38 Weltbilder vor 1905

Vertiefung und Kompetenzüberprüfung

Martin Apolin (Stand Juli 2012)

Die Kopernikanische Wende, Sonnensystem

A1 Im Dezember 1610 verwendete GALILEI sein Teleskop, um die Venus zu beobachten. Er konnte sehen, dass sie Phasen hat (siehe Abb. 1), vergleichbar mit denen unseres Mondes. Es gibt also auch „Vollvenus" (in der Abbildung nicht zu sehen) und „Neuvenus" (rechts unten). Er leitete aus dieser Beobachtung ein weiteres, sehr gewichtiges Indiz für die Richtigkeit des heliozentrischen Weltbildes ab. Versuche seine Überlegung nachzuvollziehen. Wie müssten die Phasen der Venus im geozentrischen Weltbild aussehen? Bedenke dabei, dass man schon damals wusste, dass die Venus als „Morgenstern" bzw. „Abendstern" immer in der Nähe zu Sonne zur sehen ist.

Abb. 1: Einige Phasen der Venus (Foto: Statis Kalyvas - VT-2004 Programm).

A2 a Die Erde ist rund 150 Milliarden Meter von der Sonne entfernt. Schätze ab, mit welcher Geschwindigkeit sie sich um die Sonne bewegt.

b Bei welchem Prozentsatz der Lichtgeschwindigkeit (etwa $3 \cdot 10^8$ m/s) liegt die Bahngeschwindigkeit der Erde? Wie weit bewegt sich die Erde, wenn sich das Licht um 10 m bewegt?

c Nimm an, du stehst im Regen, und die Regentropfen fallen senkrecht (Abb. 2 links). Wenn du nun zu laufen beginnst, addieren sich die Laufgeschwindigkeit und die Fallgeschwindigkeit der Tropfen, und diese kommen von schräg rechts.

Fällt der Regen tatsächlich schräg? Ansichtssache - für die bewegte Person schon. Für eine ruhende Person fällt der Regen aber nach wie vor senkrecht. Diese scheinbare Ablenkung nennt man Aberration. Das heißt wörtlich übersetzt eigentlich Verirrung.

Abb. 2 (Grafik: Janosch Slama; Abb. 3.13, S. 22, BB5)

Dieser Effekt tritt auch bei Licht auf. Wenn du einen Stern anvisierst, der sich exakt über dir befindet (also im Zenit), dann musst du das Fernrohr um einen kleinen Winkel kippen, damit der Stern genau in der Mitte des Bildes ist. Schätze diesen Winkel ab und verwende dabei das Ergebnis aus 2b.

A3 Wie müsste der Sternenhimmel für ein extrem schnelles Raumschiff aussehen - also eines, das sich beinahe mit Lichtgeschwindigkeit bewegt? Verwende für deine Überlegungen die Ergebnisse von A2.

A4 Der zunehmende Mond sieht bei uns so aus wie Nummer 2 bis 4 in Abb. 3. Wie aber sieht der zunehmende Mond auf der Südhalbkugel aus?

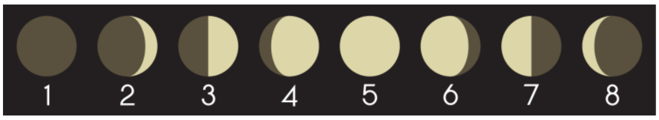

Abb. 3: Die Phasen des Mondes (Grafik: Pamplelune; Quelle: Wikipedia).

A5 a Unter einem siderischen Monat versteht man eine volle Umdrehung des Mondes um die Sonne. Er beträgt 27,322 Erdtage. Sieht man dann von der Erde aus wieder dieselbe Mondphase? Versuche zu begründen.

b Unter einem synodischen Monat versteht man die Zeit zwischen zwei gleichen Mondphasen. Berechne mit Hilfe der Zeitdauer des siderischen Monats (siehe A5 a) den synodischen. Mache dazu eine Skizze.

A6 Man hört oft, dass man am Grund eines tiefen Brunnens auch unter Tags die Sterne sehen kann. Bereits Aristoteles soll das behauptet haben. Stimmt das tatsächlich? Versuche zu begründen.

A7 a Der Polarstern steht ziemlich genau im Norden (Abb. 4). War das immer so? Und wird das auch in Zukunft so bleiben? Bedenke, dass die Erde ein Kreisel ist und nicht exakt kugelförmig!

Abb. 4: Die scheinbare Sterndrehung. Nur der Polarstern ist (fast) in Ruhe (siehe auch Abb. 38.5, S. 5).

b Wie könnte man auf einfache Weise abschätzen, wie lange das Bild in Abb. 4 belichtet wurde?

A8 Abbildung 5 zeigt einen Kreisel, der in einem Schwimmer so montiert ist, dass sich seine Achse nur horizontal bewegen kann. Durch die Erdrotation käme er nach einiger Zeit in Position II. Seine Achse würde also gekippt. Wie wird sich der Kreisel aber tatsächlich verhalten?

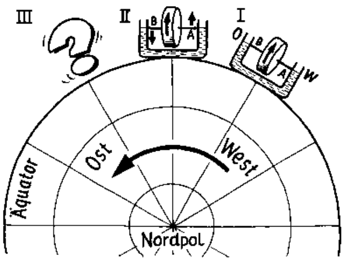

Abb. 5 (Grafik: Janosch Slama)

A9 Schätze die Masse der Sonne ab. Verwende dazu das Gravitationsgesetz (S. 39) und die Zentripetalkraft (S. 66, BB5), die auf die Erde wirkt. Der Abstand Erde-Sonne beträgt rund 150 Millionen Kilometer.

A10 Welche besonderen Konstellationen liegen in Abb. 6 a bis d vor? Warum ist nicht jedes Mal bei Neumond eine Sonnenfinsternis und bei Vollmond eine Mondesfinsternis? Überlege mit Hilfe der Abbildung.

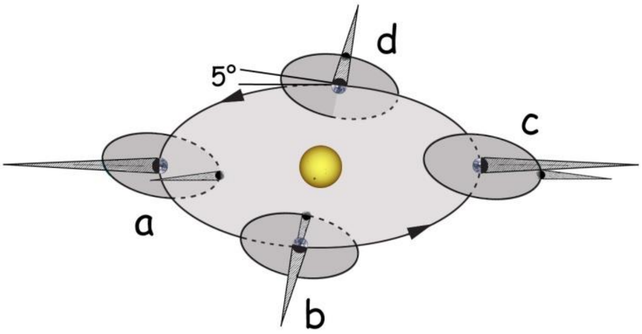

Abb. 6 (Grafik: Martin Apolin)

A11 Der Mond beschreibt näherungsweise eine Kreisbahn um die Erde, die wiederum eine Kreisbahn um die Sonne beschreibt. Welche Bahn beschreibt daher *der Mond um die Sonne* (siehe Abb. 7)?
a) die Krümmung der Bahn zeigt abwechselnd zur Sonne hin und von der Sonne weg; b) der Mond beschreibt eine Art Spiralbahn; c) die Mondbahn entspricht einem Vieleck.

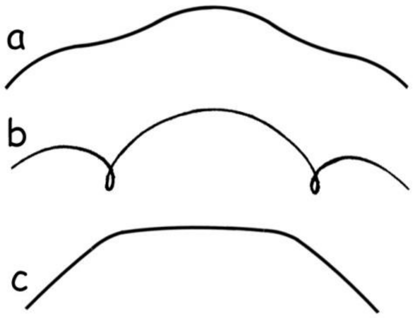

Abb. 7: Welche der hier schematisch dargestellten Mondbahnen beschreibt die tatsächliche am ehesten?

A12 a Berechne die Geschwindigkeit der Erde um die Sonne und des Mondes um die Erde. Welche Möglichkeit der Mondbahn in Abb. 7 scheidet dadurch aus? Die Daten für deine Berechnung findest du unter A12 c.

b Streng genommen ist die Formulierung „der Mond bewegt sich um die Erde“ falsch. Warum?

c Welche Beschleunigung übt die Erde auf den Mond aus? Welche Beschleunigung übt die Sonne auf den Mond aus? Was wird größer sein? Gib vor der Berechnung einen Tipp ab. Welche der Bahnen in Abb. 7 scheidet auf Grund deiner Ergebnisse nun aus?
Für deine Berechnung brauchst du das Newton'sche Gravitationsgesetz (Kap. 13.1, BB6) und folgende Daten: Masse

der Sonne $2 \cdot 10^{30}$ kg, Masse der Erde $6 \cdot 10^{24}$ kg, durchschnittliche Entfernung Sonne-Erde $1{,}5 \cdot 10^{11}$ m, durchschnittliche Entfernung Erde-Mond $3{,}8 \cdot 10^{8}$ m, Zeit für einen vollen Umlauf des Mondes um die Erde 27,3 Tage.

A13 Die Kraft der Sonne auf den Mond ist stets größer als die Kraft der Erde auf den Mond (A12 c). Warum zieht also die Sonne den Mond nicht zu sich?

A14 Angenommen, du besitzt Superkräfte. Ist es möglich, dass du von einem hohen Berg einen Apfel so schnell abwirfst, dass er die ganze Erde umrundet (wenn wir den Luftwiderstand vernachlässigen)?

Abb. 8 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 10.2, S. 96, BB5).

Das (klassische) Relativitätsprinzip

A15 In 2 bis 4 Milliarden Jahren (die Angaben differieren in der Literatur) wird unsere Milchstraße wahrscheinlich mit dem Andromedanebel (Abb. 9) kollidieren, der etwa 2,5 Millionen Lichtjahre von uns entfernt ist. Wie schnell fliegen wir demnach aufeinander zu? Berechne die Länge eines Lichtjahrs selber (c ist rund $3 \cdot 10^{8}$ m/s).

Abb. 9: Der imposante Andromedanebel. (Quelle: NASA)

A16 Du sitzt in einem fensterlosen Kasten, der sich mit gleicher Geschwindigkeit, also unbeschleunigt, dahinbewegt. Kannst du diese Bewegung irgendwie feststellen? Und wie ist das, wenn der Kasten in irgendeiner Weise beschleunigt (rechts)? Verwende für deine Antwort die Begriffe absolut und relativ!

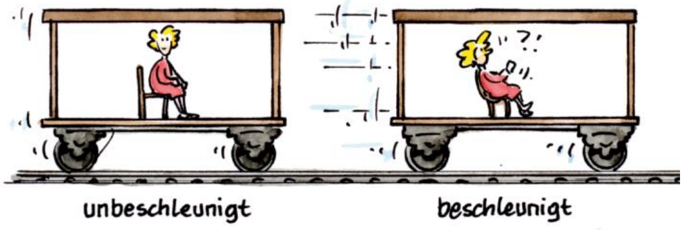

Abb. 10 (Grafik: Janosch Slama)

A17 Der Ruhezustand ist nichts anderes als ein Sonderfall der Bewegung! Was ist mit dieser Aussage gemeint?

A18 Die spezielle Relativitätstheorie vereinheitlicht Ruhe und Bewegung mit Elektrizität und Magnetismus! Was ist damit gemeint? Verwende für deine Erklärung Abb. 11!

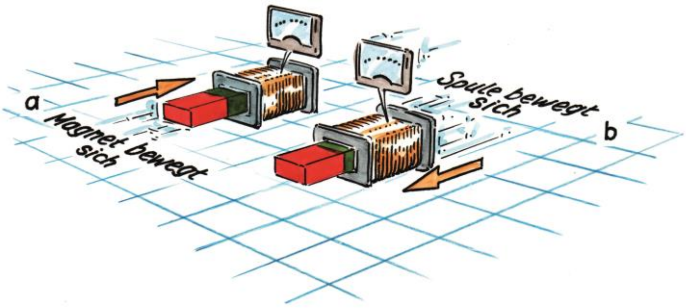

Abb. 11: Schiebt man einen Magneten in eine Spule (a) oder die Spule über einen Magneten (b), lässt sich eine Induktionsspannung messen. Aus deren Höhe lässt sich aber nicht ableiten, was sich bewegt. Es kommt nur auf die Relativgeschwindigkeit an. Das Relativitätsprinzip gilt also nicht nur für die Mechanik, sondern auch für Elektrodynamik und generell für alle Naturgesetze (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 2, S. 130).

A19 Ein altes Argument gegen das heliozentrische Weltbild war folgendes: Stell dir vor, du lässt eine Münze auf den Boden fallen. Während der für den Fall benötigten Zeit bewegt sich die Erde jedoch weiter, wodurch die Münze nicht *vor*, sondern z. B. *auf* deinem Fuß landen würde. Gegenstände fallen aber bekanntlich senkrecht. Das nahm man als ein Argument dafür, dass sich die Erde nicht um die Sonne drehen kann. Wie kann man dieses Argument entkräften?

A20 Wenn keine Beschleunigungen in irgendeiner Form auftreten, dann spricht man in der Physik von einem Inertialsystem. Man kann also sagen: Wenn du dich in einem völlig ruhig fliegenden Flugzeug befindest, dann befindest du dich in einem Inertialsystem. Streng genommen ist das aber eigentlich gar nicht richtig! Warum? Lies in Kapitel 43 (BB8) auf Seite 40 nach!

A21 Was wird von GALILEO GALILEI in folgendem Text aus dem Buch *Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das Ptolemäische und das Kopernikanische* (1632) beschrieben?

"Schließt Euch in Gesellschaft eines Freundes in einen möglichst großen Raum unter dem Deck eines großen Schiffes ein. Verschafft Euch dort Mücken, Schmetterlinge und ähnliches fliegendes Getier; sorgt auch für ein Gefäß mit Wasser und kleinen Fischen darin; hängt ferner oben einen kleinen Eimer auf, welcher tropfenweise Wasser in ein zweites enghalsiges darunter gestelltes Gefäß träufeln lässt. Beobachtet nun sorgfältig, solange das Schiff stille steht, wie die fliegenden Tierchen mit der nämlichen Geschwindigkeit nach allen Seiten des Zimmers fliegen. Man wird sehen, wie die Fische ohne irgend welchen Unterschied nach allen Richtungen schwimmen; die fallenden Tropfen werden alle in das untergestellte Gefäß fließen. Wenn Ihr Euerem Gefährten einen Gegenstand zuwerft, so braucht Ihr nicht kräftiger nach der einen als nach der anderen Richtung zu werfen, vorausgesetzt, dass es sich um gleiche Entfernungen handelt. Wenn Ihr, wie man sagt, mit gleichen Füßen einen Sprung macht, werdet Ihr nach jeder Richtung hin gleichweit gelangen. Achtet darauf, Euch aller dieser Dinge sorgfältig zu vergewissern, wiewohl kein Zweifel obwaltet, dass bei ruhendem Schiffe alles sich so verhält. Nun lasst das Schiff mit jeder beliebigen Geschwindigkeit sich bewegen: Ihr werdet - wenn nur die Bewegung gleichförmig ist und nicht hier- und dorthin schwankend - bei allen genannten Erscheinungen nicht die geringste Veränderung eintreten sehen. Aus keiner derselben werdet Ihr entnehmen können, ob das Schiff fährt oder stille steht. [...] Die Ursache dieser Übereinstimmung aller Erscheinungen liegt darin, dass die Bewegung des Schiffes allen darin enthaltenen Dingen, auch der Luft, gemeinsam zukommt. Darum sagte ich auch, man solle sich unter Deck begeben, denn oben in der freien Luft, die den Lauf des Schiffes nicht begleitet, würden sich mehr oder weniger deutliche Unterschiede bei einigen der genannten Erscheinungen zeigen."

A22 Im Jahr 1905 formulierte ALBERT EINSTEIN in einem Aufsatz in den Annalen der Physik folgendes:

„Die Gesetze, nach denen sich die Zustände der physikalischen Systeme ändern, sind unabhängig davon, auf welches von zwei relativ zueinander in gleichförmiger Translationsbewegung befindlichen Koordinatensystemen diese Zustandsänderungen bezogen werden.“

Was hat er damit gemeint?

Die Jagd nach dem Äther

A23 Zwei gleich schnelle Radfahrer bestreiten ein Rennen. Sie fahren gleich lange Strecken (SAS = SBS) in verschiedene Richtungen. Bei Windstille sind sie natürlich gleich schnell. Berechne allgemein, wie sich die Fahrzeiten verhalten, wenn der Wind aus der eingezeichneten Richtung kommt. Hilf dir mit Abb. 13!

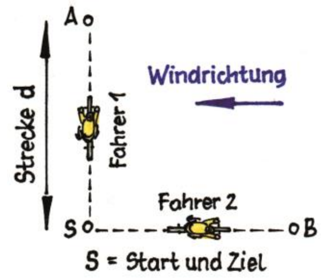

Abb. 12 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 39.16, S. 8, BB8).

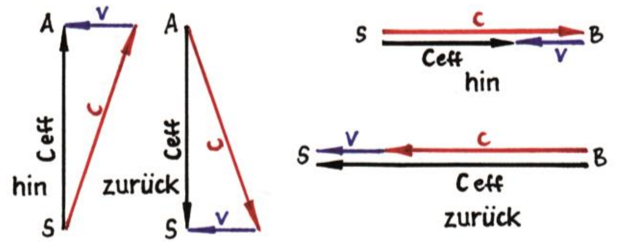

Abb. 13: c = Fahrgeschwindigkeit der Radfahrer relativ zur Luft, v = Windgeschwindigkeit relativ zum Boden und c_{eff} = Geschwindigkeit der Radfahrer relativ zum Boden

A24 Berechne A23 mit konkreten Zahlen. Nimm an, dass die beiden Radfahrer mit 30 km/h relativ zur Luft fahren, der Wind konstant mit 10 km/h weht und die Strecken SA und SB einen Kilometer lang sind. Wie groß ist der Zeitunterschied für den Hin- und Rückweg?

A25 Berechne den Laufzeitunterschied beim Michelson-Interferometer mit Hilfe von A23. Nimm die Strecke SA und SB großzügig mit 10 m an. Die Lichtgeschwindigkeit (c) beträgt etwa $3 \cdot 10^8$ m/s, die Geschwindigkeit der Erde um die Sonne, die den Ätherwind verursachen würde (v), 30 km/s.

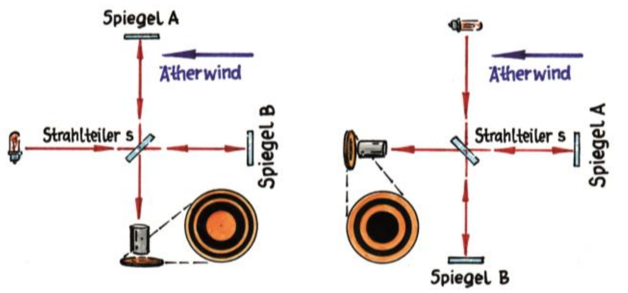

Abb. 14: Schematische Darstellung der Funktionsweise des Michelson-Interferometers (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 38.19, S. 9).

A26 Wie vielen Wellenlängen entspricht die unterschiedliche Laufzeit der beiden Strahlen im Michelson-Morley-Experiment? Nimm eine mittlere Wellenlänge von 650 nm an. Anders gefragt: Um wie viel sind beide Wellenzüge zum Schluss verschoben, wenn sie in gleicher Phase starten? Welche Gesamtverschiebung ergibt sich daraus im günstigsten Fall durch Drehung des Geräts?

A27 Begründe mit Hilfe der Ergebnisse aus A25 und A26, warum man diesen Versuchsaufbau gewählt hat. Warum wurde nicht versucht, den Laufzeitunterschied direkt zu messen?

A28 Einerseits wusste man Ende des 19. Jahrhunderts, dass Lichtwellen Transversalwellen sind, weil man sie polarisieren kann. Transversalwellen können sich aber nur in Festkörpern ausbreiten. Welche widersprüchlichen Eigenschaften hätten sich daraus für den Äther ergeben?

A29 Gegen Ende des 19. Jahrhunderts suchten die Experimentalphysiker intensiv nach dem sagenumwobenen Äther, durch dessen Schwingungen sich das Licht ausbreiten sollte. Trotz langwieriger Suche konnte dieser aber nicht gefunden werden. 1905 veröffentlichte Albert Einstein seine spezielle Relativitätstheorie, in der er erklärte, dass man den Äther deshalb nicht finden kann, weil es ihn gar nicht gibt. Warum konnte er das auf einmal behaupten? Wieso war der Äther plötzlich nicht mehr nötig? Hilf dir mit Kap. 28.2 in BB7!

Hilfe zu A1: Wie würde die Venus in einem geozentrischen Universum aussehen? Würde sich die Venusbahn innerhalb der Sonnenbahn befinden, dann müsste die Venus, weil sie sich ja immer in der Nähe der Sonne befindet und somit von hinten beleuchtet wird, entweder sichelförmig sein oder dunkel (so wie in Abb. 15a), ähnlich wie der Merkur, der sich in der Nähe der Sonne befindet. „Vollvenus" wäre aber unmöglich. Dafür müsste nämlich die Erde zwischen Venus und Sonne liegen.
Würde sich die Venusbahn aber außerhalb der Sonnenbahn befinden, dann wäre die Venus von vorne beleuchtet und müsste so aussehen wie in Abb. 15b. Dafür wäre in diesem Fall „Neuvenus" ausgeschlossen. Galilei konnte aber alle Phasen sehen, und das ist nur in einer heliozentrischen Welt möglich.

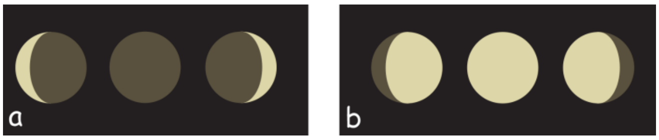

Abb. 15: a) Die Venus in einem geozentrischen System, wenn sie sich zwischen Erde und Sonne befände. b) Die Venus, wenn sie sich hinter der Sonne befände.

Hilfe zu A2 a: Der Abstand Erde-Sonne beträgt $1{,}5\cdot10^{11}$ m. Nehmen wir vereinfacht an, dass die Erdbahn kreisförmig ist. Der Umfang beträgt dann $2\cdot r\cdot\pi = 9{,}42\cdot10^{11}$ m. Dafür benötigt die Erde ein Jahr, also etwa $3{,}15\cdot10^{7}$ s. Die Geschwindigkeit der Erde um die Sonne beträgt daher rund 30.000 m/s oder 30 km/s.

Hilfe zu A2 b: Die Lichtgeschwindigkeit beträgt etwa $3\cdot10^{8}$ m/s. Die Bahngeschwindigkeit der Erde ist rund $3\cdot10^{4}$ m/s (siehe A2 a) und somit 1/10.000 oder 0,01 % der Lichtgeschwindigkeit. Wenn sich Licht 10 m weit bewegt, dann hat sich die Erde in dieser Zeit um 1 mm bewegt.

Hilfe zu A2 c: Im Prinzip ist es ganz ähnlich wie beim Schirm. Die senkrechte Geschwindigkeit wäre in diesem Fall die Lichtgeschwindigkeit und die vertikale Geschwindigkeit die der Erde um die Sonne. Der Winkel, um den man den Schirm bzw. das Fernrohr kippen muss, ist in Abb. 16 rechts eingetragen. Es gilt: $\tan\alpha = v_{\text{Erde}}/c$ und $\alpha = \arctan(v_{\text{Erde}}/c) = \arctan(10^{-4}) = 5{,}73\cdot10^{-3}\,° = 20{,}63''$.
Man muss also das Fernrohr um den winzigen Winkel von knapp 21 Bogensekunden kippen. Beachte: Eine Bogensekunde ist bloß der 3600ste Teil eines Grads. Das ist absurd wenig! Trotzdem: Schon im Jahre 1725 beobachtete der englische Astronom James Bradley eine solche Verschiebung

bei einem Stern, den man von London aus im Zenit beobachten konnte. Durch die Erdbewegung beschreiben die Sterne im Laufe eines Jahres kleine Ellipsen am Himmel, eine Miniaturkopie der Erdbahn. Aus der Bahngeschwindigkeit der Erde und dem Aberrations-Winkel konnte Bradley schon damals eine Schätzung der Lichtgeschwindigkeit abgeben, die nur etwa 1,2% über dem heute als richtig angesehenen Wert lag.

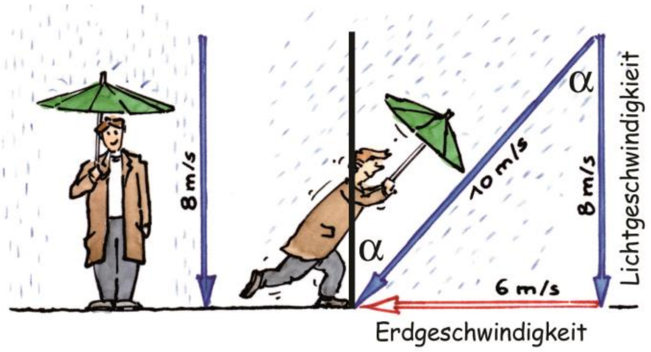

Abb. 16: Analogie zwischen der Aberration der Regentropfen und der Aberration des Lichts. Die Bewegung des Beobachters führt also zu einer scheinbaren Änderung der Lichtrichtung. Im Gegensatz zu den Tropfen wächst aber die Geschwindigkeit des Lichts nicht an, weil *c* nicht überschritten werden kann (Grafik: Janosch Slama; Abb. 3.13, S. 22, BB5).

Hilfe zu A3: Für ein extrem schnell bewegtes Raumschiff sind die Sterne nicht gleichmäßig verteilt, sondern erscheinen in dem Teil des Raums konzentriert, auf den sich das Raumschiff zubewegt (siehe Abb. 17). Warum? Weil sich, wie beim Regen oder beim Teleskop, die scheinbare Richtung, aus der das Licht kommt, in Bewegungsrichtung nach vorne verschiebt. Bei einer Reisegeschwindigkeit von knapp *c* würdest du einen Stern, der sich genau über dir befindet, um 45° in Bewegungsrichtung verschoben sehen.

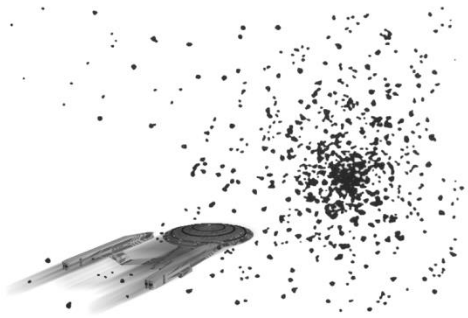

Abb. 17

Hilfe zu A4: Nehmen wir als extreme Positionen zwei Personen am Nord- und Südpol. Diese sind Gegenfüßler, also Antipoden (siehe Abb. 18). Die Person am Südpol sieht daher auch „unsere“ Mondphasen komplett kopfstehen. Der zunehmende Mond auf der Südhalbkugel sieht daher so aus wie der abnehmende Mond auf der Nordhalbkugel und umgekehrt.

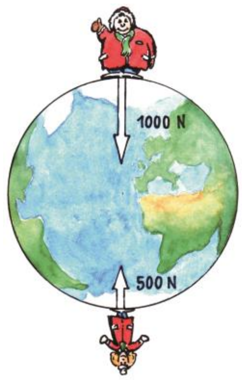

Abb. 18: Personen am Nord- und am Südpol sind Antipoden (Grafik: Janosch Slama).

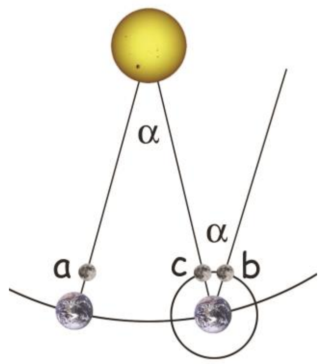

Abb. 19, zu A5: a) Startposition; Zusätzlich zum vollen Umlauf (b) muss sich der Mond noch um den Winkel α weiterdrehen (c), damit wir von der Erde aus wieder dieselbe Mondphase sehen (Grafik: Martin Apolin).

Hilfe zu A5 a: Nein, weil sich die Erde inzwischen selbst weiter um die Sonne gedreht hat. Der Mond muss sich zusätzlich zu den 360° noch um den Winkel α drehen, damit wieder dieselbe Mondphase zu sehen ist (siehe Abb. 18).

Hilfe zu A5 b: Die Überlegung ist die: Die Winkelgeschwindigkeit ist allgemein $\omega = \Delta\varphi/\Delta t$ und daher gilt $\Delta t = \Delta\varphi/\omega$. Die Erde dreht sich in einem synodischen Monat um den Winkel α um die Sonne. Daher gilt: $T_E = \alpha/\omega_E$. Der Mond dreht sich in einem synodischen Monat einmal um die Erde und zusätzlich noch um den Winkel α. Es gilt daher $T_M = (2\pi+\alpha)/\omega_M$. Weil beide Zeiten einem synodischen Monat entsprechen, kann man sie gleichsetzen: $\frac{\alpha}{\omega_E} = \frac{2\pi+\alpha}{\omega_M}$. Daher gilt $\alpha = \frac{\omega_E}{\omega_M}(2\pi + \alpha)$. Der Einfachheit halber ersetzen wir den Ausdruck ω_E/ω_M durch *x*. Wir erhalten dann $\alpha = x(2\pi + \alpha) = 2\pi x + \alpha x$. Durch Umformen erhalten wir $\alpha = \frac{2\pi x}{(1-x)}$.

Sind wir genauer und nehmen für ein Jahr 365,25 Tage. Für ω_E ergibt sich dann $1{,}99 \cdot 10^{7}$ s^{-1}. Weil ein siderischer Monat 27,322 Tage hat, erhalten wir für ω_M $2{,}66 \cdot 10^{-6}$ s. Wenn wir nun in die Formel einsetzen, erhalten wir für α 0,508 rad oder 29,1°. Daher ist $T_E = \alpha/\omega_{Erde}$ = 2551481 s = 29,53 Tage.

Hilfe zu A6: Das stimmt nicht, auch wenn es seit Jahrhunderten so erzählt wird. Man hat wohl angenommen, dass man das Sonnenlicht dadurch irgendwie ausblenden kann. Die Helligkeit des Tageshimmels kommt jedoch von der Streuung des Sonnenlichts, und diese lässt sich durch den Blick durch eine Röhre nicht rückgängig machen.

Hilfe zu A7 a: Blickt man längere Zeit auf den Sternhimmel, so drehen sich die Sterne scheinbar. Nur zwei Punkte, genau über den Polen der Erde, sind immer in Ruhe. Man sieht, dass sich selbst der Polarstern etwas bewegt hat (Abb. 4). Warum? Weil er nicht exakt im Norden steht, sondern etwa 0,8° vom Himmelsnordpol entfernt. Momentan! Denn durch die Präzession der Erdachse wandern die Himmelspole. Wodurch wird diese Präzession hervorgerufen? Die Ursache liegt darin, dass die Erde durch ihre Eigenrotation etwas abgeplattet ist. Der Äquatordurchmesser ist um 0,3 % oder 43 km größer als der Poldurchmesser. Außerdem ist die Erdachse um etwa 66,5° gegen die Erdbahnebene geneigt (bzw. um 23,5° gegen die Senkrechte). Die Erde ist daher von Sonne und Mond aus gesehen nicht symmetrisch, und beide zerren am Äquatorwulst. Ohne Drehung würde sich dadurch die Erdachse aufrichten. Die Erde ist aber ein riesiger Kreisel. Die Achse richtet sich daher nicht auf, sondern weicht diesem Drehmoment in Rotationsrichtung rechtwinkelig aus und vollführt eine Präzessionsbewegung. Sehr gemächlich allerdings: Ein voller Umlauf der Erdachse dauert nämlich 25.850 Jahre. Diese Zeitdauer nennt man auch Platonisches Jahr. In künftiger Zeit werden daher andere „Polarsterne" eine Rolle spielen.

Abb. 20: Die Wanderung des scheinbaren Himmelsnordpols im Laufe von rund 26.000 Jahren. Erst dann wird wieder der Polarstern seinem Namen gerecht (Grafik: Janosch Slama).

Hilfe zu A7 b: Dazu muss man den Öffnungswinkel des Kreissektors messen, der durch die Bahn eines Sternes und den Drehpunkt aufgespannt wird (siehe Abb. 21). Dieser Winkel beträgt 30°. In 24 h rotiert die Erde um 360°, pro Stunde daher um 15°. In unserer Aufnahme hat sich die Erde um 30° gedreht, also wurde diese 2 Stunden lang belichtet.

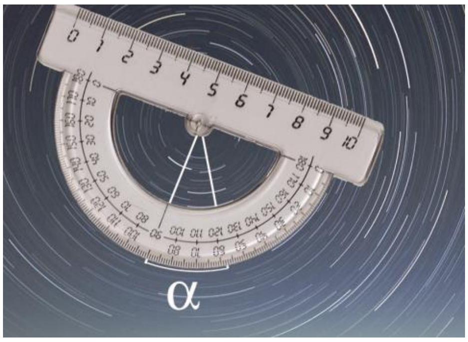

Abb. 21: Die Sterne haben sich um 30° gedreht (Grafik: Martin Apolin)

Hilfe zu A8: Der Kreisel weicht der Bewegung durch eine Präzessionsbewegung aus. Die Achse des Kreisels dreht sich daher nicht in der Papierebene, sondern aus der Papierebene heraus (Abb. 22 III). Wie weit wird sich die Kreiselachse drehen? So weit, bis diese in Nord-Süd-Richtung steht. Warum? Weil dann nämlich die Achse des Kreisels nur mehr parallel verschoben, aber nicht mehr gedreht wird, und deshalb keine Präzessionsbewegung mehr auftritt. Ein rotierender Kreisel ist daher ein Kreiselkompass, der den Vorteil hat, nicht durch Magnetfelder beeinflusst zu werden.

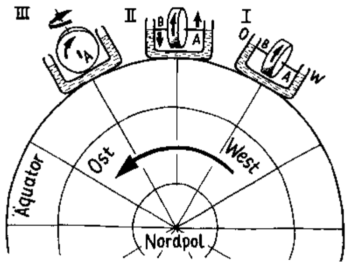

Abb. 22 (Grafik: Janosch Slama)

Hilfe zu A9: Die Winkelgeschwindigkeit der Erde um die Sonne ist $\omega = 2\pi/T$, wobei T einem Jahr in Sekunden entspricht. T ist also 365·60·60·24 s ≈ $3{,}15 \cdot 10^7$ s. Die Zentripetalkraft wird durch die Gravitationskraft hervorgerufen. Man kann daher beide Kräfte gleichsetzen und nach M_{Sonne} auflösen:

$$\frac{G M_{Erde} M_{Sonne}}{r^2} = M_{Erde}\,\omega^2 r \rightarrow M_{Sonne} = \frac{\omega^2 r^3}{G} = \frac{4\pi^2 r^3}{G T^2}.$$

Wenn man die bekannten Werte einsetzt, erhält man für M_{Sonne} $2 \cdot 10^{30}$ kg, was sehr gut dem in der Literatur angeführten Wert entspricht.

Hilfe zu A10: a) Neumond; b) Sonnenfinsternis; c) Vollmond; d) Mondesfinsternis. Die Bahn des Mondes um die Erde ist um etwa 5° zur Erdbahn (Ekliptik) geneigt. Deshalb liegt bei Voll- und Neumond meistens der Mond ober- oder unterhalb der Erdbahn, und daher kommt es dann zu keinen Finsternissen.

Hilfe zu A11: Die Lösung ist c. Die Mondbahn entspricht am ehesten einem Vieleck. Allerdings ist der Effekt in Abb. 8 übertrieben dargestellt. Eine nähere Erklärung findest zu in der Hilfe zu A12.

Hilfe zu A12 a: Der Umfang der Erdbahn beträgt $2 \cdot \pi \cdot 1{,}5 \cdot 10^{11}$ m = $9{,}42 \cdot 10^{11}$ m, die Umlaufzeit $365 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24$ s = $3{,}15 \cdot 10^{7}$ s. Die Tangentialgeschwindigkeit der Erde beträgt daher rund $3 \cdot 10^{4}$ m/s oder 30 km/s. Der Umfang der Mondbahn beträgt $2{,}4 \cdot 10^{9}$ m, die Umlaufzeit $2{,}36 \cdot 10^{6}$ s. Die Tangentialgeschwindigkeit des Mondes beträgt daher rund 10^{3} m/s oder 1 km/s. Die Erde ist also rund 30-mal so schnell um die Sonne unterwegs wie der Mond um die Erde. Daher scheidet b in Abb. 8 aus. Eine Schleifenbahn mit rückläufiger Bewegung würde nämlich voraussetzen, dass sich der Mond schneller um die Erde bewegt als die Erde um die Sonne.

Hilfe zu A12 b: Erde und Mond bewegen sich um den gemeinsamen Schwerpunkt, das Baryzentrum (siehe S. 106, Abb. 10.4, BB5).

Hilfe zu A12 c: Durch Gleichsetzen von $F = mg$ mit dem Gravitationsgesetz und Umformen erhältst du $g = GM/r^2$. Für $g_{S\text{-}M}$ ergibt sich dann rund $6 \cdot 10^{-3}$ m/s². Du kannst dabei vereinfacht für r den Abstand Sonne-Erde einsetzen, weil die variable Mondentfernung auf Grund der großen Entfernung Sonne-Erde praktisch keine Rolle spielt. Für $g_{E\text{-}M}$ ergeben sich rund $2{,}8 \cdot 10^{-3}$ m/s². Die Sonne zieht den Mond also mehr als doppelt so stark an wie die Erde. Ist das nicht verblüffend?
Damit scheidet Bahn a in Abb. 8 aus. Diese würde voraussetzen, dass die Anziehungskraft der Erde auf den Mond größer ist als die der Sonne auf den Mond. Nur dann könnte es zu einer Krümmung der Mondbahn von der Sonne weg kommen (konvexe Krümmung).
Tatsächlich entspricht die Mondbahn schematisch gesehen c in Abb. 7. Sie ist, salopp gesagt, eine Art 12-Eck, weil das Jahr rund 12 synodische Monate hat, und daher immer konkav, also immer zur Sonne hin gekrümmt. In Abb. 23 siehst du eine maßstabsgetreue Abbildung der Mondbahn.

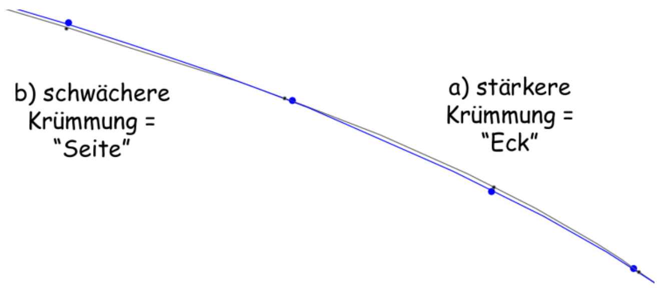

Abb. 23: Maßstabsgetreue Bahn von Erde und Mond um die Sonne. a) Die Erde befindet sich zwischen Mond und Sonne. Der Mond erfährt eine stärkere Beschleunigung, die Bahn um die Sonne ist stärker gekrümmt. Das entspricht dem „Eck“ des 12-Ecks. b) Der Mond befindet sich zwischen Erde und Sonne. Er erfährt dadurch in Summe eine schwächere Beschleunigung, die Bahn um die Sonne ist schwächer gekrümmt. Das entspricht der „Seite“ des 12-Ecks.

Hilfe zu A13: Das Baryzentrum Erde-Mond bewegt sich näherungsweise auf einer Kreisbahn um die Sonne. Der Mond fällt nicht auf die Sonne, weil er relativ zu dieser eine sehr hohe Tangentialgeschwindigkeit besitzt. Schließlich fällt ja auch die Erde nicht auf die Sonne, obwohl diese die Erde viel stärker anzieht als der Mond.

Hilfe zu A14: Angeblich beobachtete NEWTON unter einem Baum liegend den Mond, als ihm ein Apfel auf den Kopf fiel. Und da hatte er die großartige Idee: Er verstand in diesem Augenblick die Bewegung des Mondes als ein „Fallen um die Erde“. Er kam zu dem Schluss, dass die Umlaufbahn des Mondes und der Fall des Apfels auf dieselben Gesetzmäßigkeiten zurückzuführen sind, nämlich auf die Gravitation zwischen allen Gegenständen. Wenn du einen Apfel einfach loslässt, dann fällt er auf Grund der Gravitation zu Boden. Wenn du ihn wirfst, fliegt er umso weiter, je schneller er ist. Der Grund, dass er schließlich doch zu Boden fällt, ist immer noch derselbe: die Gravitation der Erde. Bei einer horizontalen Abwurfgeschwindigkeit von knapp 8 km/s passiert nun aber etwas Verblüffendes: Der Apfel fliegt auf einer Kreisbahn um die Erde. Der Apfel befindet sich dabei immer noch im freien Fall, er fliegt aber genau parallel zur Erdoberfläche! Mit der nötigen Kraft könnte man daher tatsächlich einen Apfel um die Erde werfen.

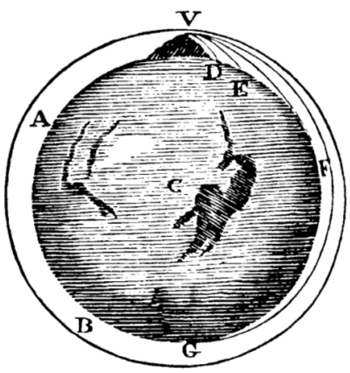

Abb. 24 (Originalzeichnung von Newton)

Hilfe zu A15: Ein Jahr hat $60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365$ s, also etwa $3{,}15 \cdot 10^{7}$ s. Ein Lichtjahr entspricht daher der Entfernung von etwa $3{,}15 \cdot 10^{7}\,\text{s} \cdot 3 \cdot 10^{8}\,\text{m/s} \approx 10^{16}$ m. Die Entfernung Milchstraße - Andromedanebel beträgt daher $2{,}5 \cdot 10^{22}$ m. 2 Milliarden Jahre sind etwa $6{,}3 \cdot 10^{16}$ s. In diesem Fall beträgt die

Relativgeschwindigkeit knapp 400 km/s. Wenn man 4 Milliarden annimmt, dann beträgt die Geschwindigkeit immer noch rund 200 km/s.

Hilfe zu A16: Bei unbeschleunigten Bewegungen merkst du nicht, dass du dich bewegst! Oder, etwas physikalischer: Bei unbeschleunigten Bewegungen laufen mechanische Experimente normal ab. Geschwindigkeiten sind daher relativ! Wie groß sie gemessen werden, ist eine Frage des Bezugssystems. Eine Tasse am Tisch im Flugzeug bewegt sich aus deiner Sicht nicht, aus der Sicht einer Person am Boden mit 250 m/s. Welche Ansicht ist richtig? Beide! Es ist eben nur eine Frage des Bezugssystems! Bei Beschleunigungen (also Geschwindigkeitsänderungen) ist das anders. Beschleunigungen sind absolut. Absolut bedeutet „losgelöst“. Man muss also nicht vergleichen. Wenn du in einem Kasten sitzt, der beschleunigt, dann kannst du das spüren und natürlich auch messen. Beschleunigung kannst du ganz alleine im tiefsten Weltall messen, ohne irgendeinen Bezugspunkt.

Hilfe zu A17: Unbeschleunigte Bewegungen sind relativ. Wie groß die gemessene Geschwindigkeit eines Objekts ist, hängt von der Wahl des Bezugssystems ab. Wenn man sich mit dem Objekt mit bewegt, hat dieses die Geschwindigkeit null. Weil es unendlich viele Möglichkeiten gibt, das Bezugssystem so zu wählen, dass die Geschwindigkeiten größer als null ist, aber nur eine Möglichkeit dafür, dass die Geschwindigkeit exakt null ist, ist der Ruhezustand ein Sonderfall der Bewegung.

Hilfe zu A18: Ruhe und gleichförmige Bewegung sind äquivalent (siehe A17). Daher darf es auch keinen Unterschied machen, ob die Induktionsspannung durch die Bewegung des Magneten, der Spule oder eine Kombination beider Bewegungen zu Stande kommt. Die Induktion ist ein elektromagnetisches Phänomen. Daher kann man sagen, dass die spezielle Relativitätstheorie Ruhe und Bewegung mit Elektrizität und Magnetismus vereint!

Hilfe zu A19: Wenn wir auf der Erde einen Gegenstand fallen lassen, so fällt er deswegen senkrecht, weil sich im Augenblick des Loslassens auch die Erde und der ganze Körper in dieselbe Richtung bewegen. Es ist ähnlich, als würde man in einem ruhig fahrenden Zug oder einem ruhig fliegenden Flugzeug eine Münze fallen lassen. Auch in diesem Fall fällt die Münze senkrecht.

Hilfe zu A20: Im ruhig fliegenden Flugzeug oder ruhig fahrenden Zug gilt der Trägheitssatz nur in horizontaler Richtung, nicht aber vertikal. Salopp könnte man sagen, dass solche Systeme „zweidimensionale Inertialsysteme“ sind. Gibt es Systeme, bei denen der Trägheitssatz in allen drei Dimensionen gilt? Ja, frei fallende bzw. im All schwebende Systeme (siehe Abb. 25).

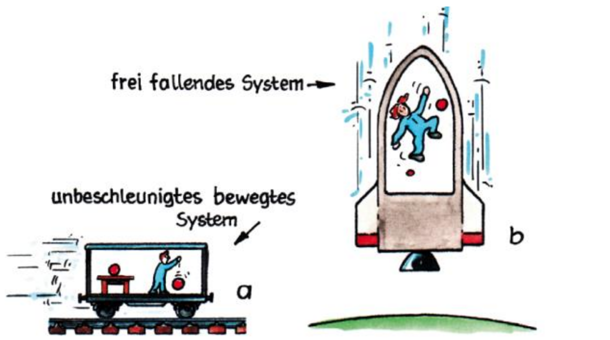

Abb. 25: Eine Kugel, die am Tisch liegt, bleibt liegen. Eine Kugel, die du auslässt, wird vertikal beschleunigt. Der Trägheitssatz ist in vertikaler Richtung nicht erfüllt. b) Alle Objekte, die in Ruhe sind, bleiben in Ruhe. Der Trägheitssatz ist in allen Richtungen erfüllt. (Grafik Janosch Slama; siehe Abb. 43.10, S. 41).

Hilfe zu A21: GALILEI beschreibt das klassische Relativitätsprinzip.

Hilfe zu A22: Der Aufsatz, aus dem dieses Zitat entnommen ist, trug den Titel *Von der Elektrodynamik bewegter Körper* und ist heute als spezielle Relativitätstheorie bekannt. Das Zitat könnte man so "übersetzen": Bei unbeschleunigten Bewegungen laufen alle Experimente
normal ab. Oder, etwas wissenschaftlicher formuliert: Die Naturgesetze werden in allen Inertialsystemen durch dieselben Gleichungen beschrieben.

Hilfe zu A23: Aus der allgemeinen Formel $v = s/t$ folgt $t = s/v$. v ist in unserem Fall c_{eff}. Für den Radfahrer, der die Strecke über A nimmt, weht der Wind immer quer zur Fahrtrichtung. Daher kann man den Satz von Pythagoras anwenden, um c_{eff} zu berechnen. Es gilt dann $t_{SAS} = t_{SA} + t_{AS} = \frac{d}{c_{eff}} + \frac{d}{c_{eff}} = \frac{d}{\sqrt{c^2-v^2}} + \frac{d}{\sqrt{c^2-v^2}} = \frac{2d}{\sqrt{c^2-v^2}} = \frac{2d}{c}\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$.
Für den Radfahrer, der die Strecke über B nimmt, gilt $t_{SBS} = t_{SB} + t_{BS} = \frac{d}{c-v} + \frac{d}{c+v} = \frac{d(c+v)}{(c-v)(c+v)} + \frac{d(c-v)}{(c-v)(c+v)} = \frac{dc+dv+dc-dv}{c^2-v^2} = \frac{2dc}{c^2-v^2} = \frac{2dc}{c^2}\frac{1}{1-v^2/c^2} = \frac{2d}{c}\frac{1}{1-v^2/c^2}$.
Es gilt also $t_{SAS}\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = t_{SBS}$. Der Fahrer über B braucht daher länger.

Hilfe zu A24: Zunächst ist es günstig, die Geschwindigkeiten in m/s umzurechnen: *c* = 30 km/h = 30/3,6 m/s = 8,3 m/s und *v* = 10 km/h = 2,8 m/s. Der Fahrer, der die Strecke über A nimmt, benötigt die Zeit $t_{SAS} = \frac{2d}{c}\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \approx 256$ s, der Fahrer, der die Strecke über B nimmt, benötigt die Zeit $t_{SBS} = \frac{2d}{c}\frac{1}{1-v^2/c^2} \approx 272$ s. Die Differenz beträgt etwa 16 s. Oder anders gerechnet: $t_{SAS}\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = t_{SBS}$. Wenn t_{SAS} 256 s beträgt, dann muss t_{SBS} daher 272 s betragen.

Hilfe zu A25: Der Lichtstrahl über A benötigt die Zeit $t_{SAS} = \frac{2d}{c}\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \approx 6{,}666666700 \cdot 10^{-8}$ s, der Lichtstrahl über B die Zeit $t_{SBS} = \frac{2d}{c}\frac{1}{1-v^2/c^2} \approx 6{,}666666733 \cdot 10^{-8}$ s. Die Differenz beträgt also nur $3{,}33 \cdot 10^{-16}$ s.

Hilfe zu A26: Aus *c = s/t* folgt *s = c·t*. Bei einem Laufzeitunterschied von $3{,}3 \cdot 10^{-16}$ s ergibt sich eine Verschiebung der Wellenzüge um $3 \cdot 10^{8}$ m/s·$3{,}3 \cdot 10^{-16}$ s $\approx 10^{-7}$ m. 650 nm = $6{,}5 \cdot 10^{-7}$ m. Die Verschiebung beträgt also rund 1/6 der Wellenlänge. Wenn man das Gerät um 90° dreht, dann ist der andere Strahl um diesen Wert verschoben. Das macht also in Summe eine Verschiebung von rund 1/3 Wellenlänge. Diese Verschiebung müsste das Interferenzmuster deutlich verändern.

Hilfe zu A27: Um die Lichtlaufzeit direkt zu messen, müsste die Uhr eine Genauigkeit von mindestens 10^{-16} s aufweisen. In diesen Bereich kommen die genauesten modernen Atomuhren. Ende des 19. Jahrhunderts waren solche Genauigkeiten natürlich vollkommen illusorisch. Deshalb kam nur eine indirekte Messung über die Veränderung des Interferenzmusters in Frage.

Hilfe zu A28: Der Äther müsste ja den gesamten Raum erfüllen. Nachdem er aber nicht direkt zu bemerken ist, dürfte er sich vom Vakuum nicht unterscheiden. Auf der anderen Seite müsste er aber ein Festkörper sein, weil er die Transversalwellen des Lichts transportiert. Der Äther müsste daher quasi ein "hartes Vakuum" sein, und das ist schon sehr absurd.

Hilfe zu A29: Warum brauchte man 1905 plötzlich den Äther nicht mehr, um die Lichtausbreitung durchs Vakuum zu erklären? Das ist auf einen Artikel Einsteins über den Fotoeffekt (Kap. 28.2, BB7) zurückzuführen, den er kurz vor der Speziellen Relativitätstheorie veröffentlichte.
Darin konnte er zeigen, dass Licht nicht nur Wellen-, sondern auch Teilcheneigenschaften aufweist. Und wenn man sich Licht als einen Strom von Teilchen vorstellt, ist es ganz logisch, dass es problemlos das Vakuum durchqueren kann. Erst diese Erkenntnis ermöglichte das Entwickeln der SRT.