

Erlebte Relativitätstheorie

Hans - Otto Carmesin

Hohenwedeler Weg 136, 21682 Stade
Gymnasium Athenaeum, Harsefelder Str. 40, 21680 Stade
Fachbereich Physik, Universität Bremen, 28334 Bremen

Kurzfassung

Die Relativitätstheorie provoziert und reizt, weil sie den üblichen Erlebnissen von Raum und Zeit widerspricht. Daher wäre der ideale Ausgangspunkt zur Einführung dieser Lehre eine Reise mit Schülern bei einem Tempo, das der Lichtgeschwindigkeit nahe kommt. Solche Fahrten habe ich mit Schülern der Astronomie-AG unternommen, im Rahmen eines Theaterstücks. Dabei nutzten wir neueste Computersimulationen [1], hatten durch merkwürdige Effekte in Raum und Zeit einige Schwierigkeiten, die wir mit Hilfe der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie aber alle bewältigen konnten. Hier stelle ich das Konzept vor, berichte über Erfahrungen und veröffentliche den vollständigen Text des Stückes sowie eine CD mit den im Theaterstück eingesetzten Computeranimationen.

1. Einleitung

Die Relativitätstheorie ermöglicht kaum Schulexperimente [2,3]. Auch sind die auftretenden Phänomene nicht aus der Alltagswelt bekannt. Abhilfe bietet hier eine Reise mit den Schülern bei einer Geschwindigkeit nahe der Lichtgeschwindigkeit und durchgeführt in einem Theaterstück.

2. Durchführung

Wir führten das Stück, *Das Geheimnis des P. Braun*, am 30.10.2002 abends im Forum des Gymnasiums Athenaeum vor Schülern und interessierten Gästen auf. Die Schauspieler waren alle Mitglieder der Astronomie-AG. Vorbereitend hatten wir in der AG die Theorie behandelt. Als Rakete verwendeten wir einen kleinen Wagen, der mit Hilfe von Stativmaterial und Pappe eine Raketenform erhielt und eine Person als Besatzung aufnehmen konnte. Eine weitere Person war am Wagen durch die Pappe verdeckt und für das Schieben des Wagens bei den Flügen zuständig. Die Außenverkleidung erfolgte durch Alufolie. Der Blick aus der Rakete wurde durch einen Beamer erzeugt. Bei den Starts sorgten eine Nebelmaschine und farbige Beleuchtung für das nötige Feuerwerk. Die Aufführung dauerte etwa 60 Minuten. Der vollständige Text und die Computeranimationen sind im Anhang präsentiert.

3. Erfahrungen

Den Schauspielern hat es Spaß gemacht. Das Publikum hat kräftig applaudiert. Ich konnte erfahren, dass selbst Geschwisterkinder aus dem Kindergarten ihre Freude hatten, wegen der vielen bunten Aktionen mit der Rakete und der schönen Computeranimationen. Gespräche mit Schülern zeigten, dass sie nun viele interessierende Fragen zu dem Thema hatten. Das entspricht dem anfänglichen Konzept: Das Theaterstück soll

Erlebnisse bieten und Interesse wecken, ähnlich wie ein Exponat in einem Science-Center. Diese ersten Erfahrungen sind im Unterricht aufzuarbeiten. Das tat ich in einem Grundkurs Physik im Schuljahrgang 13. Dabei zeigte sich, dass die Schüler im Unterricht von sich aus immer wieder Szenen aus dem Theaterstück ansprachen, um die im Physikunterricht entwickelte Relativitätstheorie mit den Beobachtungen aus der Aufführung zu vergleichen. Mein Unterrichtskonzept ging nicht von dem Stück aus, da die Aufführung keine Pflichtveranstaltung war und nicht alle Schüler des Grundkurses anwesend waren.

4. Schlussfolgerungen

Das Theaterstück ist als Einstieg in das Thema Relativitätstheorie gut geeignet. Es kann so ansprechend aufgeführt werden, dass es auch Zuschauern gefällt, die sich nicht auf das Lernen der Relativitätstheorie vorbereiten wollen. Die Schülerbeiträge aus dem anschließenden Unterricht deuten darauf hin, dass man die Aufführung auch zum verbindlichen Ausgangspunkt einer Unterrichtseinheit zur Relativitätstheorie machen kann.

Literaturhinweise

- [1] Kraus, U. u. a.: Was Einstein noch nicht sehen konnte. *Phys. Journal* 1 (2002) Nr. 7/8. S. 77-82.
- [2] Grehn, J. u. a.: *Metzler Physik*, 3. Auflage, Schroedel Verlag, Hannover 1998. S. 354-385.
- [3] Carmesin, H.-O.: *Grundideen zur Relativitätstheorie*. Köster, Berlin 1996.

Das Geheimnis des P. Braun

Schüler erleben die Zeitdehnung
und andere Abenteuer

Ein Schauspiel

© Hans–Otto Carmesin
Stade 2002

Personen

Tim: Ausgebuffter Raketenbauer und Peters großer Bruder

Sandra: Erster Flieger, auch sonst immer als erste lebhaft dabei und Fan von Uwe

Peter: Zweiter Flieger, pfiffiger, kleiner begeisterter, nicht immer mutiger Anfänger sowie Tims kleiner Bruder

Klaus: Dritter Flieger und forscher Draufgänger

Sabine: Vierter Flieger, smarte, energische Schülerin mit Durchblick und Fan von Uwe

Uwe: Fünfter Flieger und konfliktscheues Waisenkind

Klara: Überzeugte Nichtfliegerin

Carstens: Lehrer

Katrin, Frank, Stefan, Norbert: Neugierige Besucher

Außer Tim sind alle auf dem Athe.

1. Szene: In der Astro-AG-Stunde

Im Hintergrund: Teleskop. Im Raum: Die Schüler der Astro-AG und ihr Lehrer Carstens. Schüler bringen eine Truhe in den Raum.

Peter: Der Hausmeister hat diese Truhe auf dem Dachboden gefunden. Hier steht Astronomie-AG 1934, P. Braun.

Peter: Wer ist P. Braun?

Carstens: Herr Braun hat 1927 die Astronomie-AG am Athe gegründet. Weil er nicht besonders groß war, nannten ihn manche Piccolo, daher P.

Die Schüler schmunzeln.

Klaus: Peter, mit P wie Piccolo.

Peter wirft ihm einen grimmigen Blick zu.

Carstens: Geht die Truhe auf?

Klara: Nein!

Klaus nimmt einen verbogenen Nagel, hantiert am Schloss und öffnet den Deckel.

Klaus: Doch, klar geht die auf!

Sabine holt einen Himmelsglobus heraus, hält ihn hoch und sagt:

Sabine: Seht mal, ein Himmelsglobus!

Sandra holt ein Heft aus der Truhe, schlägt es auf und sagt:

Sandra: Ey, hört mal zu, hier ist ein Tagebuch. Da steht:

23.11.1932

Ich entdeckte einen um die Erde kreisenden Kleinkörper. Dieser leuchtete manchmal kurz auf. Vermutlich ist es Antimaterie, die ab und zu auf vorbeifliegenden Staub trifft und diesen in Energie umwandelt. Dabei glüht der Körper jedes mal kurz auf. Meine Bahnberechnungen ergeben, dass der Brocken zu Silvester bei Neuwerk abstürzen sollte.

27.12.1932

Mit Hilfe einer Vakuumpumpe und einiger Magnete habe ich ein Gefäß gebaut, in dem ich den Brocken aufbewahren will.

1.1.1933

Ich hatte das total außergewöhnliche Glück, einige Zentner des Materials einfangen zu können. Es ist tatsächlich Antimaterie. Auf der nächsten Seite ist eine Karte. An der markierten Stelle befindet sich die Antimaterie. Ich möchte es vorerst geheim halten. Denn ich will mit dem Stoff eine Rakete antreiben und im Weltall nach der Herkunft des Brockens suchen.

Uwe: Zeig mir bitte mal die Karte!

Sandra: Die übrigen Seiten sind leer.

Carstens: Alles total unwahrscheinlich. Im Vergleich hierzu sind Münchhausens Geschichten ja harmlos! Ist sonst noch was drin?

Peter: Nein, leider nicht.

Carstens: Gut, dann schlage ich vor, wir besprechen bei der Gelegenheit, was Antimaterie ist.

Die meisten Schüler und der Lehrer besprechen Antimaterie. Dazu zeigt Carstens mit dem Beamer einige Folien. Sabine und Uwe versuchen mit einer Kerze die Geheimtinte sichtbar zu machen.

Carstens zu Folie 3: Mit seiner Relativitätstheorie entdeckte Einstein die Gleichwertigkeit von Masse m und Energie E . Das brachte er auf die Formel E gleich m mal c Quadrat.

Carstens zu Folie 4: Dirac wandte die Relativitätstheorie auf die damals neue Quantentheorie an und betrachtete bewegte Teilchen mit einem Impuls p . Dann gilt für die Äquivalenz von Masse und Energie E Quadrat gleich m Quadrat mal c hoch vier plus p Quadrat mal c Quadrat.

Carstens zu Folie 5: Für die Energie erhält man eine positive und eine negative Wurzel. In der

Quantentheorie erwartet man für jede Energie in der Natur einen entsprechenden Zustand.

Carstens zu Folie 6: Dirac folgerte, dass es neben der üblichen Materie auch noch eine bisher unentdeckte Antimaterie geben müsste. Das glaubte ihm damals wohl kaum jemand.

Carstens zu Folie 7: Doch 5 Jahre später entdeckte Anderson in der kosmischen Strahlung Antimaterie. Dazu ließ er eine Apparatur mit einem Ballon sehr hoch steigen, zeichnete im Magnetfeld die Flugbahn auf und fand so ein positives Teilchen, dessen Masse ...

Carstens zu Folie 8: ... und Ladungsbetrag dem negativen Elektron entsprechen.

Carstens zu Folie 9: Das ist das von Dirac vorhergesagte Antiteilchen zum Elektron, das Antielektron oder Positron.

Carstens zu Folie 10: Für Braun war ein Raketentreibstoff interessant. Bei jedem Treibstoff wird Masse in Energie umgewandelt, je mehr, desto besser. Hier einige Beispiele. Normale Verbrennung ist nicht sehr effektiv, es wird nur ein Zehnmillionstel Prozent der Masse genutzt.

Carstens zu Folie 11: Kernspaltung ist schon wesentlich wirkungsvoller, aber auch da bleiben über 999 Promille der Masse ungenutzt.

Carstens zu Folie 12: Bei der Energiefreisetzung der Sonne durch Kernfusion wird immerhin fast 1 Prozent der Masse in Energie verwandelt.

Carstens zu Folie 13: Mit 50 % ist die Supernova schon recht ordentlich. Hier ein Foto unserer AG von der Staubwolke, die eine Supernova hinterließ, welche im Jahr 1054 im Tierkreiszeichen Krebs beobachtet wurde.

Carstens zu Folie 14: Treffen Materie und Antimaterie aufeinander, so wird die Masse vollständig in Energie umgewandelt. Das wäre schon ein optimaler Treibstoff, wenn man ihn hätte. *Sabine und Uwe versuchen noch immer mit einer Kerze die Geheimtinte sichtbar zu machen und entdecken die Karte.*

Uwe: Oh, sieh mal, da kommt was.

Sabine: Psst!

Sabine legt dabei den Finger auf den Mund. Uwe nickt und steckt das Heft heimlich in ihre Tasche.

2. Szene: Flüge

2a. Flug zur Entdeckung der Zeitdilatation

Alle AG-Schüler und Tim treffen sich auf einer Lichtung. Die Rakete steht bereits dort.

Klara: Ihr wollt doch nicht wirklich mit diesem Schrotthaufen fliegen!

Klaus: Meinst du, wir haben uns die ganze Arbeit umsonst gemacht?

Uwe: Ungefährlich ist es nicht!

Sandra: War es etwa für Braun ungefährlich, den Brocken aufzufangen?

Sabine: Heute machen wir sowieso nur Testflüge im nahen Weltall.

Klara: Wer hat das denn gebaut?

Tim: Ich!

Peter: Das ist mein großer Bruder, er hat seine KFZ-Mechaniker-Ausbildung gerade abgeschlossen.

Klaus: Nachdem er wegen drei Fünfen das Athe verlassen hat.

Uwe: Na und, er wollte eben lieber etwas Praktisches machen. Und Fahrzeuge bauen, das kann er, das macht ihm Spaß und das kann ihm niemand nehmen!

Klara: Hat das Ding auch eine Druckkabine?

Tim stolz: Klar, Klara! Sieh hier, Druckkabine, Thermostat, Schleudersitz, Triebwerkszündung, Grobregulierung, Feinregulierung, 3D-Steuerung, Autopilot, Schubumkehr zur weichen Senkrechtlandung, Reserveantrieb, Kreislaufbooster zur Vermeidung von Blackouts bei hoher Beschleunigung, Trägheitsdämpfer usw.

Peter: Funktioniert das alles auch?

Klaus: Wir haben es bis 20 km Flughöhe schon getestet.

Sabine: Jedenfalls soll keiner etwas davon erfahren, sonst gibt es doch nur Flugverbot!

Einige: Wir sagen nichts weiter!

Peter: Und wenn uns jemand beobachtet?

Klaus: Wer soll uns denn hier auf der Lichtung sehen? Und wenn wir erst fliegen, ist das Ding so schnell, dass man es kaum jemand bemerken kann.

Klara: Ihr seid ja verrückt. Macht was ihr wollt, ich bleibe am Boden.

Sandra: Es passt sowieso nur einer rein. Darf ich zuerst fliegen?

Klaus: Nein, Ich will die erste Runde drehen!

Sabine: Wir machen zwei Flüge, beide dürfen 15 Minuten fliegen.

Klaus: Na gut.

Sandra: Ladies first.

Klaus: Aber du musst während des Fluges über Funk erzählen, was du siehst.

Sie setzt sich rein und startet. Folie 15, Geräusche zum Start auslösen! Bei jedem Start Nebelmaschine einschalten und den Nebel farbig beleuchten!

Durch die Beleuchtung sieht man sie und den Blick durch das Fenster auf der Leinwand. Folie 16, sich entfernende Erde durch Klick in die Bildmitte auslösen!

Die Erde wird beim Blick nach hinten schnell kleiner. Folie 17 (Flug vorbei an Sternen) starten! Sandra ist verwundert und schießt ein Foto. Sie dreht noch einige Runden und blickt auf ihre Uhr. Sie dreht zum Rückflug. Folie 18 (zunächst schwarz) durch Klick auf die Bildmitte aktivieren. Die Erde wird beim Anflug größer. Sie landet und steigt aus.

Sandra ist verwundert und schießt ein Foto. Sie dreht noch einige Runden und blickt auf ihre Uhr. Sie dreht zum Rückflug. Folie 18 (zunächst schwarz) durch Klick auf die Bildmitte aktivieren. Die Erde wird beim Anflug größer. Sie landet und steigt aus.

Sandra ist verwundert und schießt ein Foto. Sie dreht noch einige Runden und blickt auf ihre Uhr. Sie dreht zum Rückflug. Folie 18 (zunächst schwarz) durch Klick auf die Bildmitte aktivieren. Die Erde wird beim Anflug größer. Sie landet und steigt aus.

Klaus: Das ist gegen die Absprache!

Sandra: Warum?

Klaus: Du bist 25 Minuten geflogen, nicht 15!

Sandra: Was soll das denn, deine Uhr ist wohl falsch gestellt!

Sabine: Also Sandra! Er hat recht, gib es wenigstens zu!

Sandra: Seid ihr verrückt? Ich bin Punkt 3 Uhr losgeflogen und jetzt ist es genau Viertel nach drei!

Uwe: Mensch, das ist die Zeitdilatation!

Peter: Was???

Uwe: Die Zeitdehnung.

Sandra: Was soll denn das sein?

Uwe: Das hängt mit der Lichtgeschwindigkeit zusammen.

Sandra: Das Licht ist doch unendlich schnell.

2b. Flug zur Erklärung der Zeitdilatation

Tim: Falsch! Sieh diese Stoppuhr mit eingebautem Blitz und integrierter Solarzelle. Die Uhr misst automatisch die Zeit vom Aussenden eines Lichtblitzes bis zum Auftreffen des Reflexes. Ich baue jetzt am Raumschiff seitlich in 1,5 m Abstand einen Spiegel an. Setz dich mal ins Raumschiff!
Sandra setzt sich hinein und nimmt die Stoppuhr in die Hand. Sie lächelt zu Uwe und legt sich mit der Hand ihre Haare zurecht.

Sabine: Oh, Sandra, du bist auch so schön genug.

Sandra: Haha! So jetzt löse ich den Blitz aus!

Sandra löst den Blitz aus.

Sandra: 10 Nanosekunden.

Peter: Was ist eine Nanosekunde?

Sandra: Eine Nanosekunde ist eine Milliardstel Sekunde.

Tim: Prima. Und wie schnell ist dann das Licht?

Sandra: Die Strecke beträgt zweimal 1,5 m. Also 3m. Dann ist die Geschwindigkeit 3m geteilt durch 10 Nanosekunden. Ich erweitere mit 100.000.000 und wandle Meter in Kilometer um. Dann ist die Geschwindigkeit 300.000 Kilometer pro Sekunde. Na und?

Uwe: Gut, jetzt probieren wir das Ganze mal im Flug.

Es raschelt am Waldrand.

Peter: Ist da hinten am Waldrand jemand?

Peter zeigt hin. Alle sehen hin.

Sabine: Nein, du bist übervorsichtig!

Uwe: Also gut, noch mal, jetzt probieren wir das Ganze, wenn du hier vorbei fliegst.

Sandra: Das heißt, ich fliege bei euch vorbei und messe die Lichtgeschwindigkeit?

Uwe: Genau, und dabei fliegst du mit 80 Prozent der Lichtgeschwindigkeit.

Sandra fliegt vorbei und blitzt. Startgeräusche auf Folie 19. Schwarze Zwischenfolie 20. Sie liest beim Aussteigen ab.

Sandra: Die Zeit ist wieder 10 Nanosekunden. Also beobachte ich immer die Lichtgeschwindigkeit 300.000 Kilometer pro Sekunde, ob ich ruhe oder rase.

Uwe: Genau, die Lichtgeschwindigkeit ist überall und immer gleich!

Sandra: Na und?

Sabine: Na, schöne Sandra. Fällt dir nichts auf?

Sandra: Was denn?

Sabine: Geh mal dort hin, wo du den Lichtblitz beim Flug ausgelöst hast.

Sandra geht zu der Stelle.

Sabine: Und jetzt gehe ich dorthin, wo du das Licht wieder aufgefangen hast.

Klaus: Ich stelle mich jetzt an die Stelle, an der das Licht auf den Spiegel traf.

Sabine stellt sich 4 m in Flugrichtung weiter und Klaus an die Stelle, die der Spiegel in der einnahm, als 2 m von 4 m zurückgelegt waren.

Sandra: Aha, der Lichtweg am Boden ist länger als 3 m. Daher habt ihr auch eine längere Zeit gemessen als ich. Denn die Lichtgeschwindigkeit ist immer und überall 300.000 Kilometer pro Sekunde, am Boden und im Raumschiff.

Uwe: Genau, das nennt man die Zeitdilatation.

Klara: Das ist für einen normalen Menschen wie mich zu unübersichtlich.

Uwe: Ich zeige es noch mal am Notizblock.

Uwe erläutert den Wegunterschied am Notizblock, Folie 21, am Beamer:

Uwe zu Folie 22: Braun zeichne ich den Weg der Rakete und blau den Weg des Lichts vom Boden aus gesehen. Rot markiere ich den Weg des Lichts von der Rakete aus betrachtet: Von der Rakete aus gesehen geht das Licht einmal senkrecht zum Rumpf zum Spiegel und zurück. Offensichtlich ist der rote Lichtweg kürzer als der blaue. Daher ist in der Rakete vom Blitzen bis zum Messen des Lichtes weniger Zeit vergangen als am Boden, denn die Lichtgeschwindigkeit ist überall 300.000 Kilometer pro Sekunde.

Sandra: Und wie sehr war die Zeit am Boden gedehnt?

Uwe: Ich zeichne es dir auf!

Uwe zu Folie 23 Teil a: Die Zeit am Boden nenne ich te-be, die in der Rakete te-er. Ich betrachte jetzt immer nur die erste Hälfte der Wege. So entsteht ein rechtwinkliges Dreieck.

Uwe zu Folie 23 Teil b: Die braune Strecke ist die Fluggeschwindigkeit mal te-be. Das ist 240.000 Kilometer pro Sekunde mal te-be. Die blaue Strecke ist die Lichtgeschwindigkeit mal te-be. Das ist 300.000 Kilometer pro Sekunde mal te-be. Für das rechtwinklige Dreieck gilt der Satz des Pythagoras: Die Summe der Quadrate der kurzen Seiten ist gleich dem Quadrat der langen Seite. Die rote Strecke ist 1,5 m lang. Also ist 1,5 m zum Quadrat plus das Quadrat von 240.000 Kilometer pro Sekunde mal te-be gleich dem Quadrat von 300.000 Kilometer pro Sekunde mal te-be. Das ist jetzt eine Gleichung mit einer Unbekannten: te-be, die Zeit am Boden.

Uwe zu Folie 23 Teil c: Die Lösung ist te-be gleich 25 Drittel Nanosekunden.

Uwe zu Folie 23 Teil d: In der Rakete braucht das Licht für 1,5 m gerade mal 1,5 m geteilt durch 300.000 km pro Sekunde gleich 5 Nanosekunden.

Folie 24: Schwarze Zwischenfolie

Peter: Das verstehe ich ja schon: Also ist te-be gleich fünf Drittel mal te-er.

Sandra: Aha, ich habe auf meiner Uhr 15 Minuten Dauer abgelesen, ihr habt fünf Drittel mal 15 gleich 25 Minuten gemessen.

Klara: Dann müsste Sandras Uhr jetzt 10 Minuten nach gehen.

Beide vergleichen die Uhren.

Sandra und Klara zusammen: Tatsächlich!

2c. Flug zur Längenkontraktion

Sandra: Ich habe ein Foto geschossen.

Sandra zeigt ihr Foto der ovalen Erde, Folie 25.

Klaus: Gibt es nicht auch eine Längenkontraktion?

Peter: Und wie soll das gehen?

Uwe: Peter, setz dich bitte in die Rakete, flieg einmal mit 80 Prozent der Lichtgeschwindigkeit um den Äquator und miss die Flugdauer!

Peter: Ich fliege doch nicht damit.

Sabine: Willst du es jetzt wissen?

Peter: Na gut.

Er dreht eine Runde und landet. Zum Startgeräusch Mitte der Folie 26 anklicken!

Peter: Ich habe 0,1 Sekunden gemessen.

Uwe: Wie lang ist demnach der Äquator?

Peter: 0,1 Sekunden mal 240.000 Kilometer pro Sekunde gleich 24 000 km.

Klara: Falsch, jeder weiß, dass er 40.000 km lang ist.

Klaus: Klar, Klara. Wie lange ist er denn nach unserer Messung geflogen?

Klara: Wir haben eine Sechstel Sekunde gemessen. Hm. Verstehe, eine Sechstel Sekunde mal 240.000 Kilometer pro Sekunde gleich 40.000 km. Und warum haben wir eine Sechstel Sekunde gemessen?

Tim: Zeitdilatation, Faktor fünf Drittel!

Klara: Klar.

Sandra: Und warum war die Erde oval?

Uwe: Die Längenkontraktion tritt doch nur in Flugrichtung auf.

Peter: Ach so, von der Rakete aus erscheint die Erde in Flugrichtung verkürzt. In die dazu senkrechte Richtung scheint sie die übliche Länge zu haben.

Tim: Eigentlich sieht das noch etwas anders aus. Denn diese Kamera gleicht automatisch die Laufzeit des Lichts aus.

Klaus: Und wie sieht das normal aus?

Tim: Ich sehe, Sandra hat auch Aufnahmen mit der Videokamera gemacht. Da ist nichts ausgeglichen. *Tim führt das Video vor. Die anderen kommentieren: Folie 27, Brandenburger Tor, zum Start in der Mitte anklicken!*

Peter: Mensch, das ist doch das Brandenburger Tor!

Klara: Und jetzt ist sie auch noch durchgeflogen.

Peter: Aber warum erscheinen jetzt die Säulen von hinten, obwohl die Kamera genau geradeaus nach vorne gerichtet ist?

Sabine: War die Kamera wirklich nach vorne gerichtet?

Klaus: Am besten sehen wir uns das erst noch einmal an!

Folie 27 noch einmal in der Mitte anklicken!

Peter: Ja, das Bild ist symmetrisch, die Kamera zeigt geradeaus!

Uwe: Zeig es bitte doch noch einmal!

Folie 27 noch einmal in der Mitte anklicken!

Klara: Also, warum erscheinen jetzt die Säulen von hinten?

Sabine: Tim sagt, die Laufzeit des Lichts ist hier nicht ausgeglichen. Daher kommt es!

Klara: Was???

Sabine: Ich zeichne es auf. Uwe, gib mir doch mal deinen Notizblock!

Sabine zu Folie 28 Teil a: Das sind die Säulen des Brandenburger Tors aus der Vogelperspektive, hinten grün gestrichen.

Sabine zu Folie 28 Teil b: Fliegt die Rakete durch die Mitte des Tors, so geht gleichzeitig Licht von den grünen Rückseiten Richtung Flugbahn. Wegen der hohen Geschwindigkeit der Rakete trifft dieses Licht noch auf die Rakete.

Peter: Na klar, dann fällt es in die Videokamera auf der Rakete und wir sehen die grünen Rückseiten der Säulen.

Tim: Hier ist noch mehr auf dem Video, ich zeige das mal.

Folie 29, in der Mitte anklicken!

Peter: Oh, der Eiffelturm!

Klara: Und wie der sich verbiegt.

Uwe: Das geht wohl wie beim Brandenburger Tor. Licht von der Turmspitze geht in Richtung Flugbahn und wird dort von der Rakete erfasst. So wie das Tor sich von der Seite Richtung Rakete zu verbiegen schien, so scheint sich der Turm von oben zur Rakete hin zu biegen.

Tim: Ich zeige es noch mal.

Folie 29, in der Mitte anklicken!

Tim: Ich zeige mal die nächste Aufnahme.

Folie 30, in der Mitte anklicken!

Klara: Die Erde!

Peter: Noch mal!

Folie 30, in der Mitte anklicken!

Uwe: Ich sehe Afrika, dann Arabien und Indien.

Klaus: Und am Horizont kommt noch Australien.

Klara: Warum fliegt die Rakete schnell auf die Erde zu und nur langsam wieder weg?

Sandra: Wegen der Schwerkraft?

Sabine: Gute Idee, aber falsch!

Uwe: Bei der hohen Geschwindigkeit spielt die Schwerkraft keine merkliche Rolle mehr.

Peter: Das ist wohl eher wie beim Brandenburger Tor. Beim Anflug kommt das Licht der Rakete entgegen und sie erreicht es daher sehr schnell. Entfernt sich die Rakete aber von der Erde, so muss sie dem Licht hinterher fliegen. Das von schräg hinten kommende Licht holt die Rakete dann langsam ein.

Klara: Klar, das heißt, wenn die Erde in der Rakete von der Seite zu sehen ist, dann ist die Rakete schon vorbeigeflogen.

Peter: Genau! Zeig es doch noch mal!

Folie 30, in der Mitte anklicken!

Tim: Ich zeige mal eine andere Aufnahme.

Folie 31, in der Mitte anklicken!

Klara: Saturn!

Peter: Warum?

Klara: Na, welcher Planet hat sonst so schöne große Ringe?

Klaus: Die scheinbaren Verbiegungen und Verzögerungen funktionieren wie bei der Erde.

Uwe: Durch die Ringe ist nur alles viel deutlicher.

Peter: Ja! Zeig das doch auch noch mal.

Folie 31, in der Mitte anklicken!

Sandra: Tim, wie kommt der Saturn auf das Video?
Ich war nicht da!

Tim: Oh, ja. Ich gebe es zu. Ich habe heute nacht schon mal einen Probeflug gemacht.

Sandra: Das war nicht abgesprochen!

Uwe: Jetzt streitet euch doch nicht gleich. Er wollte eben selber das Risiko des Erstfluges tragen.

Sandra: Dazu hätten einige Minuten gereicht.

2d. Flug zur Entdeckung der Lichtgeschwindigkeit als Maximum

Klaus: Jetzt fliege ich aber endlich!

Uwe: Gut, damit nicht wieder Streit entsteht, einigen wir uns lieber gleich, welche Zeit gilt.

Sabine: Es soll die Zeit am Boden gelten! Achte also auf die Geschwindigkeitsanzeige und korrigiere deine Uhr!

Klaus: Geschwindigkeit, hm. Das ist die Idee, ich fliege mal schneller als das Licht, wie bei Raumschiff Enterprise!

Sabine: Das geht nicht!

Klaus: Bisher gab es auch noch nie einen so guten Antrieb. Wir werden es ja sehen.

Tim: Na, ich schalte mal den Fahrtenschreiber ein, damit er uns keine Märchen erzählt, wenn er zurück kommt.

Tim legt einen Schalter im Cockpit um. Klaus startet, Folie 32 zum Startgeräusch in der Mitte anklicken! Tim holt ein Fernrohr, schließt es an eine Steckdose an und beobachtet damit Klaus.

Sabine zu ihm: Was machst Du denn da?

Tim: Dieses Teleskop kompensiert die Effekte der Lichtlaufzeiten und der Längenkontraktion.

Sandra: Dann siehst du jetzt die reine Zeitdilatation?

Tim: Ja.

Sandra: Darf ich auch mal durchsehen?

Tim: Na gut.

Sie beobachtet Klaus auf seinem Flug. Der Lichtspot erhellt ihn. Ab jetzt bewegt sich Klaus auf seinem Flug für das Publikum in Zeitlupe, extrem verlangsamt, denn er fliegt fast mit Lichtgeschwindigkeit. Er gibt Vollgas. Folie 33 beim Verlassen der Erde in der Mitte anklicken!

Er muss einigen Asteroiden ausweichen, Folie 34. Klaus redet in Zeitlupe mit entsprechend tiefer Stimme: Jetzt will ich mal sehen, wie die gesuchte Antimaterie im Weltall aussieht. Ich lasse mal ein paar Gramm raus.

Durch das Fenster sieht man gelegentlich etwas aufglühen, Folie 35. Klaus redet in Zeitlupe: Es ist, wie Braun es beschrieben hat. Die Antimaterie trifft gelegentlich auf Staub oder Gas und wandelt diese in Energie um.

Er dreht um, fliegt zurück und landet, Folie 36 in der Mitte anklicken!

Peter: Na, warst du schneller als Licht?
Klaus: Nein.

Tim: Wir sehen uns den Fahrtenschreiber an. $v(t)$ wird projiziert, Folie 37.

Klaus: Ich habe doch die ganze Zeit Vollgas gegeben. Am Anfang bin ich ja auch ordentlich schneller geworden. Aber dann, als ich fast die Lichtgeschwindigkeit erreicht hatte, wurde ich einfach nicht mehr schneller, trotz Vollgas.

Folie 38 als schwarze Zwischenfolie!

Uwe: Je schneller man fliegt, desto schwieriger wird es, die Geschwindigkeit weiter zu steigern.

Klara: Warum?

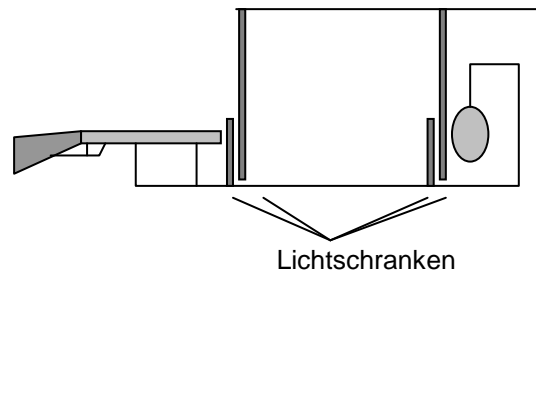


Abb. 1: Anordnung zur relativistischen Masse: Im System des Gewehrs sind zwei Lichtschranken zur Messung der Flugdauer t_R der Kugel im System der Rakete und ein Pendelsäckchen. Am Boden sind zwei Lichtschranken zur Messung der Flugdauer t_B der Kugel am Boden.

2e. Flug zur relativistischen Masse

Sandra: Mit einem Gewehr könnte man das verstehen.

Peter: Was soll das denn? Meinst du, mit vorgehaltenem Gewehr kann man alles verstehen?

Uwe: Nein, sie meint wohl, wir schießen auf einen Gegenstand, zum Beispiel auf einen pendelnden Sack.

Sabine: Klar, aber woher nehmen wir ein Gewehr?

Tim: Ich habe auf dem Weg hierher das Luftgewehr meines Vaters abgeholt. Ich hole es mal eben.

Uwe: Prima, willst du fliegen, Sabine?

Sabine: Mir liegt nicht viel dran. Ich kann mir vorstellen, dass es anderen mehr Spaß bringt.

Klaus: Hast du Angst?

Sabine: Ich fliege.

Tim kommt mit dem Luftgewehr zurück und gibt es Sabine.

Sabine: Tim, jetzt brauchen wir zwei Stoppuhren zur Messung der Flugdauer der Kugel.

Tim: Das machen wir mit Lichtschranken.

Tim baut zwei breite Lichtschranken am Boden auf. Uwe schraubt eine Stange mit zwei Lichtschranken an das Gewehr. Er hängt einen gefüllten Sack mit einem Seil an der Stange vor der Mündung auf. Plötzlich kommen einige neugierige Schüler aus dem Wald.

Frank: Na, was macht ihr denn hier?

Die AG-Schüler stellen sich vor die Rakete und verdecken diese teilweise. Einige AG-Schüler gehen auf die neugierigen Schüler zu.

Sandra: Eigentlich wären wir heute ganz gerne ungestört!

Norbert: Seid ihr nicht von der Astro-AG? Was macht ihr überhaupt in der AG?

Sabine: Die Welt ist größer als die Erde! Und wir wollen wissen, was es außerhalb der Erde noch gibt und was das für das Leben auf der Erde bedeutet!

Stefan: Schön, und was gibt es da?

Sabine: Hallo, wie stellst du dir das vor? Das kann man jetzt nicht mal eben in 5 Minuten sagen!

Norbert: Dann sag uns doch ein paar Beispiele, die dich besonders interessieren!

Sabine: Na gut, also: Wichtig sind die Asteroiden, das sind Felsbrocken, die durch das Weltall fliegen. Vor 65 Millionen Jahren stürzte einer auf die Erde und vernichtete die Dinosaurier und viele der damals auf der Erde lebenden Arten. Auch davor haben Asteroiden schon große Artensterben ausgelöst.

Frank: Na und, das wird doch auch im Fernsehen gezeigt.

Peter: Ja, da kannst du aber nur passiv zugucken. Wir bauen eigene Beobachtungsinstrumente. Damit betrachten und fotografieren die Dinge. Das Ganze werten wir selber aus und ziehen unsere eigenen Schlussfolgerungen.

Norbert: Oh, der kleine Peter kann hier auch schon mitmachen?

Peter wirft Norbert einen grimmigen Blick zu.

Norbert: Und, gibt es denn Außerirdische?

Uwe: Das weiß man nicht. Man weiß auch nicht wie das Leben auf die Erde kam, aber man hat viele für das Leben elementare Substanzen in kosmischem Staub entdeckt. Daher könnte es sein, dass das Leben gar nicht auf der Erde entstanden ist, sondern aus dem Weltall kam.

Stefan: Wenn das Leben aus dem All kam, dann könnten auch Außerirdische versuchen die Erde zu erobern.

Uwe: Wieso das denn? Es gibt universelle moralische Werte. Auf der Basis könnte man auch mit Außerirdischen verhandeln.

Frank: Ziemlich abgehoben! Außerdem werden alle wissenschaftlichen Entdeckungen am Ende für die Rüstung genutzt, lieber Uwe.

Sabine: Das ist jetzt zu vereinfachend und pauschalisierend. Da müsste man die Nutzung einer Erfindung und von Rüstung schon im Einzelfall prüfen.

Frank: Na gut, aber Uwes universelle moralische Werte sind trotzdem völlig abgehoben.

Klara: Jedenfalls müssten Außerirdische auch essen, sich fortpflanzen und sich untereinander verständigen. Warum sollten wir uns dann nicht auch mit denen verständigen können?

Katrin: Das ist alles Phantasterei. Was bedeutet das All heute für unser Leben?

Sandra: Unser Leben benötigt Sonnenstrahlen. Und wir beobachten zum Beispiel gewaltige

Explosionen auf der Sonne, auch mit Folgen für unser Klima.

Stefan: Und warum fotografiert ihr dann Sterne?

Tim: Die Sonne ist ja nur ein Stern unter vielen. Und wir können auch das komplette Explodieren von Sternen sehen.

Katrin lacht und sagt: Dann sind bald alle Sterne kaputt?

Klaus: Erstens geht das nicht so schnell. Zweitens sehen wir nicht nur, wie Sterne kaputt gehen, sondern auch wie neue entstehen, zusammen mit Planeten.

Norbert: Und wie könnt ihr das alles wissen?

Peter: Na ja, wir können auch nicht alles gleichzeitig machen. Es ist immer ein Thema im Mittelpunkt. Im Laufe der Zeit bekommt man dann den Überblick. Manchmal machen wir auch eine Exkursion.

Stefan: Was heißt Exkursion, ihr könnt ja nicht ins Weltall fliegen!

Sabine: Meinst du? Aber jetzt haben wir wirklich keine Zeit.

Klaus: Also Tschüß!

Klara: Also, nun lasst uns mal hier in Ruhe und geht schön wieder nach Hause.

Katrin: Gehört euch etwa der Wald und die Lichtung?

Sabine: Nein, aber wir waren zuerst hier, haben auch nett mit euch geredet und wären heute ganz gerne ungestört.

Stefan stellt sich vor Uwe. Dieser erschrickt.

Stefan: Was? Uwe, ihr habt hier Geheimnisse und wir sollen brav nach Hause gehen?

Stefan schubst Uwe leicht. Uwe zuckt etwas zusammen.

Klaus: Lass Uwe in Ruhe!

Klaus schiebt sich zwischen Uwe und Stefan und tritt dabei versehentlich Stefan auf den Fuß.

Stefan: Au, tritt mit doch nicht auf den Fuß!

Stefan stößt Klaus um. Es entsteht eine kleine Rauferei unter den Jungen: Stefan und Frank nehmen zu zweit Uwe in den Schwitzkasten. Der wird etwas rot.

Sabine zu Sandra: Was soll das denn, zu zweit auf einen! Der kriegt ja gar keine Luft mehr!

Sandra: Du kannst ihm ja helfen.

Sabine geht auf Frank los. Da fällt Frank unglücklich auf seinen Ellenbogen.

Er schreit laut auf.

Frank: Autsch, ich bin auf meinen Ellenbogen gefallen!

Sabine: Tut mit leid!

Frank: Schon gut, war doch nur Spaß!

Stefan: Komm Frank, wir gehen. Wir hatten ein bisschen Zeit und wollten da nur mal sehen, was ihr hier so macht!

Sabine: Tschüß!

Die neugierigen Schüler gehen.

Uwe: Dass immer gleich Streit entsteht, das finde ich ja nicht so toll.

Klaus: Ach was, es ist doch gar nichts passiert.

Uwe: Also gut, wir machen weiter. Die Frage ist: Warum konnte Klaus nicht schneller als 300.000 Kilometer pro Sekunde fliegen? Dazu machen wir jetzt unseren Flugversuch:

Sabine: Achtung, Leute! Jetzt kommt ein Schießkunststück, dagegen ist Wilhelm Tell ein Anfänger! Ich fliege mit 240.000 Kilometer pro Sekunde an den beiden Lichtschranken am Boden vorbei, schieße durch alle vier Lichtschranken und filme die maximale Höhe der Pendelbewegung.

Uwe: Ich beobachte diese Pendelhöhe am Boden. *Sie fliegt (Folie 39 Startgeräusche), schießt (Folie 40, Schuss, Folie 41 schwarze Zwischenfolie), filmt, landet, betrachtet ihre Aufnahme und liest die Uhr ab. Uwe misst am Boden.*

Sabine: Ich habe die maximale Pendelhöhe 3 cm beobachtet.

Uwe: Ich auch!

Klaus: Beide sind gleich, weil der Sack senkrecht zur Flugrichtung pendelt. Da gibt es keine Längenkontraktion.

Sabine: Meine Uhr zeigt 6 Millisekunden für die Flugdauer der Kugel.

Uwe: Meine zeigt 10 Millisekunden.

Peter: Warum?

Klara: Zeitdilatation!

Klara: Klar, Faktor fünf Drittel!

Klaus projiziert die Skizze, Folie 42.

Klaus: Also, das Prinzip seht ihr schon an der Skizze! Die Flugstrecke der Kugel zum Sack ist senkrecht zur Flugrichtung der Rakete und wird daher am Boden und in der Rakete mit gleicher Länge beobachtet. Am Boden ist die Geschwindigkeitskomponente der Kugel zum Sack verkleinert, denn die Geschwindigkeit ist doch die Flugstrecke der Kugel geteilt durch ihre Flugdauer, und diese Flugdauer ist am Boden verlängert. Eine verkleinerte Geschwindigkeit bedeutet eine vergrößerte Masse am Boden, denn der Sack wurde für beide gleich hoch gependelt, und eine verlangsamte Kugel braucht dazu eine vergrößerte Masse. Übrigens hättest du gar nicht fliegen müssen um das festzustellen.

Sabine: Warum?

Sandra: Der Sack pendelt senkrecht zur Flugrichtung. Da ist doch klar, dass ihn beide gleich hoch pendeln sehen. Und die Zeitdilatation kennen wir auch schon.

Sabine: Na gut. Ich habe ja gleich gesagt, dass ich nicht fliegen will.

Peter: Und um welchen Faktor war die Masse vergrößert?

Sabine: Die Flugdauer der Kugel ist am Boden um den Faktor fünf Drittel vergrößert.

Peter: Dann ist die Geschwindigkeit der Kugel für den Beobachter am Boden um den Faktor fünf Drittel verkleinert. Denn die Geschwindigkeit ist die Flugstrecke der Kugel geteilt durch ihre Flugdauer.

Klaus: Der Impuls ist Masse mal Geschwindigkeit und für beide gleich.

Sandra: Dann ist die Masse für den Beobachter am Boden um den Faktor fünf Drittel vergrößert, weil die Geschwindigkeit um diesen Faktor verkleinert ist und das Produkt unverändert bleibt.

Klara: Also ist die Masse um den Faktor fünf Drittel vergrößert! Das habe ich mir doch gleich gedacht. Na und?

Im Hintergrund füllt Uwe unbemerkt den restlichen Treibstoff in die Rakete. Er setzt sich in die Rakete.

Sabine: Ein bewegter Gegenstand scheint eine erhöhte Masse zu haben. Diese scheinbare Masse nennt man auch die relativistische Masse. Durch die hohe Masse ist die Beschleunigung erschwert.

Klara: Klar doch. Aber warum konnte Klaus nicht schneller als mit Lichtgeschwindigkeit fliegen?

Sabine: Geht seine Fluggeschwindigkeit gegen die Lichtgeschwindigkeit, so geht die relativistische Masse gegen unendlich und die Beschleunigung gegen null, trotz Vollgas.

Peter: Ganz schön kompliziert!

Sabine: Und schießen muss man können!

Sie hält stolz das Gewehr hoch und klopft sich selbst auf die Schulter.

2f. Uwes Start

Plötzlich startet Uwe, Startgeräusch Folie 43, Entfernen von der Erde Folie 44, beide in der Mitte anklicken.

Die übrigen außer Sabine: Hey, was soll denn das?

Sabine: Er will die Antimaterie suchen.

Klaus: Hier in der Gegend gibt es bestimmt keine.

Sabine: Dann fliegt er eben etwas länger.

Klaus: Du meinst Wochen oder Monate?

Sabine: Eher Wochen.

Peter: Bist du verrückt? Und die Schule? Und seine Eltern?

Sabine: Seine Eltern sind schon vor Jahren durch einen Verkehrsunfall umgekommen. Seitdem lebt er bei seiner Tante.

Klara: Und was sagt die dazu?

Sabine: Für die war er schon immer nur Ballast.

Und nun will sie heiraten; da soll Uwe ins Internat.

Klara: Und das wollt ihr beide nicht.

Peter: Sabine, du hast ihm den Flug doch wohl nicht eingeredet?

Sabine: Natürlich nicht! Er hat schon länger einen Brief an seine Tante geschrieben.

Klara: Was steht da drin?

Sabine: Er schreibt, dass er auf dem Athe bleiben will und sich wegen des drohenden Internats versteckt hält.

Klaus: Und was haben wir damit zu tun?

Sabine: Na, ein besseres Versteck gibt es doch gar nicht. Im All findet ihn niemand. Einige von uns wird man fragen, ob wir was wissen. Selbst wenn wir etwas sagen würden, wäre das zwecklos. Denn es kann ihn sowieso niemand holen. Am besten für alle: Wir wissen von nichts. Außerdem würde uns sowieso keiner glauben, dass er im All ist.

Einige andere: Stimmt, das glaubt uns keiner.

Sabine: Und, wir schweigen?

Einige andere: Ja.

Klaus: Es bleibt uns auch kaum etwas anderes übrig. Aber hätte er nicht auch woanders ein gutes Versteck gefunden?

Sabine: Na ja, das Verstecken ist natürlich nicht der einzige Grund für seinen Flug. Er will wohl auch einiges entdecken.

Sandra geht ans Funkgerät.

Sandra: Hallo Uwe, ein Internat kann doch auch ganz schön sein. Hast du dir das Ganze auch gut überlegt?

Uwe: Na klar!

Sandra: Tim, wie lange hält man es denn aus, in deiner Rakete?

Tim: Für einige Tage ist schon was zu Essen drin. Außerdem ist unter dem Sitz eine große aufblasbare Kabine, die könnte er als Gewächshaus nutzen.

Sandra: Klara, du bist doch gut in Bio. Du solltest zusammen mit Tim einige Hinweise für Uwes Überleben zusammenstellen.

Klara und Tim sehen sich an und nicken:

Beide: Klar.

Sabine: Ich schicke ihm Tipps zur Navigation.

Klaus: Im übrigen bleiben wir mit ihm in Kontakt und schicken ihm alle nötigen Informationen.

3. Szene: Am schwarzen Loch?

Uwe beobachtet von seiner Rakete aus ein schwarzes Loch, Folien 45 und 46 anklicken! Er überlegt sich am Notizblock, Folie 47, warum er den Gegenstand mehrfach von beiden Seiten sieht.

Uwe zu Folie 47 a: Ich sehe den sehr schweren sich drehenden Gegenstand.

Uwe zu Folie 47 b: Von der Oberseite kommt Licht durch den gekrümmten Raum in mein Auge. So sehe ich die Vorderseite.

Uwe zu Folie 47 c: Durch die Raumkrümmung kommt auch von der Unterseite Licht in mein Auge. Daher sehe ich auch die Unterseite.

Uwe: Ich fliege mal näher ran.

Folien 48 und 49 anklicken!

Uwe zu Folie 49: Oh, jetzt sehe ich die Oberseite, die Unterseite und wieder die Oberseite. Licht von der Oberseite kommt direkt in mein Auge, aber auch nachdem es einmal um den Gegenstand herumgelaufen ist. Daher sehe ich die Oberseite zweimal. Die Raumkrümmung wird also größer wenn ich näher komme.

Da empfängt er einen Funkspruch.

Sabine per Funk: Die Funksignale brauchen jetzt schon ziemlich lange für die Entfernung. Der schwere kleine Gegenstand, den du beobachtet hast, kann doch ein schwarzes Loch sein, obwohl er strahlt: Hawking-Strahlung. Fahre also lieber nicht zu dicht ran.

Uwe: Prima. Jetzt kommt die Warnung aber ziemlich spät. Dann werde ich also sofort den Kurs wechseln.

Er reißt den Steuerknüppel herum. Die Rakete wird mehrfach schwer erschüttert, Folie 50 für Lärm an allen drei Symbolen mehrfach anklicken! Er geht ans Funkgerät.

Uwe: Hallo, die Nachricht kam recht spät. Ich bin schon in der Nähe des schwarzen Lochs. Ich habe nach der Warnung sofort den Kurs gewechselt.

Es rumpelt laut, Feuerwerkskörper zünden, dabei Sicherheit beachten! Felsbrocken rasen vorbei. Es blitzt, dampft, raucht, zischt.

Uwe: Ich hoffe, ich komme hier noch weg. Noch habe ich viel Treibstoff.

Das Funkgerät erhitzt sich und fängt an zu qualmen. Es explodiert, passende Effekte selbst entwickeln. Überall ist Rauch, Licht und Nebel. Die Rakete gerät ins Trudeln.

Folie 51 als schwarze Zwischenfolie.

4. Szene: Ehemaligenfeier

Die Schüler sind jetzt 20 - 30-jährige Ehemalige.

Auch Tim ist dabei. Alle sind bestens gekleidet.

Uwe fehlt. Folie 52 als Hintergrund.

Klaus: Hast du noch was von Uwe gehört?

Sandra: Nach dem letzten Funkspruch kam kein Signal mehr.

Sabine: Er ist bestimmt nicht hinein gestürzt.

Schließlich hatte er noch genug Treibstoff.

Klaus: Was wurde aus seiner Tante?

Sabine: Sie und ihr Freund haben sich die Schuld an Uwes Verschwinden gegenseitig zugeschoben und sich dabei endgültig zerstritten.

Sandra: Dann wäre Uwe ja nicht ins Internat gekommen, wenn er nach einigen Wochen zurückgekommen wäre.

Uwe kommt als 16-Jähriger herein. Er und Sabine erblicken sich und fallen sich in die Arme.

Sandra: Uwe ist wieder da!

Peter: Uwe, toll dass du wieder da bist!

Klara: Mensch, das ist ja wirklich Uwe!

Klaus: Der sieht noch aus wie damals!

Tim: Da hat er ja noch mal Glück gehabt!

Sabine: Ich wusste, dass du lebst. Seit wann bist du da?

Uwe: Ich bin gerade gelandet, nach 15 Monaten Flug. Vielen Dank für eure Funkmeldungen. Sie waren öfters ziemlich lebenswichtig.

Carmesin, Hans-Otto: Erlebte Relativitätstheorie. In: Nordmeier, Volker (Hrsg.): Tagungs-CD Fachdidaktik Physik, 2003. ISBN 3-936427-71-2