Lösungen der Aufgaben

Lösung zu Posten 1: Einsteins Postulate

Aufgabe 1*: Geben Sie ein Beispiel für ein Inertialsystem an und geben Sie ein Beispiel für ein System an, welches kein Inertialsystem ist.*

In Inertialsystemen gilt der Trägheitssatz. Daher sind weder beschleunigte noch rotierende Systeme Inertialsysteme. Die Erde kann in vielen Fällen als Inertialsystem approximiert werden, solange es sich nicht um Experimente von längerer Dauer handelt bei denen die Erdrotation eine Rolle spielt (z. B. Foucault-Pendel).

Aufgabe 2: *Man wirft aus dem Stand einen Apfel mit 10 m/s nach vorne. Der Apfel fliegt dann mit 10 m/s. Jetzt setzt man sich ins Auto und fährt mit einer Geschwindigkeit von 20 m/s. Wieder wirft man einen Apfel nach vorne. Der Apfel flitzt dann mit (10 + 20) m/s =30 m/s über die Straße.*

Soweit so gut. Leuchtet man aus dem Stand mit einer Taschenlampe nach vorne, bewegt sich das Licht mit 300´000´000 Metern pro Sekunde. Nun führt man dieses Experiment wie oben im Auto aus, fährt also mit einer Geschwindigkeit von 20 m/s und leuchtet mit der Taschenlampe nach vorne.

Frage: Wie schnell ist das Licht jetzt für einen Beobachter, an dem das Auto vorbeifährt? Wie schnell ist das Licht für einen Autoinsassen?

In beiden Fällen entspricht die Geschwindigkeit des Lichtes der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum – gemäss dem Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.

Aufgabe 3: *Drei Raumschiffe bewegen sich mit konstanter Geschwindigkeit und gleichen Abständen hintereinander durch den tiefen Weltraum. Die Astronauten wollen wissen, wie schnell sie fliegen. Zu diesem Zweck sendet das mittlere Schiff ein Radiosignal oder einen Lichtblitz aus. Wenn sich die Schiffe in Ruhelage befinden, wird das Signal das vordere und das hintere Raumschiff gleichzeitig erreichen.*

Wenn sich die Formation jedoch bewegt, lässt sich dann ihre Geschwindigkeit daraus erschliessen, um wie viel später das Signal beim ersten Schiff (das sich von ihm wegbewegt) ankommt als beim zweiten (das sich auf das Signal zu bewegt)?

Gemäss dem Relativitätsprinzip ist das unmöglich. Das Signal kommt im Bezugssystem der Astronauten bei beiden Schiffen gleichzeitig an.

Aufgabe 4 (sofern Sie noch Zeit haben): *Versuchen Sie, die beiden Postulate mit eigenen Worten zu formulieren, ohne dieses Dokument offen vor sich liegen zu haben.*

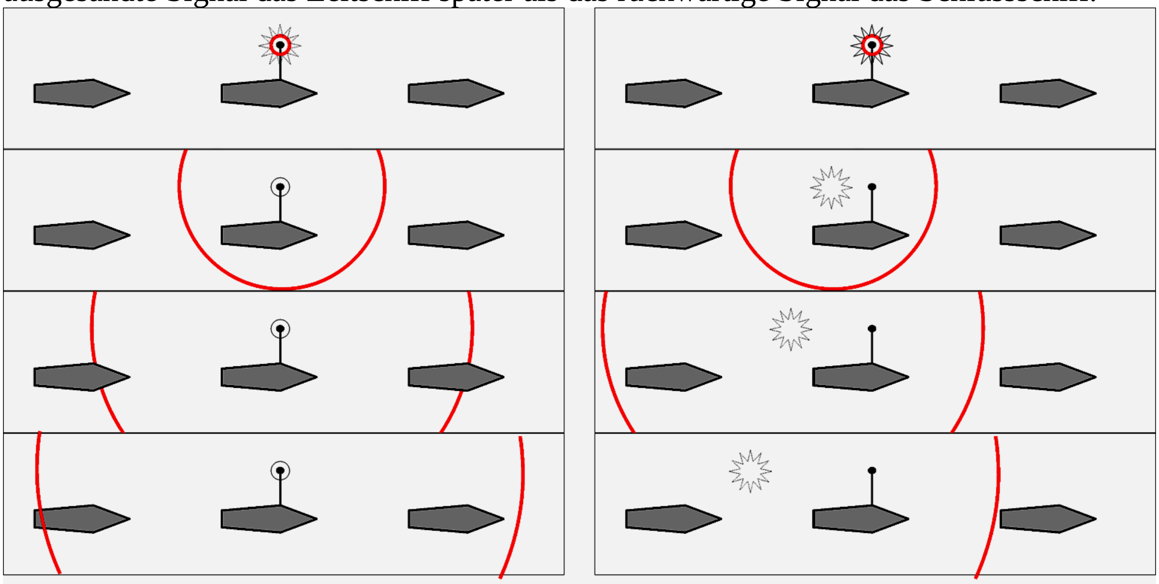
Lösungen zu Posten 2: Was heisst hier „gleichzeitig“?

***Aufgabe 1**: Drei Raumschiffe fliegen hintereinander her mit gleichem Abstand. Das mittlere Schiff sendet einen Funkspruch aus: „Frühstück einnehmen!“ Von den Besatzungen aus gesehen, kommt der Befehl vorn und hinten gleichzeitig an. Wenn wir von der Erde aus die Raumschiffe beobachten, was sehen wir dann?*

*Antwort **a**:* *Die Mannschaft des vorderen Schiffes greift zuerst zum Brötchen.*
*Antwort **b**:* *Beide beginnen das Frühstück gleichzeitig.*
*Antwort **c**:* *Die Mannschaft des hinteren Schiffes fängt zuerst an zu frühstücken.*

Welche der Antworten ist richtig? Begründen Sie.

Antwort c ist richtig. Als Beobachter sehen wir, dass der Funkspruch hinter dem Leitschiff „herjagen“ muss, während das Schlussschiff ihm entgegenfliegt. Wir messen beide Signale, die sich relativ zu uns mit derselben Geschwindigkeit, der unveränderlichen, absoluten Lichtgeschwindigkeit fortbewegen. Nach unseren Messungen erreicht das nach vorn ausgesandte Signal das Leitschiff später als das rückwärtige Signal das Schlussschiff.



Aus dem Bezugssystem der Astronauten aus betrachtet. Aus dem Bezugssystem von der Erde aus betrachtet.

***Aufgabe 2:** Sie stehen auf einer Landepiste und beobachten ein Raumschiff, das mit einer extrem hohen Geschwindigkeit landen will. Wenn der Pilot beide Landekufen gleichzeitig ausfährt, beobachten Sie, dass*

a) die hintere Kufe früher ausgefahren wurde als die vordere.

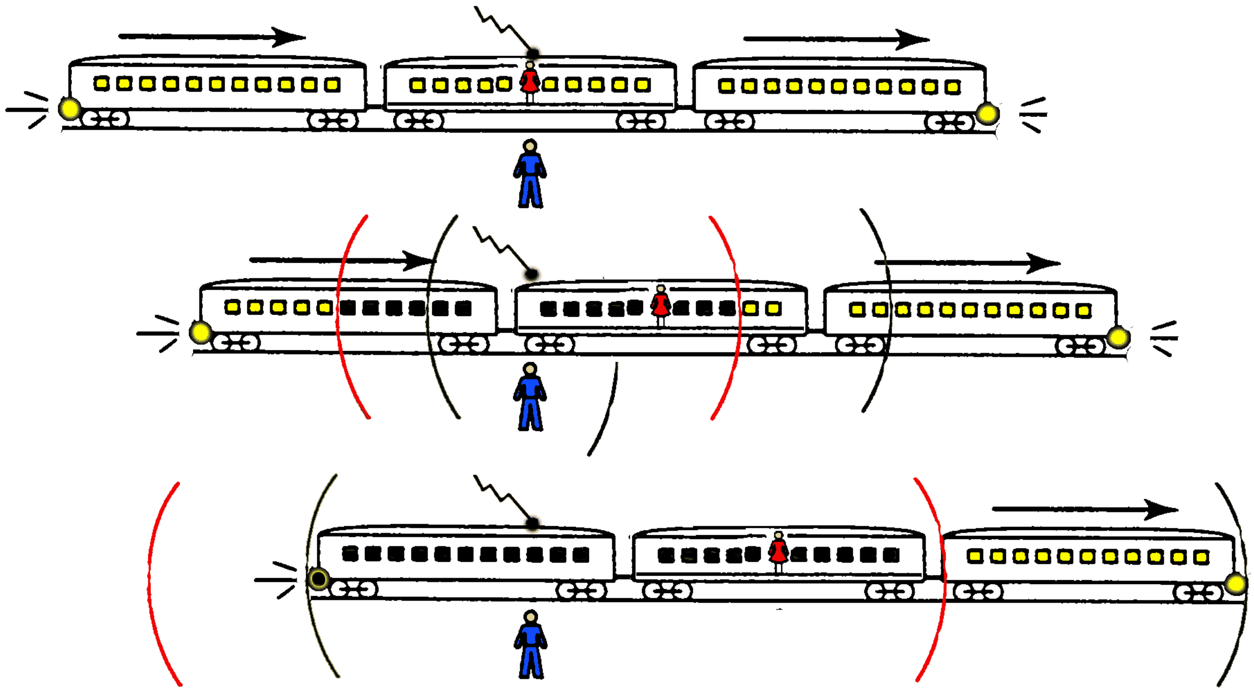
b) die vordere Kufe früher ausgefahren wurde als die hintere.

c) beide gleichzeitig ausgefahren wurden.

Antwort a ist richtig. Der Beobachter sieht, dass die hintere Landekufe als erste ausgefahren wird, und zwar aus demselben Grund, aus dem er die Besatzung des hinteren Raumschiffs als erste essen sieht (siehe Aufgabe 1).

Aufgabe 3: *Der Relativitätsexpress rast mit nahezu Lichtgeschwindigkeit dahin. Da schlägt ein Blitz genau in die Mitte des Zuges in das Stromaggregat ein und legt die Stromversorgung lahm. Daraufhin verlöschen im Zug die Lichter der Reihe nach. Diese Hell-Dunkel-Grenze bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit durch den Zug. In der unteren Abbildung sehen Sie die Situation, wie sie sich für die Reisende darstellt. Rücklicht und Scheinwerfer gehen gleichzeitig aus.*

Wie sieht ein Bahnwärter die Lichter ausgehen, wenn er zur Zeit des Blitzeinschlags auf der Höhe der Mitte des Zuges stand? Gehen für ihn Rücklichter und Scheinwerfer gleichzeitig aus? Zeichnen Sie mit einer anderen Farbe die Wellenfronten des Blitzes ein, wie sie sich für ihn ergeben.



Lösungen zu Posten 3: Ist Zeit relativ?

***Aufgabe 1**: Bewegt sich eine Uhr mit der Geschwindigkeit v an einem Uhrensatz vorbei, welcher in einem Inertialsystem ruht, so geht sie langsamer als diese Uhren. Nähert sich die Geschwindigkeit der Uhr der Lichtgeschwindigkeit, so verlangsamt sich ihr Gang immer mehr.*

a) Wenn bei einer ruhenden Uhr eine Stunde vergeht, wie viele Minuten vergehen in einer Uhr, die sich gegenüber den ruhenden Uhren mit der Hälfte der Lichtgeschwindigkeit bewegt?

$$t_0 = t\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = 51\,\text{min}\ 58\,\text{sec}$$

b) Mit welcher Geschwindigkeit v muss sich die Uhr bewegen, damit sie halb so schnell läuft wie die ruhende?

$$v = c\sqrt{1-\frac{t_0^{\,2}}{t^2}} = 0.866c = 2.598\cdot 10^8\ \text{m/s}$$

c) (freiwillig) Welchen Wert nimmt t für Überlichtgeschwindigkeiten (beispielsweise v = 2c) an? Wie interpretieren Sie dieses Resultat?

$$t_0 = t\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = t\sqrt{-3} \in \text{Im}$$

Die Lösung besitzt einen imaginären Wert und ist damit physikalisch nicht sinnvoll.

***Aufgabe 2**: Zum Zeitpunkt der Abreise sind die Zwillinge 25 Jahre alt. Berechnen Sie das Alter des Astronauten, wenn sein Zwillingsbruder auf der Erde seinen 50. Geburtstag feiert. (Bem.: Im Text ist v = 0.8 c angegeben.)*

Die Eigenzeit des Astronauten beläuft sich auf $t_0 = t\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = 15\,\text{a}$. Daher wird er bei seiner Rückkehr 40 Jahre alt sein.

***Aufgabe 3 (freiwillig):** Wie weit hat sich der Astronaut während seiner Reise von der Erde entfernt ?*

(Bemerkung: Für ihn ist aber nur die Zeit vergangen, welche Sie in Aufgabe 3 berechnet haben. Ist er jetzt mit Überlichtgeschwindigkeit unterwegs gewesen ? Machen Sie sich nicht zu viele Gedanken. Die Antwort finden Sie im Posten „Längenkontraktion“ und bedarf einer etwas genaueren Analyse.)

$s = vt = 20$ Lichtjahre $= 1.89 \cdot 10^{17}$ m

Wichtig ist, die Eigenzeit des ruhenden Beobachters zu benutzen.

Lösungen zu Posten 4: Sind Längen immer gleich lang?

Aufgabe 1:
Ein 2.0 m langer Speer fliegt mit einer Geschwindigkeit von 0.80c. Wie lang ist der Speer im Bezugssystem des Werfers und in seinem eigenen Bezugssystem?

Länge des Speeres im ruhenden System: l_0=2.0 m
Länge des Speeres aus Sicht des bewegten Systems:

$$l = l_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 2 \cdot \sqrt{1 - 0.8^2} = 2 \cdot 0.6 = 1.2m$$

Aufgabe 2:
Wie schnell muss der Speer geworfen werden, damit seine Länge sich aus Sicht der Zuschauer um a) 1%, b) 10% und c) 50% abnimmt? Geben Sie die Geschwindigkeit in Einheiten von c an. Vergleichen Sie die Geschwindigkeiten mit der Geschwindigkeit von Elektronen in einer TV Röhre ($8 \cdot 10^7$ *m/s).*

$$\frac{l}{l_0} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \Rightarrow \quad \frac{v}{c} = \sqrt{1 - \left(\frac{l}{l_0}\right)^2}$$

a) Abnahme der Länge um 1% bei folgender Geschwindigkeit:

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1 - \left(\frac{99}{100}\right)^2} = 0.14$$

$$v = 0.14 \cdot c = 0.42 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

b) Abnahme der Länge um 10% bei folgender Geschwindigkeit:

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1 - \left(\frac{90}{100}\right)^2} = 0.44$$

$$v = 0.44 \cdot c = 1.3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

c) Abnahme der Länge um 50% bei folgender Geschwindigkeit:

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1 - \left(\frac{50}{100}\right)^2} = 0.87$$

$$v = 0.87 \cdot c = 2.6 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Die Geschwindigkeit von Elektronen in den TV-Röhren ist grösser als jene des Speers, wenn die Länge um 1% kontrahiert, aber kleiner, wenn seine Länge um 10% oder mehr kontrahiert.

Aufgabe 3:
A) Formulieren Sie mit ihren eigenen Worten, wie das Erreichen der Erdoberfläche der Myonen mithilfe der Längenkontraktion erklärt werden kann.
B) Beschreiben Sie den gleichen Effekt mithilfe der Zeitdilatation (siehe vorheriges Kapitel) indem Sie die Vorkommnisse vom Bezugssystem der Erde aus beschreiben.

A) Basierend auf der Vorstellung, dass die Erde mit nahezu Lichtgeschwindigkeit auf den Entstehungsort der Myonen zu rast, ist aus Sicht der Myonen der Weg zwischen ihrem Entstehungsort und der Erdoberfläche viel kürzer (Längenkontraktion). Sie können ihn daher innerhalb ihrer kurzen mittleren Lebensdauer passieren.
B) Von der Erde aus betrachtet, rasen die Myonen auf die Erdoberfläche zu. Ihre Lebensdauer ist im Bezugssystem der Erde aufgrund der Zeitdilatation viel länger. Somit können sie in der längeren Zeit die Erdoberfläche erreichen.

Aufgabe 4:
Unter der Annahme, dass Autos in der Zukunft viel schneller als heute fahren können, wäre es dann möglich ein 5m langes Auto in eine 4m lange Garage zu parken?
a) Berechnen Sie die Geschwindigkeit mit der das Auto in die Garage hineinfahren müsste, um ganz darin zu verschwinden.
b) Könnte diese Vision funktionieren?

a) $\frac{l}{l_0} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \Rightarrow \quad v = c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{l}{l_0}\right)^2} = c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{4}{5}\right)^2} = 0.6 \cdot c$

Das Auto müsste mit 0.6c in die Garage hineinfahren.

b) Diese Vision kann nicht funktionieren, da das Auto beim Parken wieder zum Stillstand kommt und dann aus der Garage herausragen würde.

Aufgabe 5:
Eine Tunneleinfahrt ist 2.0 m hoch. Ein Physiker möchte gerne sein 2.2 m hohes Auto durch diesen Tunnel fahren. Wie schnell müsste der Physiker fahren, damit er durch den Tunnel passt? Begründen Sie kurz.

Die Längenkontraktion findet nur in der Bewegungsrichtung des bewegten Inertialsystems zum ruhenden Inertialsystem statt. In diesem Fall wird die Länge des Autos kontrahiert, nicht aber seine Höhe oder Breite. Der Physiker muss über den Bergpass fahren.

Aufgabe 6:
Der Radius unserer Galaxie beträgt etwa $3 \cdot 10^{20} m$.
a) Wie schnell müsste ein Raumschiff fliegen, wenn es die ganze Galaxie innerhalb von 300 Jahren (gemessen vom Raumschiff aus) durchqueren soll?
b) Wieviel Zeit ist währenddessen auf der Erde vergangen?

Das Raumschiff sei das ruhende Bezugssystem, die Galaxie fliegt am Raumschiff vorbei.

Zurückgelegte Strecke vom Raumschiff aus betrachtet: $l = l_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

Die Geschwindigkeit des Raumschiffes beträgt $v = \frac{l}{t} = \frac{l_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{t}$ => $\frac{v}{c} = \sqrt{\frac{l_0^2}{l_0^2 + c^2 t^2}}$

mit $l_0 = 2 \cdot 3 \cdot 10^{20}$ m und $t = 300a = 9.46 \cdot 10^9$ s ergibt sich: $\frac{v}{c} = 0.99999$.

Wenn das Raumschiff mit 99.999% der Lichtgeschwindigkeit fliegt, kann es innerhalb von 300 Jahren einmal unsere Galaxie durchqueren.

b) Von der Erde aus betrachtet ist die Galaxie nicht kontrahiert. Das Raumschiff fliegt mit 0,99999c. Für die Reise von einem Ende der Galaxie zum anderen vergeht also auf der Erde die Zeit: $t_{Erde} = \frac{l_0}{v} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 10^{20} m}{0.99999 \cdot c} \approx 2 \cdot 10^{12} s \approx 64000 yr$

Auf der Erde vergehen während der Reisezeit 64000 Jahre!!!

Lösungen zu Posten 5: *E = mc²*

Aufgabe 1: *Geben Sie den Energieinhalt von 1g Masse in Joule an.*

Ein Einsetzen in die Energie-Massen Äquivalenz ergibt: $E=mc^2$

$$\mathrm{E} = 0.001\,\mathrm{kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \frac{m}{s})^2 = 0.001 \cdot 9 \cdot 10^{16} \frac{\mathrm{kg\,m}^2}{s^2} = 9 \cdot 10^{13}\,\mathrm{J}\,.$$

Ein Gramm Masse entspricht einer Energie-Äquivalenz von $9 \cdot 10^{13}\,\mathrm{J}$.

Aufgabe 2: *Bei der Knallgasreaktion 2H + 0 → H_2O wird die Reaktionsenergie von 571,6 kJ/mol vollständig abgeführt. Um wieviele Kilogramm reduziert sich die Masse eines Wassermoleküls gegenüber der Masse der H- und O-Atome?*

Umformung der Energie-Masse-Äquivalenz ($\Delta E=\Delta mc^2$) führt zu: $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = 6.35 \cdot 10^{-12} kg$ Massenabnahme pro Mol. Pro Wassermolekül ergibt das demnach eine Massenabnahme von

$$\Delta m_{Molekül} = \frac{\Delta m}{N_A} = \frac{6.35 \cdot 10^{-12} kg}{6.022 \cdot 10^{23}} = 1.05 \cdot 10^{-35} kg$$

Aufgabe 3: *Was ist an der Äquivalenz von Energie und Masse so interessant?*

Mit der Gleichung $E=mc^2$ wurde der Satz der Unveränderlichkeit von Substanz bzw. Masse ungültig. Masse repräsentiert eine grosse Energiemenge. Ferner muss unterschieden werden zwischen sogenannter Ruhemasse und träger Masse eines Teilchens. Die Einsteinsche Masse-Energie-Äquivalenz hat grosse Bedeutung nicht nur im Mikrokosmos, sondern auch im Makrokosmos. Seit der Feststellung der Äquivalenz von Masse und Energie kann u.a. erklärt werden, wie der Fusionsprozess auf der Sonne stattfindet, bei dem durch Umwandlung von Wasserstoff in Helium eine ungeheure Energiemenge freigesetzt wird (siehe Posten „Kernfusion“.

Lösungen zu Posten 6: Sind Massen immer gleich massiv?

Aufgabe 1:
a) In Teilchenbeschleunigern werden Elektronen auf eine Geschwindigkeit von über 0.999 c beschleunigt. Wie schwer werden sie, aus Sicht der ruhenden Physikerin im Labor? Die Masse des Elektrons in seinem Ruhesystem (sog. "Ruhemasse") ist $m_e = 9.109... \cdot 10^{-31}$ kg.

b) Auf welche Geschwindigkeit müsste man einen (beliebigen) Körper beschleunigen, damit seine beobachtete Masse um einen Millionstel der Ruhemasse zunimmt?

a) $m_{rel} = \frac{m_0}{\sqrt{1-0.999^2}} = 22.366...\cdot 9.109...\cdot 10^{-31}kg \approx 2.04\cdot 10^{-29}kg$

b)
$$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = 1.000001 \quad \Rightarrow \quad 1-\left(\frac{v}{c}\right)^2 = \frac{1}{1.000001^2} \quad \Rightarrow \quad v = c\cdot\sqrt{1-\frac{1}{1.000001^2}} \approx 424\ km/s$$

Aufgabe 2:
a) Ein Raumschiff (1 Megatonne Ruhemasse) fliegt mit 0.5 c an einem ruhenden Beobachter vorbei. Welche Masse würde der Beobachter für das Raumschiff messen?

b) Ein Düsenjet verfolgt dasselbe Raumschiff, aus Sicht des Pilots "flüchtet" das Raumschiff mit der Geschwindigkeit 0.4·c. Welche Masse würde der Pilot des Düsenjets für das Raumschiff messen?

c) Messen also der ruhende Beobachter und der verfolgende Pilot dieselbe Masse für dasselbe Raumschiff? Oder doch nicht? Denken Sie darüber nach, und begründen Sie ihre Antwort!

a) $m_{rel} = \frac{m_0}{\sqrt{1-0.5^2}} \approx 1.155\ Mt$

b) $m_{rel} = \frac{m_0}{\sqrt{1-0.4^2}} \approx 1.091\ Mt$

c) Nein, denn das Raumschiff wird aus zwei verschiedenen Inertialsystemen gemessen. Die relativistische Masse hängt vom Bezugssystem ab, aus der sie gemessen wird.

Aufgabe 3:
Erstellen Sie (mit der Formel für die relativistische Masse) eine Excel-Datei, die folgendes berechnen kann:

Input: Geschwindigkeit v des bewegten Objekts, in Einheiten der Lichtgeschwindigkeit

Output: Faktor, der die Massenzunahme des bewegten Objekts angibt (m_{rel}/m_0)

Falls Sie nicht sicher sind, ob Ihre Formel stimmt, rufen Sie Ihren Lehrer / Ihre Lehrerin, oder einen Kollegen, der diesen Posten schon gemacht hat! So ist sichergestellt, dass Sie nicht mit der falschen Formel weiterrechnen.

a) Machen Sie eine Tabelle mit verschiedenen Geschwindigkeiten (die kleiner als c sind!), und berechnen sie die entsprechenden Massenzunahmen. Wie verhält es sich für eine Geschwindigkeit, die gegen die Lichtgeschwindigkeit geht?

b) Finden Sie durch Ausprobieren heraus: Auf welche Geschwindigkeit müsste man einen Körper beschleunigen, damit seine Masse um 1/1000 der Ruhemasse zunimmt (der Faktor also 1.001 wird)? Und wieviel, um die Masse zu verdoppeln, und zu vertausendfachen? Spielen Sie ein bisschen mit Ihrer Datei herum.

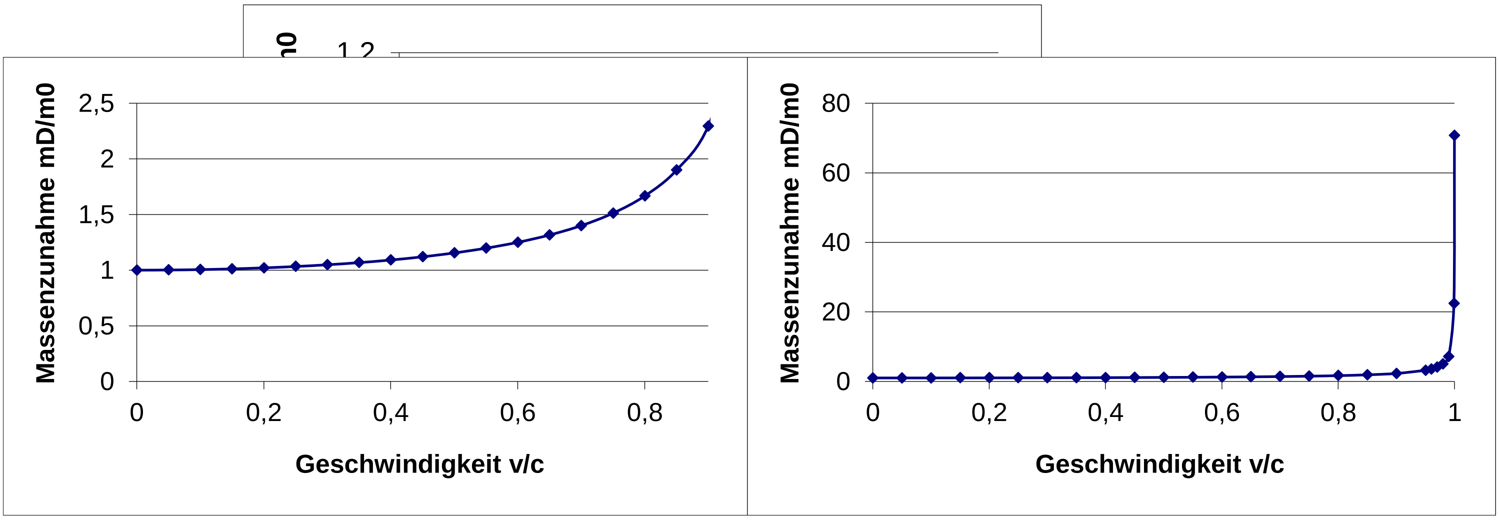
c) Was gibt Ihnen ihre Rechnung heraus, wenn Sie die Lichtgeschwindigkeit c eingeben? Was ist wohl der physikalische Grund dafür?
Was beobachten sie für Geschwindigkeiten, die sehr nahe an c sind? Welche Masse hätte ein Teilchen, das mit Lichtgeschwindigkeit fliegt?

d) Erzeugen Sie einen Graphen, der die Massenzunahme in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Objektes darstellt. Machen sie Graphen für verschiedene Abschnitte: v = 0 – 0.5 c, v = 0 - 0.9 c,
v = 0 – 0.9999 c.

a) = 1/WURZEL(1-(A1)^2)
Zelle A1: Geschwindigkeit des bewegten Objekts in Einheiten von c.

b) ca. 0.04469 *c* für 1/1000-fache,
ca. 0.866025 *c* für doppelte und
ca. 0.9999995 *c* für tausendfache Massenzunahme.

c) #DIV/0! : Es ist unmöglich (bzw. "verboten") sich mit Lichtgeschwindigkeit zu bewegen. Die Masse wäre unendlich.



d)

Aufgabe 5:
Bevor Sie weiterlesen: Machen Sie sich eigene Gedanken darüber, woher die zusätzliche Masse kommen könnte, die ein beschleunigter Körper gewinnt (aus Sicht eines ruhenden Beobachters). Denken Sie dabei an den Posten 5 "$E=mc^2$", also an die Äquivalenz von Energie und Masse.

Ein beschleunigter Körper gewinnt an kinetischer Energie. Aufgrund der Energie-Masse-Äquivalenz bedeutet das, dass er somit auch an Masse gewinnt.

Aufgabe 6:
a) Stellen Sie sich ein batteriebetriebenes Katapult vor, das Steine senkrecht hochwerfen kann. Im Moment des Abwurfs bekommt der Stein eine hohe Geschwindigkeit. Nimmt seine Masse zu? Wenn nein, wieso nicht? Wenn ja, woher kommt die Energie, die der zugenommenen Masse entspricht?

b) Ein Jogger beginnt in einer flachen Ebene (also nicht bergabwärts!) zu rennen, und beschleunigt auf beinahe Lichtgeschwindigkeit. Wie sieht es in seinem Fall aus? Woher bezieht er seine Energie?

c) Mit einer Hebebühne wurde ein Stein auf einen Turm gebracht. Der Stein wird dann fallengelassen, wodurch seine Geschwindigkeit zunimmt. Wie sieht es nun in diesem Fall aus? Tipp: Betrachten Sie genau die Energien, die der Stein auf dem Turm und kurz vor dem Aufprall hat!

a) Das Katapult überträgt die Energie der Batterie auf die gespannte Feder, und diese Federenergie dann auf den Stein. Es wird also Energie von aussen auf den Stein zugeführt. Die Masse des Steines nimmt also zu. Die Energie stammt von der Batterie.

b) Der Jogger bezieht seine Energie aus seinen eigenen Muskeln. Es wird also keine Energie von aussen zugeführt, somit nimmt auch seine Masse nicht zu. (Seine Massenzunahme wird durch eine Massenabnahme der Muskeln kompensiert)
Bem.: Da der Jogger atmet, kann er streng genommen nicht als abgeschlossenes System betrachtet werden. Für die Veranschaulichung der relativistischen Problematik sei darauf aber nur am Rande hingewiesen.

c) Die Energie stammt ursprünglich aus dem Motor der Hebebühne, wird also von aussen zugeführt. Sie wird dann in das Gravitationsfeld der Erde gesteckt in Form von potentieller Energie (die Masse des Steins erhöht sich dadurch nicht). Erst während des Falls wird die kinetische Energie des Steins und somit seine Masse erhöht.