

Fachdidaktik Physik: 2.1.9. Thermodynamik in Klassenstufen 9 und 10

Hans-Otto Carmesin

Gymnasium Athenaeum Stade, Studienseminar Stade

Hans-Otto.Carmesin@t-online.de

16. März 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Lernstruktur der UE	2
2.1	Fachliche Sicht	2
2.2	Pädagogische Umsetzung	4
3	Energieübertragung	7
4	Gasdruck und Gasgesetze	13
5	Stirlingmotor und maximal möglicher Wirkungsgrad	21
6	Aufgaben	27
7	Zusammenfassung	27

1 Einleitung

Die industrielle Revolution prägt bis heute unsere Gesellschaft und inzwischen zunehmend auch das Klima auf unserer Erde. Diese Unterrichtseinheit befasst sich mit der entsprechenden physikalischen Grundlage, der Wärme-Kraft-Maschine (s. Beime u. a. (2012); Brüning u. a. (2010); Frenzel (2017); Gehmann (2015)). Die vorher gültigen Rahmenrichtlinien sahen die Behandlung von Klimamodellen vor (s. Carmesin (2001); Reineke (1997)), insofern ist das Klima seit vielen Jahren ein zentrales Anliegen des Physikunterrichts in Niedersachsen (Carmesin u. a. (2015b), Carmesin u. a. (2015a), Carmesin u. a. (2018)).

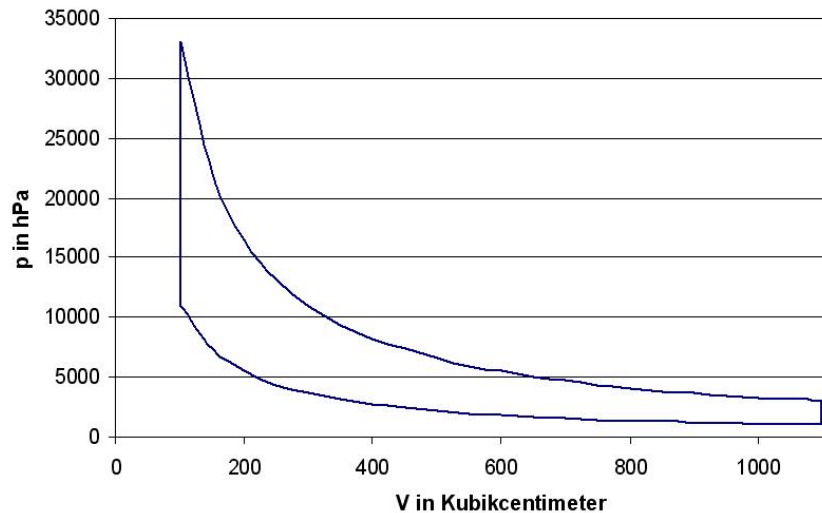


Abbildung 2: Wir können die Arbeitsweise des Stirlingmotors im pV-Diagramm darstellen.

Der in Sequenz vier behandelte *Stirlingmotor* arbeitet mit einem permanent eingeschlossenen Gas. Seine vier Takte können durch eine heiße isotherme Expansion, eine Abkühlung bei konstantem großem Volumen, eine kalte isotherme Kompression sowie eine Erhitzung bei konstantem kleinem Volumen modelliert werden (s. [Boysen u. a. \(1997\)](#)). Die dabei freigesetzte mechanische Energie wird durch die Gleichung $\delta E = p \cdot \Delta V$ errechnet, während die Zustände im pV-Diagramm durch die Gesetze von Amontons und Boyle-Mariotte berechnet werden. Die beim Abkühlen verlorene innere Energie $\Delta E_{i,Abkuehlen}$ des Gases kann durch die spezifische Wärmekapazität $c_V = 0,72 \frac{J}{g \cdot K}$ von Luft berechnet werden.

Aus diesen Zusammenhängen kann der *Wirkungsgrad* η berechnet werden, das Thema der fünften Sequenz. Vernachlässigt man $\Delta E_{i,Abkuehlen}$, so erhält man den maximal möglichen Wirkungsgrad eines Stirlingmotors $\eta = 1 - \frac{T_-}{T_+}$, wobei die beiden Temperaturen T_+ und T_- das heiße und das kalte Reservoir beschreiben, siehe unten.

Jede Maschine, die innere Energie in Arbeit umwandelt, hat einen niedrigeren Wirkungsgrad als $\eta = 1 - \frac{T_-}{T_+}$. Das können wir mit Hilfe der Entropie beweisen (s. [Boysen u. a. \(1997\)](#)). Meine SuS haben diese Tatsache auch ohne den Begriff Entropie bewiesen. Gemäß dem Kerncurriculum ist der Beweis aber nicht erforderlich (s. [Beime u. a. \(2012\)](#); [Brüning u. a. \(2010\)](#); [Frenzel \(2017\)](#); [Gehmann \(2015\)](#)).



Tina möchte Tee kochen. Sie möchte 0,5 Liter Wasser von 20°C auf 100°C erhitzen.

Abbildung 3: Wir können den Lernprozess auf Alltagserfahrungen der SuS gründen.

2.2 Pädagogische Umsetzung

Für diese Unterrichtseinheit gibt es eine Vielzahl von lebensweltlichen Bezügen. Die SuS kennen Energieüberträge bei Wärmekissen, beim Kochen, beim Sport oder bei Sonnenstrahlung. Dadurch können wir die erste Sequenz mit schülergerechten Beispielen gestalten.

Die SuS spüren Druck beim Tauchen oder bei schnellem Höhenwechsel. Sie kennen Blutdruck, den Gasdruck in Luftballons oder Fahrradreifen, den Unterdruck bei verschlossenen Marmeladengläsern, den Zusammenhang von Gasdruck und Volumen bei der Fahrradpumpe, den Zusammenhang von Gasdruck und Temperatur beim Heißluftballon. Hiermit können wir die Sequenzen zwei und drei auf lebensweltliche Bezüge der SuS gründen.

Die Sequenzen zum Stirlingmotor und seinem Wirkungsgrad können wir an die Welt der Motoren anknüpfen, aber die SuS bringen hier kaum aussagekräftige Erfahrungen mit. Daher können wir hier den SuS einen völlig neuartigen Erfahrungsbereich erschließen. Hierzu arbeiten wir vorteilhaft mit exemplarischen Versuchen und Modellrechnungen.

Inhaltsbezogene Kompetenzen: SuS ...	Prozessbezogene Kompetenzen: SuS ...
... unterscheiden Temperatur und innere Energie eines Körpers.	... erläutern am Beispiel, dass zwei Gegenstände trotz gleicher Temperatur unterschiedliche innere Energie besitzen können (K)
beschreiben einen Phasenübergang energetisch.	... deuten ein dazugehöriges Energie-Temperatur-Diagramm (E). ... formulieren an einem Alltagsbeispiel die zugehörige Energiebilanz (E). ... entnehmen dazu Informationen aus Fachbuch und Formelsammlung.
... geben Beispiele dafür an, dass Energie, die infolge von Temperaturunterschieden übertragen wird, nur vom Gegenstand höherer Temperatur zum Gegenstand niedrigerer Temperatur fließt. ... erläutern, dass Vorgänge in der Regel nicht umkehrbar sind, weil ein Energiestrom in die Umgebung auftritt. ... verwenden in diesem Zusammenhang den Begriff Energieentwertung.	... benutzen ihre Kenntnisse zur Beurteilung von Energiesparmaßnahmen (B).
... benutzen die Energiestromstärke/Leistung P als Maß dafür, wie schnell Energie übertragen wird ... bestimmen die in elektrischen Systemen umgesetzte Energie ... unterscheiden mechanische Energieübertragung (Arbeit) von thermischer (Wärme) an ausgewählten Beispielen.	... verwenden in diesem Zusammenhang Größen und Einheiten korrekt (E). ... verwenden in diesem Zusammenhang die Einheiten 1 J und 1 kWh (E). ... untersuchen auf diese Weise bewirkte Energieänderungen experimentell (E). ... entnehmen dazu Informationen aus Fachbuch und Formelsammlung (K). ... unterscheiden dabei zwischen alltags-sprachlicher und fachsprachlicher Beschreibung (K). ... vergleichen und bewerten alltagsrelevante Leistungen (B). ... zeigen die besondere Bedeutung der spezifischen Wärmekapazität des Wassers an geeigneten Beispielen aus Natur und Technik auf (B).

Tabelle 1: KC zur quantitativen Energieübertragung: E: Erkenntnisgewinnung. K: Kommunikation. B: Bewertung.

Inhaltsbezogene Kompetenzen: SuS ...	Prozessbezogene Kompetenzen: SuS ...
<p>... beschreiben den Gasdruck als Zustandsgröße modellhaft und geben die Definitionsgleichung des Drucks an.</p> <p>... verwenden für den Druck das Größensymbol p und die Einheit 1 Pa und geben typische Größenordnungen an.</p>	<p>... verwenden in diesem Zusammenhang das Teilchenmodell zur Lösung von Aufgaben und Problemen (E).</p> <p>... tauschen sich über Alltagserfahrungen im Zusammenhang mit Druck unter angemessener Verwendung der Fachsprache aus (K).</p>
<p>... beschreiben das Verhalten idealer Gase mit den Gesetzen von Boyle-Mariotte und Gay-Lussac.</p> <p>... erläutern auf dieser Grundlage die Zweckmäßigkeit der KelvinSkala.</p>	<p>... werten gewonnene Daten durch geeignete Mathematisierung aus und beurteilen die Gültigkeit dieser Gesetze und ihrer Verallgemeinerung. (E).</p> <p>... dokumentieren die Ergebnisse ihrer Arbeit und diskutieren sie unter physikalischen Gesichtspunkten (K).</p>
<p>... beschreiben die Funktionsweise eines Stirlingmotors.</p> <p>... beschreiben den idealen stirlingschen Kreisprozess im V-p-Diagramm</p>	<p>... interpretieren einfache Arbeitsdiagramme und deuten eingeschlossene Flächen energetisch (E).</p> <p>... argumentieren mithilfe vorgegebener Darstellungen (K).</p>
<p>... erläutern die Existenz und die Größenordnung eines maximal möglichen Wirkungsgrades auf der Grundlage der Kenntnisse über den stirlingschen Kreisprozess.</p> <p>... geben die Gleichung für den maximal möglichen Wirkungsgrad einer thermodynamischen Maschine an.</p>	<p>... nutzen und verallgemeinern diese Kenntnisse zur Erläuterung der Energieentwertung und der Unmöglichkeit eines ?Perpetuum mobile? (E).</p> <p>... nehmen wertend Stellung zu Möglichkeiten nachhaltiger Energienutzung am Beispiel der ?Kraft-Wärme-Kopplung? und begründen ihre Wertung auch quantitativ.</p> <p>... zeigen dabei die Grenzen physikalisch begründeter Entscheidungen auf (K).</p>

Tabelle 2: KC : E: Erkenntnisgewinnung. K: Kommunikation. B: Bewertung.

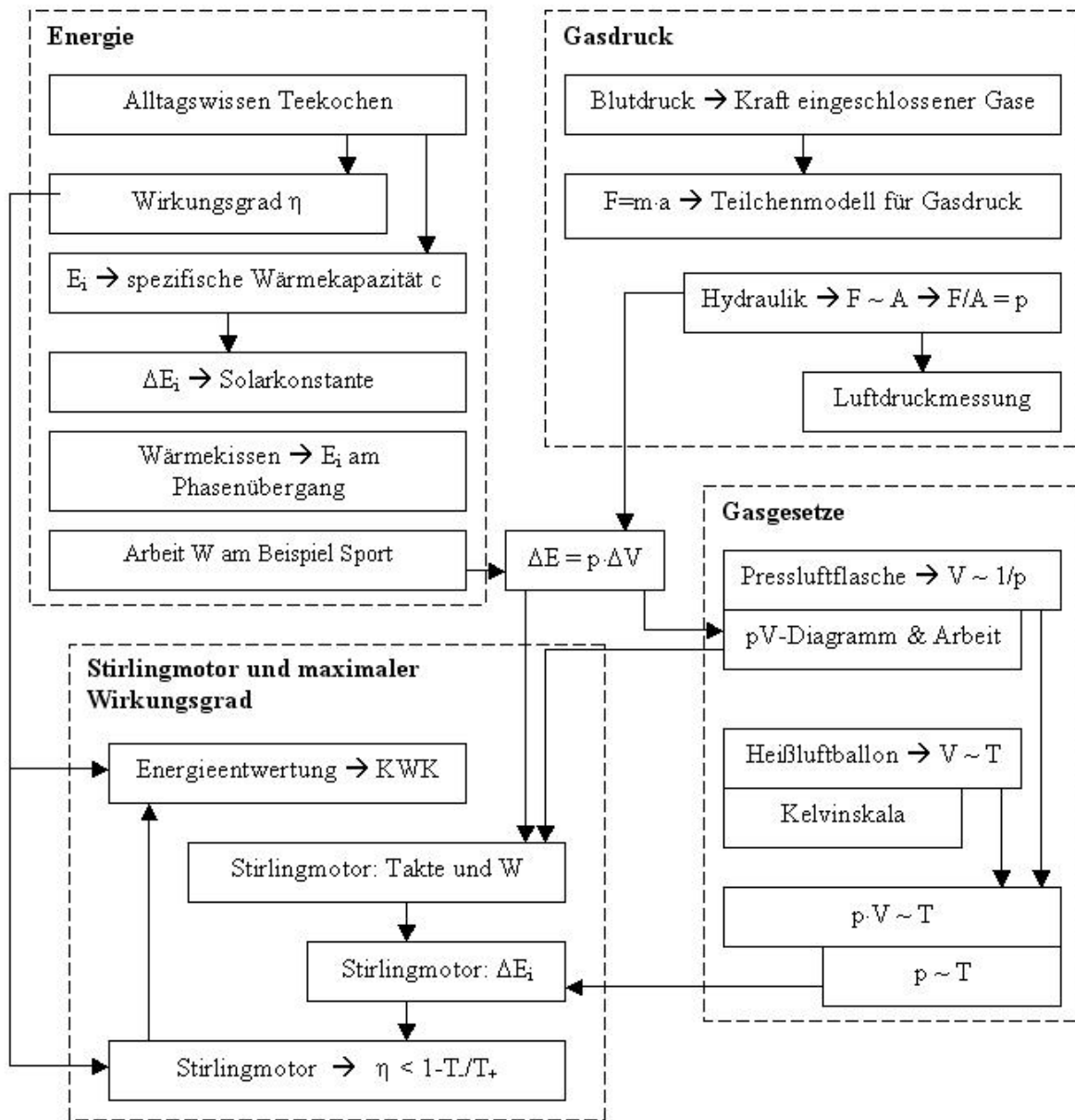


Abbildung 4: Mögliche Lernstruktur zur UE.

3 Energieübertragung

Eine mögliche Realisierung der Unterrichtssequenz veranschauliche ich durch einen Vorschlag für die Stundenabfolge und Kurzentwürfe für einige zentrale Stunden.

Nr.	Stundenthema	Stundenlernziel
1	Bestimmung der zugeführten Energie beim Teekochen	Die SuS können die zugeführte Energie beim Erhitzen von Wasser mit verschiedenen Geräten experimentell bestimmen.
2	Entdecken der spezifischen Wärmekapazität von Wasser	Die SuS können ihre Entdeckung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser erläutern.
3	Entdecken der Solarkonstante	Die SuS können die Solarkonstante aus Daten für einen Sonnenkollektor und die Transmission der Atmosphäre berechnen.
4	Analyse eines Wärmekissens mit Latentwärme	Die SuS können Latentwärmespeicher analysieren.
5	Analyse von im Sport verrichteter Arbeit	Die SuS können die bei Kniebeugen und Liegestützen verrichtete Arbeit analysieren.

Tabelle 3: Unterrichtssequenz Energieübertragung.



Der 42.800-Liter-Speicher wird in das Solarhaus eingebracht. Zum Heizen wird im Winter die Energie 5000 kWh benötigt. Im Sommer das Wasser des Tanks durch die Sonne von 20°C auf 90°C erhitzt.

Abbildung 5: Der Kontext Solartank wurde von den SuS als aktuell interessant empfunden.

Die erste Stunde zum Kochen (s. Abb. 3, 6) hat sich sehr bewährt, da die SuS von Alltagsgegenständen wie Tauchsieder, Wasserkocher und Mikrowelle ausgehen, diese in spannender Weise aussagekräftig analysieren und fachlich kompetent auf hohem Niveau Wirkungsgrade behandeln.

Die zweite und dritte Stunde zur spezifischen Wärmekapazität und Sonnenstrahlung (s. Abb. 7, 5) interessierte die SuS aufgrund der Solaranlage und aktivierte sie durch den Schülerversuch und die Analyse mit dem aussagekräftigen Ergebnissen über Wasser und Sonnenstrahlen.

Im Rahmen der Energiewende werden Energiespeicher immer wichtiger. Hier ist auch die Funktionsweise der Wärmekissen, die Energiespeicherung mit Phasenübergängen, von allgemeinem Interesse (s. Carmesin u. Kreier (2014)).

Kurzentwurf für eine Physikstunde

Thema der Unterrichtssequenz: Energieübertragung

1) Bestimmung der zugeführten Energie beim Teekochen

Didaktik: Stundenlernziel: Die SuS können die zugeführte Energie beim Erhitzen von Wasser mit verschiedenen Geräten experimentell bestimmen.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
Lernvoraussetzung: Thermometer, Mikrowelle, Tauchsieder, Wasserkocher	Anwenden
Lernvoraussetzung: Sieden bei 100°C	Nennen, Anwenden
Lernvoraussetzung: Energiestrom in die Umgebung	Erläutern, Anwenden
TLZ: Gerät mit geringster zugeführter Energie	Hypothese Aufstellen
TLZ: Versuche	Planen
TLZ: Versuche	Durchführen, Auswerten
TLZ: Energieverluste	Deuten

Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Entdeckenlassend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
3	<u>Hinführung:</u> Geräte zum Kochen	Einstiegsfolie, s. u.	LSG
5	<u>Aufgabenstellung:</u>	Entwickeln der Leitfrage	LSG
8	<u>Analyse 1:</u> Hypothesen	Aufstellen	Murmelg.
12	<u>Analyse 2:</u> Versuche	Planen	Murmelg.
30	<u>Lösung:</u> Durchführen, Auswerten	SE, themendifferenziert	GA
40	<u>Sicherung:</u> s. u.	SV, Reflexion, Anwendungsbezug, Deutung	SV
45	<u>Festigung:</u> HA stellen	Eventuell Fragen	LSG/EA

Geplantes Tafelbild

Bei welchem Gerät wird am wenigsten Energie zugeführt?

Vermutungen: Wasserkocher, da isoliert, Mikrowelle, da modern

Zu den Versuchen: Messen von 100°C durch Sieden oder mit dem Thermometer
Messen der zugeführten Energie durch das Energiemessgerät

Messwerte:

Wasserkocher: 186000 J; Mikrowelle: 649000 J; Tauchsieder: 258000J

Ergebnis: Beim Wasserkocher wird am wenigsten Energie zugeführt.

Deutung: Bei allen drei Geräten geht ein Teil der Energie in die Umgebung verloren. Die nicht verlorene Energie ist die genutzte Energie.

Information: Geht keine Energie in die Umgebung, so werden 167200 J zugeführt.

Abbildung 6: Kurzentwurf zur Erhitzung mit verschiedenen Geräten, Einstiegsfolie s.o.

Kurzentwurf für eine Physikstunde

Thema der Unterrichtssequenz: Energieübertragung

- 1) Bestimmung der zugeführten Energie beim Teekochen
- 2) Entdecken der spezifischen Wärmekapazität von Wasser

Didaktik: Stundenlernziel: Die SuS können ihre Entdeckung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser erläutern.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
Lernvoraussetzung: Beim Erhitzen zugeführten Energie	Bestimmen
Lernvoraussetzung: Warmwasserspeicher	Beschreiben
Lernvoraussetzung: Beim Erhitzen von 0,5 l Wasser um 80 K zugeführte Energie	Nennen
TLZ: Wärmekapazität von 42800 l Wasser	Hypothese Aufstellen
TLZ: Regeln $\Delta E \sim m$; $\Delta E \sim \Delta \vartheta$	Hypothese Aufstellen
TLZ: Versuche	Planen, Durchführen, Auswerten
TLZ: Spezifische Wärmekapazität	Erläutern, Bestimmen

Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Entdeckenlassend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
3	<u>Hinführung:</u> Solartank	Einstiegsfolie, s. u.	LSG
5	<u>Problemstellung:</u>	Entwickeln der Leitfrage, s. u.	LSG
12	<u>Analyse 1:</u> Hypothesen	Aufstellen	Murmelg.
15	<u>Analyse 2:</u> Versuche	Planen	Murmelg.
30	<u>Lösung:</u> Durchführen, Auswerten	SE, binnendifferenziert, AB	GA
40	<u>Sicherung:</u> s. u.	SV, Reflexion, Anwendungsbezug, Folgerungen	SV
45	<u>Festigung:</u> HA stellen	Eventuell Fragen	LSG/EA

Geplantes Tafelbild

Kann der Tank die Energie für einen Winter speichern?

Vermutungen:

Nein, denn $0,5 \text{ l} \rightarrow 167200 \text{ J} = 0,046 \text{ kWh}$
 $42800 \text{ l} \rightarrow 3937,6 \text{ kWh}$
 $80 \text{ °C} \rightarrow 3837,6 \text{ kWh}$
 $70 \text{ °C} \rightarrow 3445,4 \text{ kWh}$
 $\Delta E \sim m$; $\Delta E \sim \Delta \vartheta$

Zu den Versuchen: Verändere m bei konstantem $\Delta \vartheta$

Verändere $\Delta \vartheta$ bei konstantem m

Ergebnisse:

Die Energiezunahme ΔE ist proportional zur Masse m , bei konstanter Temperatur ϑ .

Die Energiezunahme ΔE ist proportional zur Temperatur ϑ , bei konstanter Masse m .

Die Energiezunahme ΔE ist proportional zum Produkt $m \cdot \vartheta$.

Der Proportionalitätsfaktor $c = \Delta E / (m \cdot \Delta \vartheta)$ ist $c = 4,18 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$ und heißt spezifische Wärmekapazität von Wasser.

Beim Erhitzen von 20 °C auf 90 °C nimmt das Wasser die Energie $\Delta E = c \cdot m \cdot \Delta \vartheta = 3478,7 \text{ kWh}$ auf.

Abbildung 7: Kurzentwurf zur spezifischen Wärmekapazität, Einstiegsfolie s.o.

Kurzentwurf für eine Physikstunde

Thema der Unterrichtssequenz: Energieübertragung

- 1) Bestimmung der zugeführten Energie beim Teekochen
- 2) Entdecken der spezifischen Wärmekapazität von Wasser
- 3) Entdecken der Solarkonstante

Didaktik: Stundenlernziel: Die SuS können die Solarkonstante aus Daten für einen Sonnenkollektor und die Transmission der Atmosphäre berechnen.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
Lernvoraussetzung: Wirkungsgrad	Berechnen
Lernvoraussetzung: Sonnenkollektor	Beschreiben
Lernvoraussetzung: Leistung	Berechnen
TLZ: Berechnen der Leistungen je m^2 : P_{Nutz} ; P_{su} ; P_{Wohnum}	Berechnen
TLZ: Energietransport von der Sonne zur Erde	Deuten

Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Aufgebend erarbeitend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Hinführung:</u> Sonnenkollektor	Einstiegsfolie, s. u.	LSG
8	<u>Aufgabenstellung:</u>	Entwickeln der Leitfrage, s. u.,	LSG
12	<u>Erarbeitung 1 und Sicherung 1:</u> Lösungsideen	Vorschlägen	Murmeln
20	<u>Erarbeitung 2:</u> S_{E}	Berechnen	PA
30	<u>Sicherung:</u> s. u.	SV, Reflexion, Deutung, Anwendungen, Bezeichnungen	SV
45	<u>Festigung:</u> Verschiedene Anwendungsaufgaben	Bearbeiten	EA

Geplantes Tafelbild

Welche Leistung haben die Sonnenstrahlen je Quadratmeter?

Schätzungen: 100 W, 300 W

Lösungsideen:

Berechne die Leistung für jede Sekunde und jeden Quadratmeter: P_{Nutz} ; P_{su} ; P_{Wohnum}

$$\eta = P_{Nutz} / P_{su}$$

$$P_{Nutz} = P / 10 = 0,63 \text{ kW}$$

$$P_{su} = P_{Nutz} / \eta = 0,9 \text{ kW}$$

$$P_{Wohnum} = P_{su} / 0,66 = 1,363 \text{ kW}$$

Ergebnisse: Die Leistung der auf einen Quadratmeter der Erde treffenden Sonnenstrahlen beträgt 1,363 kW.

Deutung: Die entsprechende Energie wird in Form von Strahlung durch das Weltall (Vakuum) von der Sonne zur Erde transportiert. Sie ist die Grundlage für das meiste Leben auf der Erde.

Bezeichnung: Diese Leistung pro Fläche von 1,363 kW/m² heißt Solarkonstante S_{E} .

Einstiegsfolie



Sonnenkollektor: $A = 10 \text{ m}^2$; $P = 6,3 \text{ kW}$; $\eta = 70\%$;
65% der Energie der Sonnenstrahlen, die auf die Erde
treffen, kommen am Boden an.

Abbildung 8: Kurzentwurf zur Sonnenstrahlung.

Kurzentwurf für eine Physikstunde

Thema der Unterrichtssequenz: Energieübertragung

- 1) Bestimmung der zugeführten Energie beim Teekochen
- 2) Entdecken der spezifischen Wärmekapazität von Wasser
- 3) Entdecken der Solarkonstante
- 4) Analyse eines Wärmekissens mit Latentwärme

Didaktik: Stundenlernziel: Die SuS können Latentwärmespeicher analysieren.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
Lernvoraussetzung: Messung Spezifische Wärmekapazität	Durchführen
Lernvoraussetzung: innere Energie	Erläutern
TLZ: Funktionsweise des Wärmekissens	Beschreiben
TLZ: Schmelzwärme von Wasser	Messen

Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Problemlösend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Hinführung:</u> Wärmekissen	DE, Funktionsweise beschreiben, TA	LSG
8	<u>Problemstellung:</u>	Entwickeln der Leitfrage, s. u.,	LSG
14	<u>Problemanalyse:</u> Kristallisationswärme, Kontrollversuch	Vermuten, Vorschlagen	Murmeltg.
35	<u>Lösung:</u> SE mit Wasser & Natriumacetat Trihydrat	Durchführen, Auswerten, themendifferenziert	GA
40	<u>Sicherung:</u> s. u.	SV, Reflexion, Anwendung	SV
45	<u>Festigung:</u> Verschiedene Anwendungsaufgaben, HA	Bearbeiten	EA



Gepantes Tafelbild

Wie funktioniert ein Wärmekissen?

Beschreibung: Anfangs ist im Kissen eine durchsichtige flüssige Substanz.

Wenn man das Metallplättchen drückt, dann erstarrt die Substanz und wird dabei warm.

Legt man das Kissen anschließend in heißes Wasser, dann lösen sich die Kristalle auf.

Vermutungen zum Funktionsprinzip: Beim Erstarren wird innere Energie frei gesetzt.

Beim Auflösen der Kristalle wird innere Energie aufgenommen.

Kontrollversuch: Beim Schmelzen von Wassereis müsste auch innere Energie aufgenommen werden. Wir schmelzen Wasser und untersuchen, wie viel Energie dabei aufgenommen wird.

Ergebnisse: 100 g Wassereis nimmt beim Schmelzen die innere Energie 33400 J auf.

100 g Natriumacetat Trihydrat nimmt beim Auflösen der Kristalle die innere Energie 16000 J auf.

Abbildung 9: Kurzentwurf zum Wärmekissen.

4 Gasdruck und Gasgesetze

Eine mögliche Realisierung der Unterrichtssequenz veranschauliche ich durch einen Vorschlag für die Stundenabfolge und Kurzentwürfe für einige zentrale Stunden.

Nr.	Stundenthema	Stundenlernziel
1	Entdeckung des Luftdrucks	Die messen den Luftdruck mit einem Smartphone, um ihre experimentelle Kompetenz zu schulen.
2	Entdeckung der Proportionalität von Druck und Volumen	Die entdecken die Proportionalität, um ihre Kompetenz zur Erkenntnisgewinnung schulen.
3	Entdeckung der Energiezunahme beim Komprimieren eines Gases	Die SuS entdecken die Energiezunahme, um ihre Fachkompetenz zu schulen.
4	Entdeckung der Druckzunahme beim Erhitzen eines Gases	Die SuS entdecken die Druckzunahme, um ihre Fachkompetenz zu schulen.
5	Analyse eines Mofamotors	Die SuS analysieren den Motor, um ihre Fachkompetenz zu schulen.
6	Entdeckung des universellen Gasgesetzes	Die SuS entdecken das Gesetz, um ihre Erkenntnisgewinnungskompetenz zu schulen.

Tabelle 4: Unterrichtssequenz Gasdruck.



Abbildung 10: Blutdruckmessung:
Die Blutdruckmessung ist eine bewährte Möglichkeit zur Einführung des Drucks unter Berücksichtigung der Interessenstudien (s. [Muckenfuß \(1995\)](#)).

Wesentliche Stunden der UE stelle ich im Folgenden dar.

Kurzentwurf für eine Physikstunde

Thema der Unterrichtssequenz: Gasdruck

Entdeckung des Luftdrucks

Didaktik: KUZ: Die messen den Luftdruck mit einem Smartphone, um ihre experimentelle Kompetenz zu schulen.

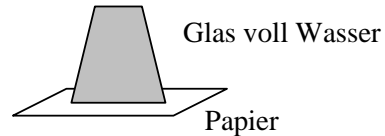
Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Allgemeinwissen zur Atmosphäre	Erläutern
LV: Allgemeinwissen zum Vakuum	Erläutern
DS: Eingeschlossenes Wasser im Glas beim Spülen	Beschreiben
DS: Messung	Planen, Durchführen
DS: Druck im Teilchenmodell am Beispiel	Erläutern

Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Entdeckenlassend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Einstieg:</u> Wasser im Glas	Beschreiben	LSG
7	<u>Problemstellung:</u> „	Entwickeln der Leitfrage	LSG
15	<u>Analyse:</u> Hypothese, Kontrollversuch	Aufstellen, Planen	Murmelg./LSG
25	<u>Lösung:</u> Messung Berechnung	GA	GA
30	<u>Sicherung:</u> s. u.	Reflexion, Anwendungsbezug	LSG
45	<u>Festigung</u>	DE SuS führen Einstiegsversuch durch	SSG
70	Reflexion: Teilchenmodell	AB zur Übertragung auf Einstiegsversuch, A1	PA
90	<u>Festigung:</u> Wie hoch könnte das Wasser im Glas stehen?	Berechnen 10 m	PA

Geplantes Tafelbild

Durchführung: Ein Glas voll Wasser wird durch ein Blatt Papier lose abgedeckt und mit der Öffnung nach unten gehalten
Beobachtung: Das Wasser läuft nicht aus.



Warum läuft das Wasser nicht aus dem Glas?

Durchführung: Ein Glas voll Wasser wird durch ein Blatt Papier lose abgedeckt und mit der Öffnung nach unten gehalten.

Vermutungen: Sonst müsste im Glas ein Vakuum entstehen, das geht nicht.

Die Luft drückt das Wasser in das Glas.

Die Luft übt auf das Blatt eine Kraft F_L nach oben aus.

Das Wasser übt auf das Blatt eine Kraft F_W nach unten aus.

$$F_L > F_W$$

Überprüfung der Vermutungen:

$$F_W = m \cdot g = 0,2 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} = 2 \text{ N}$$

Messung des Luftdrucks mit dem Smartphone: $P = 1000$ Millibar

$$1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa} = 100\,000 \text{ N/m}^2 \rightarrow P = 100\,000 \text{ N/m}^2$$

$$F_L = p \cdot A = 100\,000 \text{ N/m}^2 \cdot 0,001 \text{ m}^2 = 100 \text{ N}$$

Ergebnis: Der Luftdruck beträgt in Stade 100 000 Pa.

Die Einheit des Druck ist $1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$ (Pascal).

Ein Gas mit einem Druck P übt auf eine ebene Fläche A die Kraft $F = P \cdot A$ aus.

Zu 1a) Die Teilchen des Gases prallen gegen den Deckel. Dabei üben sie eine Kraft auf den Deckel nach oben aus.

$$\text{Zu 1b) } P = m \cdot g / A + 100\,000 \text{ Pa} = 5 \text{ N} / 0,01 \text{ m}^2 + 100\,000 \text{ Pa} = 100\,500 \text{ Pa} = 500 \text{ Pa Überdruck}$$

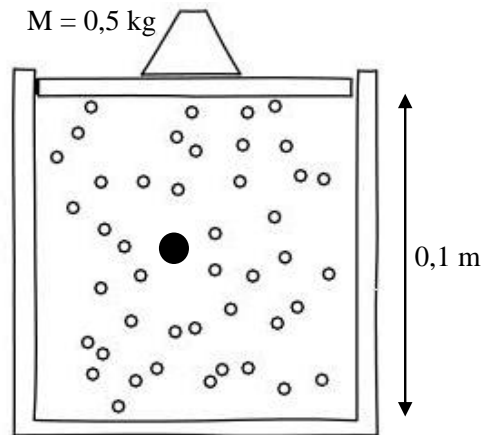
$$\text{Zu 1c) } F = P \cdot A = 100\,500 \text{ Pa} \cdot 0,01 \text{ m}^2 = 1005 \text{ N}$$

$$\text{Zu 2) } F = P \cdot A = 100\,000 \text{ N/m}^2 \cdot 0,4 \cdot 0,4 \text{ m}^2 = 16\,000 \text{ N}$$

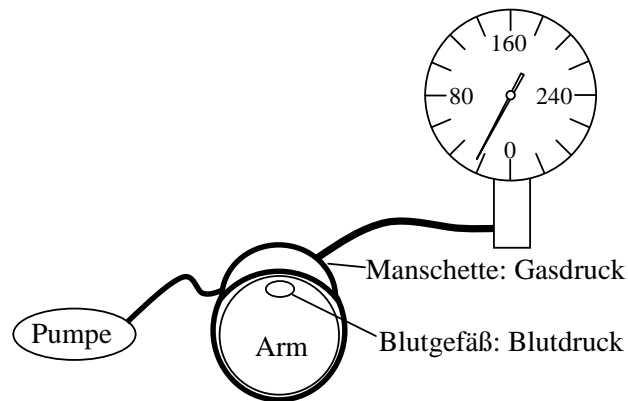
$$\text{Zu 3) } \Delta P / \Delta h = 13 \text{ Pa/m}$$

$$\text{Zu 4) } p_1 = 120 \text{ mmHg} = 160 \text{ hPa}; \quad p_1 = 90 \text{ mmHg} = 120 \text{ hPa}$$

f
√
√
√
√



- 1) Ein Würfel mit der Kantenlänge 0,1 m schließt ein Gas ein. Auf dem membranförmigen Deckel befindet sich eine Masse von 0,5 kg.
 - a) Erkläre, wie das eingeschlossene Gas die Masse oben hält.
 - b) Berechne den Druck des Gases im Würfel.
 - c) Berechne die Kraft, die das Gas auf eine Seitenwand ausübt.
- 2) Paul liegt waagrecht in der Hängematte. Sein quadratischer Brustkorb hat eine Fläche von 40 cm mal 40 cm. Berechne die Kraft, welche die Luft von oben auf seinen Brustkorb ausübt.
- 3) Miss den Luftdruck abhängig von der Höhe an verschiedenen Stellen des Gebäudes.



- 4) Miss den Blutdruck. Erkläre, wie das Messverfahren funktioniert.

Blutdruckmessung:

Höre den Puls ständig ab.

Lege die Manschette an.

Pumpe die Manschette auf, bis der Puls gerade nicht mehr zu hören ist.

Lasse Luft aus, bis der Puls gerade zu hören ist und notiere den Druck p_1 .

Lasse Luft aus, bis der Puls gerade nicht mehr zu hören ist und notiere Druck p_2 .

Umrechnung: 1000 hPa = 750 mmHg.

Kurzentwurf für eine Physikstunde

Thema der Unterrichtssequenz: Gasdruck

Entdeckung des Luftdrucks

Entdeckung der Proportionalität von Druck und Volumen

Didaktik: KUZ: Die entdecken die Proportionalität, um ihre Kompetenz zur Erkenntnisgewinnung schulen.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Luftdruck	Erläutern
LV: Gasdruck	Erläutern
LV: Stempeldruck	Erläutern, Berechnen
DS: Druck im eingeschlossenen Gas	Berechnen
DS: Messung	Planen, Durchführen
DS: Gesetz von Boyle-Mariotte	Experimentelles Begründen

Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Problemlösend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
15	<u>Sicherung:</u> Berechnung des Drucks im eingeschlossenen Gas	Hausaufgabenvortrag, vermutlich wurde Luftdruck übersehen	SV LSG
20	<u>Einstieg:</u> Bild	beschreiben	LSG
25	<u>Problemstellung:</u> „	Entwickeln der Leitfrage	LSG
35	<u>Analyse:</u> Versuchsplanung	Zielformulierung, Vermutung, Planen	MuG/LSG
55	<u>Lösung:</u> Messung Berechnung	GA	GA
65	<u>Sicherung:</u> s. u.	Reflexion, Anwendungsbezug	LSG
90	<u>Festigung</u>	AB, Üben	SSG

Geplantes Tafelbild

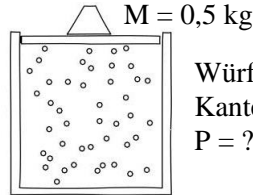
$$A = 0,1 \text{ m} \cdot 0,1 \text{ m} = 0,01 \text{ m}^2$$

$$F = M \cdot g = 0,5 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} = 5 \text{ N}$$

$$\text{Druck durch Masse: } P_M = F/A = 5 \text{ N}/0,01 \text{ m}^2 = 500 \text{ Pa}$$

$$\text{Druck durch Luft: } P_L = 100 \text{ 000 Pa}$$

$$\text{Gasdruck im Würfel: } P = 100 \text{ 500 Pa}$$



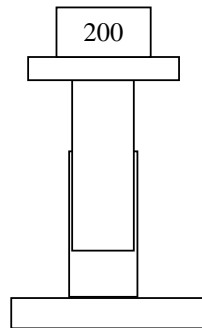
Würfel
Kantenlänge 0,1 m
P = ?

Reicht das Gas in der Pressluftflasche?

Wie hängt das Volumen der Luft vom Druck ab?

Vermutungen: je größer P desto kleiner V $\sqrt{\quad}$; $P \sim 1/V \sqrt{\quad}$ d. h. $P \cdot V = \text{Konstant} \sqrt{\quad}$

Versuchsskizze: Radius: 1,2 cm; Fläche: $A = 3,14 \cdot r^2 = 0,00045 \text{ m}^2$



m in g	F in N	P_m in Pa	P in Pa	V in Liter	$P \cdot V$ in J
400	4	8842	108842	0,000033	3,6
1000	10	22105	122105	0,00003	3,7
2000	20	44210	144210	0,000025	3,6
5000	50	110524	210524	0,000018	3,8

$$8 \text{ Liter} \cdot 300 \text{ bar} = V \cdot 1 \text{ bar} \quad | : 1 \text{ bar}$$

$$V = 2400 \text{ Liter}; 2400 \text{ Liter}/25 \text{ Liter/min} = 96 \text{ min}$$

Ergebnisse: Das Produkt aus dem Druck P und dem Volumen V eines eingeschlossenen ist konstant, kurz $P \cdot V = \text{Konstante}$.

Die Luft reicht für 96 min, das genügt.

Lösungen: Zu 1a) $P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \rightarrow 275 \text{ bar} \cdot 0,2 \text{ Mio. m}^3 = 1 \text{ bar} \cdot V \rightarrow V = 55 \text{ Mio. m}^3$

Zu 1b) $22 \text{ Mrd. m}^3 / 0,055 \text{ Mrd. m}^3 = 400$ Zu 1c) $22/96 = 23\%$

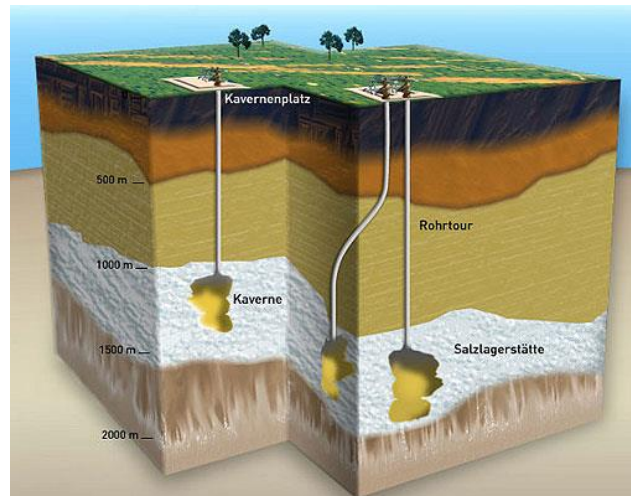
Zu 2) $F = m \cdot g = 20 \text{ 000 kg} \cdot 10 \text{ N/kg} = 200 \text{ 000 N}$; Überdruck $P = 140 \text{ bar} = 14 \text{ 000 000 Pa}$

$$P = F/A \rightarrow A = F/P = 200 \text{ 000 N}/14 \text{ 000 000 Pa} = 0,014 \text{ m}^2 = 140 \text{ cm}^2$$

Einstiegsbild:

Nötige Einsatzdauer: 90 min
Luftbedarf: 25 Liter je min
Flaschenvolumen: 8 Liter
Gasdruck: $300 \text{ bar} = 300 \cdot 100 \text{ 000 Pa}$





- 1) Erdgas wird in großen Mengen unterirdisch in Gaskavernen gelagert. Eine solche Kaverne hat ein Volumen 0,2 Millionen Kubikmetern. Das Erdgas wird mit einem Druck von 275 bar eingelagert.
 - a) Bestimme das Volumen des eingelagerten Gases, wenn der Gasdruck gleich dem Luftdruck ist.
 - b) In Deutschland können 22 Milliarden Kubikmeter Erdgas in Kavernen gelagert werden. Berechne die dafür benötigte Anzahl der obigen Gaskavernen.
 - c) In Deutschland werden jährlich 96 Milliarden Kubikmeter Erdgas verbraucht. Berechne den Prozentsatz des Jahresverbrauchs, der eingelagert werden kann.



- 2) Ein pneumatischer Wagenheber kann bis zu 20 t heben und hat einen Gasdruck von bis zu 141 bar. Berechne die Querschnittsfläche des Kolbens.

Kurzentwurf für eine Physikstunde, Dr. Carmesin

Thema der Unterrichtssequenz: Gasdruck

Entdeckung des Luftdrucks

Entdeckung der Proportionalität von Druck und Volumen

Entdeckung der Energiezunahme beim Komprimieren eines Gases

Didaktik: KUZ: Die SuS entdecken die Energiezunahme, um ihre Fachkompetenz zu schulen.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Luftdruck	Erläutern
LV: Gasdruck	Erläutern
LV: Stempeldruck	Erläutern, Berechnen
LV: Mechanische Energie $\Delta E = F \cdot \Delta s$	Erläutern, Berechnen
DS: Messung	Planen, Durchführen
DS: $\Delta E = P \cdot \Delta V$	Begründen

Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Problemlösend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Einstieg:</u> Video Rakete	Beschreiben	LSG
10	<u>Problemstellung:</u> Aufpumpen	Entwickeln der Leitfrage	LSG
35	<u>Analyse:</u> Versuchsplanung	Zielformulierung, Vermutung, Planen	MuG/LSG
55	<u>Lösung:</u> Messung, Berechnung	GA; binnendifferenziert $\Delta E = P \cdot \Delta V$	GA
65	<u>Sicherung:</u> s. u.	Reflexion, Anwendungsbezug	LSG
90	<u>Festigung</u>	AB, Üben	SSG

Geplantes Tafelbild

Wie viel Kraft F und Energie ΔE benötigt man zum Aufpumpen?

Beispiele: Lufrakete: $V = 1 \text{ L}$; P bis 5 bar;

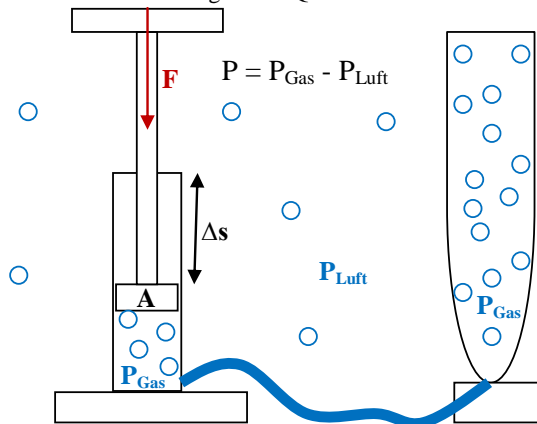
Fahrradschlauch

Ideen: je größer P desto größer F ✓

Je größer P desto größer ΔE ✓

$P = F/A \rightarrow$ wichtig ist die Querschnittsfläche A der Pumpe ✓

$\Delta E = F \cdot \Delta s$ ✓



$\Delta s = 0,4 \text{ m}$

P in bar	1	2	3	4	5
F in N	100	200	300	400	500
ΔE in J, je Kompression	40	80	120	160	200

Anzahl der Kompressionen: $N = 12$

Querschnittsfläche: $A = F/P = 0,001 \text{ m}^2 = 10 \text{ cm}^2$

Mittlere Energie je Kompression: $\bar{E} = 120 \text{ J}$

Energie $E = N \cdot \bar{E} = 1440 \text{ J}$

Ergebnisse:

- Beim Aufpumpen nimmt die Kraft F mit dem Überdruck P zu; dabei gilt $F = P \cdot A$ mit der Querschnittsfläche A des Zylinders der Pumpe.
- Beim Aufpumpen nimmt die Energiezunahme ΔE je Kompression mit dem Überdruck P zu; dabei gilt $\Delta E = F \cdot \Delta s$ mit der Kompressionsstrecke Δs .
- Erweitern mit A ergibt $\Delta E = (F/A) \cdot (A \cdot \Delta s) = P \cdot \Delta V$ mit dem Volumen ΔV des Zylinders der Pumpe.

Einstiegsvideo:



Lösungen: Zu 1a) $F = P \cdot A = 250\,000 \text{ N/m}^2 \cdot 0,001 \text{ m}^2 = 250 \text{ N}$

Zu 1b) $\Delta E = P \cdot \Delta V = 250\,000 \text{ N/m}^2 \cdot 0,0003 \text{ m}^3 = 75 \text{ J}$

Zu 2a) $A = F/P$; $F = m \cdot g = 21\,000 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} = 210\,000 \text{ N}$;

$P = 140 \cdot 100\,000 \text{ N/m}^2 = 14\,000\,000 \text{ N/m}^2$

$A = 210\,000 \text{ N} / 14\,000\,000 \text{ N/m}^2 = 0,015 \text{ m}^2$

Zu 2b) $\Delta E = P \cdot \Delta V = 14\,000\,000 \text{ N/m}^2 \cdot 0,00015 \text{ m}^3 = 2100 \text{ J}$

$\Delta E = m \cdot g \cdot \Delta h = 21\,000 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} \cdot 0,01 \text{ m} = 2100 \text{ J}$

Kurzentwurf für eine Physikstunde, Dr. Carmesin

Thema der Unterrichtssequenz: Gasdruck

Entdeckung des Luftdrucks

Entdeckung der Proportionalität von Druck und Volumen

Entdeckung der Energiezunahme beim Komprimieren eines Gases

Entdeckung der Druckzunahme beim Erhitzen eines Gases

Didaktik: KUZ: Die SuS entdecken die Druckzunahme, um ihre Fachkompetenz zu schulen.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Gasdruck	Erläutern
LV: Smartphone Druckmessung	Erläutern, Anwenden
LV: Temperaturmessung	Erläutern, Anwenden
DS: Messung	Planen, Durchführen
DS: p wächst linear mit ϑ	Begründen
DS: p = 0 bei -273°C \rightarrow Absoluter Temperaturnullpunkt	Begründen

Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Problemlösend

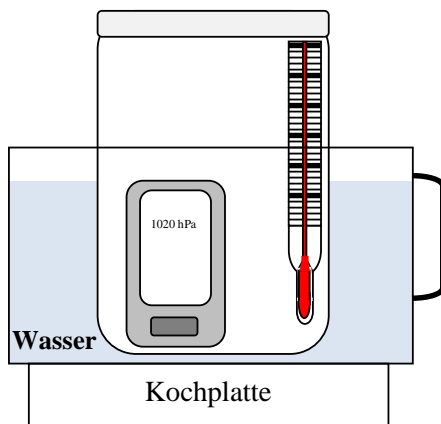
Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Einstieg:</u> Video Spraydose	Beschreiben	LSG
10	<u>Problemstellung:</u> Aufpumpen	Entwickeln der Leitfrage	LSG
35	<u>Analyse:</u> Versuchsplanung	Zielformulierung, Vermutung, Planen	MuG/LSG
55	<u>Lösung:</u> Messung, Auswertung	GA; binnendifferenziert $P(-273^\circ\text{C}) = 0$	GA
65	<u>Sicherung:</u> s. u.	Reflexion, Anwendungsbezug	LSG
90	<u>Festigung</u>	AB, Üben	SSG

Gepantes Tafelbild

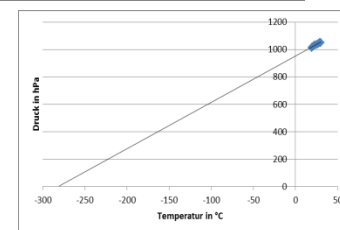
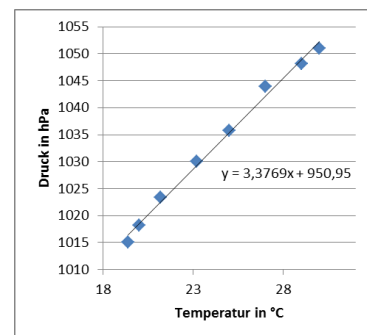
Wie nimmt der Gasdruck mit der Temperatur zu?

Beispiele: Spraydose, Gasflasche, Fahrradschlauch

Ideen: je heißer, desto größer p \checkmark p proportional zur Temperatur in $^\circ\text{C}$ f



ϑ in $^\circ\text{C}$	p in hPa
19,4	1015
20	1018,2
21,2	1023,3
23,2	1030
25	1035,8
27	1043,9
29	1048,2
30	1051



Ergebnisse:

- p steigt linear mit der Temperatur.
- p = 0 bei -281°C (Literaturwert: -273°C)
- Da p nie negativ ist, ist -273°C der **absolute Temperaturnullpunkt**.

Bezeichnung: Neue Temperaturskala: Kelvinskala: $x^\circ\text{C} = (x-273)\text{K}$; Zeichen T

Beispiele: $0\text{K} = -273^\circ\text{C}$; $273\text{K} = 0^\circ\text{C}$; $37^\circ\text{C} = 310\text{K}$

Folgerung: Mit der Kelvinskala ist $p \sim T$ bei konstantem Volumen (Gasgesetz von Amontons)

Einstiegsvideo:



Lösungen: Zu 1) $T_1 / p_1 = T_2 / p_2 \rightarrow p_2 = p_1 \cdot T_2 / T_1$

$p_2 = 4\text{ bar} \cdot 973\text{K} / 293\text{K} = 13,3\text{ bar}$

Zu 2) $T_1 / p_1 = T_2 / p_2 \rightarrow p_2 = p_1 \cdot T_2 / T_1$

$p_2 = 10\text{ bar} \cdot 2100\text{K} / 700\text{K} = 30\text{ bar}$

Kurzentwurf für eine Physikstunde, Dr. Carmesin

Thema der Unterrichtssequenz: Gasdruck

Entdeckung des Luftdrucks
 Entdeckung der Proportionalität von Druck und Volumen
 Entdeckung der Energiezunahme beim Komprimieren eines Gases
 Entdeckung der Druckzunahme beim Erhitzen eines Gases
 Analyse eines Mofamotors

Entdeckung des universellen Gasgesetzes

Didaktik: KUZ: Die SuS entdecken das Gesetz, um ihre Erkenntnisgewinnungskompetenz zu schulen.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Gasgesetz von Amontons, $p \sim T$	Erläutern, Anwenden
LV: Gesetz von Boyle-Mariotte, $p \sim 1/V$	Erläutern, Anwenden
DS: Komprimieren, Erhitzen	Erläutern
DS: Gasgesetze	Anwenden
DS: Universelles Gasgesetz	Begründen, Anwenden
DS: Zuladung	

Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Interaktiv Erarbeitend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Einstieg:</u> Einstiegsbild	Beschreiben	LSG
10	<u>Entwickeln der Frage:</u> Zuladung	Entwickeln der Leitfrage	LSG
30	<u>Analyse:</u> Ideen, universelles Gasgesetz	Sammeln, Einführen, z. B. Teppich	MuG/LSG
60	<u>Erarbeitung:</u> maximale Zuladung	GA: Berechnen	GA
70	<u>Sicherung:</u> s. u.	Reflexion, Anwendungsbezug	LSG
90	<u>Festigung</u>	AB, Üben	SSG

Geplantes Tafelbild

Kann man 700 kg in den Ballon laden?

Ideen: Ein Teil der Luft entweicht beim Erhitzen. Die Dichte sinkt.

Erhitzen des Ballons: V wächst mit T bei konstantem p
 Bisherige Gasgesetze: $p \sim 1/V$ bei konstantem T
 $p \sim T$ bei konstantem V

Info: Konsequenz: $p \sim T \cdot 1/V$

Im Gas steigt p immer gemäß: $p \sim T \cdot 1/V$, **universelles Gasgesetz**, gilt für alle Gase

$$\text{Masse der Luft: } m_1 = 4000 \text{ m}^3 \cdot 1,3 \text{ kg/m}^3 = 5200 \text{ kg}$$

Geplante Schülerpräsentation: $V_1/T_1 = V_2/T_2$

$$\rightarrow V_2 = V_1 \cdot T_2/T_1 = 4000 \text{ m}^3 \cdot 363\text{K}/293\text{K} = 4956 \text{ m}^3$$

$$\rho_2 = 5200 \text{ kg}/4956 \text{ m}^3 = 1,05 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Luftmasse: } m_2 = 4000 \text{ m}^3 \cdot 1,05 \text{ kg/m}^3 = 4200 \text{ kg}$$

$$\text{Gehoben werden kann die Differenz: } \Delta m = m_1 - m_2 = 1000 \text{ kg}$$

$$\text{Mögliche Zuladung: } 1000 \text{ kg} - 250 \text{ kg} = 750 \text{ kg}$$

Ergebnisse: Es können maximal 750 kg zugeladen werden.

Universelles Gasgesetz: Das Produkt aus Druck und Volumen ist proportional zur absoluten

Temperatur: $p \cdot V \sim T$

Info: Der Proportionalitätsfaktor ist $N \cdot k_B$.

Dabei ist N die Teilchenzahl im Gas und k_B die Boltzmann-Konstante $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$.

Insgesamt ist $p = N \cdot k_B \cdot T \cdot 1/V$ oder: $p \cdot V = N \cdot k_B \cdot T$

Folgerung: Bei konstantem Druck ist $V \sim T$ (Gasgesetz von Gay-Lussac)

Lösungen: Zu 1) Konstanter Druck $\rightarrow V_1/T_1 = V_2/T_2 \rightarrow V_2 = V_1 \cdot T_2/T_1 \rightarrow V_2 = 1 \text{ m}^3 \cdot 375\text{K}/300\text{K} = 1,25 \text{ m}^3$
 $\rho_2 = 1,3 \text{ kg}/1,25 \text{ m}^3 = 1,04 \text{ kg/m}^3 \rightarrow$ es fehlen 0,26 kg, diese können gehoben werden.

Zu 2) Konstantes Volumen $\rightarrow T_1/p_1 = T_2/p_2 \rightarrow p_2 = p_1 \cdot T_2/T_1 \rightarrow p_2 = 200 \text{ kPa} \cdot 600\text{K}/300\text{K} = 400 \text{ kPa}$

Zu 3) Konstante Temperatur: $V_1 \cdot p_1 = V_2 \cdot p_2 \rightarrow p_2 = p_1 \cdot V_1/V_2 \rightarrow p_2 = 100 \text{ kPa} \cdot 100 \text{ ml}/10 \text{ ml} = 1000 \text{ kPa}$

Erfahrung: in 85 min gut gelaufen.

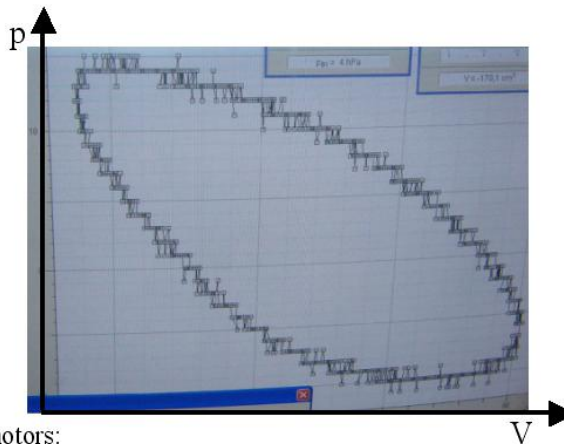
5 Stirlingmotor und maximal möglicher Wirkungsgrad

Eine mögliche Realisierung der Unterrichtssequenz veranschauliche ich durch einen Vorschlag für die Stundenabfolge und Kurzentwürfe für einige zentrale Stunden.

Nr.	Stundenthema	Stundenlernziel
1	Einführung des idealen Stirling'schen Kreisprozesses	Die SuS erläutern den Prozess, um ihre Fachkompetenz zu schulen.
2	Entdeckung des maximalen Wirkungsgrades des idealen Stirling'schen Kreisprozesses	Die SuS leiten ? her, um ihre Erkenntnisgewinnungskompetenz zu schulen.
3	Anwendung des Stirlingmotors als Wärmepumpe	Die kehren den Motor um, um ihre Erkenntnisgewinnungskompetenz zu schulen.
4	Herleitung des maximalen Wirkungsgrades einer beliebigen Wärme-Kraft-Maschine	Die SuS leiten den maximalen Wirkungsgrad her, um ihre Mathematisierungskompetenz zu schulen.
5	Messung des Wirkungsgrades eines Stirlingmotors	Die SuS messen den Wirkungsgrad mithilfe eines pV-Diagramms, um ihre experimentelle Kompetenz zu schulen.

Tabelle 5: Unterrichtssequenz Stirlingmotor und maximal möglicher Wirkungsgrad.

Arbeitsblatt, Physik 10, Dr. Carmesin



Messwerte zum Wirkungsgrad des Stirlingmotors:
 Heizspannung $U = 11 \text{ V}$; Heizstromstärke $I = 1,35 \text{ A}$; Umdrehungsdauer $T = 4,25 \text{ s}$; pV-Diagramm:
 $\Delta p = 13 \text{ hPa}$; $\Delta V = 20 \text{ cm}^3$; Fläche: $W = 0,0161 \text{ J}$.

Abbildung 11: Arbeitsblatt zur Messung des Wirkungsgrades des Stirlingmotors.

Wesentliche Stunden der UE stelle ich im Folgenden dar.

Kurzentwurf für eine Physikstunde

Thema der Unterrichtssequenz: Stirlingmotor

Einführung des idealen stirlingschen Kreisprozesses

Didaktik: KUZ: Die SuS erläutern den Prozess, um ihre Fachkompetenz zu schulen.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Arbeit $\Delta E = W_A = \bar{p} \cdot \Delta V$	Erläutern, Berechnen
LV: Gasgesetze	Erläutern, Anwenden
DS: Stirlingmotor, Arbeitstakte	Beschreiben
DS: Stirlingmotor, idealer Kreisprozess	Erläutern

Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Darbietend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Einstieg:</u> Stirlingmotor	Beschreiben	LSG
10	<u>Konzepthilfe 1: Anknüpfung & Fragestellung:</u> s.u.: BISHHER/NEU	Entwickeln der Leitfrage, Vermuten	LSG
20	<u>Konzepthilfe 2: Vermittlung von Ankerbegriffen und Regeln:</u> s. u. IB	IWB, Infoblatt IB	LV
30	<u>Überprüfung:</u> IB, s. u.	Berechnen, Aufgabe IB	GA
40	<u>Sicherung:</u> s. u.	SV, IWB, Reflexion	SV
50	<u>Rückgriff:</u> Energieumwandlungen	Analysieren	MuG/LSG
80	<u>Festigung:</u> p-V-Diagramm	Eventuell Fragen, PA, SV	PA
90	<u>Ausstieg:</u> Motoren	Nennen, Vergleichen	SSG

Geplantes Tafelbild

BISHHER: Benzinmotor:

Gas wird erhitzt und verrichtet Arbeit → Gas wird ausgestoßen → kompliziert

NEU: Stirlingmotor:

Gas wird erhitzt und verrichtet Arbeit → Gas wird gekühlt und beibehalten → einfach

Wie funktioniert ein Stirlingmotor?

Vermutungen: thermische Energie → Bewegungsenergie ✓
welche Takte?

Geplante Ergebnisse der GA

I. Konstante Temperatur: $V_1 \cdot p_1 = V_2 \cdot p_2 \rightarrow p_2 = p_1 \cdot V_1 / V_2 \rightarrow p_2 = 33\,000 \text{ kPa} \cdot 100 \text{ ml} / 1100 \text{ ml} = 3000 \text{ kPa}$

II. Konstantes Volumen → $T_1 / p_1 = T_2 / p_2 \rightarrow p_2 = p_1 \cdot T_2 / T_1 \rightarrow p_2 = 3000 \text{ kPa} \cdot 900\text{K} / 300\text{K} = 1000 \text{ kPa}$

III. Konstante Temperatur: $V_1 \cdot p_1 = V_2 \cdot p_2 \rightarrow p_2 = p_1 \cdot V_1 / V_2 \rightarrow p_2 = 1000 \text{ kPa} \cdot 1100 \text{ ml} / 100 \text{ ml} = 11\,000 \text{ kPa}$

IV. Konstantes Volumen → $T_1 / p_1 = T_2 / p_2 \rightarrow p_2 = p_1 \cdot T_2 / T_1 \rightarrow p_2 = 11\,000 \text{ kPa} \cdot 900\text{K} / 300\text{K} = 33\,000 \text{ kPa}$

Ergebnisse: Der Stirlingmotor hat vier Takte:

Arbeitstakt: Gas gibt mechanische Energie ans Schwungrad. Konstante = $T = T_{\text{hoch}}$

Verdrängungstakt 1: Gas wird gekühlt. Konstante = $V = V_{\text{hoch}}$

Kompressionstakt: Schwungrad gibt mechanische Energie ans Gas. Konstante = $T = T_{\text{niedrig}}$

Verdrängungstakt 2: Gas wird gewärmt. Konstante = $V = V_{\text{niedrig}}$

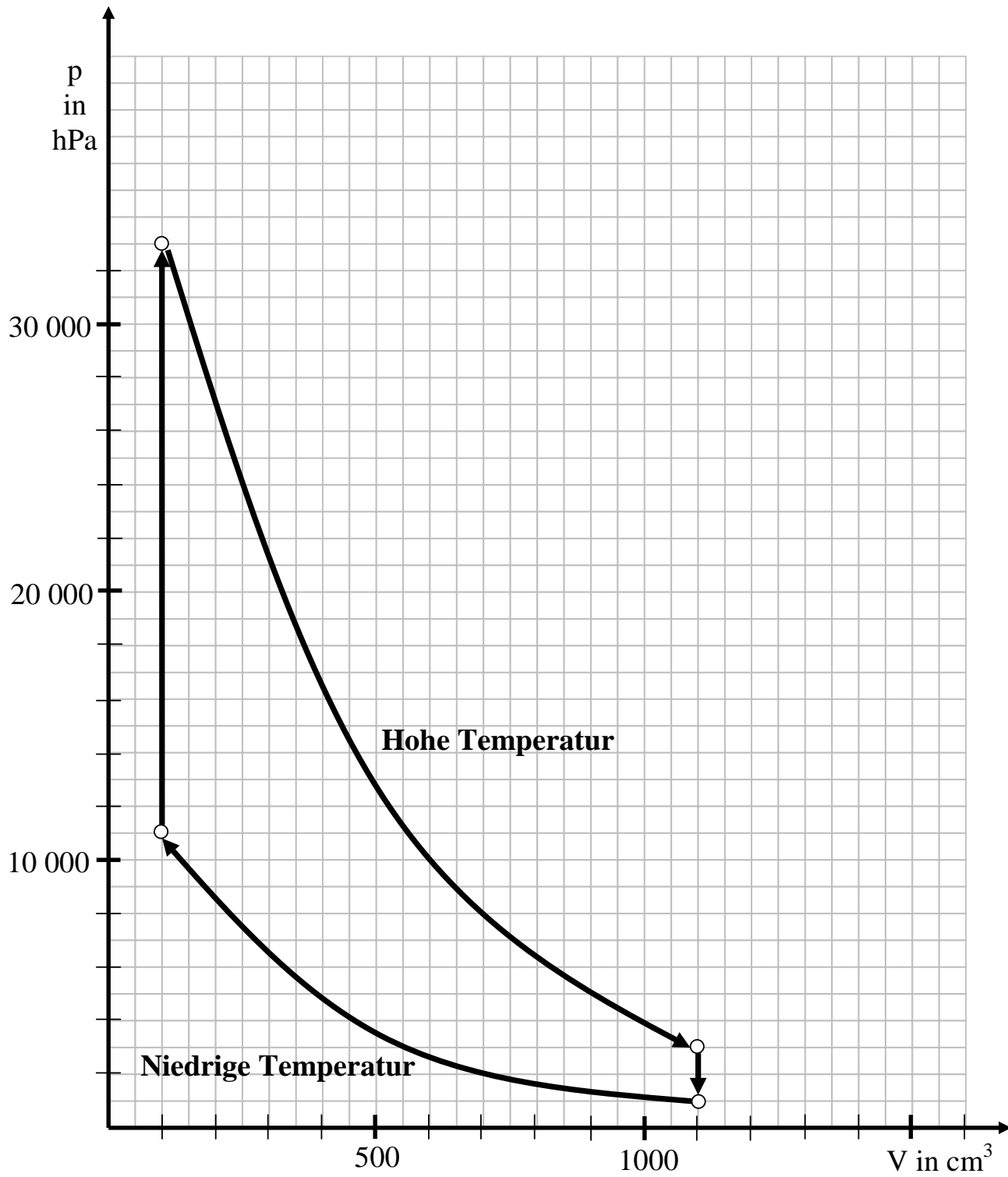
Energieumwandlungen:

Der Stirlingmotor wandelt thermische Energie in mechanische Energie und umgekehrt.

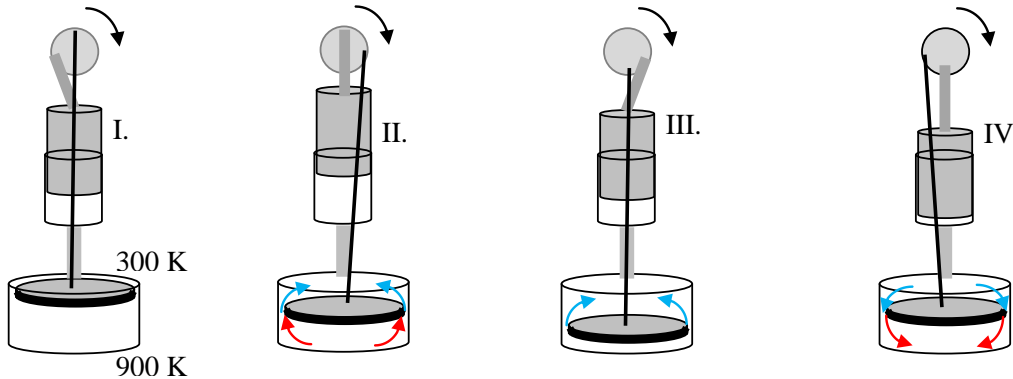
Anscheinend überwiegt die Umwandlung von thermischer Energie in mechanische Energie.

Literaturhinweis: Der Stirlingmotor. URL: <http://www.physik.fu-berlin.de/studium/schulkontakte/physlab/labor/img/Stirlingmotor1.pdf?1359122405>. Download 7.4.2014.

Zeichne für den im Fallbeispiel behandelten idealen stirlingschen Kreisprozess den Verlauf der Zustände im p-V-Diagramm. -- Hier mit Lösung --



Idealer stirlingscher Kreisprozess



Ein idealer stirlingscher Kreisprozess hat ein Arbeitsgas mit einer Temperatur T , einem Volumen V und einem Druck p .

Im Fallbeispiel ist zu Beginn: $(V|T|p) = (100 \text{ cm}^3|900 \text{ K}|33\,000 \text{ hPa})$

Anschließend laufen folgende Takte ab:

I. Arbeitstakt

Das Gas expandiert bei $T = 900 \text{ K}$ (da Gas im unteren heißen Bereich) von 100 cm^3 auf 1100 cm^3 .

Das Gas gibt mechanische Energie an das Schwungrad.

Das Gas nimmt dazu nötige thermische Energie aus der unteren heißen Platte.

II. Verdrängungstakt 1

Das Gas kühlt bei $V = 1100 \text{ cm}^3$ auf $T = 300 \text{ K}$.

Der Verdrängerkolben schiebt heißes Gas in oberen kalten Bereich und kühlt es so.

Das Gas gibt thermische Energie an den Verdrängerkolben.

III. Kompressionstakt

Das Gas wird bei $T = 300 \text{ K}$ von 1100 cm^3 auf 100 cm^3 komprimiert.

Das Schwungrad gibt mechanische Energie an das Gas.

Das Gas gibt dabei auftretende thermische Energie an die obere kalte Platte.

IV. Verdrängungstakt 2

Das Gas wird bei $V = 100 \text{ cm}^3$ auf $T = 900 \text{ K}$ erhitzt.

Der Verdrängerkolben schiebt heißes Gas in unteren heißen Bereich und erhitzt es so.

Das Gas nimmt die thermische Energie am Verdrängerkolben auf.

Aufgabe: Berechne die fehlenden Drucke.

Takt	T in K	V in cm^3	p in hPa
-	900	100	33 000
Arbeitstakt	-	-	-
-	900	1100
Verdrängungstakt 1	-	-	-
-	300	1100
Kompressionstakt	-	-	-
-	300	100
Verdrängungstakt 2	-	-	-

Kurzentwurf für eine Physikstunde

Thema der Unterrichtssequenz: Stirlingmotor

Einführung des idealen Stirling'schen Kreisprozesses

Entdeckung des maximalen Wirkungsgrades des idealen Stirling'schen Kreisprozesses

Didaktik: KUZ: Die SuS leiten η her, um ihre Erkenntnisgewinnungskompetenz zu schulen.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Gasgesetze & Arbeit $\Delta E = W_A = \bar{p} \cdot \Delta V$	Erläutern, Berechnen
LV: Stirlingmotor, idealer Kreisprozess, Drucke	Erläutern, Berechnen
DS: Stirlingmotor, idealer Kreisprozess, Energiebilanz	Erläutern, Berechnen
DS: Stirlingmotor, idealer Kreisprozess, η	Erläutern, Berechnen

Methodik: Dominantes Lehrverfahren: Entdeckenlassend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Einstieg:</u> Stirlingmotor, Takte	Beschreiben	LSG
10	<u>Fragestellung:</u> s.u.	Entwickeln der Leitfrage	LSG
20	<u>Analyse:</u> s. u.	TA, Ideen	MuG/LSG
50	<u>Lösung:</u> s. u.	Berechnen, binnendifferenziert η	GA
60	<u>Sicherung:</u> s. u.	SV, Reflexion	SV
90	<u>Festigung:</u> weitere Beispiele, Anwendungen	Messen, Analysieren, Eintragen am p-V-Diagramm	PA/SV

Geplantes Tafelbild

Wie viel Energie wird beim Stirlingmotor genutzt?

Ideen: thermische Energie \rightarrow Bewegungsenergie, Energiebilanz im Fallbeispiel?

$$\Delta E_{\text{mechanisch}} = \bar{p} \cdot \Delta V \quad \text{Vereinbarung wir rechnen mit Mittelwerten des Drucks.}$$

$$\text{Energieerhaltung} \rightarrow \Delta E_{\text{thermisch}} = -\Delta E_{\text{mechanisch}}$$

Skizze s. u.

Geplante Ergebnisse der GA

Arbeitstakt:

$$\Delta E_{\text{mechanisch}} = \bar{p} \cdot \Delta V = (33000 \text{ hPa} + 3000 \text{ hPa})/2 \cdot 1000 \text{ cm}^3 = 18000 \text{ h N/m}^2 \cdot 0,001 \text{ m}^3 = 18 \text{ hJ}$$

$$\Delta E_{\text{mechanisch}} = -18 \text{ hJ}$$

Kompressionstakt:

$$\Delta E_{\text{mechanisch}} = -\bar{p} \cdot \Delta V = -(11000 \text{ hPa} + 1000 \text{ hPa})/2 \cdot 1000 \text{ cm}^3 = -6000 \text{ h N/m}^2 \cdot 0,001 \text{ m}^3 = -6 \text{ hJ}$$

$$\Delta E_{\text{mechanisch}} = 6 \text{ hJ}$$

Verdrängungstakte: Energie bleibt im System Gas plus Verdrängerkolben

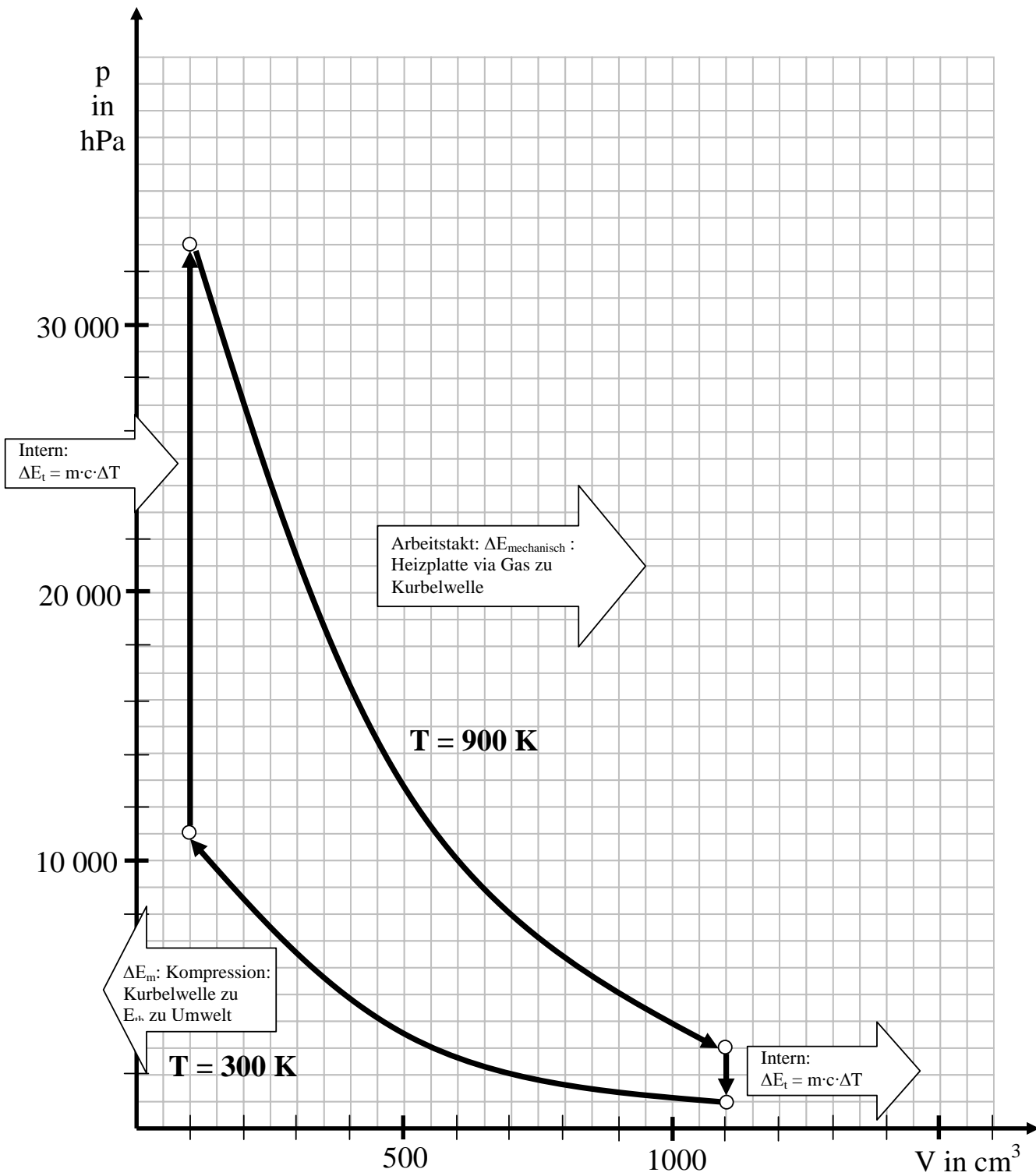
$$\Delta E_{\text{genutzt}} = 18 \text{ hJ} - 6 \text{ hJ} = 12 \text{ hJ}; \quad \Delta E_{\text{zugeführt}} = 18 \text{ hJ}$$

$$\eta = 1200/1800 = 2/3 = (900 \text{ K} - 300 \text{ K})/900 \text{ K}$$

$$\eta = W_{\text{Kompression}}/W_{\text{Expansion}} = (\bar{p}_{\text{kalt}} - \bar{p}_{\text{warm}})/\bar{p}_{\text{warm}} = (T_{\text{warm}} - T_{\text{kalt}})/T_{\text{warm}}$$

Ergebnisse: Das Schwungrad nimmt während einer Umdrehung 1800 J auf und gibt davon 600 J als thermische und 1200 J als mechanische Energie ab. $\eta = 2/3$

Verallgemeinerung: Eine Maschine, die thermische Energie in mechanische Energie umwandelt und dazu eine hohe absolute Temperatur T_{warm} sowie eine tiefe absolute Temperatur T_{kalt} nutzt, hat den maximalen Wirkungsgrad $\eta_{\text{maximal}} = (T_{\text{warm}} - T_{\text{kalt}})/T_{\text{warm}}$



6 Aufgaben

1. Nennen Sie zielführende Bezüge zur Chemie.
2. Entwerfen Sie eine Stundenabfolge zu den Unterrichtssequenzen vier und fünf, bei der die Formel zum Wirkungsgrad nicht hergeleitet wird.
3. Im Sinne des exemplarischen Lernens könnten wir vom Stirlingmotor ausgehen und an diesem Beispiel die Gasgesetze behandeln. Erstellen Sie eine entsprechende Lernstruktur (s. [Wagenschein \(1999\)](#)).
4. Nennen Sie dem Stirlingmotor verwandte Maschinen, die Sie in der UE behandeln könnten.
5. Entwerfen Sie eine Klassenarbeit zur UE.
6. Skizzieren Sie eine Stunde zur Behandlung des Gesetzes von Gay-Lussac.
7. Skizzieren Sie eine Stunde zur Behandlung des Gesetzes von Boyle-Mariotte.
8. Skizzieren Sie eine Stunde zur Behandlung des Gesetzes von Amontons.

7 Zusammenfassung

Druck ist lebenswichtig, beim Blutkreislauf und beim Atmen. Da ein Großteil der mechanischen und elektrischen Energie weltweit mithilfe expandierender Gase gewonnen wird, werden in dieser UE entsprechende Maschinen am Beispiel des Stirlingmotors behandelt. Dabei werden auch die Wirkungsgrade solcher Maschinen und allgemeiner Wärme-Kraft-Maschinen untersucht.

Die UE zeigt eine klare Progression von den physikalischen Grundlagen Energieübertragung und Gasgesetze hin zum Stirlingmotor mit seinem Wirkungsgrad. Im Sinne des exemplarischen Lernens könnten wir auch vom Stirlingmotor ausgehen und an diesem die Gasgesetze behandeln.

In jedem Fall rücken hier das nachhaltige energetische Wirtschaften und über die Herleitung maximaler Wirkungsgrade der zweite Hauptsatz der Thermodynamik in den Fokus. Ich wünsche Ihnen, dass Sie mit Ihren Schülern hierzu die nötigen kritischen sowie konstruktiven Kompetenzen entwickeln.

Literatur

[Beime u. a. 2012] BEIME, Christa ; HOPPE, Petra ; HUMMES, Klaus-Peter ; VÖPEL, Karl-Heinz ; VOSS, Christine ; ZEMANN, Winfried: *Kerncurriculum für die Integrierte Gesamtschule, Schuljahrgänge 5 - 10, Naturwissenschaften, Niedersachsen*. Hannover : Niedersächsisches Kultusministerium, 2012

[Boysen u. a. 1997] BOYSEN, Gerd ; ; HEISE, Harri ; LICHTENBERGER, Jochim ; SCHEPERS, Harald ; SCHLICHTING, Hans-Joachim: *Physik - Oberstufe Ausgabe A Band 1*. Ausgabe N. Berlin : Cornelsen, 1997. – 178–179 S.

-
- [Brüning u. a. 2010] BRÜNING, Thomas ; DÖTZER, Susanne ; ELSASSER, Wolfgang ; HEIKE, Christina ; JÜTTNER, Horst ; MICHALSKI, Regina ; MOORKAMP, Michael ; SUTTMAYER, Beate: *Rahmenrichtlinien für das Fach Naturwissenschaft in der Klasse 12 der Fachoberschule, Niedersachsen*. Hannover : Niedersächsisches Kultusministerium, 2010
- [Carmesin 2001] CARMESIN, Hans-Otto: Einführung des Energiebegriffs mit Hilfe menschlicher Sinnesorgane. In: NORDMEIER, Volker (Hrsg.) ; Deutsche Physikalische Gesellschaft (Veranst.): *Tagungs-CD Fachdidaktik Physik*. Berlin : DPG, 2001
- [Carmesin u. a. 2018] CARMESIN, Hans-Otto ; EMSE, Anneke ; KONRAD, Ulf ; PRÖHL, Inka K. ; SALZMANN, Wiebke ; WITTE, Lutz: *Universum Physik Sekundarstufe II Niedersachsen Einführungsphase*. Berlin : Cornelsen Verlag, 2018
- [Carmesin u. a. 2015a] CARMESIN, Hans-Otto ; KAHLE, Jens ; KONRAD, Ulf ; PRÖHL, Inka ; TRUMME, Torsten ; WITTE, Lutz ; HAGEDORN, Andreas: *Universum Physik 9/10*. Berlin : Cornelsen, 2015
- [Carmesin u. a. 2015b] CARMESIN, Hans-Otto ; KAHLE, Jens ; KONRAD, Ulf ; TRUMME, Torsten ; WITTE, Lutz ; HAGEDORN, Andreas: *Universum Physik 7 und 8*. Berlin : Cornelsen, 2015
- [Carmesin u. Kreier 2014] CARMESIN, Hans-Otto ; KREIER, Matthias: Innovative Energiespeicher mit Wärmekissen. In: *PhyDid B* (2014)
- [Frenzel 2017] FRENZEL, Michael u. a.: *Kerncurriculum für das Gymnasium - gymnasiale Oberstufe, die Gesamtschule - gymnasiale Oberstufe, das Fachgymnasium, das Abendgymnasium, das Kolleg, Physik, Niedersachsen*. Hannover : Niedersächsisches Kultusministerium, 2017
- [Gehmann 2015] GEHMANN, Kurt u. a.: *Kerncurriculum für das Gymnasium, Schuljahrgänge 5 - 10, Naturwissenschaften, Niedersachsen*. Hannover : Niedersächsisches Kultusministerium, 2015
- [Muckenfuß 1995] MUCKENFUSS, Heinz: *Lernen im sinnstiftenden Kontext*. Berlin : Cornelsen, 1995
- [Reineke 1997] REINEKE, Vera: *Rahmenrichtlinien für das Gymnasium - gymnasiale Oberstufe, die Gesamtschule - gymnasiale Oberstufe, das Fachgymnasium, das Abendgymnasium, das Kolleg, Physik, Niedersachsen*. Niedersächsisches Kultusministerium, 1997
- [Wagenschein 1999] WAGENSCHN, Martin: *Verstehen lehren*. Weinheim : Beltz Verlag, 1999