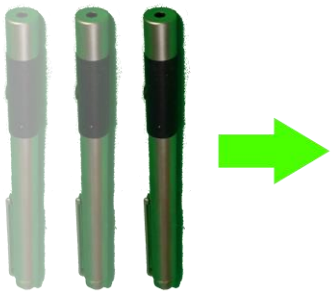
Einen Doppler-Effekt hat man aber auch,
wenn sich der Empfänger bewegt:
Bewege ich mich auf die Schallquelle zu,
ist der Ton höher,
als wenn ich mich von ihr wegbewege.
Bei Wasserwellen merkt man das sofort:
Wenn man bei Wind und Wetter gegen die Wellen schwimmt,
ist das viel unangenehmer,
als mit den Wellen zu schwimmen.
Die Länge der Wasserwellen ändert sich dabei nicht,
nur die Frequenz, mit der sie mir ins Gesicht schlagen,
weil ich mich relativ zu den Wellen bewege.

So, das waren ein paar Details
zum Doppler-Effekt im Fall von Schall- bzw. Wasserwellen.
Wie sieht es denn jetzt beim Licht aus?
Wir haben ja schon gehört,
dass elektromagnetische Wellen etwas speziell sind,
insbesondere ist die Lichtgeschwindigkeit,
anders als bei Schallwellen,
unabhängig von der Geschwindigkeit des Empfängers.
Und daraus ergab sich ja
die bis heute andauernde Diskussion
um den Äther…

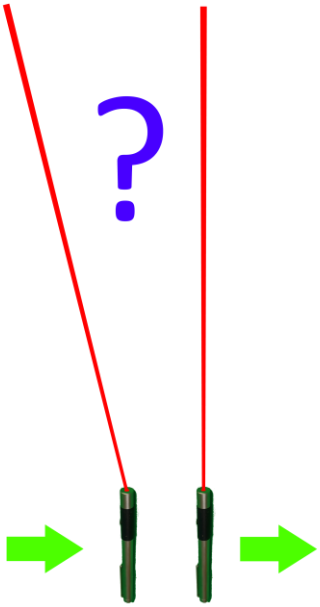
Also, Licht ist eine elektromagnetische Welle,
und folglich gibt es da auch den Doppler-Effekt.
Ein unangenehmes Beispiel
kennt jeder von euch, der Auto fährt:
Die Radarfallen zur Geschwindigkeitskontrolle
nutzen den Doppler-Effekt von elektromagnetischen Wellen,
um eure Geschwindigkeit zu messen.
Oder ein anderes Beispiel aus der Astronomie,
bei dem der Doppler-Effekt eine große Rolle spielt:
Aus der Frequenz des Lichts,
das von den Sternen zu uns kommt,
kann man nämlich deren Geschwindigkeit
relativ zu uns bestimmen
- Radarfallen für Sterne, quasi 😊 -
und das mit einer enormen Präzision.
Mittlerweile lassen sich damit Geschwindigkeitsänderungen
von nur 1m/s messen, was 300 Mio. mal langsamer
als die Lichtgeschwindigkeit selbst ist.
Überträgt man dieses Geschwindigkeitsverhältnis auf den Schall,
würde das bedeuten, dass noch Geschwindigkeiten,
die tausendmal langsamer als Schneckentempo sind,
messbar wären.
(Notiz: Radarmessung (Laser) ist noch besser, Schnecke: 3m/h).
Zurück zum Licht, mit einem Beispiel aus der Astronomie dazu:
In unserem Sonnensystem steht die Sonne nicht ganz still.
Auch der Jupiter z.B. mit seiner Masse,
zwingt die Sonne zu einer kleinen Kreisbewegung
mit einer Geschwindigkeit von ca. 10m/s.
Und diese Geschwindigkeitsänderung der Sonne
lässt sich inzwischen eben
über den Doppler-Effekts gut messen.
Und genauso lassen sich auch Exoplaneten erforschen,
- was ja zurzeit auch so ein Hot-Topic ist -
indirekt über das Wackeln ihres Zentralgestirns.

Man könnte also sagen,
der Doppler-Effekt ist etwas,
das uns im Alltag und in der Forschung
auf Schritt und Tritt begegnet.
Allerdings geht es da meistens um den
sogenannten „longitudinalen“ Doppler-Effekt.

Beim longitudinalen Doppler-Effekt bewegen sich
Quelle und Empfänger immer in Richtung der Welle.
Das ist auch der Fall,
der in den meisten Lehrbüchern behandelt wird;
wohl hauptsächlich deshalb,
weil das leichter zu erklären und zu berechnen ist.
Aber wir wollen ja,
und müssen auch nicht rechnen -
und tatsächlich versteht man die RT am besten,
wenn die Bewegung NICHT in Richtung,
sondern senkrecht zur
Ausbreitungsrichtung der Welle stattfindet.
Man spricht in diesem Fall vom
sogenannten „transversalen“ Doppler-Effekt.



Also, stellt euch mal vor,
ihr leuchtet mit einem Laser-Pointer in den Himmel.
Und außerdem bewegt ihr euch seitwärts dazu.
Sei es, weil ihr z.B. lauft, oder weil ihr
auf einem Schiff in den Nachthimmel blickt.
Aber selbst wenn ihr steht,
passiert das automatisch,
weil sich die Erde ja bewegt,
wie ich vorhin schon erwähnt habe,
z.B. mit immerhin 30km/Sek um die Sonne.



Ja, und die entscheidende Frage ist jetzt,
wie sieht das eigentlich genau aus,
wenn sich der Laser-Pointer seitlich bewegt?
Man könnte sich z.B. fragen,
ist der Laserstrahl dann abgeknickt,
oder bewegt er sich mit?
Um diese Frage beantworten zu können,
muss man allerdings schon sehr genau hinsehen,
d.h. die Experimente dazu sind nicht so ganz einfach -
weil das Licht so verdammt schnell ist.
Bevor man aber aufwendige und
teure Experimente plant, lohnt es sich immer,
erst nochmal genau nachzudenken, was man will,
d.h. man macht ein Gedankenexperiment.

Wie ist das denn z.B.,
wenn ich in einem Zug oder in einem Flugzeug
einen Apfel hochwerfe?
Der fliegt natürlich senkrecht nach oben
und fällt genau so wieder herunter.
Vorausgesetzt natürlich,
da ist nirgends ein Fenster offen.
Wenn der Wind durchpfeift,
dann geht's natürlich schief.
Aber, gehen wir mal davon aus,
dass alle Fenster zu sind,
dann gibt's da keinen Unterschied

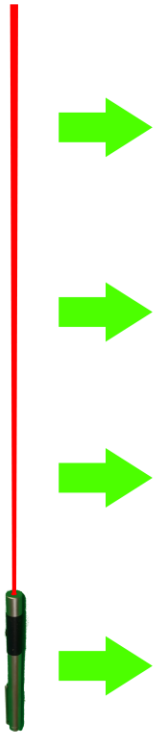
zu dem Fall, wenn der Zug steht.
Und warum ist das so?
Naja, am Anfang,
auch wenn ich den Apfel noch in der Hand halte,
dann hat er doch schon eine Geschwindigkeit
in Richtung des fahrenden Zugs.
Und diese Geschwindigkeitskomponente behält er bei,
auch während er durch die Luft fliegt.
Das ist das klassische Additionsgesetz von Geschwindigkeiten
nach dem Relativitätsprinzip von Galileo Galilei.
Und folglich vollführt der Apfel im Zug,
aus Sicht eines Mitreisenden,
die gleiche Flugbahn,
wie die Flugbahn eines Apfels,
der von jemand auf dem Bahnsteig hochgeworfen wird.

Und so ähnlich ist es beim Laserstrahl auch.
Zwar hat das Licht nach oben nicht mehr Lichtgeschwindigkeit,
da ja insgesamt die Lichtgeschwindigkeit
nicht überschritten werden darf,
aber in Bewegungsrichtung hat es,
wie beim Apfel,
die gleiche Geschwindigkeit, wie der Zug.
Folglich geht das Licht,
genauso wie der Apfel auch,
senkrecht nach oben.
Alles andere wäre ja unlogisch
und wird experimentell auch nicht beobachtet.

Wenn dem nicht so wäre,
dann gäbe es auch noch ein weiteres Problem,
dann würde nämlich das Licht
aus dem Laser-Resonator "herausfallen".
Denn ein Laser funktioniert ja so:
Man hat ein optisch aktives Medium,
in dem das Laserlicht erzeugt wird.
Außerdem ist das optisch aktive Medium
zwischen zwei Spiegeln,
die einen Resonator bilden, eingesperrt.
Das Licht wandert jetzt immer
zwischen den beiden Spiegeln hin- und her,
wobei es permanent verstärkt wird.
Und so bildet sich im Laser-Resonator
eine relativ intensive stehende Lichtwelle aus.
Das Licht, das wir sehen,
also das Licht, das aus dem Laser
wirklich heraus kommt, ist nur ein Bruchteil
von dieser stehenden Lichtwelle im Resonator.
Und wenn jetzt das Licht im Resonator
bei einer seitlichen Bewegung nicht mitgehen würde,
ja dann ginge der Laser aus.

Die Beweislast spricht also eindeutig dafür,
dass der Laserstrahl senkrecht nach oben geht.

Man kann's auch einfach ausrechnen,
da es ja nur ein Spezialfall des Doppler-Effekts ist.



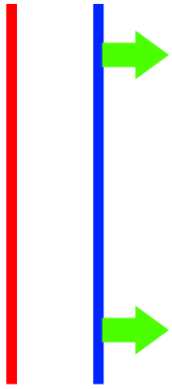
Okay, wir haben also so etwas,
wie einen seitlich driftenden Lichtstrahl.
Auf jeden Fall würde ich das so nennen.
In der Literatur ist dieser Begriff
bisher aber nicht zu finden.
Das Einzige was man findet,
ist der „transversale Doppler-Effekt“.
Das ist aber nicht ganz genau das Gleiche -
und in vielen Lehrbüchern wird gar nicht so ganz klar,
welche Geometrie mit dem transversalen Doppler-Effekt
eigentlich gemeint ist.

In diesem Zusammenhang mache ich
an dieser Stelle mal einen kleinen Exkurs,
hinsichtlich der Frage,
was wir eigentlich sehen,
weil das Licht ja eine gewisse Laufzeit hat,
die von Ort zu Ort unterschiedlich sein kann.
Wen das nicht interessiert,
der darf in der Zwischenzeit
mal ein bisschen aus dem Fenster gucken
oder einen Kaffee trinken gehen.

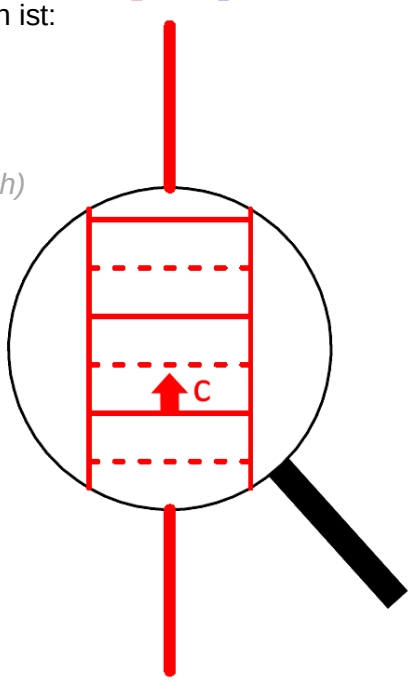
Das Problem ist ja,
dass wir hier von ziemlich großen Geschwindigkeiten reden.
Um überhaupt unterscheiden zu können,
ob der Laserstrahl jetzt abgeknickt ist,
oder seitlich driftet,
muss ich entweder sehr genau messen,
oder ich brauche sehr große Geschwindigkeiten.
So 1/10 der Lichtgeschwindigkeit wäre nicht schlecht.
Das ist aber schon verdammt schnell,
und bei diesen Geschwindigkeiten
macht sich die Laufzeit des Lichts bemerkbar,
d.h. wenn mein Laser-Pointer einen Lichtpuls aussendet,
dann ist der Laser-Pointer,
wenn der Lichtpuls beim Beobachter ankommt,
schon ein Stück weitergewandert.
Die Frage ist also, was sieht man eigentlich?
So wie ich es hier dargestellt habe,
mit dem abgeknickten oder seitlich driftenden Lichtstrahl,
ist das ja immer ein Bild zu EINEM ganz bestimmten Zeitpunkt.
Aber das Licht braucht ja eine gewissen Zeit
um von einem Punkt aus in mein Auge zu gelangen.
D.h. wir sehen etwas anderes.
Es ist jetzt aber nicht entscheidend,
was wir sehen, sondern das was ist.
Und tatsächlich können wir "das was ist" auch wirklich messen.

Wir könnten z.B. überall im Raum Detektoren aufstellen,
die wir zeitlich synchronisieren.
Dann führen wir die Messungen zusammen
und bekommen so ein Bild zu einem ganz bestimmten Zeitpunkt.
Oder wir rekonstruieren aus vielen Bildern,
die zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommen wurden,
das Bild zu einem ganz bestimmten Zeitpunkt.
Dass wir die Gedankenexperimente,
die wir hier machen,
in Wirklichkeit erstmal gar nicht so sehen können,
ist also nicht das Entscheidende.
Entscheidend ist, ob es IRGENDEINE Möglichkeit gibt,
unsere Gedankenexperimente in die Realität umzusetzen.
Und das ist bei dem,
was ich hier beschreibe,
immer der Fall.

Ende der Kaffeepause.
Jetzt geht's wieder für alle weiter.

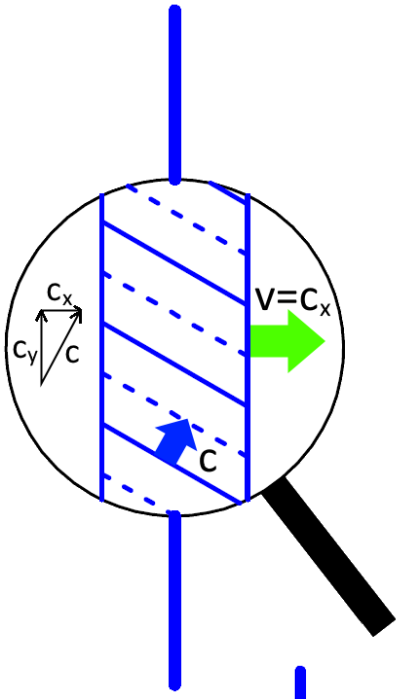


Gut, wir haben jetzt also diesen
seitlich driftenden Lichtstrahl.
Und was machen wir damit?
Schauen wir uns den doch mal genauer an.
Es muss ja einen Unterschied
zu einem "normalen" Lichtstrahl geben.
Wobei, was heißt schon "normal".
Es ist ja nichts in Ruhe:
Die Erde dreht sich um sich selbst und um die Sonne.
Und unser Sonnensystem dreht sich mit
800.000km/h um das Zentrum unserer Milchstraße.
Das einzige, was man mit Sicherheit unterscheiden kann ist:
Ob sich ein Lichtstrahl RELATIV zu mir bewegt,
oder ob er ruht.

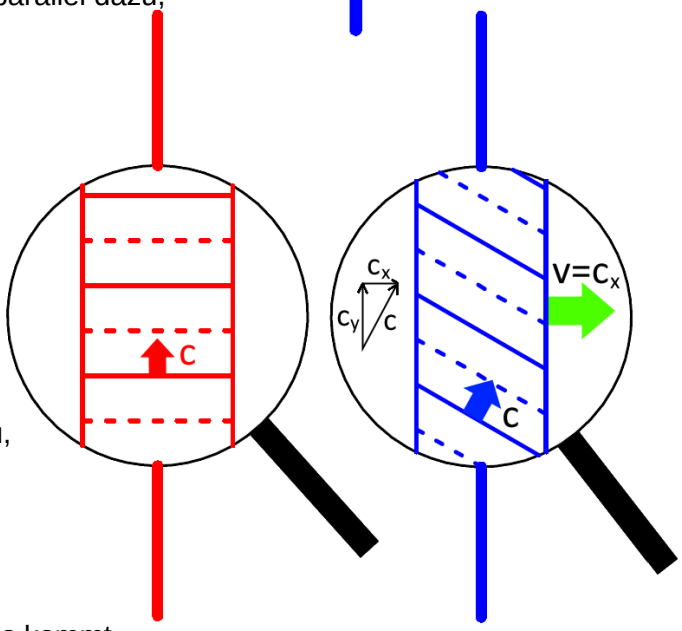


Ich zeichne hier mal einen ruhenden *(roter Strich)*
und einen seitlich bewegten Lichtstrahl hin, *(blauer Strich)*
wobei „bewegt“ ist natürlich schwierig.
Ich deute das mal mit einem Pfeil an *(grüner Pfeil)*.
Okay, da sieht man jetzt erstmal keinen Unterschied.
Aber zoomen wir mal ein bisschen
in den Lichtstrahl hinein:
Was ist denn ein Lichtstrahl?
Licht ist, wie wir gehört haben,
eine elektromagnetische Welle,
was ich hier jetzt mal mit diesen Linien skizziere.
(waagrechte Linien einzeichnen)
Die durchgezogenen Linien sind die Wellenberge
und die gestrichelten die Wellentäler.
Und die seitlichen Linien

sind die Begrenzung des Lichtstrahls.
Die werden auch noch eine wichtige Rolle spielen.
Außerdem läuft diese Welle *(ruhender, roter Lichtstrahl)*
mit Lichtgeschwindigkeit c nach oben.
Das deute ich mal durch diesen
Geschwindigkeitsvektor an.
Wichtig ist: Dieser Geschwindigkeitsvektor steht
immer senkrecht auf der Wellenfront.



So, und wie sieht es beim
seitlich driftenden Lichtstrahl aus?
(beim Zeichnen an der Tafel
Längen mit Meterstab übertragen)
Naja, zum einen haben wir da
eine Geschwindigkeit v nach rechts.
Und dann haben wir noch eine
Geschwindigkeitskomponente in Strahlrichtung,
die nennen wir mal c_y.
Die Geschwindigkeit v ist natürlich auch
gleich der Geschwindigkeitskomponente der
Lichtgeschwindigkeit c_x in x-Richtung
und beide zusammen müssen wieder
die Lichtgeschwindigkeit c ergeben.
Und auch hier stehen die Wellenfronten
wieder senkrecht auf dem Geschwindigkeitsvektor.
Und alle anderen Wellenfronten sind parallel dazu,
und werden von der Begrenzung
des Lichtstrahls abgeschnitten.
Übrigens, wieso ich die Längen
hier so mit dem Meterstab abmesse,
sage ich euch gleich.
So, damit haben wir's schon!
Diese beiden Bilder zusammen,
das ist die RT.
Die SRT, um genau zu sein,
bei der es um konstante
Geschwindigkeiten geht.
Bei der ART kommen noch
Beschleunigung und Gravitation hinzu,
das ist aber heute nicht unser Thema.
Also, SRT.



Und warum steckt da die SRT drin?
Fangen wir mal mit dem an,
was auch in jedem Lehrbuch als erstes kommt,
das ist die relativistische Zeitdilatation, die besagt:
Uhren in einem bewegten System gehen langsamer.
Dazu wird immer die Lichtuhr herangezogen,
(siehe z.B.: https://die-neue-relativitaetstheorie.de/beitraege/lichtuhr/)
bei der ein Lichtpuls zwischen zwei Spiegeln hin und her wandert.
Und die Rate mit der er das tut,
das ist die Taktrate der Lichtuhr.
Und die bewegte Uhr geht jetzt eben langsamer,

weil dort das Licht ja nur mit der kleineren c_y-Komponente
zwischen den Spiegeln hin- und herläuft.
Wie groß diese y-Komponente ist,
kann man auch gleich ausrechnen:
Nach dem Satz des Pythagoras gilt:

$$c_x^2 + c_y^2 = c^2$$

oder umgeformt

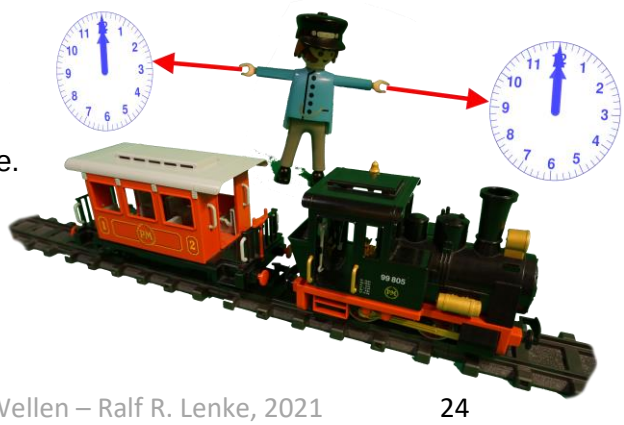
$$c_y = \sqrt{c^2 - v^2} = c\sqrt{1 - v^2 / c^2} := c / \gamma$$

mit

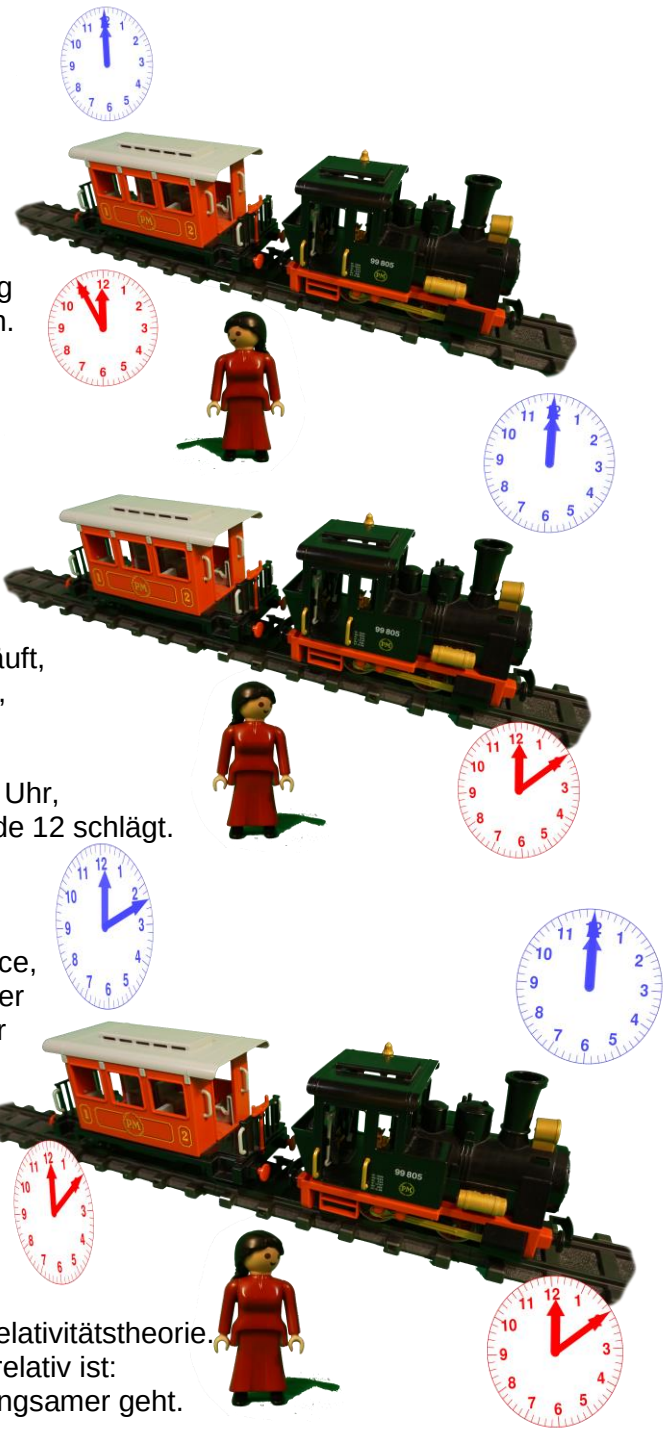
$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

Den γ-Faktor solltet ihr euch merken,
der wird uns im Folgenden immer wieder begegnen...
Eine bewegte Lichtuhr geht also
um den Faktor γ langsamer,
- relativ - also aus Sicht des ruhenden Beobachters.
So, und um nicht immer ruhender und
bewegter Beobachter sagen zu müssen,
gebe ich den beiden mal wieder einen Namen:
Die ruhende Beobachterin sei unsere Alice aus Paris
und der bewegte Beobachter sei Bob aus HD.
Aus Sicht von Alice geht also Bobs Uhr langsamer.

Damit haben wir also eine anschauliche Erklärung
für die relativistische Zeitdilatation gefunden.
Damit hört es in den Lehrbüchern aber mit den
anschaulichen Erklärungen auch schon auf.
Ab hier beginnt überall die Mathematik.
Tatsächlich gibt es, insbesondere für
zwei weitere relativistische Phänomene,
bisher keine befriedigende, anschauliche Erklärung:
Das eine ist die relativistische Längenkontraktion,
auch genannt: Lorentz-Kontraktion.
Und das 3. Element ist die Gleichzeitigkeit.
Wieso Gleichzeitigkeit?
Tatsächlich hängt der Zeitunterschied von Ereignissen,
die an VERSCHIEDENEN Orten passieren,
von deren Relativbewegung ab.
Insbesondere werden Ereignisse,
die in einem bewegten System gleichzeitig passieren,
von einem ruhenden Beobachter
nicht als gleichzeitig wahrgenommen.
Ein oft zitiertes Beispiel dazu:
Der Schaffner eines fahrenden Zugs
sendet von der Mitte des Zugs ein
Lichtsignal zum Zuganfang und Zugende.
Da für ihn Zuganfang und Zugende
gleich weit entfernt sind
und das Licht sich in beide Richtungen
mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet,
erreichen für ihn die Lichtsignale



Zuganfang und Zugende gleichzeitig.
Sagen wir mal: Punkt 12 Uhr.[1]



Für die Beobachterin Alice
auf dem Bahnsteig aber,
Fährt der Zuganfang dem Licht davon
und das Zugende kommt
dem Lichtsignal entgegen,
wodurch die Lichtpulse nicht gleichzeitig
an Zuganfang und Zugende ankommen.
Also, der Lichtpuls *(=rote Kreide)*
läuft in der Mitte los
(Zug nach vorne fahren und rote Kreide nach hinten laufen lassen)
und kommt zuerst am Zugende,
sagen wir mal 5 vor 12 an;
5 vor 12, weil aus Alices Sicht,
das Licht ja eine kürzere
Strecke zurückgelegt hat.
Das Lichtsignal aber, das nach vorne läuft,
muss dem Zuganfang hinterher rennen,
und kommt aus Alices Sicht später an;
sagen wir mal: 10 nach 12
Auf Alices Uhr ist es also gerade 12:10 Uhr,
wenn es auf der vorderen Zuguhr gerade 12 schlägt.

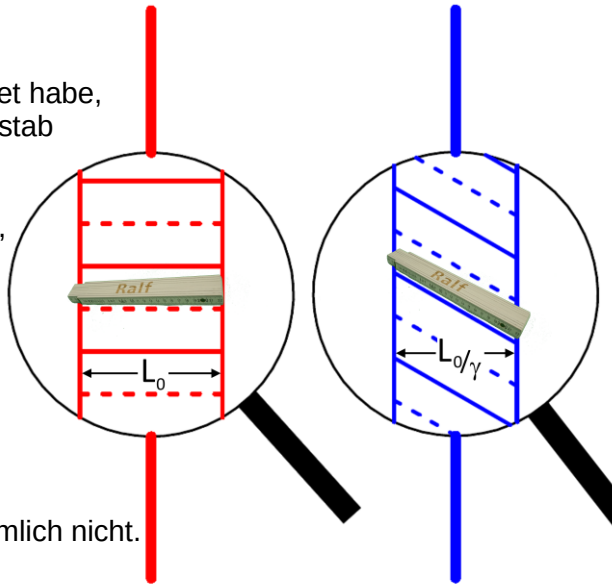
In der Zwischenzeit ist aber auch
die hintere Zuguhr weitergelaufen.
Nicht genau um 15 Minuten, wie bei Alice,
sondern nur um 12 Minuten aufgrund der
relativistischen Zeitdilatation - Bobs Uhr
geht ja langsamer als Alices Uhr.
Dieser Phasenschub von,
in diesem Beispiel 12 Minuten,
also diese Zeitdifferenz zwischen
bewegten Uhren, die aus Sicht des
ruhenden Beobachters *(Alice zeigen)*,
an unterschiedlichen Orten stehen,
(vordere und hintere Zuguhr zeigen)
ist ein ganz wichtiges Element in der Relativitätstheorie.
Nur dadurch ist es möglich, dass alles relativ ist:
Dass also aus Alices Sicht Bobs Uhr langsamer geht.
Dass aber auch umgekehrt,
aus Bobs Sicht Alices Uhr langsamer ist.
Niemand kann sagen, wer sich wirklich bewegt.
Das ist eben das Relativitätsprinzip,
auf dem Einsteins Relativitätstheorie aufbaut:

---

[1] Für diejenigen, die es nachrechnen wollen: Im folgenden Rechenbeispiel wurde für das Verhältnis v/c ein Wert von 0.6 angenommen, und die Zuglänge entspricht einer Strecke, die das Licht in 20 Minuten zurücklegt, was ungefähr das 2.5-fache der Entfernung der Erde zur Sonne ist. Es handelt sich also wirklich um ein Gedankenexperiment 😊.

Die Naturgesetzte sind unabhängig vom
Bewegungszustand des Beobachters.
Und jeder Beobachter misst eine
Vakuumlichtgeschwindigkeit von 300.000km/s.

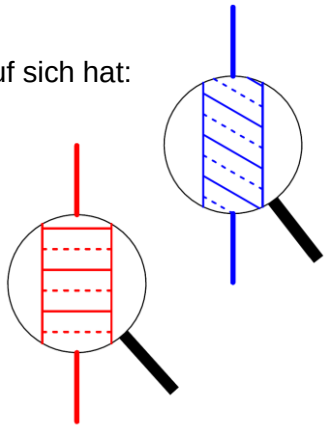
Aber wie kommen wir jetzt
zu einer anschaulichen und, sagen wir mal,
tiefgründigen Erklärung für
die Längenkontraktion und
der Sache mit der Gleichzeitigkeit?
Schauen wir doch nochmal die beiden Lichtstrahlen an.
Die Zeitdilatation haben wir verstanden,
das hängt damit zusammen,
dass das Licht bei der Lichtuhr
nur mit der verringerten Geschwindigkeit c_y,
also c/γ, hin und herläuft.
Aber man sieht an diesem
seitlich driftenden Lichtstrahl noch mehr:
Ich habe doch vorhin,
als ich die schiefen Wellenfronten gezeichnet habe,
die Länge der Wellenfronten mit dem Meterstab
vom normalen Lichtstrahl übertragen.
Das hatte auch seinen Grund:
Diese Wellen-FRONTEN hier *(linker Strahl)*,
wenn der Laser-Pointer ruht,
und hier *(rechter Strahl)*,
wenn wir ihn seitlich bewegen,
sind nämlich exakt gleich lang.
Beim Doppler-Effekt,
also wenn ich eine Quelle bewege,
oder wenn das Licht an einem bewegten,
PLANEN Spiegel reflektiert wird,
ändert sich die Länge der Wellenfronten nämlich nicht.

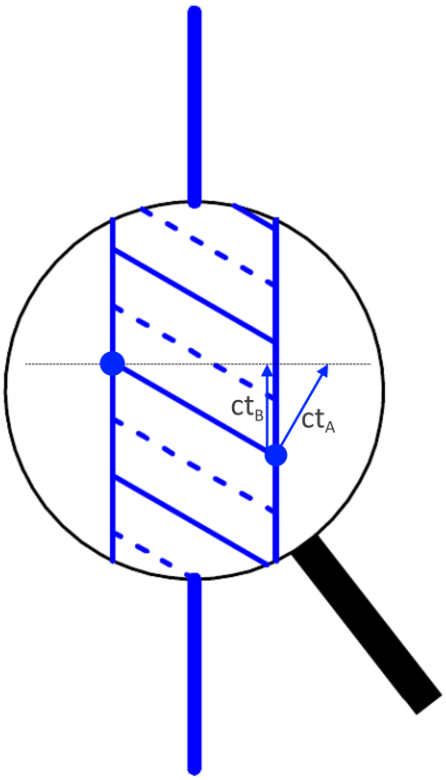


Jetzt ist beim ruhenden Lichtstrahl
die Breite des Lichtstrahls,
- wir nennen sie mal L_0 -
natürlich gerade durch die Länge
dieser Wellenfronten gegeben.
Beim seitlich driftenden Lichtstrahl ist das anders,
da dort die Wellenfronten gekippt sind,
was zur Folge hat,
dass der Lichtstrahl schmäler wird.
(mit Händen und Meterstab durch Scherbewegung zeigen)
Und zwar wieder um den Faktor γ.
Der seitlich driftende Lichtstrahl
hat also nur noch die Breite L_0/γ.
Und, Bingo,
das ist die relativistische Lorentz-Kontraktion:
Lichtstrahlen, die sich mit großer Geschwindigkeit bewegen,
werden in Bewegungsrichtung kontrahiert.
Wieso das auch für materiebehaftete GEGENSTÄNDE
und nicht nur für diesen Lichtstrahl hier gilt,

darauf komme ich gleich.

Zuerst überlegen wir uns noch,
was es mit diesen schiefen Wellenfronten auf sich hat:
Wenn ein Lichtstrahl an uns vorbei wandert,
dann sehen wir das *(schiefer Lichtstrahl)*.
Aber jemand, der sich mit dem
seitlich driftenden Lichtstrahl mitbewegt,
also relativ zum Lichtstrahl ruht,
sieht das *(normaler Lichtstrahl)*.
Wie passt das zusammen???
Hm, was ist denn eine Wellenfront?
Eine Wellenfront ist die Linie,
die zu einem bestimmten Zeitpunkt
überall gleich weit
von der Lichtquelle entfernt ist.
Oder anders herum ausgedrückt:
An allen Punkten,
zu denen eine Wellenfront
die gleiche Strecke zurückgelegt hat,
herrscht Gleichzeitigkeit.
Aber welche Strecken jetzt „gleich“ sind, das
hängt von der Bewegung des Beobachters ab.
Für den Schaffner im Zug sind Zuganfang
und Zugende immer gleich weit entfernt.
Für Alice auf dem Bahnsteig aber nicht.
Für sie wird mit zunehmender Zeit
der Abstand vom Zuganfang zur
ursprünglichen Zugmitte immer größer
und der Abstand vom Zugende zur
ursprünglichen Zugmitte immer kleiner.
Und bei den schiefen Wellenfronten?
Da erreicht dieses Ende der Wellenfront
(blauer Punkt rechts unten)
die horizontale Linie, die durch das
linke Ende der Wellenfront geht,
(blauer Punkt links)
erst nach der Zeit t_A.
Die von Alice gemessene Zeit t_A
ist die Zeit, die das Licht braucht,
um diese Strecke hier
(Länge des blauen Pfeils zeigen)
mit der Länge $c*t_A$ zurückzulegen.
Wenn jetzt die Breite dieses Lichtstrahls
gerade die Länge meines Zuges ist,
dann ist die Zeit t_A auch gerade gleich
der Zeitdifferenz für Alice,
die zwischen dem Auftreffen der Lichtpulse
am Zugende und am Zuganfang liegt.
In unserem Fall also 15min.
Beim GLEICHZEITIGEN Betrachten von
Bobs Uhren am Zugende und Zuganfang,
sieht Alice dort allerdings nur eine kleinere

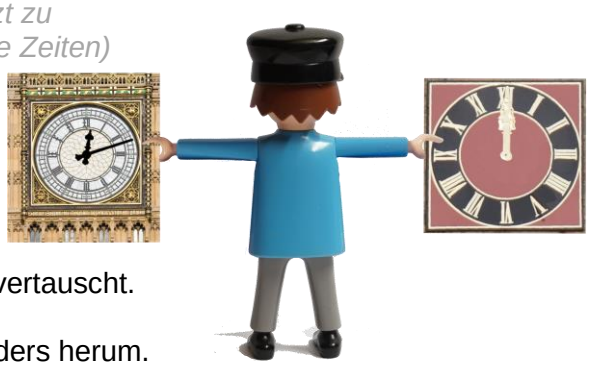




Zeitdifferenz von $t_B = t_A / \gamma$, da Bobs Zeit
um den Faktor γ langsamer vergeht.
In unserem Fall also 12min.
Mit diesen gekippten Wellenfronten
haben wir also eine, sagen wir mal,
„mikroskopische“ oder „der Natur intrinsische“
Erklärung für das Phänomen der „Gleichzeitigkeit“ gefunden;
was eben in den Lehrbüchern bisher
nur mit diesen Lichtpulsen, die zum
Zuganfang und Zugende laufen, erklärt werden kann.

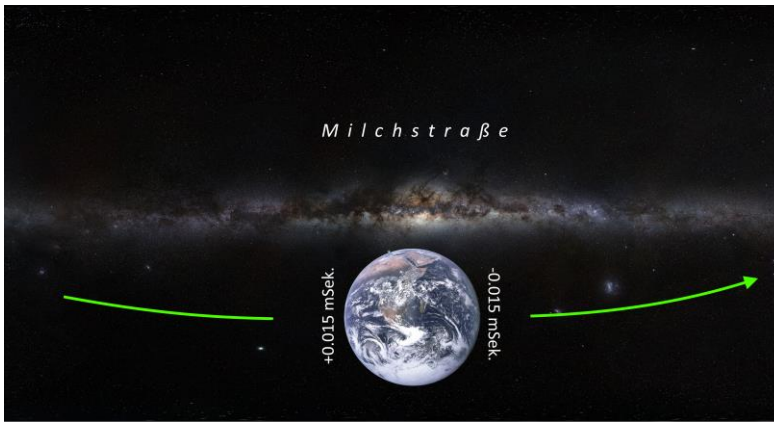
Noch eine nette Sache
im Zusammenhang mit der Gleichzeitigkeit:
Wenn Bob quer im Zug steht
und sein Arme ausstreckt,
dann geht, wie wir jetzt wissen,
aus Alices Sicht eine Uhr,
die er an seinem linken Handgelenk trägt,
gegenüber einer Uhr
an seinem rechten Handgelenk, nach.
Ich mache das mal vor: *(ich bin jetzt der Schaffner und setze ein Schaffnermütze auf)*

Zur besseren Unterscheidbarkeit
sei die Uhr an meiner linken Hand,
jetzt Big Ben,
auf dem es gerade 12 Uhr schlägt,
und die Uhr an meiner rechten Hand,
das ist die Kirchturmuhr in meinem
Heimatstädtle Lauchheim,
da schlägts gerade 12:12 Uhr.
Und außerdem befinde ich mich ein einem Zug,
der fast mit Lichtgeschwindigkeit fährt.
So, und wenn ich mich jetzt rumdrehe,
(rumdrehen, Rückseite der Schilder ist jetzt zu sehen mit gleichen Uhren aber vertauschte Zeiten)



dann zeigt das nächste Mal,
wenn die Zeiger wieder oben stehen,
also gegen Mitternacht,
Big Ben jetzt 0:12 Uhr
und in Lauchheim ist es Mitternacht.
Die beiden Uhren haben also ihre Rolle,
was das Vor- und Nachgehen anbelangt, vertauscht.
Und wenn ich mich nochmal rumdrehe,
dann ist es am nächsten Mittag wieder anders herum.
Erstaunlich, oder?
Gut, ihr habt den Trick hier natürlich durchschaut,
(Schilder von beiden Seiten zeigen)
aber wenn ich in einem schnellen Zug
an euch vorbeifahren würde,
wäre das tatsächlich so,
dann bräuchte ich nicht zu schummeln,
da ginge tatsächlich immer die vordere Uhr nach,
egal, wie oft ich mich rumdrehe.

Wir können ja mal abschätzen,
wie groß dieser Effekt
in unserem Alltag ist.
Wie schon gesagt,
bewegen wir uns mit
800.000km/h um das
Zentrum unserer Milchstraße.
Und als Zuglänge nehmen wir
den Erddurchmesser von
12.700km. Dann erhalten wir
damit eine Zeitdifferenz von
0.03 Millisekunden.
Das ist nicht viel,
aber auch nicht ganz wenig.



Es ist nur ungefähr 20 Mal weniger,
als die Dauer des Flügelschlags einer Mücke,
oder Schnake, wie wir hier sagen.
Und um diese Zeitdifferenz
geht die eine Uhr, die sich quasi
in „Flugrichtung“ auf der
„Vorderseite“ Seite der Erde befindet,
gegenüber einer Uhr, auf der
„Rückseite“ der Erde, nach.
Und 12 Stunden später ist es gerade umgedreht,
dann geht die erstgenannte Uhr 0.015 Millisekunden vor,
und die andere 0.015 Millisekunden nach.
Aufgrund der Bewegung um das
Zentrum unserer Milchstraße
schwankt unser „Biorhythmus“
also täglich um 0.03 Millisekunden,
das Zwanzigstel der Dauer
des Flügelschlags einer Mücke.

Betrachten wir nicht nur die tägliche Schwankung,
sondern die Schwankung im Laufe eines Jahres,
dann können wir statt des Erddurchmessers
den viel größeren Durchmesser der
Erdumlaufbahn um die Sonne einsetzen,
und dann betrüge die Zeitdifferenz fast 0.4 Sekunden.
Allerdings stimmt das nicht ganz,
da unser Sonnensystem gegenüber der
Rotationsbewegung der Milchstraße gekippt ist.
Dadurch ist der Effekt um ca. einen Faktor 2 kleiner.
Allerdings bewegt sich unsere Milchstraße
auch mit einer enormen Geschwindigkeit,
wodurch sich wieder andere Korrekturfaktoren ergeben usw…

Einerseits schwankt also die Periode unserer Uhren
im Tages- und Jahresrhythmus hin und her.
Aber andererseits bauen wir Uhren,
sogenannte Atomuhren, die eine Mio. mal eine Mio. mal
genauer sind, als diese Schwankungen.
Wenn uns jetzt also jemand von

außerhalb unserer Galaxie betrachtet,
z.B. von der Andromeda-Galaxie aus, wird er sagen:
"Hey ihr Erdlinge, eine schicke Uhr habt ihr da,
war bestimmt schweineteuer.
Aber, sie eiert! Ihr habt die teuerste Eieruhr
des Universums gebaut, haha!"

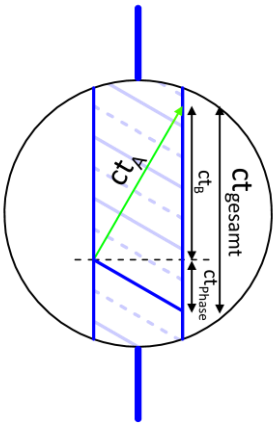
Nichts für ungut, kleiner Scherz unter Physikern.
Die Leute, die solche hochkomplexen Uhren bauen,
wissen das natürlich. Und sie wissen natürlich auch,
dass das alles auf den Dopplereffekt zurückzuführen ist.
Fakt ist jedenfalls, Zeit ist nichts Absolutes,
sondern nur relativ zu betrachten
und hängt immer vom Standpunkt des Beobachters ab.
Jeder hat seine eigene Zeit.

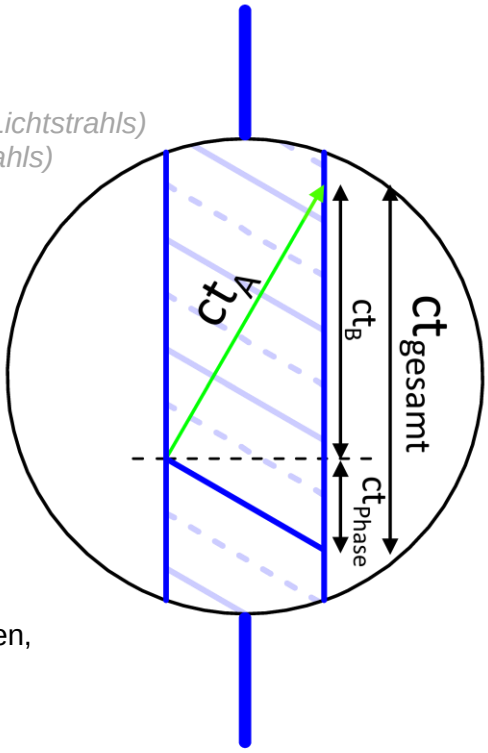
Wenn ihr genau verstehen wollt,
was da beim Rumdrehen passiert,
könnt ihr ja mal in meinen Podcast reinhören
und auf meiner Homepage nachsehen.
Vereinfacht gesagt, rutscht beim Rumdrehen,
die hintere Uhr diese schiefe Wellenfront runter,
und die vordere die Wellenfront hoch…

So, aber ich glaube, dass es jetzt erstmal Zeit wird,
Zeit für euch und mich
für eine kleine Pause zum Durchschnaufen.

(Pause)

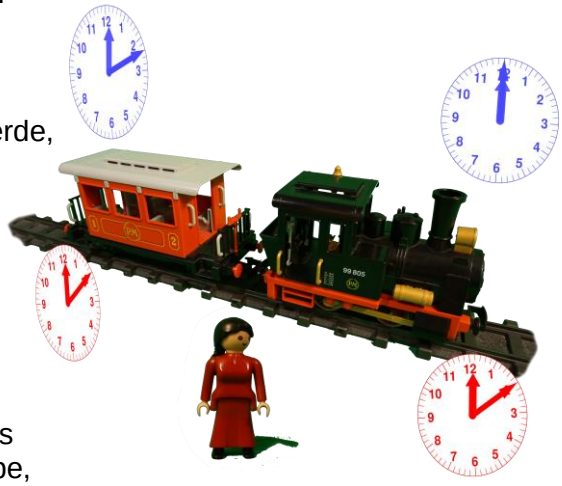
Bisher haben Alice, und wir,
immer nur Bobs Uhr betrachtet,
mal am Zuganfang und mal am Zugende.
Man könnte sich aber auch fragen,
welche Zeit sieht Alice eigentlich
auf den Uhren derjenigen Fahrgäste,
die zu jedem Zeitpunkt
gerade im Zug an ihr vorbeifahren?
Also die Zeit von diesem Fahrgast hier, *(zeigen)*
jetzt von diesem Fahrgast hier, *(zeigen)* usw…
Zum einen vergeht die Zeit im Zug langsamer,
also während der Zug,
oder der seitlich driftende Lichtstrahl,
von hier nach hier läuft,
(zeigen: linke Seite des Lichtstrahls läuft zur rechten Seite)
vergeht für Alice die Zeit t_A,
entsprechend dieser Strecke $c*t_A$.
Für die Zugreisenden dagegen vergeht die Zeit t_B,
entsprechend dieser Strecke $c*t_B$.
Und wie schon vorhin gezeigt,
ist die Zeit t_B im Vergleich zu t_A
um den Faktor γ kürzer.
Allerdings betrachtet Alice jetzt ja immer
einen anderen Fahrgast,





also z.B. zuerst den hier vorne, *(rechte Seite des Lichtstrahls)*
und dann den hier hinten. *(linke Seite des Lichtstrahls)*
Und deshalb muss zur Zeit t_B
immer noch der Phasenschub von einem
zum nächsten Fahrgast dazu gezählt werden.
Der zeitliche Phasenschub t_{Phase},
multipliziert mit der Lichtgeschwindigkeit c,
entsprach aber ja gerade dieser Länge $c*t_{Phase}$.
Damit entspricht die gesamte Zeitdifferenz t_{gesamt}
zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrgästen
gerade dieser Länge $c*t_{gesamt}$.
Aber diese Strecke – und damit diese Zeit t_{gesamt} –
ist jetzt gerade um den Faktor γ LÄNGER,
als Alices Eigenzeit t_A.
Die Zeit auf den Uhren der Fahrgäste,
die zu jedem Zeitpunkt gerade an Alice vorbeifahren,
vergeht also um den Faktor γ SCHNELLER,
als ihre eigene Zeit.
Betrachtet Alice aber jede Uhr
der vorbeifahrenden Zuggäste separat,
dann vergeht auf jeder einzelnen Uhr,
die Zeit um den Faktor γ langsamer,
als auf ihrer eigenen Uhr.
Drehen wir mal die Sichtweise herum,
also betrachten wir Alice aus der Sicht der Zuggäste.
Dann würden die Zuggäste eine Frau sehen,
die am Bahnsteig an ihnen vorbei saust,
und deren Uhr um den Faktor γ LANGSAMER geht,
als ihre Uhren im Zug.
Für die Beobachterin Alice auf dem Bahnsteig
geht also Bobs Uhr langsamer.
Genauso geht aber auch für die Beobachter im Zug
Alices Uhr langsamer.
Folglich gibt es kein ausgezeichnetes Bezugssystem.
Alles ist relativ.
Und das hängt mit der Gleichzeitigkeit,
also den gekippten Wellenfronten zusammen.

(Pause)



Zum Schluss dieses Abschnitts muss ich,
da ich immer wieder darauf angesprochen werde,
noch auf ein, in meinen Augen,
etwas nerviges Thema eingehen:
Und zwar: Kann es Zeitmaschinen geben?
In jenem Beispiel,
bei dem es bei Alice 12:10 Uhr,
im Zug vorne 12 Uhr,
und hinten 12:12 Uhr ist,
könnte man sich ja die Frage stellen:
Was wäre, wenn es zwischen Alices und Bobs
Bezugssystemen doch einen Unterschied gäbe,
und wenn Alice in ihrem Bezugssystem doch

irgendeine Technik besäße,
um instantan eine Botschaft vom Ende
zum Anfang des Bahnsteigs zu schicken.
Denn, nehmen wir mal an,
Bob steht am Anfang des Zugs
und im hinteren Teil des Zugs
gibt es noch eine dritte Person,
nennen wir sie Eve.
Und Eve begeht punkt 12:12 Uhr
im hinteren Teil des Zugs einen Mord.
Alice sieht das und schickt mit ihrer
„überrelativistischen“ Technik instantan
eine Botschaft zu Bob am Anfang des Zugs,
wo Bobs Uhr gerade 12 Uhr schlägt.
Die Frage ist jetzt,
kann Bob den Mord verhindern?
Bob macht sich also sofort
auf den Weg zum Zugende,
und zwar so schnell er kann,
also mit Lichtgeschwindigkeit.
Als er hinten ankommt,
zeigt seine Uhr gerade 12 Uhr.
Nach den Informationen,
die er von Alice bekommen hat,
geschieht der Mord um 12:12 Uhr.
„Ha“, ruft Bob, „gib auf Eve, du bist überführt!
Es ist 12 Uhr und ich weiß,
dass du in 12 Minuten einen Mord begehen willst.“
Aber Eve grinst nur:
„Oh Bob, du kommst 8 Minuten zu spät.
Während ich den Mord begangen habe,
hast du „geschlafen“.
Weil du mit Lichtgeschwindigkeit
hierhergekommen bist,
ist deine Uhr stehen geblieben.
Hier ist es mittlerweile 12:20 Uhr.“
Folglich ist keine Zeitmaschine möglich.
Okay, jetzt könnte man sagen,
wenn Alice eine Information
mit Überlichtgeschwindigkeit senden kann,
warum nicht dann auch Bob.
Aber dann würde aus Alices Sicht
Bob eine Botschaft in die Vergangenheit schicken.
Damit bräche das Relativitätsprinzip zusammenbrechen.
Wie schon gesagt, ich mag dieses Thema nicht.
Zeit ist das, was zwischen Ursache und Wirkung liegt.
Und die Wirkung passiert IMMER nach der Ursache.
Wenn irgendjemand irgendwie ein Phänomen hat,
bei dem die Wirkung VOR der Ursache liegt,
dann ist in Wahrheit die Wirkung die Ursache und
die Ursache die Wirkung.
So funktioniert eben unser Universum.
Zeitmaschinen gibt es genauso wenig

wie Perpetuum Mobiles.
Ende der Durchsage!

Aber, ich will kein Spielverderber sein und
nicht die Zuschauer demotivieren,
die sich dieses Video vielleicht nur deshalb anschauen,
weil sie vorhatten eine Zeitmaschine zu bauen.
Das größte Mysterium für mich
im Zusammenhang mit der RT ist folgendes:
Damit das Relativitätsprinzip in unserem Universum erfüllt ist,
müssen elektromagnetische Wellen,
angefangen von kilometerlangen Radiowellen,
bis hin zu hochenergetischer Gamma-Strahlung,
mit Wellenlängen im subatomaren Bereich -
also hinsichtlich der Wellenlänge,
über viele, viele Größenordnungen hinweg -
immer exakt genau die gleiche Geschwindigkeit,
also Lichtgeschwindigkeit haben.
Ja mehr noch: Auch Gravitationswellen
und Materiewellen müssen exakt
genau diese Lichtgeschwindigkeit haben.

Dann haben wir diesen γ-Faktor,
der gegen unendlich divergiert,
wenn wir Lichtgeschwindigkeit erreichen.
Man spricht hier von einer sogenannten Singularität,
also von einem Phasenübergang;
von einem Phasenübergang, bei dem wir aber
keine Ahnung haben, was jenseits der Schwelle ist,
und ob da überhaupt etwas ist.

Bei der ART, wenn die Gravitation hinzukommt,
wird dieser Term v^2/c^2 hier, genauer gesagt v^2,
durch einen anderen Term ersetzt,
in dem die Gravitationskonstante,
die Masse eines Gravitationszentrums,
und der Abstand zum Gravitationszentrum steckt.
Und immer, wenn dieser Term c^2 erreicht,
dann divergiert γ wieder,
und wir befinden uns
am Rande eines Schwarzen Lochs.
Das seltsame ist jetzt,
dass sich so eine Konstante oder eine Singularität
mathematisch zwar leicht hinschreiben lässt, …
in der Physik, also in der Natur,
so wie wir sie kennen, solche Singularitäten
immer mit äußerster Vorsicht zu genießen sind.
Immer, wenn in der Natur solche Singularitäten,
also Phasenübergänge, wie z.B. das Schmelzen von Eis,
erreicht werden, passiert etwas Komplexeres und
man muss genauer hinsehen.
Bei der RT dagegen scheint die
Universalität der Lichtgeschwindigkeit

und das Divergieren des γ-Faktors gottgegeben.
Und da gibt es, meiner Erfahrung nach, nur zwei Auswege:
Entweder: Wir glauben tatsächlich an Gott
Oder: Unser Universum ist Teil einer viel größeren,
uns völlig unbekannten Physik.

Gut, aber kommen wir wieder
auf den Boden der Tatsachen zurück...
…mit einem netten Beispiel,
wie so ein seitlich driftender Lichtstrahl
überhaupt erzeugt werden kann.
Bisher haben wir uns nämlich
immer nur das Ergebnis angesehen,
wenn der Laserpointer und der Laserstrahl
sich schon seitlich bewegen.
Aber wie komme ich jetzt vom ruhenden
zum bewegten Zustand?
Da kommt normalerweise nämlich
die Beschleunigung mit ins Spiel
und es ist gar nicht so einfach,
genau zu beschreiben, was da während
des Beschleunigungsvorgangs im Laserpointer passiert.
Aber es gibt eine andere Möglichkeit,
aus einem ruhenden Lichtstrahl
einen seitlich driftenden Lichtstrahl zu machen:
Ich sage nur Ping-Pong! *(Ping-Pong-Schläger rausholen)*
Natürlich nicht mit einem normalen Ping-Pong-Schläger,
sondern mit einem Spiegel.
Und mit diesem Spiegel haue ich von der Seite
auf einen ruhenden Lichtstrahl drauf.
Und wie bekomme ich heraus, was dann passiert?
Setzen wir uns mal ins Bezugssystem
des Ping-Pong-Schlägers.
Nennen wir es wieder Bobs Bezugssystem.
Dann sieht Bob einen seitlich driftenden Lichtstrahl,
der auf ihn zukommt und am Spiegel reflektiert wird.
Alles ganz klassische Optik.
So, und nach der Reflektion sieht Bob dann
einen seitlich driftenden Lichtstrahl,
der sich von ihm entfernt.
Und jetzt müssen wir wieder in
Alices Bezugssystem zurück wechseln.
Dann addiert sich zur seitlichen Driftgeschwindigkeit
des Lichtstrahls noch die Geschwindigkeit des
Ping-Pong-Schlägers dazu.
Entsprechend den Galilei-Transformationen,
hätte der Lichtstrahl am Ende schließlich die
doppelte Geschwindigkeit des Ping-Pong-Schlägers.
Da wir uns aber im relativistischen Regime befinden,
müssen wir statt der Galilei-
die Lorentz-Transformationen benutzen und die
Geschwindigkeit des seitlich driftenden Lichtstrahls
ist etwas kleiner als die doppelte Geschwindigkeit

des Ping-Pong-Schlägers.
Den genauen Wert müssen wir
an dieser Stelle aber gar nicht kennen
- wen's interessiert, der kann's auf
meiner Homepage nachlesen –
uns ging es ja erst einmal darum,
einen Weg zu finden, wie man einen
seitlich driftenden überhaupt Lichtstrahl erzeugen kann.

Ein weiterer Grund, wieso ich genau dieses Beispiel
an dieser Stelle erwähnt habe, ist:
Man sieht daran sehr schön,
dass sich Längen senkrecht zur Bewegungsrichtung
nicht verändern. Der Abstand der Wellenzüge
in diese Richtung *(y-Richtung)* bleibt unverändert.
Nur in Bewegungsrichtung *(x-Richtung)*
wird der Lichtstrahl schmäler.

(Pause)

So, ich hoffe, ihr bekommt so langsam ein Gefühl dafür,
was man mit dem seitlich driftenden Lichtstrahl
alles so anstellen kann.
Auf jeden Fall haben wir schon längst alles zusammen,
was wir für die SRT brauchen.
Allein durch den Vergleich eines ruhenden
mit einem seitlich driftenden Lichtstrahl:

1. Die relativistische Zeitdilatation *(c_y zeigen)* - passt
2. Die Längenkontraktion *(Strahlbreite zeigen)* – passt ebenfalls
3. Und die Gleichzeitigkeit *(schiefe Wellenfront zeigen)*

(Pause)

Jetzt könnte man sich natürlich fragen:
Okay, das ist für einen Lichtstrahl so,
aber das heißt ja nicht,
dass das für alles andere auch so ist.
Und tatsächlich ist das,
was ich bisher erzählt habe,
wie schon gesagt,
gar nicht so ganz neu.
In dem ein oder anderen Zusammenhang
sind da auch schon andere Physiker draufgekommen.
Die Lorentz-Kontraktion z.B.,
ist nach Hendrik Antoon Lorentz benannt,
der die relativistische Längenkontraktion
schon vor Einstein aus der Elektrodynamik hergeleitet hat.
Oder auch dieses Bild hier,
des Lichtstrahls mit den schiefen Wellenfronten, ist,
allerdings versteckt, im Prinzip schon in Albert Einsteins
erstem Artikel zur SRT von 1905 mit dem Titel:
"Zur Elektrodynamik bewegter Körper" zu finden.

Also, wie kommen wir bei der
relativistischen Zeitdilatation,

Längenkontraktion und Gleichzeitigkeit,
vom seitlich driftenden Lichtstrahl
auf die Längenkontraktion und Gleichzeitigkeit
von allem anderen,
das da kreucht und fleucht?
Also auch fester Materie?
Die bisherige Argumentationsweise ist folgende:
Wenn es für IRGEND etwas gilt,
dann muss es für ALLES gelten,
sonst könnte man sich nämlich
sofort ein Experiment ausdenken,
mit dem es möglich wäre
ein absolutes Bezugssystem zu definieren,
und dann wäre das Relativitätsprinzip verletzt.
Folglich besagt die bisherige Relativitätstheorie aber nur,
wie die Welt beschaffen sein MUSS,
wenn das Relativitätsprinzip erfüllt sein SOLL.
Sie kann aber keine Vorstellung liefern,
WARUM die Welt so beschaffen IST, wie sie ist.

Machen wir nochmal einen kleinen Exkurs in die Geschichte:
Die Arbeiten Albert Einsteins sind
ohne jeden Zweifel absolut genial,
vor allem, wenn man sich mal vergegenwärtigt,
zu was für einer Zeit sie entstanden sind:
Zu Beginn des 20. Jahrhunderts
gab es kein Fernsehen, kein Radio,
keinen Computer, keinen Laser.
Und die Vorstellung,
dass die Materie aus Atomen aufgebaut ist,
begann sich gerade erst zu etablieren.
Und natürlich gab es noch keine Relativitätstheorie.
Aber es gab auch etwas anderes noch nicht:
Nämlich die QUANTENTHEORIE.
Die Relativitätstheorie hat Einstein dann selbst entwickelt,
aber die Quantentheorie kannte Einstein anfangs noch nicht.
Die kam in ihrer ganzen Blüte erst rund 20 Jahre später auf.
Und was besagt die Quantentheorie?
Zum einen besagt sie,
dass Wellen auch Teilchencharakter haben.
Beim Licht sind das die Photonen.
Dafür bekam Einstein übrigens den Nobelpreis,
nicht für die Relativitätstheorie,
sondern für die Interpretation des Photoeffekts,
was ein Quantenphänomen ist.
Insofern kannte Einstein zwar doch schon einen Teil der Quantentheorie.
Der entscheidende Teil der Quantentheorie ist aber,
dass nicht nur Wellen Teilchencharakter haben,
sondern dass auch materiebehaftete Teilchen Wellencharakter haben.
Und diesen Teil kannte Einstein anfangs noch nicht.
Wobei, wie schon gesagt, wir keine Ahnung haben,
um was für Wellen es sich dabei eigentlich handelt.
Das ist aber gar nicht wichtig.
Wichtig ist nur, dass Materiewellen,

genauso wie elektromagnetische Wellen,
an kein, sagen wir mal,
für uns bisher greifbares Medium gebunden sind.
Und, Materiewellen hin oder her,
auch diese Wellen unterliegen einem Doppler-Effekt,
und zwar dem gleichen,
wie bei unseren bisherigen Überlegungen
zum seitlich driftenden Lichtstrahl,
im Fall elektromagnetischer Wellen.
Warum ist das so?
Naja, letztendlich würde das wieder
zu einer Verletzung des Relativitätsprinzips führen.
Bei Schall- oder Wasserwellen ist das anders,
weil wir dort das Trägermedium dieser Wellen greifen können,
und somit ein Bezugssystem haben.

Gut, und was heißt das jetzt für Bob,
der mit dem seitlich driftenden Lichtstrahl mitfährt?
Weil er sich mit dem Lichtstrahl mitbewegt,
sieht er ja einen ruhenden Lichtstrahl,
mit waagrechten Wellenfronten.
Aber wie kann das sein?
Naja, genauso wie der seitlich driftende Lichtstrahl,
erfahren auch die Materiewellen einen Doppler-Effekt,
und zwar den gleichen Doppler-Effekt,
wie die Lichtwellen.
D.h. sie werden genauso „verbogen“,
wie die Lichtwellen.
Auch die Felder werden genauso verbogen.
Und damit laufen alle Wellen,
elektromagnetische Wellen und Materiewellen
und was es sonst noch so geben mag,
senkrecht zur Drift-Richtung
um den Faktor γ langsamer.
Also nicht nur die Lichtuhr läuft langsamer,
oder besser gesagt, schwingt langsamer,
da eine langsamer laufende Welle
bei gleichbleibender Wellenlänge
- in y-Richtung wohlgemerkt –
um den gleichen Faktor langsamer schwingt…
Also nicht nur die Lichtuhr läuft langsamer,
sondern tatsächlich läuft und schwingt alles,
also jede Atomuhr,
und damit auch der ganze Bob,
in gleichem Maße langsamer.

Und IN Bewegungsrichtung werden
die Wellenpakete der Atome genauso gestaucht,
wie der seitlich driftende Lichtstrahl.
Also wird alles in Bobs Bezugssystem,
einschließlich Bob,
in Bewegungsrichtung gestaucht.

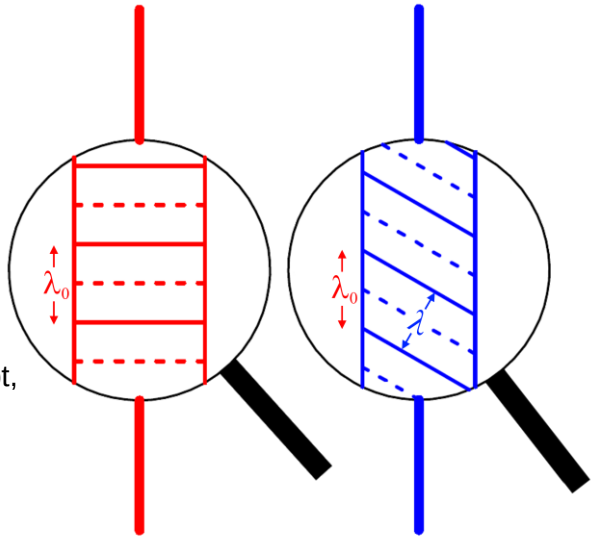
Und auch bzgl. der Gleichzeitigkeit

gilt für alle Wellen und Felder,
die ein Atom beschreiben, das Gleiche,
wie für elektromagnetische Wellen.
Die Wellenfunktionen der Atome
erfahren in Bewegungsrichtung
eine Kippung, bzw. einen Phasenschub.
Bob sieht also einen ganz normalen, ruhenden Lichtstrahl
mit waagrechten Wellenfronten,
weil er genauso deformiert wird,
wie der Lichtstrahl.
Wenn ich an etwas Schiefes
einen schiefen Maßstab anlege,
dann ist es wieder gerade.
Alles ist eben relativ.
(Hände mit schiefem Maßstab vor schiefen Lichtstrahl halten)
Wenn ich aber mit meinem schiefen Maßstab
an den geraden Lichtstrahl gehe,
dann erscheint der gerade Lichtstrahl schief.
Und damit ist das Relativitätsprinzip erfüllt:
Alles das, was Alice bei Bob sieht,
also schiefe Wellenfronten,
Längenkontraktion und Zeitdilatation,
sieht auch Bob bei Alice.
Wer sich jetzt wirklich bewegt,
das kann keiner sagen.

Und damit sind wir fertig:
In diesem Bild *(auf die beiden Lichtstrahlen deuten)*
steckt also tatsächlich die gesamte SRT.
Und zwar ganz ohne Formeln.
Natürlich kann man aus diesem Bild
auch die Lorentz-Transformationen herleiten
und kommt damit auf die SRT Albert Einsteins.
Man kann aber auch aufs Rechnen verzichten,
und mit Hilfe dieses Bilds des
seitlich driftenden Lichtstrahls
alles geometrisch,
also mit Zirkel und Lineal, herleiten.
Das Entscheidende ist:
Mit diesem Bild hat man direkt vor Augen,
wie das Relativitätsprinzip in der Natur verwirklicht wird -
quasi, was die Welt in ihrem Innersten zusammenhält -
also so in etwa zumindest,
ich will mal auch nicht übertreiben.

(Pause)

EINE Formel möchte ich aber dennoch kurz herleiten:
Ich habe die beiden Lichtstrahlen
mit einer unterschiedlichen Farbe gezeichnet.
Das hat einen Grund.
Als ich den schiefen Lichtstrahl gezeichnet habe,
habe ich diese Strecke



(Abstand der Wellen in y-Richtung)
1:1 übernommen.
Abstände senkrecht zur Bewegungsrichtung
ändern sich nämlich nicht.
Wir nennen diese Wellenlänge mal λ_0,
die Wellenlänge des ruhenden Lichtstrahls.
Wenn aber dieser Abstand immer gleichbleibt,
auch wenn die Wellenfronten gekippt sind,
dann wird der senkrechte Abstand
zwischen den Wellenfronten,
also die Wellenlänge λ
des seitlich driftenden Lichtstrahls, kleiner.
Kleinere Wellenlänge heißt aber,
dass die Farbe des Lichts ins Blaue verschoben wird,
und dass das Licht energiereicher wird.
Die Energie des Lichts ist nämlich gerade
umgekehrt proportional zu seiner Wellenlänge.
Folglich gilt, dass die Energie des Lichts
im seitlich driftenden Lichtstrahl mit γ zunimmt, also
(an die Tafel schreiben)

$$E = \gamma E_0,$$

wobei E_0 die Energie des Lichts beim ruhenden Lichtstrahl ist,
und E die Energie des seitlich driftenden Lichtstrahls.
Daraus folgt: Wenn ich einen Lichtstrahl seitlich bewegen will,
muss ich Energie hineinstecken.

Ein Laser-Pointer ist ein Resonator,
wie ich vorhin schon erwähnt habe,
in dem Licht gespeichert ist.
Und auch da ist es so:
Wenn ich den Laser-Pointer seitlich bewege,
wird das Licht kurzwelliger,
so wie wir es gerade gesehen haben,
und ich muss Energie hineinstecken.
Was heißt das aber:
„Ich muss Energie hineinstecken“,
wenn ich etwas in Bewegung versetzen will.
Das heißt, ich habe etwas,
das sich der Bewegung widersetzt,
also etwas, das träge ist -
etwas, das eine träge MASSE hat.
Das widerspricht aber dem Verständnis
der klassischen Physik,
nach dem Licht keine Masse,
sondern nur Energie und Impuls hat.
Wobei da allerdings der Impuls immer
in Richtung des Lichtstrahls gesehen wird
im Zusammenhang mit der Lichtgeschwindigkeit c.
Hier bewegen wir uns ja senkrecht zum Lichtstrahl
mit einer Geschwindigkeit deutlich
unterhalb der Lichtgeschwindigkeit!

Das ist ein wichtiger Unterschied!
Also, ich muss Energie hineinstecken,
um den Laserpointer so in Bewegung zu versetzen
(Zeigen: Laserpointer quer bewegen)
Und folglich hat das Licht im Resonator des Laser-Pointers
doch so etwas wie eine träge Masse.
Und wie groß ist diese Masse?
Naja, die Energie, die ich hineinstecken muss,
ist die Differenz zwischen dieser Energie
(auf $\gamma E0$ zeigen)
und der Ruheenergie, also

$$\gamma * E_0 - E_0 = (\gamma - 1)\, E_0.$$

Für kleine Geschwindigkeiten konvergiert γ -1
jetzt aber gegen

$$1/2\ v^2/c^2$$

Also steht hier im Grenzfall kleiner Geschwindigkeiten

$$1/2\ v^2 / c^2\ E_0$$

Das ist die Energie, die ich hineinstecken muss,
um das Licht im Resonator in Bewegung zu versetzen.
Bei kleinen Geschwindigkeiten muss das aber gerade
seiner klassischen kinetischen Energie

$$1/2\, m\, v^2$$

entsprechen.
Und wenn wir beides vergleichen, dann steht da

$$E_0 = m\, c^2.$$

Ja, und diese Formel dürfte jeder kennen.
Nicht schlecht, oder?

Aber was bedeutet diese Formel eigentlich?
Auf der einen Seite *(auf E_0 zeigen)*
haben wir die Energie des Wellenpakets -
also des Lichts im Resonator -
wir sind also im Wellenbild der Natur.
Und auf der anderen Seite steht die träge Masse.
Und Masse wird mit Teilchen in Verbindung gebracht -
wir sind hier also im Teilchenbild der Natur.
Die Formel $E_0 = m\, c^2$
spiegelt also in gewissem Sinne gerade das wider,
was wir unter dem Welle-Teilchendualismus verstehen.

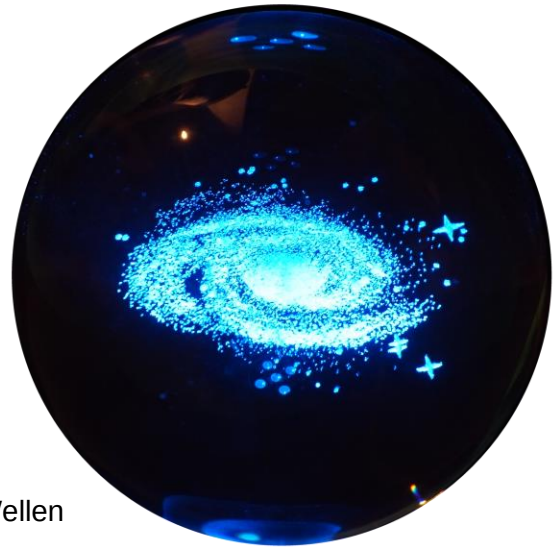
Das Wellen- und das Teilchenmodell sind
bisher aber eigentlich zwei Modelle,
die komplementärer nicht sein könnten.
Mit "Teilchen" verbindet wir etwas "Greifbares",
das sich zu einem gegebenen Zeitpunkt
an einem genau definierten Ort aufhält.
Eine Welle ist eher etwas Undefiniertes,
aber vor allem, wie ich schon zu anfangs gesagt habe:

Bei einer Welle werden KEINE Teilchen transportiert,
das Einzige, was eine Welle transportiert,
ist Energie und Impuls!
Folglich passen diese beiden Modelle
eigentlich überhaupt nicht zusammen!!!
Es sei denn, Teilchen sind nichts weiter als Wellenpakete.
Dann passt alles wunderbar zusammen:

- Der Welle/Teilchendualismus reduziert sich
  zu einem reinen Wellenmodell.
- Wir erhalten ein in sich konsistentes Modell der SRT
- und wir hätten das verbindende Glied zwischen RT und QM

Denn bis heute stehen RT und QM
so ein bisschen auf Kriegsfuß miteinander.
Von Einstein stammt ja in diesem Zusammenhang
auch der oft zitierte Ausspruch "Gott würfelt nicht".

Und wenn das alles so gut zusammenpasst,
warum sollte es dann nicht auch so sein?
Unserer Erfahrung nach funktioniert die Natur
meistens nach dem Prinzip: „Keep it simple!“
Natürlich ist die Vorstellung von
Wellenpaketen sehr gewöhnungsbedürftig.
Wir denken gerne in Teilchen,
die an einem festen Ort sind.
Aber das ist nicht so, wie die QM zeigt.
Tatsächlich KÖNNEN Teilchen an
mehreren Orten gleichzeitig sein.
Wie Wellen eben.



Und so kommen wir am Ende
doch wieder zurück zum Äthermodell.
Aber nicht zu vielen einzelnen „Ätherblasen“,
sondern zu einem einzigen,
zusammenhängenden Raum.
(Glaskugel mit „Universum“ hervorholen)
Das ganze Universum
ist eine einzige große Blase,
in der sich Wellen und Wellenpakete,
die wir als Teilchen wahrnehmen, ausbreiten.
Aufgrund des Doppler-Effekts erfüllen diese Wellen
von Natur aus das Relativitätsprinzip.

Alles ist in sich konsistent.
Vielleicht sind wir letztendlich nichts weiter,
als Wellen im Ozean des Universums.

Ein vollständiger Beweis ist das so natürlich noch nicht.
Aber ich denke, es ist ein guter Ansatz
für eine neue Physik.
Vielleicht hat jemand von euch ja eine gute Idee,
wie es weiter gehen könnte.

Zum Abschluss noch ein letzter, philosophischer Gedanke:
Diese Wellen und Wellenpakete im Universum
müssen irgendwann ja erzeugt worden sein.
Irgendwann muss irgendetwas
unser Universum zum Schwingen gebracht haben.
Folglich war der Urknall
vielleicht wirklich so etwas wie ein Knall:
Ein gigantischer Paukenschlag aus dem Nichts.
Ein gewaltiger Paukenschlag aus dem sich die
wunderbare Symphonie der Schöpfung entfaltet hat,
von der auch wir ein Teil sind.
Hoffentlich noch lange.
Alles andere wäre doch wirklich schade.

In diesem Sinne,
Man sieht sich.

Bildquellen:
Big Ben: By Diliff - Own work, CC BY 2.5, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3660614
Opera House Sidney: Von Diliff - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5420726
Milchstraße: Von ESO/S. Brunier - http://www.eso.org/public/images/eso0932a/, CC-BY 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9559670
Erde: Von NASA/Apollo 17 crew; taken by either Harrison Schmitt or Ron Evans - https://web.archive.org/web/20160112123725/http://grin.hq.nasa.gov/ABSTRACTS/GPN-2000-001138.html (image link); see also https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_329.html, Gemeinfrei, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=43894484