LK Physik Kursarbeit Nr.1 – Lösung

Aufgabe I: Wellenoptik

Hilfsmittel: Tafelwerk
Taschenrechner

1. Doppelspaltversuch

1.1 Aus „Wikipedia", der freien Enzyklopädie: *Die Korpuskeltheorie (auch Emissionstheorie oder ballistische Lichttheorie) ist eine vor allem Isaac Newton zugeschriebene physikalische Theorie, nach welcher das Licht aus kleinsten Teilchen oder Korpuskeln (Körperchen) besteht.*

Beschreiben Sie Aufbau und Beobachtung des Doppelspaltversuchs von Thomas Young aus dem Jahre 1802 mit weißem Licht und mit Laserlicht.

Aufbau: Licht wird zunächst gebündelt und dann durch einen Spalt geschickt. Anschließend passiert das Licht einen Doppelspalt und fällt auf einen Schirm.

Beobachtung:

1. Hinter dem ersten Spalt wird das Licht aufgefächert.

2. Mit Laserlicht entstehen am Schirm Interferenzmuster mit Maxima und Minima, die zum Rand hin in der Intensität schwächer werden.

3. Bei Wiederholung des Versuchs mit weißem Licht entsteht ein heller Bereich in der Mitte, der durch dunkle Streifen mit gleichem Abstand unterbrochen ist. Die Ränder der weißen Streifen sind farbig.

Erklären Sie die Unterschiede der Beobachtungen bei weißem Licht und Laserlicht.

Allgemein: Die Wellen werden hinter dem ersten Spalt gebeugt, das Licht wird aufgefächert.Am Doppelspalt werden das Licht wieder gebeugt. Die Wellen hinter den beiden Spalten interferieren und erzeugen die sichtbaren Interferenzmuster.

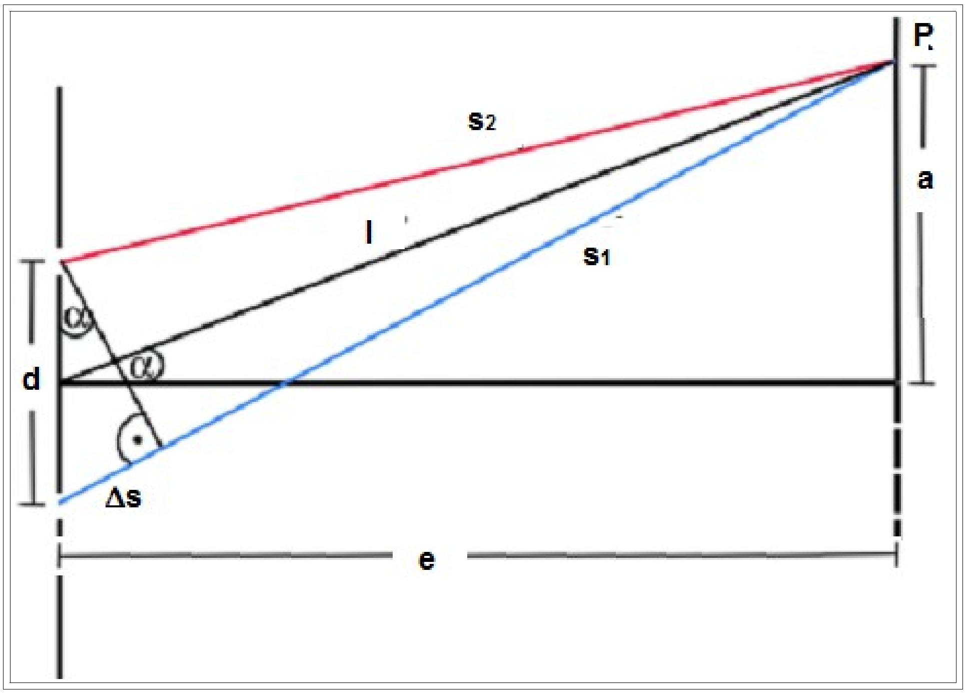
Laserlicht: Da Laserlicht kohärent (lange frequenzreine Wellenzüge) ist, entstehen scharfe Maxima und Minima.

Weißes Licht: Enthält viele Frequenzen, die jeweils anders gebeugt werden. In den breiten Maxima überlagern sie sich zu weißem Licht. Nur an den Rändern zu den Minima sind die getrennten Wellenlängen sichtbar.

Erklären Sie, warum die Beobachtungen dieses Versuches im Widerspruch zur Korpuskeltheorie stehen.

Die Beobachtungen sind nur mit Interferenz zu erklären. Dieses Phänomen tritt nur bei Wellen auf.

Sei der Spaltabstand d und e die Entfernung vom Doppelspalt zum Schirm. Wir betrachten einen Punkt P auf dem Schirm mit dem Abstand a zur optischen Achse. P liegt im Winkel α zur optischen Achse, gemessen von der Mitte zwischen den beiden Spalten. Der Weg der Lichtstrahlen zum Punkt P sei s_1 bzw. s_2. Fertigen Sie eine entsprechende Skizze an.



Stellen Sie die Bedingungen für den Winkel α_n in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ und dem Spaltabstand d auf, unter dem Maxima und Minima n-ter Ordnung auftreten.

Skizze: $\sin(\alpha)=\frac{\Delta s}{d} \Leftrightarrow \Delta s=d\sin(\alpha)$ Bedingung für konstruktive Interferenz: $\Delta s=n\lambda$ mit $n=0,1,2,3,\ ...$

Gleichsetzen: $d\sin(\alpha)=n\lambda \Leftrightarrow \sin(\alpha)=\frac{n\lambda}{d}$ mit $n=0,1,2,3,\ ...$

Leiten Sie die Beziehung $n\lambda=d\cdot\frac{a_n}{e}$ für ein Maximum n-ter Ordnung her unter der Annahme, dass $a_n \ll e$.

Skizze: $l=\sqrt{e^2+a_n^2}$ $\sin(\alpha_n)=\frac{a_n}{l}=\frac{a_n}{\sqrt{e^2+a_n^2}}$

Damit $n\lambda=d\sin(\alpha)=d\cdot\frac{a_n}{\sqrt{e^2+a_n^2}}$ Mit $a_n \ll e$ folgt $n\lambda=d\cdot\frac{a_n}{\sqrt{e^2}}=d\cdot\frac{a_n}{e}$

Berechnen Sie für das Licht eines HeNe-Laser (Wellenlänge 633 nm) den nötigen Spaltabstand, damit das Maximum 2. Ordnung unter einem Winkel von $\alpha_2 = 8°$ erscheint. (Kontrollergebnis: $d = 9{,}1\,\mu m$)

$$\sin(\alpha) = \frac{n\lambda}{d} \Leftrightarrow d = \frac{n\lambda}{\sin(\alpha)} = \frac{2 \cdot 633 \cdot 10^{-9}\,m}{\sin(8°)} = 9{,}0966 \cdot 10^{-6}\,m = 9{,}1\,\mu m$$

A: Der Spaltabstand beträgt 9,1 µm.

Berechnen Sie den Abstand zweier benachbarter Maxima, wenn der Abstand zum Schirm $e = 2\,m$ beträgt.

$$\Delta a = a_{n+1} - a_n = n\lambda\frac{e}{d} - (n+1)\lambda\frac{e}{d} = \lambda\frac{e}{d} = 633 \cdot 10^{-9}\,m \cdot \frac{2\,m}{9{,}0966 \cdot 10^{-6}\,m} = 0{,}1392\,m = 14\,cm$$

A: Der Abstand beträgt 14 cm.

<u>2. Auflösungsvermögen</u>

<u>2.1</u> Geben Sie eine gültige Definition für das Auflösungsvermögen des Auges an.

A: Das Auflösungsvermögen eines optischen Gerätes (auch des Auges) ist die Fähigkeit, zwei unter einem kleinen Winkel $\Delta\alpha$ erscheinende Gegenstände, getrennt abzubilden. Je kleiner $\Delta\alpha$ ist, desto größer ist das Auflösungsvermögen.

Die Andromeda-Galaxie hat einen Durchmesser von $d = 200.000\,ly$ $(1\,ly = 9{,}461 \cdot 10^{15}\,m)$. Wäre die Andromeda-Galaxie über ihren gesamten Durchmesser gleich hell, würde sie sich über einen Sehwinkel von $\alpha = 4{,}58°$ am Nachthimmel erstrecken. Zeigen Sie mit einer Rechnung, dass die Andromeda-Galaxie rund 2,5 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt ist.

$$r = \frac{d}{2\tan(\alpha/2)} = \frac{200000\,ly}{2\tan(4{,}58°/2)} = 2{,}5 \cdot 10^6\,ly$$

A: Andromeda ist 2,5 Millionen Lichtjahre entfernt.

Tatsächlich ist nur der innere Bereich mit einem Durchmesser von $d_z = 600\,ly$ hell genug, um bei guter Sicht mit bloßem Auge sichtbar zu sein. Erläutern Sie die physikalischen Grundlagen, warum das optische Auflösungsvermögen unseres Auges (und aller anderen optischen Instrumente) prinzipiell begrenzt ist.

- Pupille ist eine Kreisblende
- Eine Kreisblende bewirkt Beugung
- Der Abstand der Interferenzmaxima hängt von der Wellenlänge und der Entfernung ab.
- Liegen die Maxima übereinander, ist eine Unterscheidung nicht mehr möglich

Beurteilen Sie anhand einer Rechnung, ob man mit bloßem Auge die Andromeda-Galaxie als ausgedehntes Objekt beobachten kann. (Durchmesser Pupille: $3\,mm,$ mittlere Wellenlänge des sichtbaren Lichts von Andromeda: $550\,nm,$ Korrekturfaktor Kreisblende: $1{,}22$)

Mit $\Delta\alpha \geq 1{,}22\frac{\lambda}{d}$ und $\Delta\alpha = \frac{\Delta x}{g}$ folgt: $\frac{\Delta x}{g} \geq 1{,}22\frac{\lambda}{d}$ Also $\frac{600\,ly}{2{,}5 \cdot 10^6\,ly} \geq 1{,}22\frac{550 \cdot 10^{-9}\,m}{3 \cdot 10^{-3}\,m}$

$\Leftrightarrow 2{,}4 \cdot 10^{-4} \geq 1{,}83 \cdot 10^{-4}$ **Die Ungleichung ist erfüllt, also kann man die Andromeda-Galaxie mit bloßem Auge als ausgedehntes Objekt sehen.**

LK Physik Kursarbeit Nr.1 – Lösung

Aufgabe II: Atomphysik und SRT

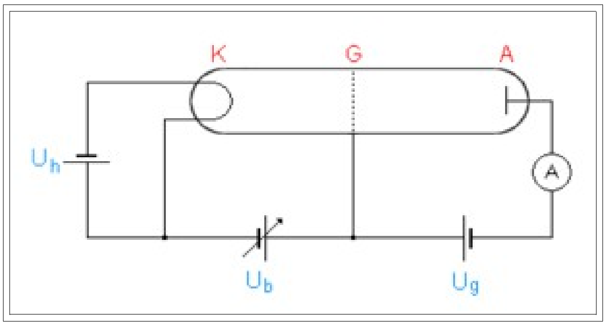
Hilfsmittel: Tafelwerk
Taschenrechner

1. Franck-Hertz-Versuch

1.1 Erläutern Sie den Aufbau des Franck-Hertz-Versuchs mit Quecksilber. Fertigen Sie dazu auch eine beschriftete Skizze an.

- Im Rohr befindet sich aufgeheiztes Hg-Gas
- Die Glühkathode emittiert Elektronen, die durch die Spannung U_B zwischen Kathode und Gitter beschleunigt werden.
- Zwischen Gitter und Auffänger ist die kleine Gegenspannung U_G von etwa 1V . Nur Elektronen mit E_{kin} > 1 eV gelangen somit zum Auffänger.

Der Auffängerstrom wird mit einem sehr empfindlichen Strommesser registriert.

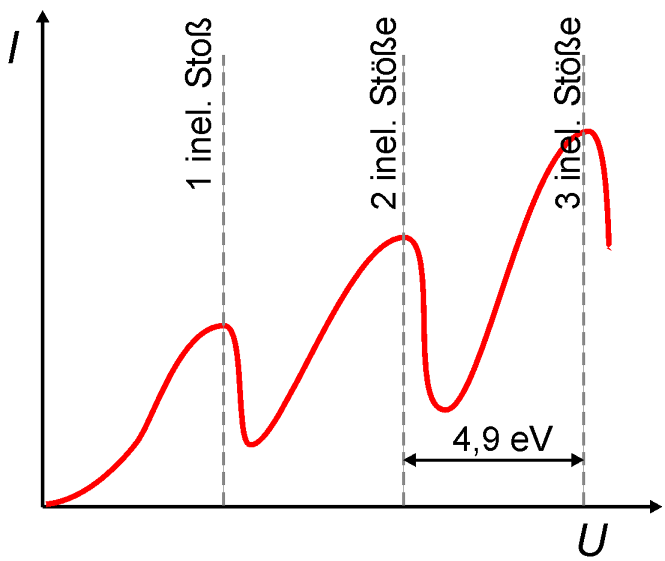


Skizzieren Sie den charakteristischen Verlauf der gemessenen Stromstärke in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung. Erklären Sie die physikalischen Grundlagen anhand verschiedener Bereiche im Diagramm.

1. Bereich: Die Elektronen stoßen mit den Hg-Atomen elastisch. Mit zunehmender Spannung können immer mehr Elektronen die Gegenspannung überwinden und erreichen den Auffänger → Stromanstieg.

2. Bereich: Einige Elektronen haben soviel Energie, dass sie ein Hg-Atom anregen können (inelastischer Stoß). Dabei verlieren sie ihre kinetische Energie und können das Gegenfeld zum Auffänger nicht mehr überwinden → Stromabfall. Anschließend nähert sich die Anregungszone der Kathode. Die Elektronen werden über einen längeren Weg bis zum Gitter wieder beschleunigt → Stromanstieg.

Folgende Bereiche: Nach der 1. Anregung reicht die kinetische Energie für weitere Anregungen aus.



Erläutern Sie auch, wie und warum sich die Messergebnisse bei Erhöhung der Temperatur des Quecksilberdampfes verändern.

- Bei höheren Temperaturen ist der Dampfdruck höher und es stehen mehr Stoßpartner zur Verfügung
- Die gemessenen Stromstärken sind überall niedriger
- Die Lage der Maxima und Minima verändert sich nicht

<u>**1.2**</u> Das erste Maximum der Stromstärke liegt bei einer Beschleunigungsspannung von $U_B = 4{,}9\,V$. Zeigen Sie, dass während der Versuchsdurchführung keine Leuchterscheinungen beobachtet werden können.

Beim Übergang in den Grundzustand senden die angeregten Hg-Atome ein Photon aus.

$$\Delta E = E_{Ph} \qquad \Delta E = h\frac{c}{\lambda}$$

$$E_{Ph} = h\frac{c}{\lambda} \;\Leftrightarrow\; \lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{4{,}136\cdot 10^{-15}\,eV\,s \cdot 2{,}998\cdot 10^{8}\,m/s}{4{,}9\,eV} = 2{,}53\cdot 10^{-7}\,m = 253\,nm$$

Die Wellenlänge liegt im ultravioletten, also nicht-sichtbaren Bereich.

Berechnen Sie zwei mögliche Geschwindigkeiten eines Elektrons bei einer Beschleunigungsspannung von $U_B = 10\,V$ und einer Gegenspannung $U_G = 1\,V$ beim Auftreffen auf den Auffangschirm.

1. Elektron ohne inelastischen Stoß: $E_{Kin} = 10\mathrm{eV} - 1\,eV = 9\,eV$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2\cdot 9\,eV}{0{,}51\cdot 10^{6}\,eV/c^2}} = 5{,}94\cdot 10^{-3}\,c = \mathbf{1{,}78\cdot 10^{6}\,m/s}$$

2. Elektron mit einem inelastischen Stoß: $E_{Kin} = 10\mathrm{eV} - 1\,eV - 4{,}9\,eV = 4{,}1\,eV$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2\cdot 4{,}1\,eV}{0{,}51\cdot 10^{6}\,eV/c^2}} = 4{,}01\cdot 10^{-3}\,c = \mathbf{1{,}20\cdot 10^{6}\,m/s}$$

<u>2. Rutherford-Streuversuch</u>

<u>**2.1**</u> Erläutern Sie, warum für den Rutherford'schen Streuversuch Goldfolie benutzt wird.

- Gold kann mit mechanischen Mittel zu einer sehr dünnen Folie verarbeitet werden (ca. 1000 Atomschichten)
- Gold hat eine hohe Atommasse. Daher ist $m_{Au} \gg m_{\alpha}$. So lässt sich aufgrund der Impulserhaltung bei Streuwinkeln von 180° zeigen, dass die Streuzentren im Atomkern sein müssen

Rutherford hatte Alphastrahlung mit einer vergleichsweise geringen kinetischen Energie benutzt. Erklären Sie, warum die Ergebnisse bei sehr schnellen α-Teilchen nicht mehr mit Rutherfords Erklärungsansatz übereinstimmen.

A: Die Teilchen kommen in den Wirkungsbereich der starken Wechselwirkung, wenn sie zu schnell sind.

Leiten Sie für den Rutherford-Streuversuch aus dem Energieansatz eine Formel für die

Abschätzung der maximalen Größe des Goldatomkerns her.

$E_{Kin}=E_{Pot}$ im Punkt der nächsten Annäherung b.

$$\frac{1}{2}m v^2=\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Qq}{b} \Leftrightarrow b=\frac{2}{4\pi\epsilon_0 m v^2}Ze2e=\frac{Ze^2}{\pi\epsilon_0 m v^2}$$

Berechnen Sie mit Hilfe dieser Formel die Obergrenze für die Größe des Goldatomkerns, wenn die Geschwindigkeit der α-Teilchen $v=1{,}5182\cdot 10^7 m/s$ beträgt.

$$b=\frac{79\cdot\left(1{,}602\cdot 10^{-19}C\right)^2}{\pi\cdot 8{,}85\cdot 10^{-12}C/(Vm)\cdot 6{,}64\cdot 10^{-27}kg\cdot\left(1{,}5182\cdot 10^7 m/s\right)^2}=4{,}76\cdot 10^{-14}m$$

A: Die Obergröße beträgt 476 pm.

Der obige Energieansatz setzt voraus, dass die kinetische Energie, die der Goldkern aufgrund des Stoßes erhält, klein im Vergleich zur kinetischen Energie des α-Teilchens ist. Zeigen Sie mit Hilfe der Impulserhaltung, dass diese Annahme berechtigt ist.

$(m_\alpha=4u=3727{,}379\,MeV/c^2;\, m_{Au}=196{,}9666\,u=183473\,MeV/c^2;$
$1u=1{,}6605\cdot 10^{-27}kg=931{,}4941\,MeV/c^2)$

$v_\alpha=1{,}5182\cdot 10^7 m/s=0{,}0506\,c \qquad p_\alpha=m_\alpha\cdot v_\alpha=3727{,}379\,MeV/c^2\cdot 0{,}0506\,c=188{,}7561\,MeV/c$

$$E_{Kin}(\alpha)=\frac{1}{2}m_\alpha v_\alpha^2=\frac{p_\alpha^2}{2m_\alpha}=4{,}77935\,MeV$$

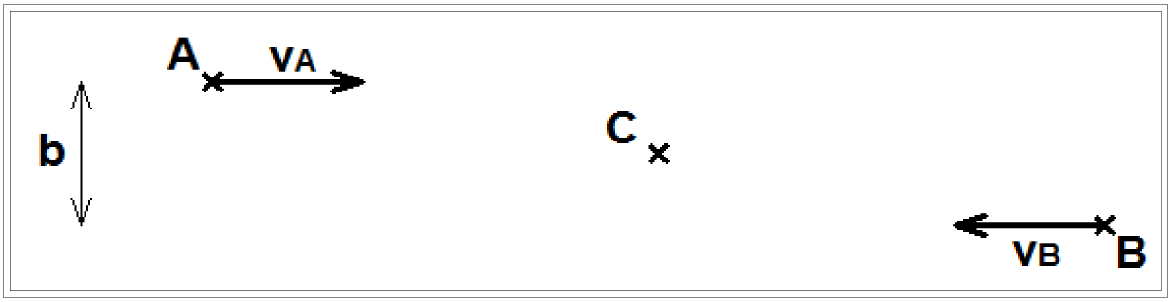
Auf den Goldkern wird der zweifache Impuls übertragen: $p_{Au}=2p_\alpha=377{,}5121\,MeV/c$

$$E_{Kin}(Au)=\frac{p_{Au}^2}{2m_{Au}}=0{,}3884\,MeV \qquad \frac{E_{Kin}(Au)}{E_{Kin}(Au)+E_{Kin}(\alpha)}=0{,}07515$$

A: 7,5% der kinetische Energie steckt nach dem Stoß im Goldkern.

3. Spezielle Relativitätstheorie

3.1 Gedankenexperiment: Wir betrachten drei Raumschiffe A, B und C mit jeweils einer Lichtuhr. Raumschiffe A und B fliegen aufeinander zu und passieren sich in Höhe von Raumschiff C, das still steht. Das Abstand b sei vernachlässigbar.



Beschreiben Sie jeweils die Beobachtungen bzgl. der Uhren aus Sicht der drei Raumschiffe.
Raumschiff A: Uhr B geht langsamer als Uhr C und beide langsamer als Uhr A.
Raumschiff B: Uhr A geht langsamer als Uhr C und beide langsamer als Uhr B.
Raumschiff C: Uhr A und Uhr B gehen beide gleich schnell und beide langsamer als Uhr C.

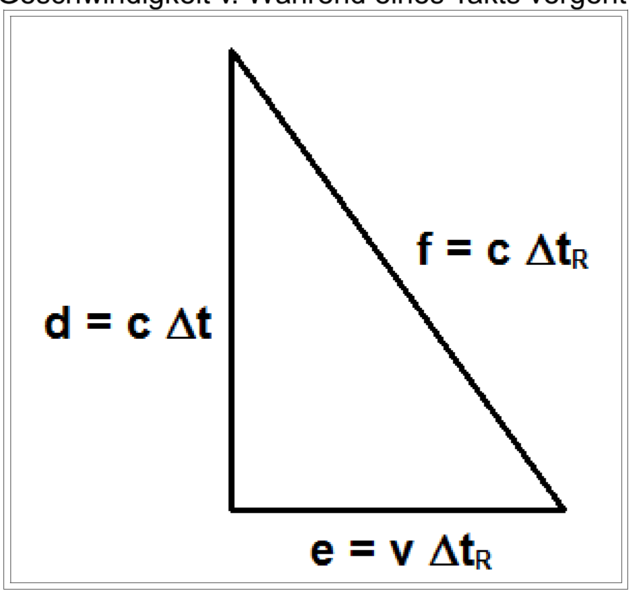
Verändertes Gedankenexperiment: Nun fliegt Raumschiff C mit vergleichsweise niedriger Geschwindigkeit auf einer Bahn senkrecht zur Flugbahn der Raumschiffe A und B auf Höhe des Passierpunktes. Zu dem Zeitpunkt, wenn sich die Raumschiffe A und B begegnen, befindet sich Raumschiff wieder genau an der Stelle wie in der Skizze oben.

Erklären Sie, ob sich die Beobachtungen qualitativ verändern. Begründen Sie Ihre Antwort.

Die Beobachtung von Raumschiff A zu Uhr B und umgekehrt verändert sich gar nicht.
Die Beobachtung von Raumschiff C oder von Raumschiff A und B auf Uhr C verändert sich nicht qualitativ. Die Bewegung von Raumschiff C verändert die Entfernung zu A oder B nur minimal (Hypotenuse zu langer Kathete) und somit erhöht sich die Relativgeschwindigkeit nur minimal.

Leiten Sie die Beziehung $\Delta t = \Delta t_R \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ aus der Betrachtung der Lichtuhren von Raumschiff A und B her. (Raumschiff C soll hier nicht beachtet werden).

Uhr C mit dem Spiegelabstand d bewegt sich mit Geschwindigkeit v. Während eines Takts vergeht aus Sicht des Bezugssystems von Uhr C die Zeit Δt, während aus Sicht eines ruhenden Bezugssystems für Uhr C die Zeit Δt_R vergeht.



Es gilt $e = v \Delta t_R$ und für die Strecke, welche die Uhr während eines Takts zurücklegt und $d = c \Delta t$ für die Strecke, welche der Lichtimpuls aus Sicht des ruhenden Bezugssystems zurücklegt.

Es gilt $d^2 = f^2 - e^2$

Die linke Seite der Gleichung beschreibt die ruhende Uhr und die rechte Seite der Gleichung beschreibt die bewegte Uhr.

Also $(c\,\Delta t)^2=(c\,\Delta t_R)^2-(v\,\Delta t_R)^2$

$$\Leftrightarrow c^2\,\Delta t^2=c^2\,\Delta t_R^2-v^2\,\Delta t_R^2 \quad | \; T$$

$$\Leftrightarrow c^2\,\Delta t^2=(c^2-v^2)\,\Delta t_R^2 \quad | \; :c^2$$

$$\Leftrightarrow \Delta t^2=\frac{(c^2-v^2)}{c^2}\Delta t_R^2 \quad | \; \sqrt{}$$

$$\Rightarrow \Delta t=\Delta t_R\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

<u>3.2</u> Ein brandneues Raumschiff startet im Jahre 2212 zu einer interstellaren Mission. Die mittlere Reisegeschwindigkeit des Raumschiffs beträgt von der Erde aus gesehen $v_R=0{,}98\,c$.

Die Garantiezeit für den Antrieb eines derartigen Raumschiff beträgt 20 Jahre. Als das Raumschiff im Jahr 2300 zur Erde zurückkehrt, ist eines der Triebwerke ausgefallen. Die Herstellerfirma lehnt den Garantieanspruch ab. Sie als Anwalt der Reederei sollen mit einer Rechnung begründen, dass der Garantieanspruch berechtigt ist.

Da das Raumschiff beschleunigen muss, um sich wieder dem Bezugssystem Erde anzupassen, ist auf dem Raumschiff die Zeit aus Sicht der Erde langsamer vergangen.

$$\Delta t=\Delta t_R\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}=88\,a\cdot\sqrt{1-\frac{0{,}98^2\,c^2}{c^2}}=17{,}51\,a$$

Auf dem Raumschiff sind also nur 17,5 Jahre vergangen. Also sind auch die Triebwerke nur 17,5 Jahre gealtert. Das liegt noch innerhalb der Garantiezeit.