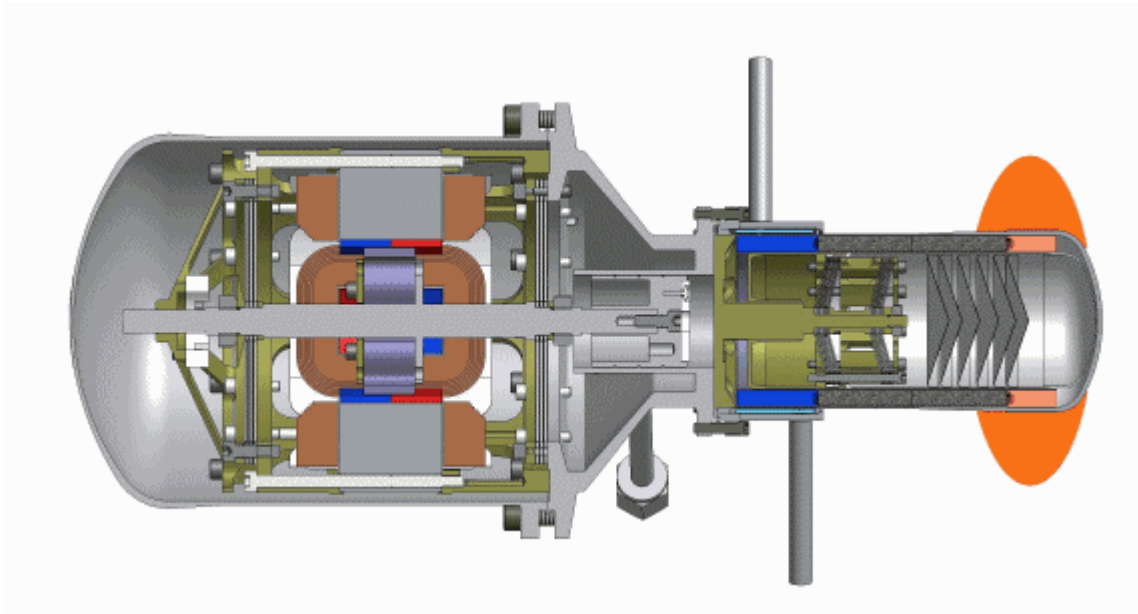


Jugendforschtarbeit



"Aus Wärme Kälte erzeugen" mit der Stirling-Kältemaschine

Eine Projektarbeit von: Ann-Christin Artmeier
Julia Naatz
Rebecca Poppenborg

1. Einleitung

„Wie kommt man auf die Idee sich mit dem Stirlingmotor, einem einst schon fast in Vergessenheit geratenen Motor zu beschäftigen?“ Diese Frage werden sich wahrscheinlich viele stellen, die von unserem Vorhaben hören. Schließlich wissen viele nicht einmal das dieser überhaupt existiert, obwohl er schon beinahe 200 Jahre alt ist. Doch auch wenn dies der Fall ist, erlangt der Stirlingmotor wieder an Ansehen. Benannt ist er nach dem schottischen Pfarrer Robert Stirling, dem schon 1816 das erste Patent erteilt wurde. Als Alternative zur Dampfmaschine wollte er statt Dampf einen Kolben mit erhitzter Luft herunterdrücken. Durchsetzen konnte er sich während den damaligen Verhältnissen nicht, da vergleichbare Motoren schneller entwickelt werden konnten. Doch eine Weiterentwicklung des Motors als Kältemaschine bzw. Wasserpumpe machte ihn wieder konkurrenzfähig, sodass er Diesel- und Ottomotoren überholen kann, was seine Wirkungsgrade, Langlebigkeit und Leistung angeht. Der Bedarf an Kraftfahrzeugmotoren mit geringen Ausstoß an Abgasen ließ zeitweilig das Interesse für den Stirlingmotor wieder aufleben.

Als wir uns im Unterricht über den Stirlingmotor unterhielten, weckte dies unser Interesse und wir beschlossen uns mehr mit diesem zu beschäftigen. Wir trafen uns nach Unterrichtsschluss und führten einige Versuchsreihen durch, welche wir schriftlich festhielten.

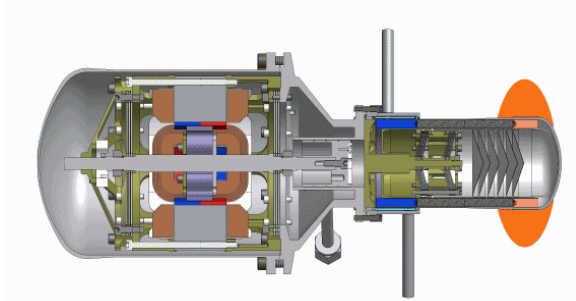
Doch zunächst einmal zum Aufbau der Maschine:

Funktion des Freikolben-Stirling-Motors:

Der Freikolben-Stirlingmotor (auf englisch: Free Piston Stirling Engine - FPSE) ist eine neue Erfindung, die das bewährte Stirling-Prinzip mit einem modernen Lineargenerator kombiniert, siehe Abbildung 1. Das Ergebnis ist eine Maschine, die aus Elektrizität (wir verwenden eine angebaute Photovoltaik-Anlage) Kälte erzeugt.

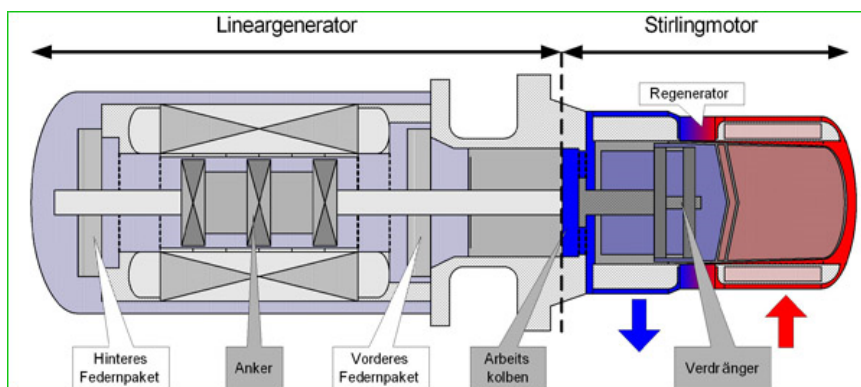
Die Maschine ist ein externer Verbrennungsmotor und unterscheidet sich somit von Diesel- und Ottomotoren, bei denen die Verbrennung im Motor selbst erfolgt. Der große Vorteil externer Verbrennung ist die außerordentlich gute Überwachung des

Verbrennungsprozesses, wodurch die Schadstoffemission auf ein Mindestmaß beschränkt wird. In Mikro-KWK (Kleinheizkraftwerke)-Systemen wird für die externe Verbrennung ein speziell für den Stirlingmotor entworfener Gasbrenner angewandt.



Zeichnung eines Freikolben-Stirling-Motors

Abbildung 1:

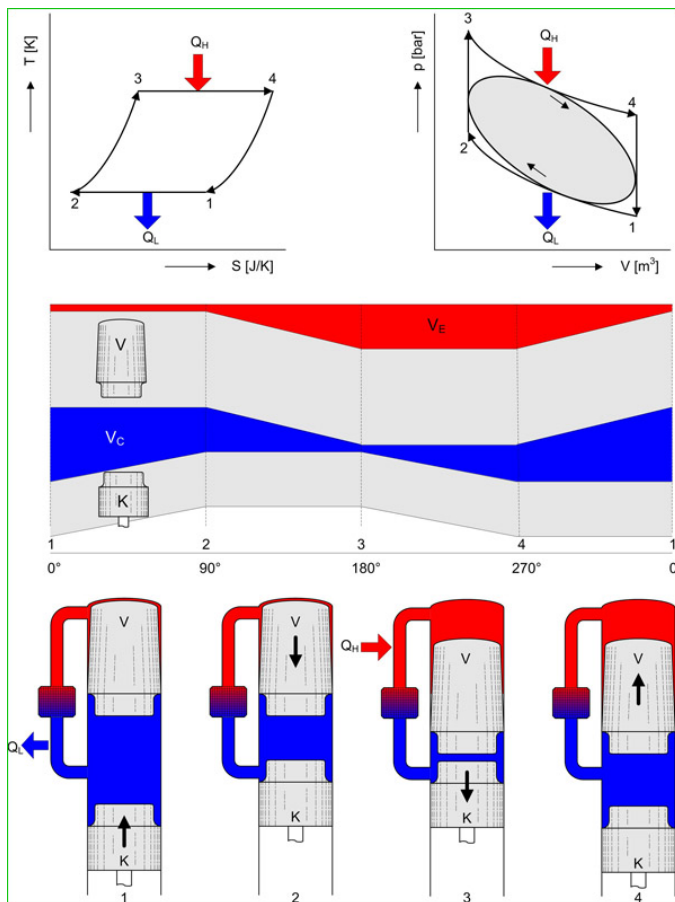


Die über liegende Abbildung stellt einen speziellen Stirlingmotor dar. Der Stirlingmotor hat zwei bewegliche Teile: der Arbeitskolben und der Verdrängerkolben. Die erzeugte Leistung wird am Arbeitskolben freigesetzt, der anschließend den (Anker des) Lineargenerators antreibt. Über den Anker wird die mechanische Energie schließlich in Elektrizität umgesetzt. Alle beweglichen Teile machen in einem Freikolben-Stirlingmotor eine schwingende Bewegung in axialer Richtung. Axial weiche, aber radial sehr starre Federn sorgen dafür, dass bewegliche Teile wie der Arbeitskolben und der Verdrängerkolben die benachbarten stationären Teile nicht berühren. Hierdurch gibt es keinen Verschleiß und der Freikolben-Stirlingmotor ist wartungsfrei. Der Stirlingmotor selbst besteht aus einer warmen und einer kalten Zone. Die warme Zone, in roter Farbe, wird von einem Gasbrenner erwärmt. Die kalte Zone, in blauer Farbe, wird mit Wasser gekühlt. Das Arbeitsgas (Helium) wird vom Verdrängerkolben zwischen der warmen und kalten Zone hin- und hergedrückt,

wobei das Gas an der Grenze beider Zonen einen Regenerator durchquert. Der Regenerator funktioniert wie ein Wärmespeicher, der das kalte Gas erwärmt, wenn es in die heiße Zone strömt und abkühlt, wird es wieder in die kalte Zone zurückgelangen. Die Thermodynamik des Stirlingzyklus wird in Abbildung 2 dargestellt und erläutert.

Abbildung

2:



1>2 Der Arbeitskolben geht nach oben und das Gas wird verdichtet. Die Wärme, die bei der Verdichtung freigesetzt wird, wird zum Kühlwasser abgeleitet. Die Verdichtung kostet wenig Energie, da das Gas verhältnismäßig kalt und das Druckniveau verhältnismäßig niedrig ist.

2>3 Der Verdrängerkolben verdrängt das meiste Gas von der kalten zur warmen Zone. Das Gas durchquert den Regenerator und wird dort erwärmt. Der Druck nimmt dadurch weiter zu.

3>4 Der Arbeitskolben geht nach unten und das Gas expandiert. Während der Expansion nimmt das Gas noch Verbrennungswärme auf, wodurch der Druckabfall verzögert wird. Die Expansion ergibt viel Energie, da das Gas verhältnismäßig heiß und das Druckniveau verhältnismäßig hoch ist.

4>1 Der Verdrängerkolben verdrängt das meiste Gas von der warmen zur kalten Zone. Das Gas durchquert den Regenerator und wird dort abgekühlt. Der Druck nimmt hierdurch weiter ab und der Zyklus schließt sich.

Quelle: <http://www.enatec.com/German/subhtml/wvz.htm>

2. „Unser Gedanke, durch Wärme Kälte erzeugen“

Uns kam der Gedanke „durch Wärme Kälte erzeugen“, doch dieser erschien uns so abwegig, dass wir recherchierten, ob es überhaupt gehe. Dabei dachten wir, dass in Entwicklungsländern ein großer Bedarf an Lebensmittel- und Medikamentenkühlung besteht. Doch herkömmliche Kühlschränke sind in diesen Ländern Luxusgüter und zum Betrieb benötigen sie eine elektrische Energieversorgung, die es oft nur in Ballungszentren gibt.

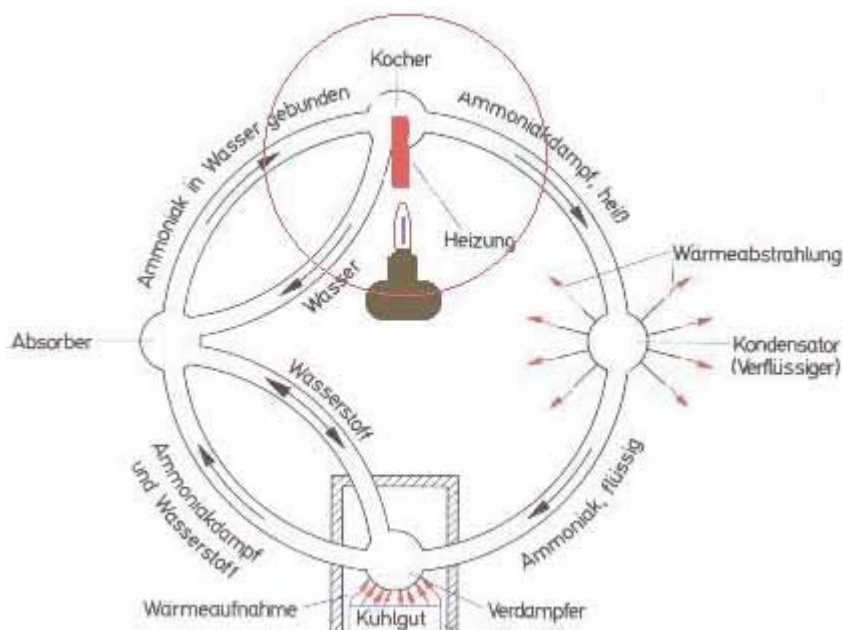
In der Schule haben wir eine „Stirling-Kältemaschine“ und da haben wir uns gedacht, wenn wir diese „irgendwie“ an ein Solarmodul anschließen, können wir durch Sonne Kälte erzielen. Die Sonne scheint überall und liefert – besonders in südlichen Ländern – Wärme im Überfluss.

3. Funktion von Kältesystemen

Um überhaupt zu wissen, wie man Kälte erzeugt, haben wir uns über drei Möglichkeiten zur Kälteerzeugung informiert.

Das Absorberprinzip

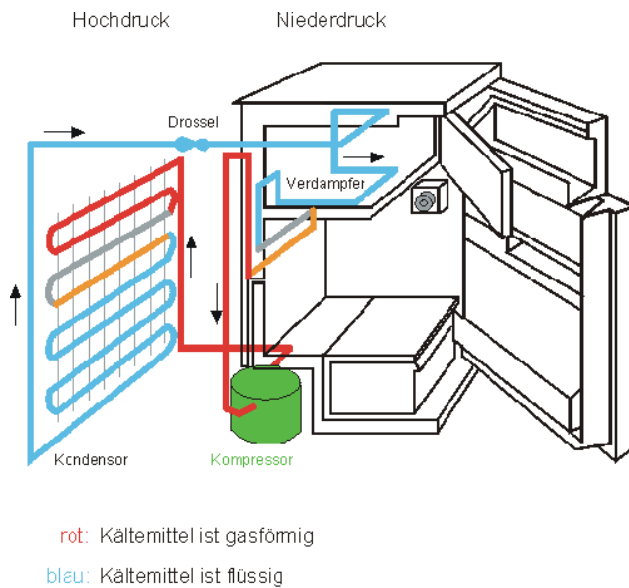
Das Absorberprinzip arbeitet mit Hilfe der Schwerkraft und braucht deshalb in der Regel eine waagerechte Ebene. Vorteile des Absorberprinzips sind die Unabhängigkeit von elektrischer Energie, da es mit 12Volt, mit 230Volt, und auch mit Gas als Energieträger funktioniert. Das Absorptionsverfahren kommt ohne mechanisch bewegte Teile aus und arbeitet daher fast geräuschlos. Es sind keine FCKW- und FKW- Substanzen enthalten, da als Kältemittel Ammoniak verwendet wird. Negativ zu betrachten ist, dass dieses Prinzip viel Energie braucht und bei Außentemperaturen oberhalb 33°C eine ungenügende Kühlwirkung hat.



Das Kompressor- oder Verdichterprinzip

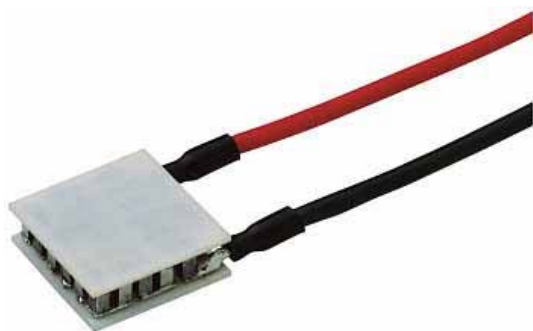
Der Kompressor verdichtet das Kühlmittel. Dabei wird das gasförmige Mittel flüssig und durchläuft das Leitungssystem bis zum Verdampfer. Hier geht es vom flüssigen Zustand wieder in den gasförmigen über. Dabei entzieht es der Umgebung Wärme und fließt wieder zurück in den Kompressor. Somit ist der Kreislauf geschlossen. Der

große Vorteil des Kompressor-Kühlschranks ist seine Leistung. Auch bei über 40°C im Schatten arbeitet er noch wirkungsvoll.



Das Peltier- oder thermoelektrisches Prinzip

Das Element besteht aus zwei keramischen Seiten. Durch Anlegen von Strom ist es möglich, eine Temperaturdifferenz von ca. 60°C zwischen den beiden Seiten zu erhalten. Das Problem ist, dass sich nicht die kalte Seite um 60°C zur Raumtemperatur abkühlt, sondern sich die heiße Seite erhitzt. Will man nun die kalte Seite zum Kühlen einsetzen, muss die heiße Seite zur Erzielung einer brauchbaren Kälteleistung entsprechend gut gekühlt werden.



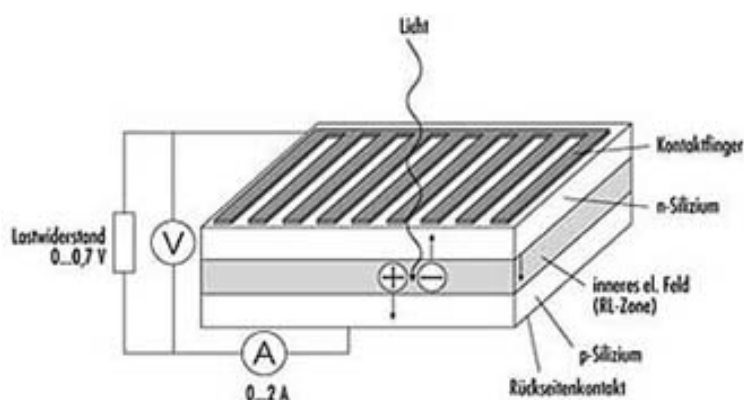
Quelle: <http://www.12v-kuehlgeraete.de>

4. Geschichte und Funktion der Solarzellen

Die Sonne gibt uns nicht nur Wärme, sondern auch Elektrizität. Schon 1839 entdeckte Alexander Bequerel den photovoltaischen Effekt. Er tauchte zwei metallische Platten in eine leitfähige Flüssigkeit und bemerkte, dass bei Sonnenbestrahlung die Spannung zwischen den Platten anstieg. Es dauerte dann allerdings noch weitere 100 Jahre, bis im Jahr 1954 Wissenschaftler der Firma Bell Telephone in den USA beobachteten, dass an elektronischen Bauteilen aus dem Halbleiter-Werkstoff Silizium eine elektrische Spannung auftrat, sobald Licht darauf fiel. Sie gingen dieser Entdeckung nach, und schließlich entstanden daraus die so genannten Solarzellen, mit deren Hilfe man Sonnenlicht in elektrischen Strom umwandelt. Dieses als „Photovoltaik“ (PV) bezeichnete Verfahren macht sich die Tatsache zunutze, dass Licht aus bestimmten Halbleiteroberflächen Elektronen herausschlägt, die sich dann im Material bewegen und als Elektrischerstrom ableitbar sind.

Wie funktioniert die photovoltaische Energieumwandlung?

Als Grundbaustoff für Solarzellen wird heutzutage fast immer Silizium verwendet. Je nach Herstellungsverfahren unterscheidet man drei Arten von Silizium-Solarzellen: Monokristalline Solarzellen bestehen unabhängig von ihrer Größe aus einem einzigen Siliziumkristall; aufgrund ihrer aufwendigen Herstellung sind sie sehr teuer, haben jedoch einen höheren Wirkungsgrad (15-20 Prozent) als polykristalline Solarzellen (13-16 Prozent). Polykristalline Solarzellen werden mit einem wesentlich geringeren Energieaufwand (und somit billiger) gefertigt. Den geringsten Wirkungsgrad weisen amorphe Solarzellen auf, die meist nur in Kleingeräten wie Taschenrechnern angewendet werden.



In der Praxis greift man vor allem auf die monokristallinen Solarzellen zurück: Die einzelnen Solarzellen werden mit elektrischen Anschlüssen versehen in Glas oder Kunststoff eingebettet und an geeigneten Stellen, z.B. auf Dächern, montiert. Die Spannung einer einzelnen Zelle ist für die meisten Anwendungsfälle zu niedrig, deshalb schaltet man mehrere Zellen zu so genannten Modulen hintereinander.

Das Silizium wird in Scheiben von wenigen zehntel Millimetern geschnitten. Durch gezieltes Verunreinigen (Dotieren) mit Phosphor und Bor erzielt man in einer dünnen Oberflächenschicht einen Überschuss an Elektronen (n-Silizium), im Rest des Materials einen Mangel an Elektronen (p-Silizium). Es entsteht im Übergangsbereich ein inneres elektrisches Feld (Raumladungszone, RL-Zone).

Bei Lichteinwirkung werden freie Ladungsträger erzeugt und durch das innere elektrische Feld nach ihrer Polarität getrennt.

Die elektrische Gleichspannung wird durch beidseitig angebrachte Kontakte nach außen geführt, über die die Elektronen fließen können.

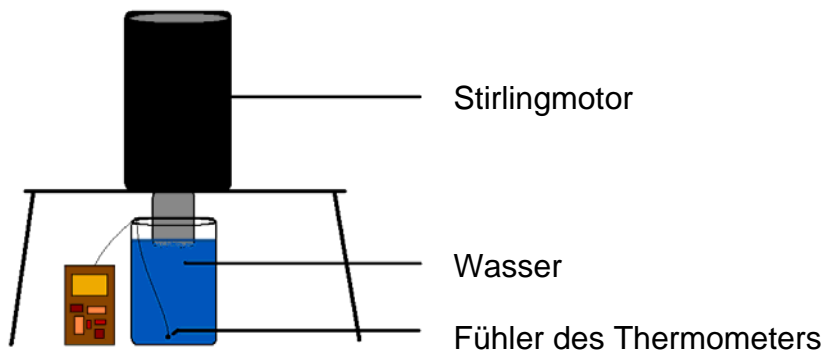
Quelle: <http://knightsathome.de>

5. Versuchsreihe

Versuch 5.1: Kühlen von Wasser (Nase 3 mm im Wasser)

Versuchsaufbau:

Ausgangstemperatur: 19°C
Zu kühlendes Volumen: 250 ml
Spannung: 11 V



Werte:

Temperatur	18°C	17°C	16°C	15°C	14°C	13°C	12°C
Zeit (in Minuten)	1,45	2,25	3,05	3,55	4,55	6,05	7,5

(Veranschaulichung: siehe Seite 12)

Fazit:

Das Wasser braucht sehr lange um eine niedrige Temperatur zu erreichen.

Um die Temperatur auf 12°C herunter zu kühlen, wird eine Wartezeit von knapp acht Minuten fällig. Wir kommen zu dem Fazit, dass der Kontakt der Kälte-Nase mit dem Wasser zu gering war.

Um das Testergebnis zu optimieren, werden wir im nächsten Versuch die ganze Kälte-Nase in das Wasser tauchen.

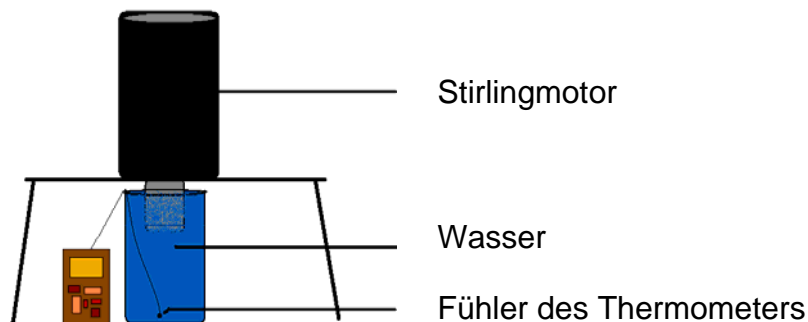
Versuch 5.1.1: Kühlen von Wasser (Nase ganz in das Wasser getaucht)

Versuchsaufbau:

Ausgangstemperatur: 18°C

Zu kühlendes Volumen: 250 ml

Spannung: 11 V



Werte:

	1,70 A					1,72				
Temperatur	17°C	16°C	15°C	14°C	13°C	12°C	11°C	10°C	9°C	
Zeit (in Minuten)	0,40	1,02	1,27	1,45	2,00	2,16	2,45	3,35	4,48	

(Veranschaulichung: siehe Seite 12)

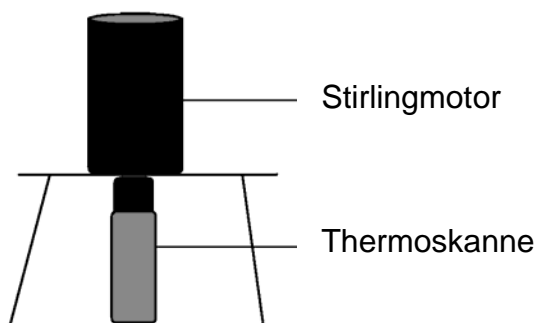
Fazit:

Der Kolben hat das Wasser in kürzerer Zeit zum Erkalten gebracht. Allerdings ist die Oberfläche an der Kolben-Nase fest gefroren, daher verringert sich die Leitfähigkeit des Wassers. Dies hat zur Folge, dass die Temperatur nach acht Minuten deutlich langsamer sinkt. Da wir diesem Gefrieren vorbeugen möchten, stellten wir zwei Fortfahrsprozesse auf: Entweder wir geben Frostschutzmittel in das Wasser oder wir beenden die Versuchsreihe mit dem Kühlen von Wasser hier und steigen auf das Kühlen von Luft um. Diese Entscheidung fiel uns leicht. Da wir alle nicht gern mit Chemikalien arbeiten und uns das neue Thema zusagte, um auch noch andere Erfahrungen zu sammeln, nannten wir die Versuchsreihe - *Kühlen von Wasser* – für beendet und stiegen auf das - *Kühlen von Luft* – um.

Versuch 5.2: Kühlen von Luft (Prototyp: Thermoskanne)

Versuchsaufbau:

Ausgangstemperatur: 16°C
Zu kühlendes Volumen: 400 ml
Spannung: 9,8 V



Werte:

Temperatur	15°C	13°C	11°C	9°C	7°C	4°C	2°C	0°C	-3°C	-6°C	-8°C
Zeit (in Minuten)	1,12	2,35	3,40	4,29	5,20	6,40	7,3	8,10	9,17	10,29	11,13

(Veranschaulichung: siehe Seite 12)

Fazit:

Die Luft kühlt deutlich schneller ab, als das Wasser. So ist nach gut acht Minuten bereits der Gefrierpunkt erreicht. Wir kommen zu dem Fazit, dass dieser Prototyp – *Thermoskanne* – sehr geeignet ist, um nach kurzer Zeit einen Raum zukühlen. Um unsere Forschung weiter zutreiben, fertigten wir einen passenden Kupferaufsatz für eine Kühlbox an.

Versuch 5.3: Kühlen von Luft (Für den Stirling-Motor präparierte Kühlbox)

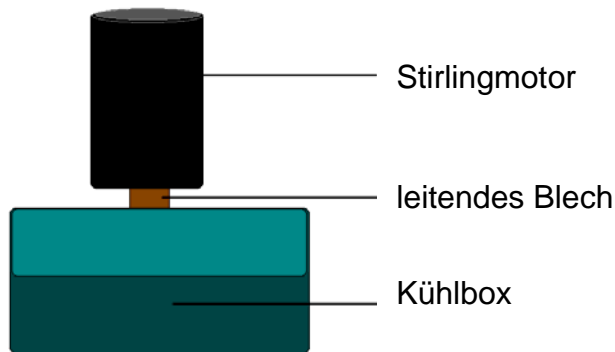
Versuchsaufbau:

Ausgangstemperatur: *auf dem Blech 19,1°C; auf dem Boden 19°C; Mitte(an der Seite) 18°C*

Zu kühlendes Volumen: *ca. 5 Liter*

Kühlende Fläche: *3745,44 cm²*

Spannung: *12 V*



Werte:

Zeit (in Min.)	3	4	5	6	7	8	10	15	20
T. Oben (°C)	19	18,50	17,30	16,60	15,40	14,50	13,40	12,5	12
T. Mitte (°C)	18	18	18	18	18	17	17	16	15
T. Unten (°C)	19	19	19	19	18	18	17	16	15
T. Ampere (A)	2	2,17	2,19	2,2	2,2	2,2	2,21	2,21	2,21

[T. = Temperatur]

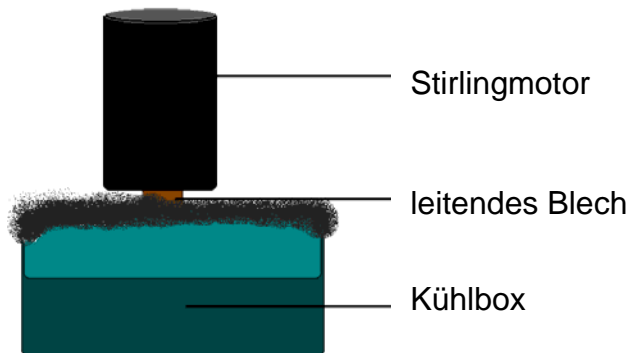
Fazit:

Die Kühlung der Kühlbox lief deutlich langsamer ab, so benötigten wir 20 Minuten, um den Innenraum auf 6°C runter zukühlen. Wir schließen dies auf den deutlich größeren zukühlenden Raum zurück. Um das Testergebnis zu optimieren, isolierten wir die Truhe mit Schaumstoff.

Versuch 5.4: Kühlen von Luft (Mit Schaumstoff isolierte Kühlbox)

Versuchsaufbau:

Ausgangstemperatur: *auf dem Blech 19,1°C; auf dem Boden 19°C; Mitte (an der Seite) 18°C*
 Zu kühlendes Volumen: *ca. 5 Liter*
 Kühlende Fläche: *3745,44 cm²*
 Spannung: *12 V*



Werte:

Zeit (in Min.)	3	4	5	6	7	8	10	15	20
T. Oben (°C)	18,9	17,9	16,8	16	15,2	14,5	13,2	11	9,6
T. Mitte (°C)	17	17	17	17	17	17	16	15	14
T. Unten (°C)	19	19	18	18	18	18	16	15	14
T. Ampere (A)	2	2,17	2,19	2,2	2,2	2,2	2,21	2,21	2,21

[T. = Temperatur] (Veranschaulichung: siehe Seite 15)

Fazit:

Die Kühlung der Kühlbox lief deutlich schneller ab. Um unser Modell allerdings zu perfektionieren, ist ein noch effizienteres Modell in Arbeit.

