

Aufgabe 1 – Thermodynamik

Durch die Klimakrise wird der Einbau von Wärmepumpen anstelle von Gas- oder Ölheizungen in Häusern immer wichtiger. In den Niederlanden werden seit dem 01.07.2018 nur noch Neubaugenehmigungen erteilt, wenn nicht mit Gas geheizt werden soll (Deutschlandfunk vom 28.06.2018).

1.a In Abbildung 1 ist ein Energieflussdiagramm dargestellt.

- I. **Erläutern** Sie mit Hilfe des dargestellten Energieflussdiagrammes die Arbeitsweise einer Wärmepumpe und eines Kältschranks und **erläutern** Sie den Unterschied zwischen beiden. **Stellen** Sie mit Hilfe des Diagrammes die Bedeutung und die Berechnung des technischen Wirkungsgrades (der Leistungszahl) ε einer Wärmepumpe und eines Kältschranks **dar**.
- II. **Begründen** Sie, dass man im Winter mit einem Kältschrank als einziger Heizquelle einen Raum erwärmen kann, indem man ihn zum Kühlen im Innenraum und gleichzeitig zum Beheizen der Wohnung nutzt. **Beurteilen** Sie, ob dies eine ausreichende Erwärmung darstellt. Ein alter Kältschrank gibt bis zu 50J an Wärmeenergie pro Sekunde an die Umgebung ab. Gehen Sie von einer ausreichenden Erwärmung aus, wenn ein elektrischer Heizlüfter mit 1kW Leistung zum Einsatz kommt.

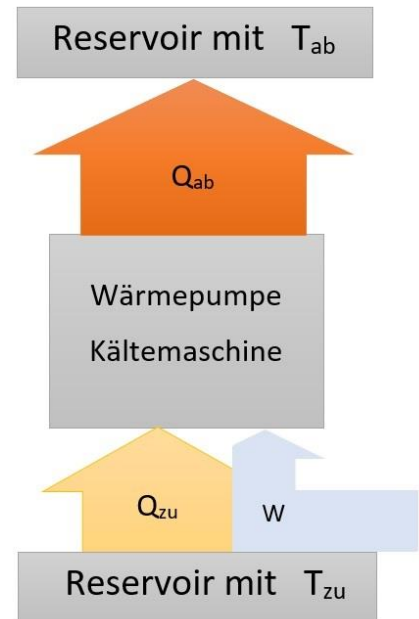


Abb.1: Energieflussdiagramm
(Quelle: Abituraufgabenkommission)

(10 BE)

- 1.b **Beschreiben** Sie die Funktionsweise einer Wärmepumpe im Hinblick auf die Prozesse des Arbeitsgases mit Hilfe der nebenstehenden Skizze. **Benennen** Sie dazu erst die Elemente der unvollständigen Skizze zur Wärmepumpe, indem Sie die folgenden Begriffe und Symbole der Abbildung 2 zuordnen:

Außenraum, Verflüssiger, Verdampfer, Innenraum, Kompressor, Kapillarrohr, T_{zu} , T_{ab} , Q_{zu} , Q_{ab} , W .

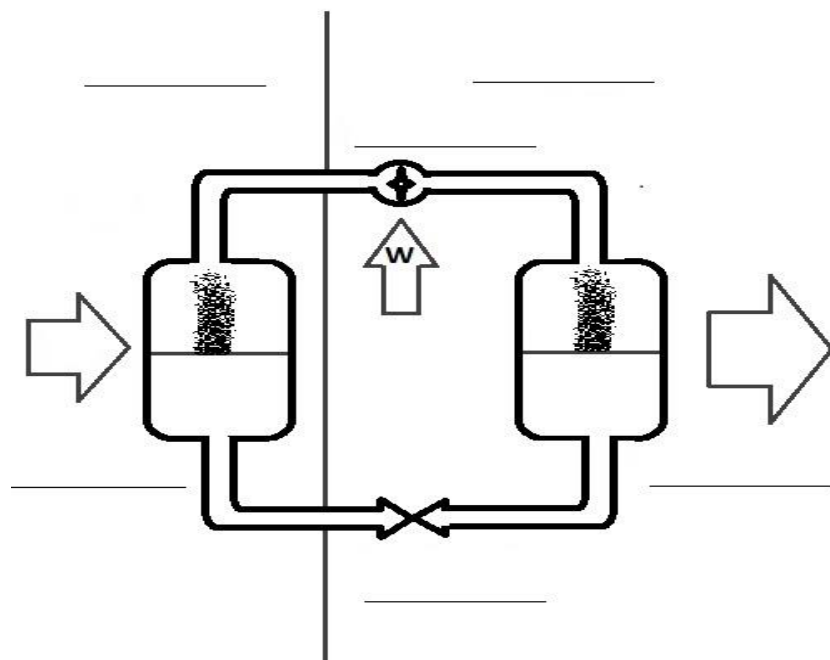


Abb.2: Funktionsweise einer Wärmepumpe
(Quelle: Abituraufgabenkommission)

(8 BE)

1.c In dem untenstehenden V - p -Diagramm ist ein idealer stirlingscher Kreisprozess und eine Skizze eines Ausschnittes eines Stirlingmotors dargestellt.

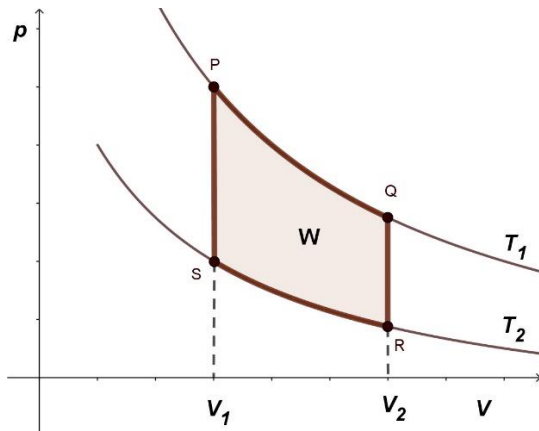


Abb. 3: Idealer Stirlingprozess
(Quelle: Abituraufgabenkommission)

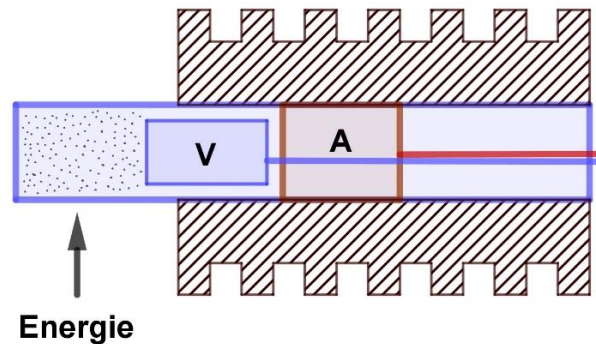


Abb. 4: Kolben im Stirlingmotor
(Quelle: Abituraufgabenkommission)

- I. **Beschreiben** Sie die vier Phasen des Kreisprozesses und die zugehörigen Takte des idealen Stirlingmotors mit Hilfe der Skizzen. **Geben** Sie dazu auch die Bewegung des Verdrängerkolbens V und des Arbeitskolbens A in den vier Phasen **an**. Beginnen Sie beim Punkt P im V - p -Diagramm. Für diesen ist die Kolbenposition in Abbildung 4 angegeben.
- II. **Berechnen** Sie den idealen Wirkungsgrad η für den Fall, dass $\vartheta_2 = 20\text{ °C}$ und $\vartheta_1 = 300\text{ °C}$ betragen.
- III. Ein Fahrzeughersteller möchte die Leistung seiner Motoren erhöhen. Eine Arbeitsgruppe schlägt einen größeren Hubraum des Kolbens vor. Eine andere Arbeitsgruppe setzt auf eine Erhöhung der Temperatur T_1 . **Ermitteln** Sie den Motor mit dem höheren Wirkungsgrad.

(12 BE)

1.d Eine Wärmepumpe kann durch einen Elektromotor oder durch einen Gasmotor betrieben werden. Die Energie der Wärmepumpe soll bei 10 °C der Luft entzogen und bei 65 °C dem Heizungssystem zugeführt werden.

- I. Es soll zunächst eine ideale Anlage angenommen werden, bei der die gesamte aufgenommene Energie W zum Heizen benutzt werden kann. **Bestätigen** Sie den technischen Wirkungsgrad der Wärmepumpe von $\varepsilon = 6,15$. **Berechnen** Sie den prozentualen Anteil der Heizenergie, der der Luft entnommen wird, wenn für den Betrieb der Wärmepumpe eine Energie \tilde{W} von 1 kWh aufgewendet werden muss.
- II. Nun soll eine Heizung mit Verlusten betrachtet werden. Wärmepumpen geben nicht die gesamte aufgenommene Energie in Form von Wärmeenergie in den Heizkreislauf wieder ab. Eine elektrisch betriebene Wärmepumpe soll 82% der aufgenommenen Energie W für das Beheizen verwenden können. Der Preis für 1 kWh elektrischer Energie beträgt $26,54\text{ ct}$. Eine gasbetriebene Wärmepumpe soll 35% der Energie des Gases für das Beheizen verwenden können. Der Preis für 1 kWh beträgt hier $11,78\text{ ct}$. **Geben** Sie in der Abbildung 5 die jeweiligen Prozente des nicht nutzbaren Anteils der aufzuwendenden Energien **an**. **Bestimmen** Sie die Preise pro kWh an Heizenergie und die preiswertere arbeitende Anlage.

III. **Berechnen** Sie den Preis pro kWh Heizenergie für die Anlage mit dem Gasmotor, wenn von der beim Betrieb des Motors anfallenden Abwärme 80% ebenfalls dem Heizungssystem zugeführt werden (vgl. Abbildung 6).

(12 BE)

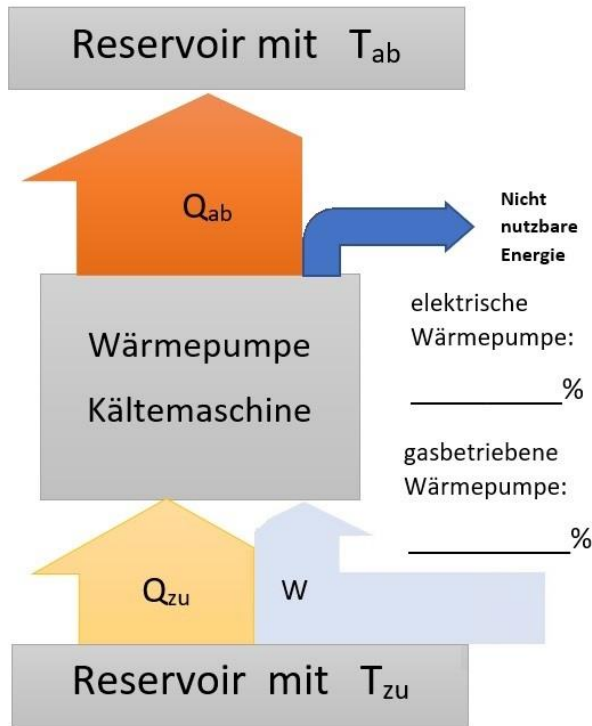


Abb. 5: Wärmepumpe
 (Quelle: Abituraufgabenkommission)

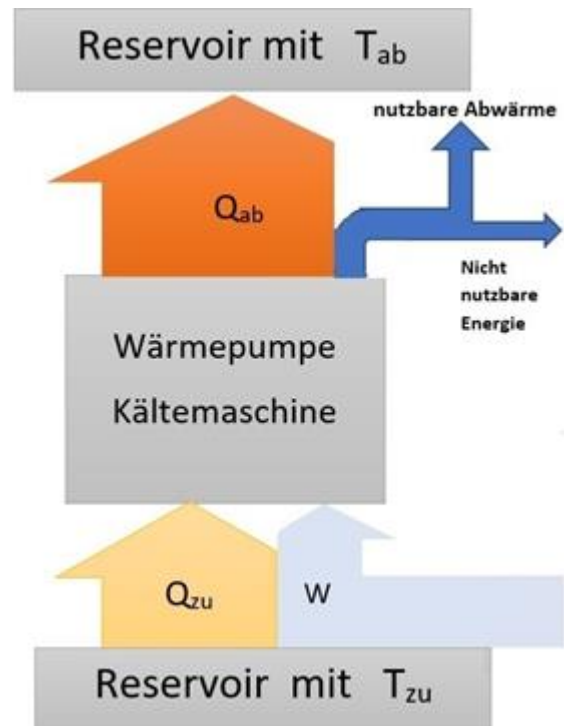


Abb. 6: Wärmepumpe mit Energierückführung
 (Quelle: Abituraufgabenkommission)

1.e Neubauten sollen möglichst klimaneutral beheizt werden. **Beschreiben** Sie ausführlich, unter welchen Bedingungen es möglich ist, weitgehend sich energetisch selbst versorgend und möglichst klimaneutral zu heizen.

(8 BE)

Aufgabe 2 – Wellenoptik

2.a Interferenzbilder können durch Interferometer erzeugt werden. In einem Interferometer werden aus einer kohärenten Lichtquelle zwei Teilstrahlen erzeugt, die später wieder zusammengeführt werden und somit interferieren können. Im Zentrum dieser Aufgabe steht das Michelson-Interferometer.

- I. **Zeichnen** Sie den Strahlengang von der Quelle bis zum Empfänger in Material 1 im Anhang ein. **Benennen** Sie die einzelnen Elemente in der Abbildung, indem Sie die folgenden Begriffe: *Strahlteiler, Spiegel, Mattscheibe* richtig zuordnen.
- II. **Beschreiben** Sie den Strahlengang innerhalb des Interferometers.
- III. **Erklären** Sie, wie der Gangunterschied Δs beim Michelson-Interferometer entsteht. Gehen Sie dabei ebenfalls darauf ein, um welche Streckendifferenz Δl ein Interferometerarm verändert werden muss, damit, wenn zuerst konstruktive Interferenz vorliegt, erneut konstruktive Interferenz auf dem Schirm beobachtet werden kann.
- IV. Im Material 2 im Anhang wurde ausgehend von dem ersten Interferenzbild mit einem Gangunterschied von $\Delta s = 0$ sukzessive der Gangunterschied um den gleichen Betrag vergrößert. **Beschreiben** Sie die Veränderung der Interferenzbilder und **geben** Sie in Material 2 die Verschiebung des Interferometerarms Δl sowie den Gangunterschied Δs als Vielfaches der Wellenlänge an.

(21 BE)

2.b In den vergangenen Jahren stieg die Auflösung von Smartphonedisplays immer weiter. Moderne Smartphones stellen dreimal so viele Pixel dar wie herkömmliche Officemonitore. In dieser Aufgabe soll thematisiert werden, ob derartige Pixeldichten vom menschlichen Auge überhaupt noch aufgelöst werden können.

- I. Physiker:innen modellieren das menschliche Auge als Kreisblende mit einer Blendenöffnung von $d \approx 4 \text{ mm}$. **Berechnen** Sie den Mindestabstand y zweier selbstständig leuchtender grüner Pixel mit einer Wellenlänge von $\lambda = 550 \text{ nm}$, die mit dem bloßen Auge in einem Sichtabstand von 25 cm noch unterscheidbar sind.
- II. Bei der Angabe von Displayauflösungen wird häufig die Pixeldichte ρ in der Einheit ppi (pixel per inch; zu deutsch: Leuchtpunkte pro Zoll) angegeben. **Bestimmen** Sie die Pixeldichte ρ (in ppi) zum Mindestabstand aus der vorherigen Aufgabe. Hinweis: 1 Zoll entspricht $2,54 \text{ cm}$. Falls Sie in der vorherigen Aufgabe kein Ergebnis berechnen konnten, verwenden Sie den Wert $40 \mu\text{m}$.
- III. **Beurteilen** Sie die Pixeldichten der Smartphones in Tabelle 1 aus physikalischer Sicht in Hinblick auf die Auflösung des menschlichen Auges. Nehmen Sie dabei Bezug auf die Ergebnisse aus I. und II.

Hersteller	Diagonale in Zoll	Seitenverhältnis	Pixeldichte in ppi	Auflösung
S	5,5	16:9	807	3840x2160
M	5	16:9	294	1280x720
G	6,7	19,5:9	512	3120x1440

Tab 1: Displayeigenschaften diverser Smartphones

IV. Ein moderner UHD-TV (ca. 65 Zoll: $144\text{cm} \times 81\text{cm}$) hat eine Auflösung von 3840×2160 Pixel und damit eine vergleichbare Auflösung wie moderne Smartphones, wobei die Bildschirmfläche viel größer ist. **Berechnen** Sie die Pixeldichte ρ des angegebenen UHD-TVS in ppi. **Diskutieren** Sie, ob es sinnvoll ist die Pixelanzahl moderner TVs aus physikalischer Sicht noch weiter zu erhöhen.

(21 BE)

2.c Ein divergenter Laserstrahl beleuchtet eine undurchsichtige Kugel, hinter der in etwas Entfernung ein Schirm steht (siehe Abb.1).

„Der hellste Teil eines Schattens befindet sich in der Mitte.“ **Erklären** Sie die Entstehung des Lichtpunktes in der Mitte des geometrischen Schattens in Abbildung 1 und **begründen** Sie, dass dieser physikalische Effekt als Nachweis für das Wellenmodell des Lichts angesehen werden kann und nicht mit der Strahlenoptik erklärt werden kann.

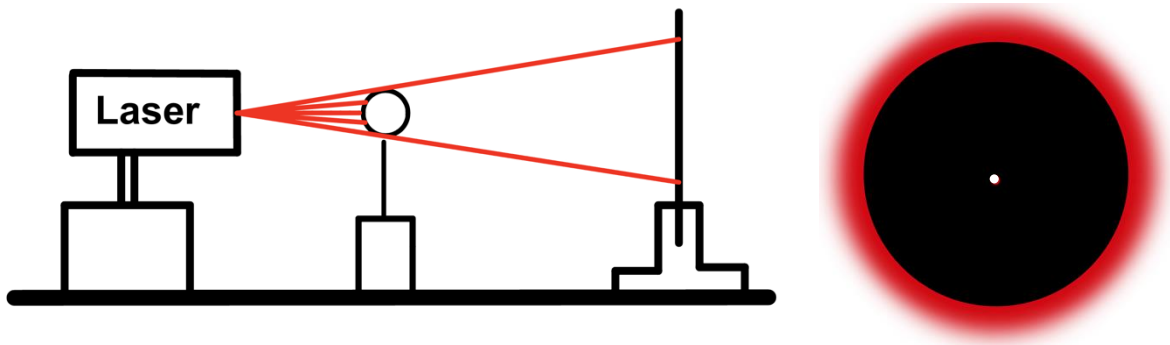


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau: Ein divergenter Laserstrahl beleuchtet eine undurchsichtige Kugel (links). Vergrößerte Aufnahme des Schirms (rechts) (Quelle: Abituraufgabenkommission)

(8 BE)

Anhang

Material 1

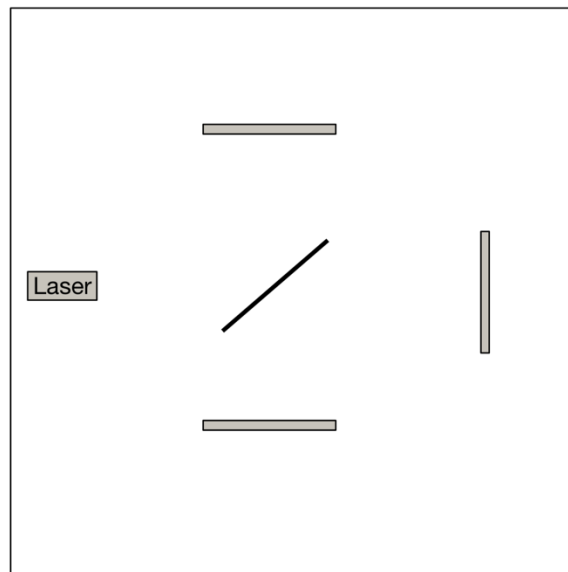
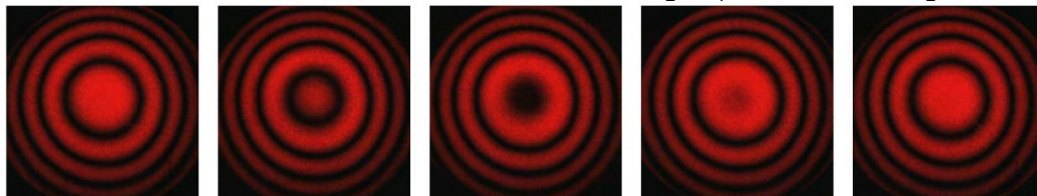


Abb. 2: Prinzipieller Aufbau eines Michelson-Interferometers (Quelle: Abituraufgabenkommission)

Material 2

Abb. 3: Interferenzbilder für unterschiedliche Interferometerarmlängen (Quelle: Abituraufgabenkommission)



Δs	$0 \cdot \lambda$				
Δl					

Aufgabe 3 – Quantenphysik der Atomhülle

3.a Laser sind ein fester Bestandteil unseres heutigen Lebens. Sie finden Anwendung in der Technik, wie bei Vermessungsaufgaben, dienen zur Bearbeitung von Oberflächen oder als Demonstrationsexperiment für Interferenzversuche.

- I. **Vergleichen** Sie die Eigenschaften von Laserlicht mit dem Licht einer Glühlampe.
- II. Jeder Laser besteht im Wesentlichen aus drei Komponenten: dem Lasermedium, dem Resonator und einer Pumpe. **Beschreiben** Sie die Bedeutung der drei Komponenten für die Funktionsweise eines Lasers.
- III. **Erklären** Sie den Begriff der Besetzungsinversion und die dazugehörige Bedeutung für die Funktionsweise eines Lasers.

(13 BE)

3.b Helium-Neon-Laser im Schulbetrieb haben sehr geringe Dauerleistungen von ca. 1mW. Gepulste Festkörperlaser, wie z.B. ein Rubinlaser, können für sehr kurze Zeiten allerdings Leistungen im Gigawatt-Bereich erzeugen. Die Photonenenergie eines Rubinlasers beträgt 1,79eV.

- V. **Berechnen** Sie zunächst die Energie W , die in dem Laserimpuls des Rubinlasers steckt, der für eine Zeitspanne von 1ns eine Leistung von 1GW erzeugt. **Berechnen** Sie anschließend die Anzahl N der ausgesandten Photonen des Laserpulses.

(5 BE)

3.c Im Folgenden soll die Funktionsweise des He-Ne-Lasers als Beispiel für einen häufig eingesetzten Laser betrachtet werden.

- I. **Beschreiben** Sie mithilfe des Energieniveauschemas in Abbildung 1 die Funktionsweise eines He-Ne-Lasers.

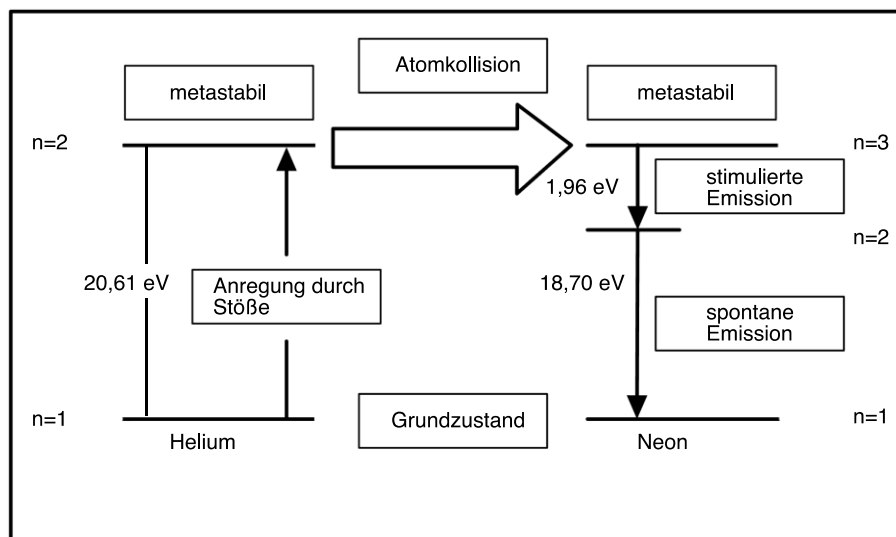


Abb. 4: Energieniveauschema eines Helium-Neon-Lasers (Quelle: Abituraufgabenkommission)

- II. **Geben** Sie den Übergang **an**, der zu der typischen Laserlinie von $\lambda = 633\text{nm}$ gehört und **bestätigen** Sie die Wellenlänge durch eine Rechnung.

(12 BE)

- 3.d In diesem Abschnitt geht es schwerpunktmäßig um den linearen Potentialtopf mit unendlich hohen Wänden. Für die Energien des linearen Potentialtopfs der Breite a gilt:

$$W_n = \frac{h^2}{8 \cdot m_e \cdot a^2} \cdot n^2$$

- I. **Beschreiben** Sie die Modellannahmen des linearen Potentialtopfes mit unendlich hohen Wänden.
- II. **Berechnen** Sie die zu den Zuständen $n = 1, 2, 3$ gehörigen Energien W_n in eV und stellen Sie die dazugehörigen Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichten $|\Psi_n|^2$ in einer Skizze dar. Nehmen Sie für die Breite des Potentialtopfes den zweifachen Bohrschen Radius mit $a_0 = 5,29 \cdot 10^{-11}$ m (Bohrscher Radius) an.
- III. **Begründen** Sie, dass die berechnete Energie im Grundzustand nicht der Energie des Wasserstoffs im Grundzustand mit $W_1 = -13,6$ eV entspricht. Gehen Sie hierbei ebenfalls auf die Bedeutung von $|\Psi_n|^2$ für $n = 1$ ein.
- IV. **Berechnen** Sie die Wellenlänge λ und die Frequenz f des emittierten Photons beim Übergang $n_2 \rightarrow n_1$.

(20 BE)

Aufgabe 1 Erwartungshorizont und Bewertung nach Anforderungsbereichen

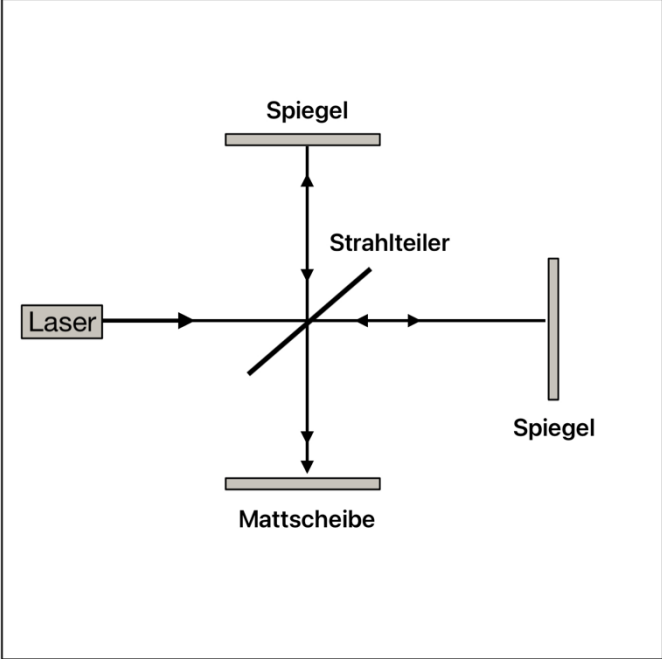
Erwarteter Inhalt / Lösungsskizze		Bewertung		
		I	II	III
a.	<p>I. Wärmepumpen und Kühlschränke nehmen von einem Reservoir (Erdboden bzw. Kühlraum) bei niedriger Temperatur T_{zu} Wärme auf und geben diese an ein Reservoir (Heizung bzw. Umgebungsluft) mit höherer Temperatur T_{ab} wieder ab. Dabei muss der Maschine die Energie W (in der Regel in Form von elektrischer Energie) zugeführt werden, damit der Vorgang in dieser Weise ablaufen kann. Denn ohne äußeren Einfluss kann Wärme nur von einem wärmeren auf einen kälteren Körper übertragen werden. Die abgegebene Wärme Q_{ab} ist gleich der Summe der aufgenommenen Wärme Q_{zu} und der zugeführten Energie W. Im Energieflussdiagramm sind deshalb der Pfeil für Q_{ab} genauso breit wie die Pfeile für Q_{zu} und W zusammen.</p> <p>Die Leistungszahl einer Wärmepumpe gibt den Faktor an, wie viel mehr Energie in Form von Wärme an das aufzuheizende Reservoir abgegeben wird, als in Form von elektrischer Energie dafür aufgewendet werden muss. Sie berechnet sich aus dem Quotienten $\varepsilon = \frac{Q_{ab}}{W}$. Bei einem Kühlschrank geht es darum, das kältere Reservoir weiter abzukühlen bzw. kalt zu halten. Deshalb gibt der technische Wirkungsgrad eines Kühlschranks $\varepsilon = \frac{Q_{zu}}{W}$ den Faktor an, wie viel mehr Wärmeenergie dem Reservoir der niedrigeren Temperatur entzogen wird als dafür aufgewendet wird.</p> <p>II. Ein Kühlschrank erwärmt seine Umgebung. Er gibt sogar mehr Wärme an die Umgebung ab als er dem Kühlraum entzieht. Pro Tag gibt der Kühlschrank nur 1,2 kWh an Wärme ab. Der elektrische Heizlüfter (mit 1 kW Leistung) gibt mehr als 20-mal so viel Wärmeenergie pro Zeit ab. Der Kühlschrank stellt also keine ausreichende Erwärmung dar.</p>	7	3	
b.	<p>Eine Wärmepumpe durchläuft einen Kreisprozess mit vier Zustandsänderungen. Ein Kühlmittel der Temperatur T_{zu} nimmt Wärme Q_{zu} aus der Umgebung auf und wird in einem Wärmetauscher, dem Verdampfer, verdampft. Anschließend wird das Kühlmittel mit einem Kompressor im Inneren des Hauses schnell und damit nahezu ohne Wärmeabgabe verdichtet. Dabei steigt die Temperatur des gasförmigen Kältemittels auf den Wert T_{ab},</p>			

Erwarteter Inhalt / Lösungsskizze		Bewertung		
		I	II	III
	<p>weil der Kompressor Arbeit am Kühlmittel verrichtet. Dafür wird die (in der Regel elektrische) Energie W verwendet. In einem zweiten Wärmetauscher, dem Verflüssiger, wird das heiße, unter hohem Druck stehende Kältemittel kondensiert. Dabei gibt es die Wärme Q_{ab} an die Heizung ab. Mit dem Kapillarrohr wird der Druck des Kühlmittels vermindert. Das verflüssigte und entspannte Kühlmittel gelangt nun wieder in den Außenbereich, um im Verdampfer erneut Wärme aus der Umgebung des Hauses aufzunehmen.</p>	4	4	
c.	<p>I. In der ersten Phase erfolgt eine isotherme Expansion. Das warme Gas dehnt sich aus und schiebt den Arbeitskolben nach rechts. Dieser gibt mechanische Energie ab. Der Verdrängerkolben bewegt sich kaum. In der zweiten Phase wird das Gas isochor abgekühlt. Der Arbeitskolben bewegt sich kaum, während sich der Verdrängerkolben nach links bewegt, so dass bei konstantem Volumen das warme Gas in den gekühlten Zylinderteil gelangt und Wärme abgibt. Die Temperatur sinkt auf T_2. In der dritten Phase komprimiert der Arbeitskolben das Gas isotherm, während der Verdrängerkolben sich kaum bewegt. Die Temperatur bleibt konstant, weil die Wärmemenge Q_2 über die Kühlung an die Umgebung abgegeben wird. In der vierten Phase schiebt der Verdrängerkolben das kühlere Gas zur Energiequelle. Dort nimmt das Gas von der Heizwendel die Wärmeenergie Q_4 auf. Der Arbeitskolben bewegt sich kaum, so dass der Vorgang isochor abläuft.</p> <p>II. Mit den angegebenen Werten ergibt sich</p> $\eta = \frac{573,15 \text{ K} - 293,15 \text{ K}}{573,15 \text{ K}} = 0,49.$ <p>III. Beide Motoren liefern beim einmaligen Durchlaufen des Kreisprozesses mehr Nutzenergie, weil die eingeschlossene Fläche größer wird. Der Wirkungsgrad eines solchen Motors hängt nur von der Temperaturdifferenz der beiden Reservoirs ab. Daher hat der Motor mit dem größeren Hubraum einen geringeren Wirkungsgrad als der Motor mit höherer Temperatur T_1.</p>	2	8	2
d.	<p>I. Berechnet wird der technische Wirkungsgrad, bzw. die Kennzahl der Wärmepumpe. Diese beträgt $\varepsilon = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{338,15 \text{ K}}{55 \text{ K}} = 6,15$. Das bedeutet, dass mit der Energie von 1kWh eine Heizenergie von 6,15kWh erreicht werden kann. Folglich wird der Luft dann die Energiemenge 5,15 kWh entnommen. Das entspricht einem Anteil von $\frac{5,15}{6,15} = 0,837 = 83,7\%$.</p> <p>II. Nicht nutzbare Energie bei der elektrischen Wärmepumpe 18%, bei der gasbetriebenen Wärmepumpe 65%. Der Wirkungsgrad der Wärmepumpe ist kleiner, weil nur noch 0,82kWh von 1kWh aufgenommener Energie in</p>			

Erwarteter Inhalt / Lösungsskizze		Bewertung		
		I	II	III
	<p>die Heizleistung mit eingehen. Mit 1kWh können nur noch $0,82 \cdot 6,15 \text{ kWh} = 5,043 \text{ kWh}$ an Wärme erzeugt werden. Das ergibt einen Preis von $\frac{26,54 \text{ ct}}{5,043 \text{ kWh}} = 5,26 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}}$. Für die mit Gas betriebene Wärmepumpe ergibt sich $0,35 \cdot 6,15 \text{ kWh} = 2,153 \text{ kWh}$ und damit einen Preis pro kWh von $\frac{11,78 \text{ ct}}{2,153 \text{ kWh}} = 5,47 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}}$. Die elektrisch betriebene Wärmepumpe arbeitet günstiger.</p> <p>III. Die nutzbare Abwärme beträgt 80% von 65% der frei werdende Energie beim Verbrennen des Gases. Wenn die Abwärme berücksichtigt wird, dann kommt zu der mit 1kWh bereitgestellten Heizenergie von 2,153 kWh noch die Energie $0,80 \cdot 0,65 \cdot 1 \text{ kWh} = 0,52 \text{ kWh}$ dazu. Mit einer kWh Gas kann also die Heizenergie 2,673 kWh verfügbar gemacht werden. Dann erhält man einen Preis pro kWh von $\frac{11,78 \text{ ct}}{2,673 \text{ kWh}} = 4,41 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}}$.</p>			
e.	<p>Das Haus sollte mit einer Wärmepumpe geheizt werden, damit keine fossilen Energieträger benötigt werden. Ebenso sollte auf das Heizen mit Holz verzichtet werden, damit die CO₂-Emissionen möglichst gering bleiben. Folglich sollte die Energie für die Wärmepumpe mit Photovoltaik oder Windenergieanlagen erzeugt werden (Wasser wäre auch eine Lösung, ist aber so nicht in ganz Deutschland umsetzbar.). Für den Fall, dass es windstill und der Himmel bedeckt ist, sollte vorher die elektrische Energie in großen Akkumulatoren gespeichert werden. Auf diese Weise gelänge eine Beheizung vollständig. Man benötigt dafür jedoch ein Grundstück, auf dem eine Windenergieanlage betrieben werden kann. Das ist in Städten und Dörfern für jedes Haus sicherlich nicht möglich. Außerdem muss ausreichend Fläche für die Solaranlage vorhanden sein. (Für eine vollständige Lösung soll sowohl die Energieversorgung in Abhängigkeit vom Wetter diskutiert, als auch die baulichen Rahmenbedingungen genannt werden.)</p>		6	2
Verteilung der insgesamt 50 Bewertungseinheiten auf die Anforderungsbereiche		15	25	10

Korrekturhinweis: „Individuelle Lösungswege werden angemessen berücksichtigt, wenn sie in sinnvoller Weise von den Erwartungen abweichen.“

Aufgabe 2 Erwartungshorizont und Bewertung nach Anforderungsbereichen

Erwarteter Inhalt / Lösungsskizze		Bewertung		
		I	II	III
a.	<p>I. Strahlengang und Benennung:</p>  <p>Abb.5: Strahlengang Michelson Interferometer (Quelle: Abituraufgabenkommission)</p> <p>II. Der Laserstrahl trifft auf den Strahlteiler (ST), wobei zwei intensitätsgleiche Teilstrahlen entstehen. Der eine Teilstrahl transmittiert und wird nach der Reflexion am Spiegel im Interferometerarm 2 am ST in Richtung Mattscheibe reflektiert. Der andere Teilstrahl wird erst am ST reflektiert, im Interferometerarm 1 am Spiegel reflektiert und transmittiert dann den ST in Richtung Mattscheibe, wo sich beide Teilstrahlen wieder überlagern. (Phasensprünge bei der Reflexion am Strahlteiler verändern den gegenseitigen Gangunterschied nicht.)</p> <p>III. Der Gangunterschied Δs entsteht durch die Längendifferenz Δl der beiden Interferometerarme, wobei beachtet werden muss, dass die Teilstrahlen die Wege zweifach passieren. Daraus folgt für die Bedingung konstruktiver Interferenz: $\Delta s = 2 \cdot (l_2 - l_1) = \lambda \rightarrow \Delta l = \frac{\lambda}{2}$</p> <p>IV. Der Durchmesser des zentralen Maximums nimmt ab (Intensität sinkt), bis es im 3. Bild zu destruktiver Interferenz kommt (schwarz). Im vierten Bild wird im zentralen Minimum der Durchmesser kleiner, bis im 5. Bild wieder konstruktive Interferenz beobachtet werden kann. (Ringe wandern nach innen.)</p> $\Delta l_1 = 0 \cdot \lambda, \Delta l_2 = \frac{1}{8} \cdot \lambda, \Delta l_3 = \frac{1}{4} \cdot \lambda, \Delta l_4 = \frac{3}{8} \cdot \lambda, \Delta l_5 = \frac{1}{2} \cdot \lambda$ $\Delta s_1 = 0 \cdot \lambda, \Delta s_2 = \frac{1}{4} \cdot \lambda, \Delta s_3 = \frac{1}{2} \cdot \lambda, \Delta s_4 = \frac{3}{4} \cdot \lambda, \Delta s_5 = 1 \cdot \lambda$			
		11	8	2

Erwarteter Inhalt / Lösungsskizze		Bewertung		
		I	II	III
b.	<p>I. Mit $y = l \cdot 1,22 \frac{\lambda}{d}$ folgt $y = 0,25 \cdot \frac{1,22 \cdot 550 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 10^{-3}} \text{ m} \approx 42 \mu\text{m}$</p> <p>II. $\rho = \frac{1}{y} \cdot 0,0254 \approx 605 \text{ ppi}$ bzw. 635 ppi für $40 \mu\text{m}$</p> <p>III. Bei dem S-Smartphone kann das menschliche Auge die Pixelstruktur für einen Sichtabstand von 25 cm nicht erkennen. Die Pixeldichten für das M- und G- Smartphone sind kleiner, als das menschliche Auge unterscheiden können sollte. Hier können individuell leuchtende Pixel unterschieden werden.</p> <p>IV. $\rho = \frac{3840\text{p}}{144\text{cm}} \approx 67,7 \text{ ppi}$ bzw. $\rho = \frac{2160\text{p}}{81\text{cm}} \approx 67,7 \text{ ppi}$ $\frac{2,54 \frac{\text{cm}}{\text{inch}}}{2,54 \frac{\text{cm}}{\text{inch}}}$</p> <p>Eine mögliche Argumentationskette: Der Sitzabstand l zum TV ist ca. 10 mal größer als beim Smartphone. Da $y \sim l$, verzehnfacht sich der noch unterscheidbare Pixelabstand und die Pixeldichte fällt auf ein Zehntel (ca. 60 ppi). Bei gleicher Pixelanzahl kann der UHD-TV horizontal oder vertikal ca. 10-mal größer sein, ohne dass das menschliche Auge einen Unterschied erkennt. Dies wäre in Übereinkunft mit typischen Smartphone- (6,5“) und UHD-TV-Größen (65“). Da die Pixeldichte für den Sitzabstand bereits vom Auge nicht mehr wahrgenommen werden kann, würde eine Steigerung der Pixelanzahl bei gleicher Größe und Sitzabstand keinen Vorteil bieten.</p>	4	14	3
c.	<p>Eine kohärente Wellenfront trifft auf eine Kugel. Von deren Umkreis gehen Elementarwellen aus, die im Mittelpunkt auf der Mattscheibe im Zentrum des Kernschattens phasengleich konstruktiv überlagern, sodass hier ein heller Fleck erkennbar ist.</p> <p>Im Rahmen der Strahlenoptik würde der Umkreis der Kugel die Randstrahlen begrenzen, wodurch ein Kernschatten an der Mattscheibe entsteht. Ein heller Fleck könnte nicht entstehen, da es sich um Strahlen handelt und diese geradlinig verlaufen. Der helle Fleck ist somit ein Nachweis für die Wellennatur des Lichts und ist auf Beugung zurückzuführen.</p>		3	5
Verteilung der insgesamt 50 Bewertungseinheiten auf die Anforderungsbereiche		15	25	10

Korrekturhinweis: „Individuelle Lösungswege werden angemessen berücksichtigt, wenn sie in sinnvoller Weise von den Erwartungen abweichen.“

Aufgabe 3 Erwartungshorizont und Bewertung nach Anforderungsbereichen

Erwarteter Inhalt / Lösungsskizze		Bewertung		
		I	II	III
a.	<p>I. Gemeinsamkeiten: elektromagnetische Strahlung; Unterschiede: Laserlicht ist monochromatisch, kohärent und teilweise polarisiert. Das Licht der Glühlampe liefert ein kontinuierliches Emissionsspektrum, besitzt eine kleine Kohärenzlänge und ist nicht polarisiert.</p> <p>II. Die Pumpe führt Energie zu, sodass es zu einer zeitlich stabilen Anregung des Lasermediums kommt. Tritt eine Besetzungsinversion im Lasermedium ein, werden kohärente Photonen emittiert. Im Resonator tritt eine Verstärkung dieser optischen Übergänge auf, die durch die Resonatorlänge gefiltert werden. Im Resonator entsteht so eine (stehende) Welle, die an einem der beiden Spiegelflächen mit geringer Transmission als Laserstrahl angekoppelt wird.</p> <p>III. Eine Besetzungsinversion liegt vor, wenn im Lasermedium mehr Atome im angeregten, als Grundzustand vorliegen. Trifft erneut ein Photon mit der passenden Anregungsenergie auf das bereits angeregte Atom, werden zwei Photonen mit gleicher Frequenz, Schwingungsphase und Polarisation emittiert (stimulierte Emission), wodurch die für Laser typische monochromatische, kohärente und polarisierte Strahlung entsteht.</p>	4	6	3
b.	<p>I. $W = P \cdot t = 1\text{GW} \cdot 1\text{ns} = 1\text{J}$; $N = \frac{W_{\text{ges}}}{W_{\text{el}}} = \frac{6,242 \cdot 10^{18} \text{ eV}}{1,79 \text{ eV}} \approx 3,49 \cdot 10^{18}$</p>		2	3
c.	<p>I. Durch einen Elektronenstoß wird ein Heliumatom aus dem Grundzustand (E1) in den metastabilen Zustand (E2) angeregt. Über eine Atomkollision wird die Energie des angeregten Helium-Atoms von 20,61 eV an ein Neon-Atom übertragen, welches aus dem Grundzustand (E1) in einen metastabilen Zustand (E3) angeregt wird. (Die fehlende Energie von 0,05 eV wird durch die kinetische Energie der Stoßpartner aufgebracht). Durch die längere Lebensdauer im Zustand E3 absorbiert das angeregte Neon-Atom ein weiteres Photon mit 1,96 eV und fällt durch Emission von zwei identischen Photonen auf den Zustand E2 zurück. Dieser Prozess wird als stimulierte Emission bezeichnet. Durch spontane Emission eines Photons mit 18,70 eV fällt das angeregte Neon-Atom in den Grundzustand (E1) zurück. Dieser Kreislauf wiederholt sich ständig.</p> <p>II. Der Übergang E3 auf E2 mit einer Energiedifferenz von 1,96 eV führt zu der typischen Laserlinie</p> $\Delta W = h \cdot \frac{c}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta W} = 633 \text{ nm}$	7	5	
d.	<p>I. Ein Elektron ist auf einen eindimensionalen Bereich der Breite a eingeschränkt. Die potentielle Energie an den Rändern ist unendlich groß, innerhalb jedoch Null (kräftefrei). Die Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichte an den Rändern ist ebenfalls Null.</p> <p>II. Mit $W_n = \frac{h^2}{8 \cdot m_e \cdot a^2} \cdot n^2$ folgt $W_1 \approx 33,6 \text{ eV}$, $W_2 \approx 134,4 \text{ eV}$, $W_3 \approx 302,4 \text{ eV}$</p>			

Erwarteter Inhalt / Lösungsskizze		Bewertung		
		I	II	III
<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> <p>Die Abbildung wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.</p> </div> <p>Abb. 6: Quelle: Metzler Physik, Aufl. 5, S.429, Abb. 429.1b (Ψ_n nicht erwartet)</p> <p>III. Die Energie für den Grundzustand im linearen Potentialtopfmodell entspricht nicht der Energie des Wasserstoffs im Grundzustand, da das Coulombpotential des Wasserstoffkerns nicht berücksichtigt wird. Für $n=1$ wäre, ohne Berücksichtigung des Kernpotentials, die Aufenthaltswahrscheinlichkeit im Kern am größten, was aber verboten ist.</p> <p>IV.</p> $f = \frac{\Delta W}{h} = \frac{W_2 - W_1}{h} = \frac{100,8\text{eV}}{h} = 2,437 \cdot 10^{16} \text{ Hz} \rightarrow \lambda = \frac{c}{f} \approx 12,3 \text{ nm}$		4	12	4
Verteilung der insgesamt 50 Bewertungseinheiten auf die Anforderungsbereiche		15	25	10

Korrekturhinweis: „Individuelle Lösungswege werden angemessen berücksichtigt, wenn sie in sinnvoller Weise von den Erwartungen abweichen.“