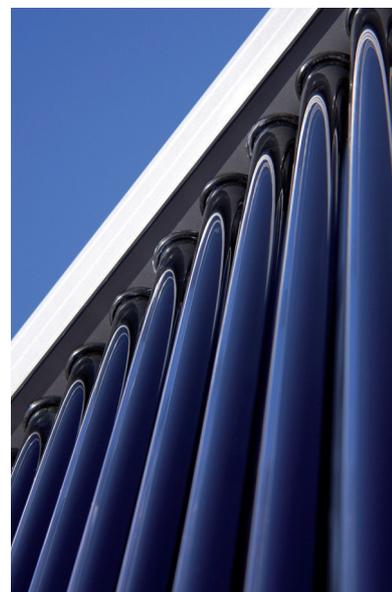


# leXsolar-ThermalEnergy Ready-to-go



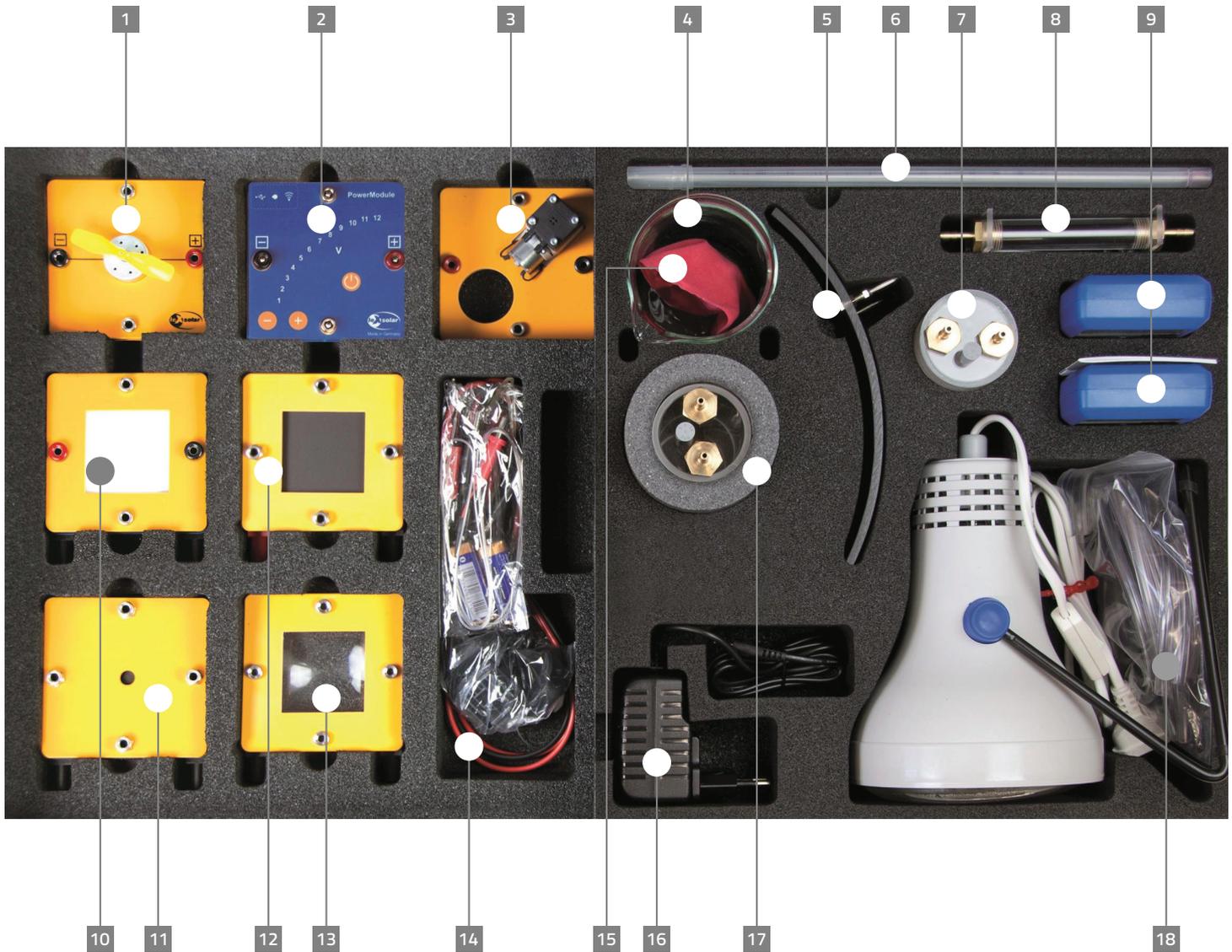
Lehrerheft

# Layout diagram leXsolar-ThermalEnergy Ready-to-go 2.0

Item-No.1304

## Bestückungsplan leXsolar-ThermalEnergy Ready-to-go 2.0

Art.-Nr.1304



- 1** 1100-27 Motor module  
1100-27 Motormodul  
L2-02-017 Yellow propeller  
L2-02-017 Luftschraube (Propeller) gelb
- 2** 9100-05 PowerModul with **16**  
9100-05 PowerModul mit **16**
- 3** 1300-09 Pump module with **22**  
1300-09 Pumpenmodul mit **22**
- 4** L2-06-082 Beaker 250 ml  
L2-06-082 Becherglas 250 ml

- 5** 1300-04 Parabolic reflector  
1300-04 Parabolspiegel-Kollektor
- 6** L2-06-016 Laboratory thermometer  
L2-06-016 Laborthermometer
- 7** 1300-12 Heat exchanger paraffin  
1300-12 Wärmetauscher Paraffin
- 8** 1300-05 Absorber tube  
1300-05 Absorberrohr
- 9** 2xL2-06-011 Digital multimeter  
2xL2-06-011 Digitalmultimeter
- 10** 1300-08 Absorber B/W  
1300-08 Absorber S/W
- 11** 1300-07 Absorber module for lens  
1300-07 Absorbermodul für Linse

- 12** 1300-10 Peltier module  
1300-10 Peltiermodul
- 13** 1300-06 Lens module  
1300-06 Linsenmodul
- 14** 2xL2-06-014/015 Test leads black/red  
2xL2-06-014/015 Messleitung schwarz/rot
- 15** L2-06-125 Cooling pad  
L2-06-125 Kühlkissen
- 16** Power supply for **2**  
Stromversorgung für **2**
- 17** 1300-11 Heat exchanger water  
1300-11 Wärmetauscher Wasser
- 18** 1300-13 Hose set  
1300-13 Schläuche-Set

Version number  
Versionsnummer

II-01.24\_L3-03-138\_10.01.2018

# Layout diagram leXsolar-ThermalEnergy Ready-to-go 2.0

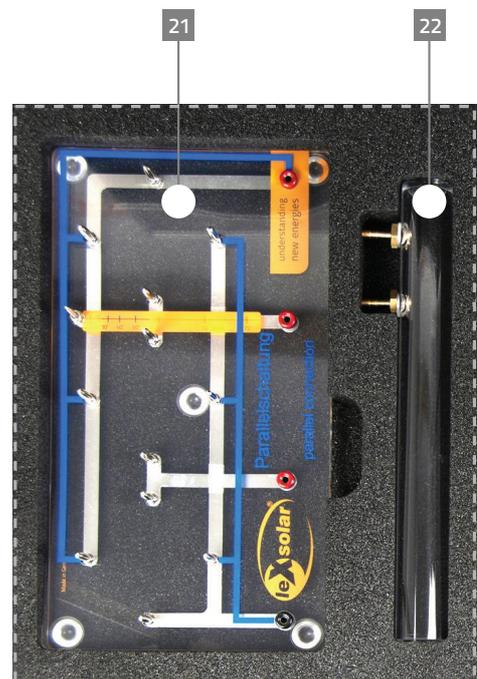
Item-No.1304

Bestückungsplan leXsolar-ThermalEnergy Ready-to-go 2.0

Art.-Nr.1304



- 19** 1300-03 Solar colector  
1300-03 Solar-Kollektor
- 20** L2-04-200 Illuminant infrared 230V with  
L2-04-080 Lamp housing  
L2-04-200 Leuchtmittel infrarot 230V mit  
L2-04-080 Lampengehäuse
- 21** 1100-19 leXsolar-basic unit  
1100-19 Grundeinheit groß
- 22** Balancing container with **3**  
Ausgleichsgefäß mit **3**



# leXsolar-ThermalEnergy

## Lehrerheft

### Inhalt

1. Absorptions- und Reflexionsvermögen unterschiedlicher Materialien .....	5
2. Konzentration von Licht mit Fresnel-Linse.....	8
3. Wärmeströmung und Wärmeschichtung.....	11
4. Wärmeleitung .....	13
5. Wärmedämmung .....	15
6. Solarkollektor mit Pumpenumlauf .....	18
7. Solarkollektor mit Thermosiphonumlauf .....	21
8. Variation der Durchflussgeschwindigkeit .....	24
9. Kollektorumlauf mit Wärmetauscher.....	27
10. Kollektorumlauf mit Paraffinwärmespeicher.....	33
11. Parabolrinnenkollektor mit Pumpenumlauf .....	38
12. Defokussierung.....	42
13. Funktionsweise eines Peltierelements.....	46
14. Untersuchung des Thermoelektrischen Generators .....	48
15. Quantitative Bestimmung der elektrischen Leistung.....	51
16. Bestimmung des Massenstroms durch den Kollektor .....	54
17. Bestimmung des Kollektorwirkungsgrads .....	56
18. Vergleich einer High-Flow und einer Low-Flow-Anlage .....	59



# 1. Absorptions- und Reflexionsvermögen unterschiedlicher Materialien

## Aufgabe

Ermittle die Unterschiede im Absorptions- und Reflexionsverhalten von Wärmestrahlung bei einer Kupferplatte mit weißer und schwarzer Beschichtung.

## Aufbau



## Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- Strahler
- Digitalmessgerät
- Absorbermodul Schwarz/weiß
- Messleitungen

## Durchführung

1. Stecke das Absorbermodul schwarz/weiß mit der weißen Seite zum Strahler zeigend auf die Grundeinheit (Abstand zum Strahler 15cm)
2. Verbinde das Digitalmessgerät mit dem Absorbermodul schwarz/weiß, wie in der Abbildung ersichtlich.
3. Stelle am Digitalmessgerät das Symbol °C ein, um die Temperaturmessung zu starten. Lege außerdem eine Uhr bereit, um während des Experiments die Zeit zu messen.
4. Notiere die Anfangstemperatur  $T(0)$  und starte die Messung, indem du den Strahler einschaltest. Notiere im Minutenabstand die Temperaturwerte, welche elektrisch direkt an der Metalloberfläche gemessen werden.
5. Schalte den Strahler ab und lasse das Absorbermodul schwarz/weiß abkühlen, bis es wieder ungefähr die Ausgangstemperatur erreicht hat.
6. Wiederhole die Messung mit der schwarzen Seite des Absorbermoduls. Achte darauf, dass der Abstand zum Strahler unverändert 15 cm beträgt.

## Messwerte

**Tabelle 1.1 – Temperaturentwicklung auf der weißen Seite**

Zeit in Minuten	0	1	2	3	4	5	6	...
Temperatur	24	27	29	31	33	35	36	



# 1. Absorptions- und Reflexionsvermögen unterschiedlicher Materialien

## Messwerte

**Tabelle 2.1 – Temperaturentwicklung auf der schwarzen Seite**

Zeit in Minuten	0	1	2	3	4	5	6	...
Temperatur	25	46	56	61	64	65	66	

## Auswertung

1. Trage deine Ergebnisse in das abgebildete Diagramm ein.
2. Vergleiche die Ergebnisse aus den beiden Telexperimenten und erkläre die beobachteten Unterschiede.
3. Erläutere welche Rückschlüsse aus dieser Erkenntnis auf die Konstruktion von Solarkollektoren zu ziehen sind.

## Diagramm

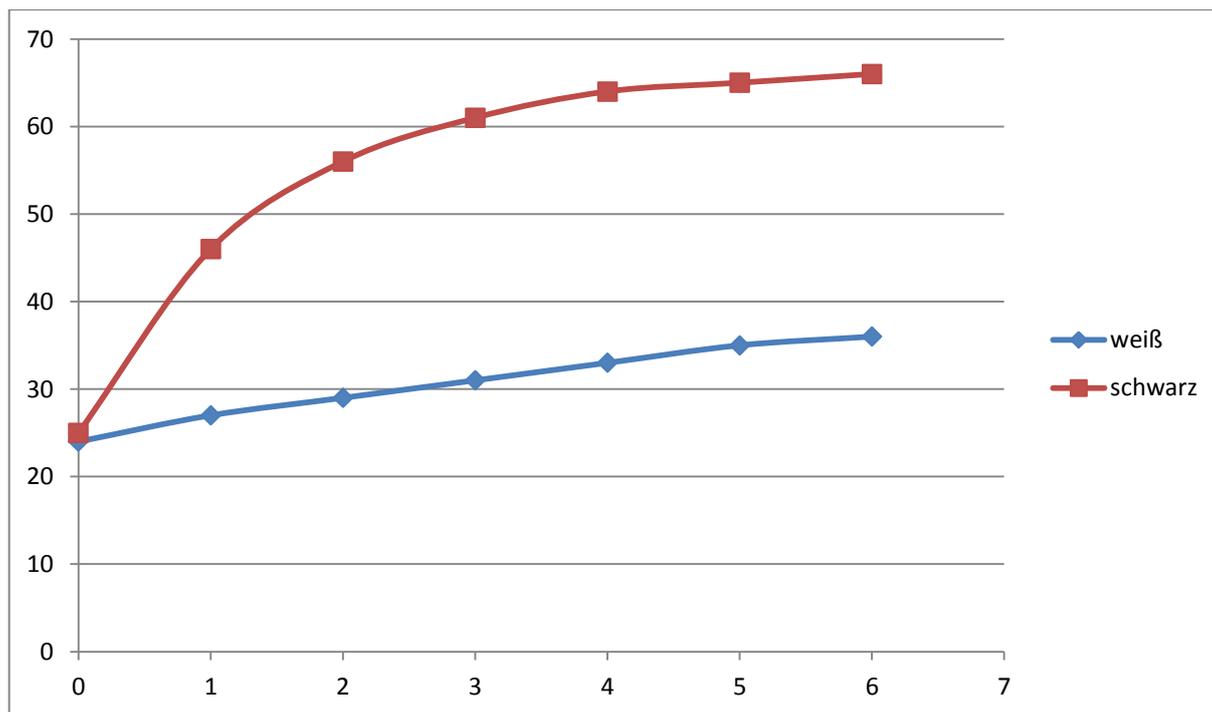


Diagramm 1.1 – Temperaturverlauf am Absorbermodul schwarz/weiß



## 1. Absorptions- und Reflexionsvermögen unterschiedlicher Materialien

### Auswertung

2.

Die Erwärmung auf der weißen Seite ist deutlich langsamer als auf der schwarzen Seite. Schwarze Oberflächen absorbieren besonders gut das einfallende Licht und reflektieren nur einen geringen Anteil einfallender Strahlung im sichtbaren Bereich. Aus diesem Grund nimmt das menschliche Auge kaum Licht von der Oberfläche wahr, sodass uns das betreffende Material schwarz erscheint. Die Fähigkeit eines Materials, Licht zu absorbieren oder zu reflektieren liegt in der Anordnung der Atomstruktur begründet, welche sich unterschiedlich stark durch Strahlung im sichtbaren Bereich anregen lässt. Die Absorption von Licht ist demzufolge frequenz- und materialabhängig.

Besonders schwarze Materialien geben nach erfolgter Erwärmung einen Teil der aufgenommenen Energie in Form von Wärmestrahlung wieder ab. Je größer die Temperaturdifferenz zwischen Material und Umgebung, desto stärker ist dieser thermische Verlust.

Die Form der zwei verschiedenen Erwärmungskurven ist durch die Überlagerung der durch Absorption aufgenommenen thermischen Energie und den thermischen Verlusten in Form von Wärmestrahlung geprägt. Bei der weißen Oberfläche verhält sich der Anstieg der Verluste ungefähr proportional zur absorbierten thermischen Energie, sodass ein annähernd linearer Verlauf zu beobachten ist. Bei der Messung der schwarzen Oberfläche überwiegt zuerst der Anteil aufgenommener Energie, bis die thermischen Verluste so groß werden, dass die Erwärmung immer geringer wird. Die gemessene Kurve besitzt daher im Messintervall eine nichtlineare Form.

3.

Solarkollektoren haben den Anspruch, einen möglichst großen Anteil einfallenden Sonnenlichts in nutzbare thermische Energie umwandeln zu können. Der Anteil reflektierter Strahlung muss demzufolge gering gehalten werden, um viel Licht absorbieren zu können. Solarkollektoren sind deshalb überwiegend mit einer schwarzen Beschichtung versehen. Wie im Experiment ersichtlich, gibt es bei solchen einfachen schwarzen Oberflächen ein gravierendes Problem, da ein Großteil der Energie in Form von Wärmestrahlung wieder abgestrahlt wird. Einen Teil zur Lösung dieses Effekts tragen heutzutage sogenannte selektive Beschichtungen bei. Diese absorbieren das Sonnenlicht ähnlich wie eine schwarze Oberfläche, weisen jedoch eine deutlich geringere Abstrahlung auf. Der Nachteil dabei ist die aufwendige Verarbeitung solcher Farben, da sie nicht wie herkömmliche Lacke aufgespritzt oder aufgestrichen werden können.



## 2. Konzentration von Licht mit Fresnel-Linse

### Aufgabe

Demonstriere den Einfluss der Konzentration von Sonnenlicht auf die Erhitzung eines Absorbermaterials.

### Aufbau

#### 2.1 Erwärmung ohne Fresnellinse



#### 2.2 Erwärmung mit Fresnellinse



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- Strahler
- Digitalmessgerät
- Linsenmodul
- Absorbermodul Linse
- Messleitungen

### Durchführung

1. Stecke das Absorbermodul Linse mit der Öffnung zum Strahler zeigend mittig auf die Grundeinheit. Den Abstand zum Strahler stellst du auf ca. 25cm ein.
2. Verbinde daraufhin das Digitalmessgerät mit dem Absorbermodul Linse, wie in Abbildung 2.1 ersichtlich.
3. Stelle am Digitalmessgerät das Symbol °C ein, um die Temperaturmessung zu starten. Lege außerdem eine Uhr bereit, um während des Experiments die Zeit zu messen.
4. Notiere die Anfangstemperatur  $T(0)$  und starte die Messung, indem du den Strahler einschaltest. Notiere im Minutenabstand die Temperaturwerte, welche elektrisch direkt an der Metallfläche gemessen werden.
5. Schalte den Strahler ab und lass das Absorbermodul Linse abkühlen, bis es wieder ungefähr die Ausgangstemperatur erreicht hat.
6. Stecke nun, wie in Abbildung 2 dargestellt, zwischen Strahler und Absorber das Linsenmodul. Achte darauf, dass der Abstand vom Absorbermodul zum Strahler unverändert 25 cm beträgt.
7. Notiere die Anfangstemperatur  $T(0)$  und starte die Messung, indem du den Strahler einschaltest. Notiere im Minutenabstand die Temperaturwerte, welche direkt an der Metallfläche gemessen werden.



## 2. Konzentration von Licht mit Fresnel-Linse

### Messwerte

**Tabelle 2.1 – Temperaturentwicklung ohne Linsenmodul**

Zeit in Minuten	0	1	2	3	4	5	6	...
Temperatur in C°	24	28	30	31	32	33	34	

**Tabelle 2.2 – Temperaturentwicklung mit Linsenmodul**

Zeit in Minuten	0	1	2	3	4	5	6	...
Temperatur in C°	24	39	45	48	50	52	53	

### Auswertung

1. Trage deine Ergebnisse in das abgebildete Diagramm ein.
2. Vergleiche die Ergebnisse aus den beiden Teilerperimenten und erkläre die beobachteten Unterschiede.
3. Erläutere welche Rückschlüsse aus dieser Erkenntnis auf die Konstruktion von Solarkollektoren zu ziehen sind.
4. Nenne, neben der Verwendung von Linsen, eine weitere Möglichkeit zur Konzentration von Licht, welche auch zur solarthermischen Energieumwandlung genutzt wird.

### Diagramm

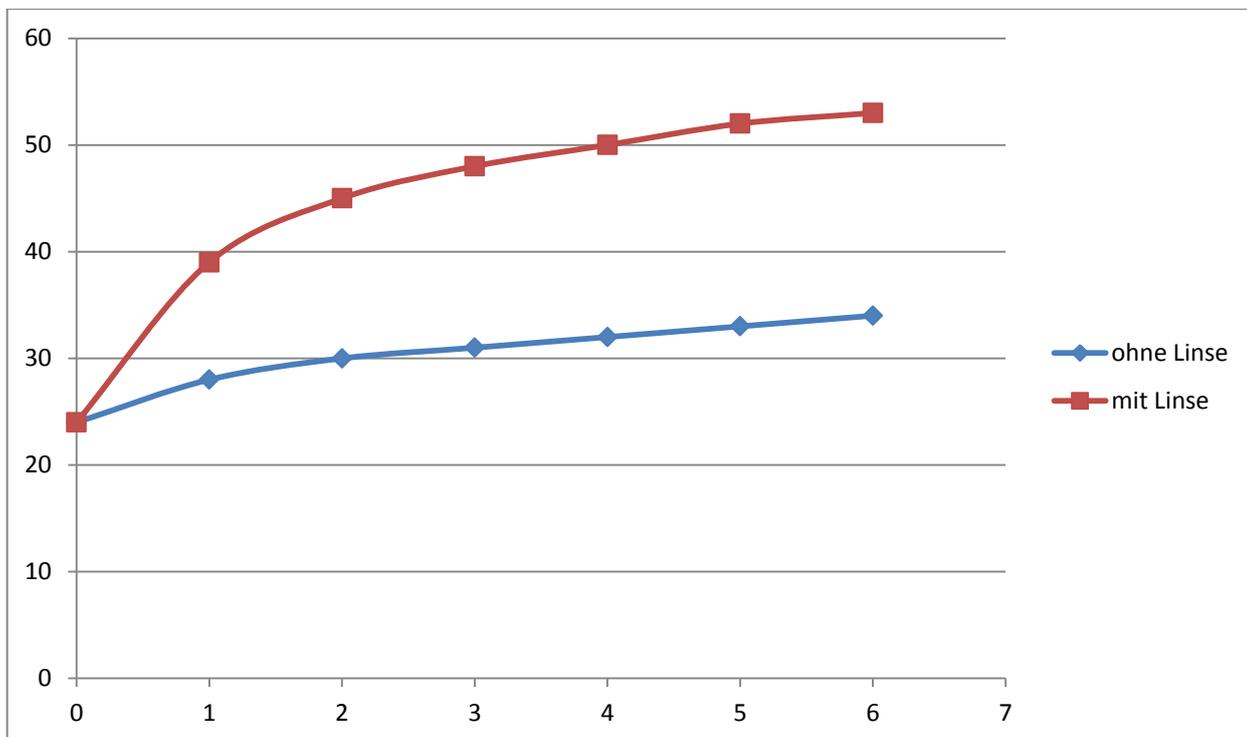


Diagramm 2.1 – Temperaturverlauf am Absorbermodul Linse



## 2. Konzentration von Licht mit Fresnel-Linse

### Auswertung

2.

Das sehr kleine Absorberplättchen im Experiment erwärmt sich im Abstand von 25cm nur sehr langsam. Nach einer Temperaturerhöhung um 6K in den ersten zwei Minuten, sind die thermischen Verluste so groß, dass nur noch ein relativ geringer und annähernd linearer Temperaturanstieg zu beobachten ist. Konzentriert man das Licht des Strahlers hingegen mit einer Fresnellinse auf das Absorberplättchen, so erwärmt sich dieses deutlich schneller und erreicht nach 2 Minuten schon eine Temperaturerhöhung um 21K. Der Verlauf der Erwärmung ist im Messintervall aufgrund der zunehmend größer werdenden Wärmeabstrahlung nichtlinear.

Licht weist im gleichen Abstand zur punktförmigen Lichtquelle eine annähernd konstante Beleuchtungsstärke auf. In der Strahlungsrichtung unseres Strahlers kann ebenfalls von einer annähernd konstanten Lichtstärke pro Flächeneinheit ausgegangen werden. Die Linse bündelt das Licht einer größeren Fläche und konzentriert es auf das relativ kleine Absorberplättchen. An diesem liegt deshalb eine höhere Beleuchtungsstärke an, sodass mehr Licht absorbiert und in thermische Energie umgewandelt werden kann.

3.

Die Verwendung von metallischen Absorbermaterialien ist verhältnismäßig teuer, da zur Warmwassererwärmung mitunter große Flächen abgedeckt werden müssen, um genügend Sonnenlicht zu absorbieren. Außerdem können nur bei sehr guter Lichteinstrahlung, also bei gutem Wetter, die benötigten Temperaturen gewährleistet werden. Optische Linsen konzentrieren das Licht großer Flächen auf kleine Bereiche und gewährleisten damit, dass sehr hohe Kollektortemperaturen auch bei leichter Bewölkung erreicht werden können. Der Vorteil von Fresnellinsen besteht dabei in der sehr flachen Bauform und der preisgünstigen Herstellungsmöglichkeit aus Kunststoff.

4.

Auch mit großen Spiegelanordnungen lässt sich Sonnenlicht bündeln. Diese Technologie wird unter dem Titel „Concentrated Solar Power“ (CSP) in Form von Parabolspiegelkollektoren bereits großflächig eingesetzt.



### 3. Wärmeströmung und Wärmeschichtung

#### Aufgabe

Bestimme die Temperatur von Wasser in unterschiedlichen Höhen eines Gefäßes.

#### Aufbau



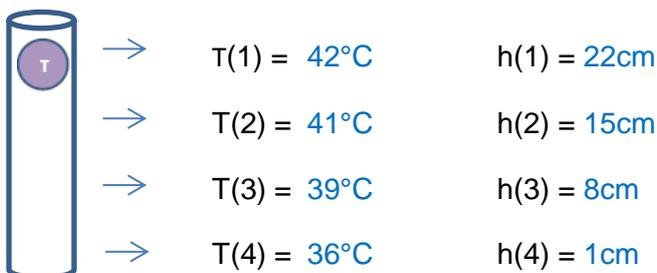
#### Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- Pumpenmodul mit Ausgleichsgefäß
- Flüssigthermometer
- Stöpsel oder kurzer Schlauch
- Warmwasser aus der Leitung im Becherglas bzw. Warmwassererzeugung mit Solarkollektor (siehe Experiment 4)
- zusätzlich benötigt:**
- Lineal

#### Durchführung

1. Stecke das Pumpenmodul mit integriertem Ausgleichsgefäß auf eine beliebige Position der Grundeinheit.
2. Stecke die beiden Stöpsel auf die Anschlüsse des Ausgleichsgefäßes. Dazu ist es alternativ auch möglich, beide Schlauchtüllen mit einem kurzen Schlauch zu verbinden.
3. Fülle mit Hilfe des Becherglases das Ausgleichsgefäß mit etwa 75ml von ca. 40°C heißem Wasser. Das Wasser kann direkt einem Warmwasseranschluss im Haus entnommen werden oder mit Hilfe des Kollektors (Experiment 4) erhitzt werden.
4. Stelle das gefüllte Ausgleichsgefäß nun einige Minuten in eine ruhige Position.
5. Miss anschließend die Temperatur in 4 verschiedenen, gleichmäßig verteilten Höhen und trage deine Messwerte in die Abbildung ein.

#### Messwerte





### 3. Wärmeströmung und Wärmeschichtung

#### Auswertung

1. Beschreibe deine Beobachtungen
2. Erläutere, wie es möglich ist, dass sich im gleichen Gefäß unterschiedliche Temperaturwerte messen lassen. Worauf lässt sich diese Beobachtung zurückführen und wie lässt sich dies für die Verwendung solarthermischer Anlagen nutzen?
3. Notiere zudem, welchen Einfluss die Wärmedämmung durch das Gefäßmaterial auf dieses Experiment hat.

1.

Die Temperatur am Boden des Gefäßes ist am niedrigsten und steigt mit zunehmender Höhe. Der Temperaturanstieg fällt jedoch im oberen Bereich des Gefäßes geringer aus.

2.

Warmes Wasser hat eine geringere Dichte als kaltes Wasser, sodass es im Gefäß nach oben steigt. Analog dazu fällt das kältere und dichtere Wasser auf den Boden des Behälters. Es kommt zu einer Wärmeströmung, durch welche sich nach kurzer Zeit eine Temperaturschichtung ausbildet. Im Gegensatz zur Wärmestrahlung wird bei der Wärmeströmung tatsächlich Materie bewegt und nicht nur thermische Energie transportiert. Solarthermische Anlagen, insbesondere in südlichen Ländern, nutzen die Bewegung von Flüssigkeiten aufgrund der Dichteabhängigkeit, um einen Umlauf ohne Pumpe zu gewährleisten. Diesen Betriebsmodus einer Solarthermieanlage nennt man Thermosyphonumlauf.

3.

Im Experiment konnte beobachtet werden, dass die Temperatur des Wassers im oberen Bereich des Gefäßes mit steigender Höhe nicht mehr so stark ansteigt. Der Effekt der Temperaturschichtung wird in diesem Bereich mit den Folgen der fehlenden Wärmedämmung überlagert. An der Wasseroberfläche gibt das Wasser thermische Energie in Form von Wärme an die Luft ab, sodass sich das Wasser stärker abkühlt, als in den kunststoffummantelten Bereichen. Diese haben eine isolierende Wirkung. Die Wahl des Isolationsmaterials bestimmt die wärmedämmenden Eigenschaften des Behälters.



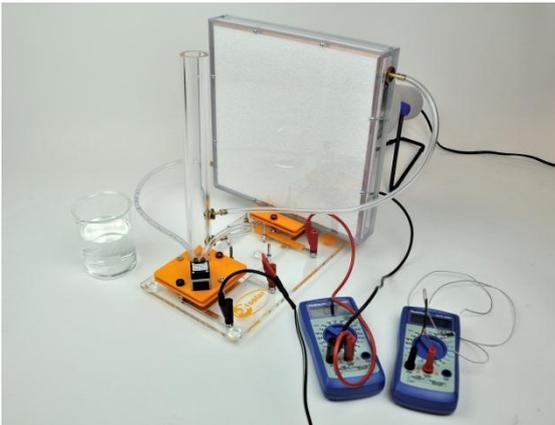
## 4. Wärmeleitung

### Aufgabe

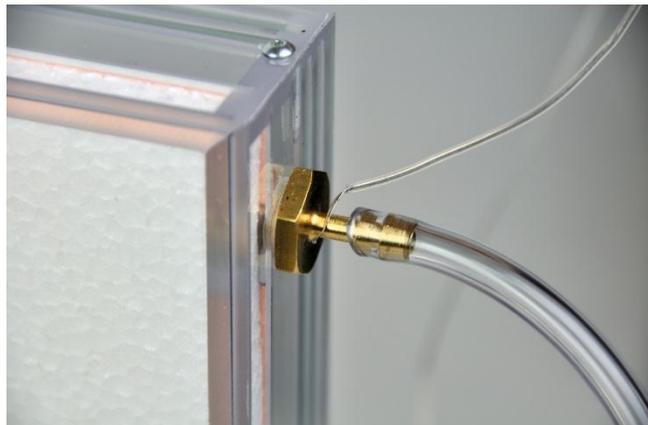
Demonstriere die thermische Leitfähigkeit unterschiedlicher Materialien am Beispiel des Solarkollektors.

### Aufbau

#### 4.1 Versuchsaufbau



#### 4.2 Temperaturmessung



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- Pumpenmodul
- 2x Digitalmessgerät mit Temperaturmessfühler
- Solarkollektor
- Messleitungen
- Schläuche
- Ausgleichsgefäß
- Solarkollektor
- Strahler
- Becherglas
- PowerModul

#### zusätzlich benötigt:

- Lineal, Uhr

### Durchführung

1. Stecke den Solarkollektor und das Pumpenmodul mit Ausgleichsgefäß wie in der Abbildung ersichtlich, auf die Grundeinheit und verbinde die Module mit den beiliegenden Schläuchen. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass der linke Pumpenanschluss mit dem unteren Anschluss des Kollektors und der rechte Anschluss mit dem unteren Ausgang des Ausgleichsgefäßes verbunden werden. Der obere Anschluss des Ausgleichsgefäßes wird anschließend mit dem oberen Anschluss des Kollektors verbunden, um den Wasserkreislauf zu schließen.
2. Fülle nun Wasser in das Ausgleichsgefäß und schließe das PowerModul an die Pumpe an (8V).

**Hinweis:** Gegebenenfalls muss mit dem Messbecher noch einmal Wasser nachgefüllt werden, bis sich ein stabiler Wasserkreislauf mit ca. 200ml Flüssigkeit eingestellt hat. Um restliche Lufteinschlüsse aus dem Kollektor zu bekommen, kannst du ihn vorsichtig schwenken.

3. Stelle an den Digitalmessgeräten das Symbol °C ein, um die Temperaturmessung zu starten. Verbinde außerdem den beiliegenden Temperaturmessfühler mit einem der Geräte.



## 4. Wärmeleitung

### Durchführung

4. Das zweite Messgerät wird direkt mit dem Kollektor verbunden, um den internen Temperatursensor abzugreifen. Achte dabei auf die Polarität der Anschlüsse.
5. Positioniere den Strahler vor dem Kollektor (15cm Abstand) und schalte ihn an. Miss nun mit dem Temperaturmessfühler die Temperatur an den metallischen Anschlüssen und am Kunststoffrand des Kollektors (siehe Abbildung 4.2), während du auch den Temperaturverlauf im Inneren beobachtest.
6. Trage die entsprechenden Messwerte in die Tabelle ein.
7. Wiederhole die Messung zweimal im Abstand von jeweils ca. 5 Minuten.

### Messwerte

	Messung 1	Messung 2	Messung 3
Temperatur im Kollektor in °C	25	33	36
Temperatur am Kunststoff in °C	20	21	25
Temperatur am Metall in °C	20	23	30

### Auswertung

1. Beschreibe deine Beobachtungen. Nenne jeweils zwei gut und zwei schlecht wärmeleitende Materialien.
2. Erläutere, welche Rückschlüsse daraus auf die Konstruktion von Solarkollektoren zu ziehen sind.

1.

Während die Temperatur im Kollektor kontinuierlich steigt, erwärmt sich sowohl das Gehäuse als auch die äußeren Anschlüsse. Es lässt sich jedoch beobachten, dass die metallischen Anschlüsse viel früher einen signifikanten Temperaturanstieg zeigen. Es lässt sich somit schlussfolgern, dass die metallischen Verbindungen bessere Wärmeleitungseigenschaften aufweisen als die Kunststoffteile des Rahmens.

Gut wärmeleitend: Kupfer, Aluminium

Schlecht wärmeleitend: Styropor, PVC

2.

Solarkollektoren müssen prinzipiell sehr gut wärmeleitende Teile beinhalten, um die aufgenommene thermische Energie aus dem Absorbermaterial auf das Trägermedium übertragen zu können. Aus diesem Grund bestehen der Absorber selbst und die mit ihm in Verbindung stehenden Rohre im Kollektor aus Kupfer. An den Messinganschlüssen lässt sich diese optimale Wärmeleitung demonstrieren. In einem realen Solarkollektor müssten solche Stellen wärmedämmend werden, damit die thermische Leistung zur Erhitzung der Kollektorflüssigkeit genutzt werden kann, anstatt Wärme an die Luft abzugeben. Alle Bestandteile eines Solarkollektors, die mit der Umgebungsluft in Kontakt stehen, sollten aus diesem Grund aus besonders gut wärmedämmenden Materialien bestehen.



## 5. Wärmedämmung

### Aufgabe

Untersuche die Auswirkung der Wärmedämmung auf die thermischen Verluste am Wärmetauscher.

### Aufbau

#### 5.1 Temperaturmessung ohne Wärmedämmung



#### 5.2 Temperaturmessung mit Wärmedämmung



### Benötigte Geräte

- Wärmetauschergefäß mit Deckel
- Wärmedämmung
- Flüssigkeitsthermometer

#### zusätzlich benötigt:

- Warmwasser aus der Leitung im Becherglas bzw. Warmwassererzeugung mit Solarkollektor

### Durchführung

1. Fülle mit Hilfe des Becherglases das Wärmetauschergefäß mit ca. 40°C warmem Wasser. Das Wasser kann direkt einem Warmwasseranschluss im Haus entnommen werden oder mit Hilfe des Solarkollektors erhitzt werden (siehe Experiment 9).

**Hinweis:** Das Experiment sollte auf einem festen Untergrund durchgeführt werden.

2. Miss nun die Temperatur im Gefäß im Abstand von zwei Minuten, während sich das Wasser abkühlt. Achte dabei darauf, dass die Spitze des Thermometers in mittlerer Höhe im Gefäß platziert wird.
3. Wiederhole die Messung mit der Isolierung um das Wärmetauschergefäß. Achte darauf, dass du alle Temperaturmessungen an derselben Stelle im Gefäß durchführst.

### Messwerte

Messung 1: Abkühlung ohne Isolation

Zeit in Minuten	0	2	4	6	8	10	12	...
Temperatur in C°	40	38,5	37,5	36,5	35,5	35	35	



## 5. Wärmedämmung

### Messwerte

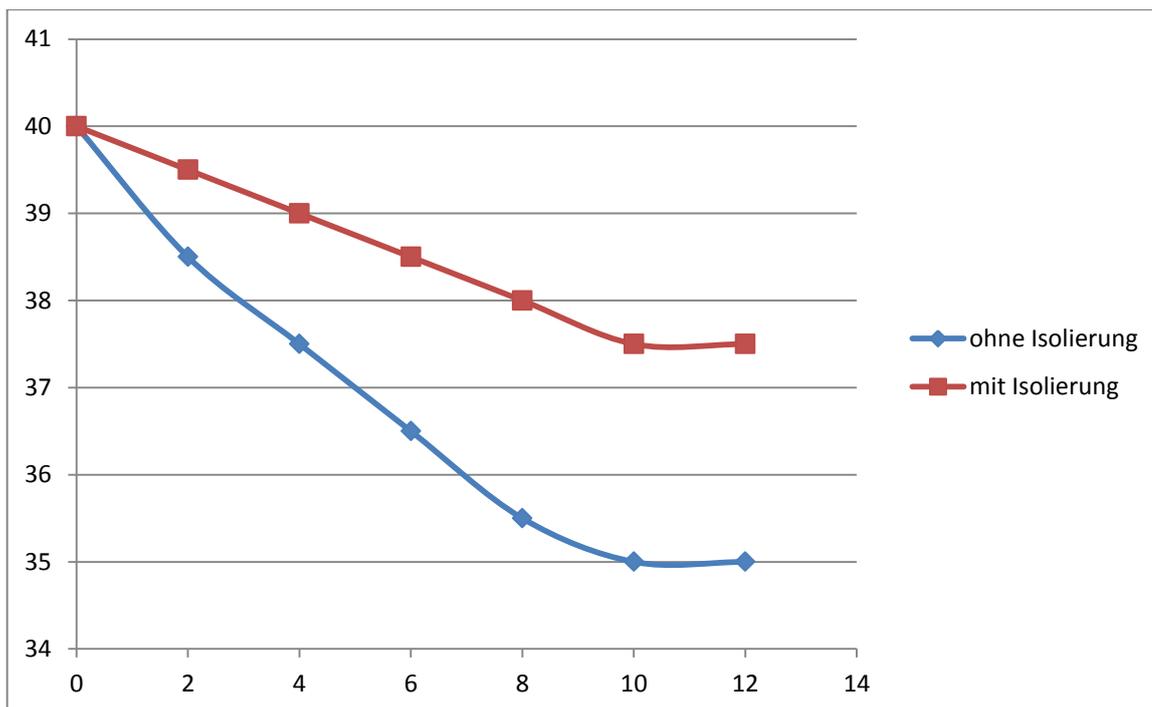
Messung 2: Abkühlung mit Isolation

Zeit in Minuten	0	2	4	6	8	10	12	...
Temperatur in C°	40	39,5	39	38,5	38	38	37,5	

### Auswertung

- Übertrage deine Ergebnisse in das abgebildete Diagramm.
- Vergleiche die Ergebnisse aus den beiden Telexperimenten und erkläre die beobachteten Werte anhand deiner Kenntnisse über Wärmeleitung, Wärmeströmung und Wärmestrahlung.
- Erläutere, welche Rückschlüsse aus dieser Erkenntnis auf die Konstruktion von solarthermischen Anlagen zu ziehen sind.
- Nenne zwei weitere Lebensbereiche oder technische Anwendungen, in denen eine gute Wärmedämmung besonders wichtig ist.

### Diagramm



### Auswertung

- Wenn der Wärmetauscher nicht isoliert ist, sinkt die Temperatur des Wassers beim Abkühlen deutlich schneller. Thermische Verluste treten durch Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Wärmeströmung auf. Die Isolierung besteht aus Kunststoff, welcher besonders schlechte Wärmeleitungseigenschaften aufweist.



## 5. Wärmedämmung

### Auswertung

Zusätzlich befinden sich viele Lufteinschlüsse in dem aufgeschäumten Material, was eine zusätzliche Isolierungswirkung, vergleichbar mit der Funktionsweise einer Thermoskanne, bewirkt. Der Einfluss von Wärmeströmung kann durch die wasserdichte, feste Außenwand des Wärmetauschers ausgeschlossen werden. Dass trotz der Minimierung von Verlusten durch Wärmeleitung weiterhin ein beachtlicher Anteil thermischer Energie an die Umgebung abgegeben wird, liegt einerseits an den nicht isolierten Deckel- und Bodenplatten, andererseits aber auch an der Wärmestrahlung. Wärmestrahlung lässt sich durch reflektierende Oberflächen abschirmen. Mit Alufolie, mit welcher man auch im Ofen mitunter das Essen vor zu starker Wärmestrahlung abschirmt, ließe sich auch dieser Anteil der thermischen Verluste noch besser abschirmen.

3.

Der Wirkungsgrad solarthermischer Anlagen ist entscheidend davon abhängig, wie gut es gelingt, die thermischen Verluste im Wasserkreislauf zu minimieren. Alle Rohrleitungen, Anschlüsse und Wärmespeicher müssen hinsichtlich ihrer Wärmedämmung optimiert werden. Dabei muss beachtet werden, dass Verluste sowohl durch Wärmeleitung als auch durch Wärmestrahlung auftreten können, sodass eine kombinierte Isolationslösung gesucht werden muss. Durch eine evakuierte Isolationsschicht mit einer polierten, metallischen Außenseite lassen sich sehr gute Wärmedämmungen realisieren. In der Praxis sind solche aufwendigen Isolationen jedoch aufgrund der hohen Anschaffungskosten nur an wenigen Stellen im thermischen Kreislauf etabliert.

4.

Kleidung, Gebäudesanierung

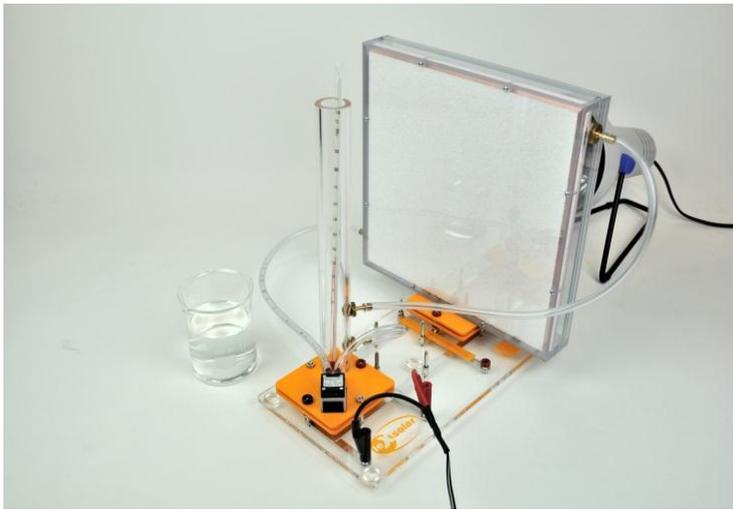


## 6. Solarkollektor mit Pumpenumlauf

### Aufgabe

Stelle den Temperaturverlauf bei der Erwärmung des Solarkollektors mit Pumpenumlauf grafisch dar.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- Strahler
- Pumpenmodul
- Ausgleichsgefäß
- Solarkollektor
- Schläuche
- Flüssigkeitsthermometer
- PowerModul
- Becherglas

#### **zusätzlich benötigt:**

- Lineal, Uhr

### Durchführung

1. Stecke den Solarkollektor und das Pumpenmodul mit Ausgleichsgefäß wie in der Abbildung auf die Grundeinheit und verbinde die Module mit den beiliegenden Schläuchen. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass der linke Pumpenanschluss mit dem unteren Anschluss des Kollektors und der rechte Anschluss mit dem unteren Ausgang des Ausgleichsgefäßes verbunden werden. Der obere Anschluss des Ausgleichsgefäßes wird anschließend mit dem oberen Anschluss des Kollektors verbunden, um den Wasserkreislauf zu schließen.
2. Fülle nun Wasser in das Ausgleichsgefäß und schließe das PowerModul an die Pumpe an (9V). Diese befördert nun das Wasser in den Kreislauf, gegebenenfalls füllst du mit dem Messbecher noch einmal Wasser nach, bis sich ein stabiler Wasserkreislauf mit ca. 200ml Flüssigkeit eingestellt hat. Um restliche Lufteinschlüsse aus dem Kollektor zu bekommen, solltest du diesen vorsichtig schwenken.
3. Stelle das Flüssigkeitsthermometer in das Ausgleichsgefäß und lege eine Uhr zur Zeitmessung bereit. Positioniere nun den Strahler vor dem Kollektor (Abstand 15cm) und schalte ihn an. Miss den Temperaturverlauf und trage die entsprechenden Werte in die Tabelle ein.

### Messwerte

Zeit in Minuten	0	5	10	15	20	25	30	...
Temperatur in C°	23	29	34	38	41	44	47	

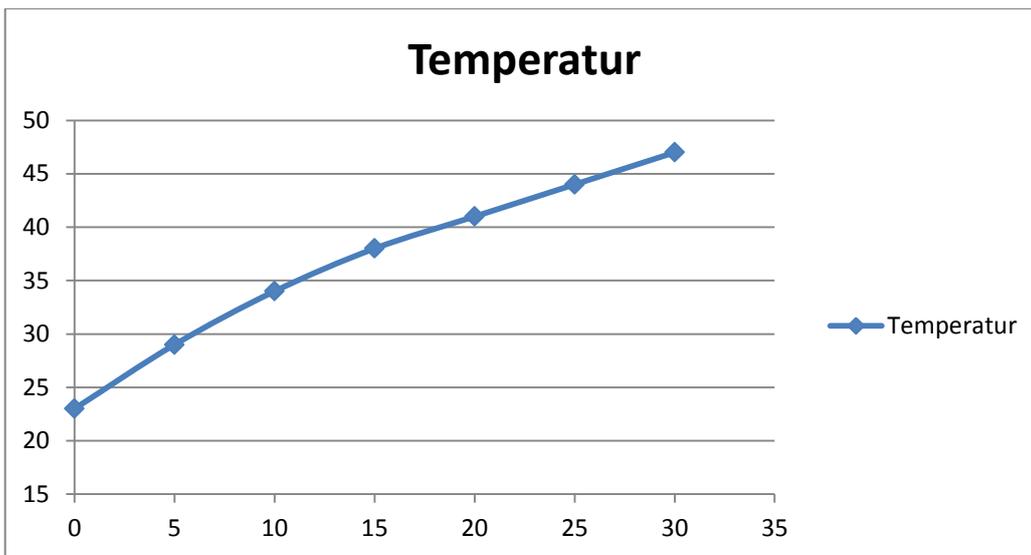


## 6. Solarkollektor mit Pumpenumlauf

### Auswertung

1. Übertrage deine Ergebnisse aus der Tabelle in das abgebildete Diagramm.
2. Beschreibe, auf welche Art und Weise sich das Wasser mit Hilfe des Solarkollektors erwärmt.
3. Erläutere alle Energieumwandlungsprozesse am Solarkollektor, gehe dabei auch auf energetische Verluste ein.
4. Zeichne zur Veranschaulichung ein qualitatives Energieflussdiagramm.

### Diagramm



### Auswertung

2.

Der Wasserkreislauf erwärmt sich im Experiment deutlich. Die Erwärmung erfolgt anfangs annähernd linear, flacht sich jedoch am Ende des Messintervalls ab. Die Durchflussgeschwindigkeit ist konstant. Es ist davon auszugehen, dass eine annähernd konstante thermische Energie über die Kollektorrohre an das Wasser abgegeben wird. Mit zunehmender Temperatur der gesamten Anlage nehmen auch die thermischen Verluste an die Umgebung zu. So wird beispielsweise über die Wände der Schläuche und die Öffnung des Ausgleichsgefäßes zunehmend Wärme abgegeben, was eine Abflachung der Erwärmungsrate bedingt.

3.

Die elektrische Energie, die durch das Stromnetz bereitgestellt wird, wird im Strahler in Strahlungsenergie umgewandelt. Bei diesem Prozess fällt zusätzlich thermische Energie ab, die ungenutzt in die Umgebung abgestrahlt wird. Diese Wärmeverluste machen sich durch die deutliche Erwärmung des Gehäuses am Strahler bemerkbar. Die am Kollektor einfallende Strahlungsenergie der Lichtquelle wird ebenfalls in thermische Energie umgewandelt. Dies geschieht in diesem Fall durch Absorption des Lichts im Absorbermaterial. Für diesen Prozess kann jedoch nur ein Teil der Strahlung genutzt werden, da ein geringer Teil schon in der Glasabdeckung absorbiert oder an der Oberfläche des Absorbers reflektiert wird.

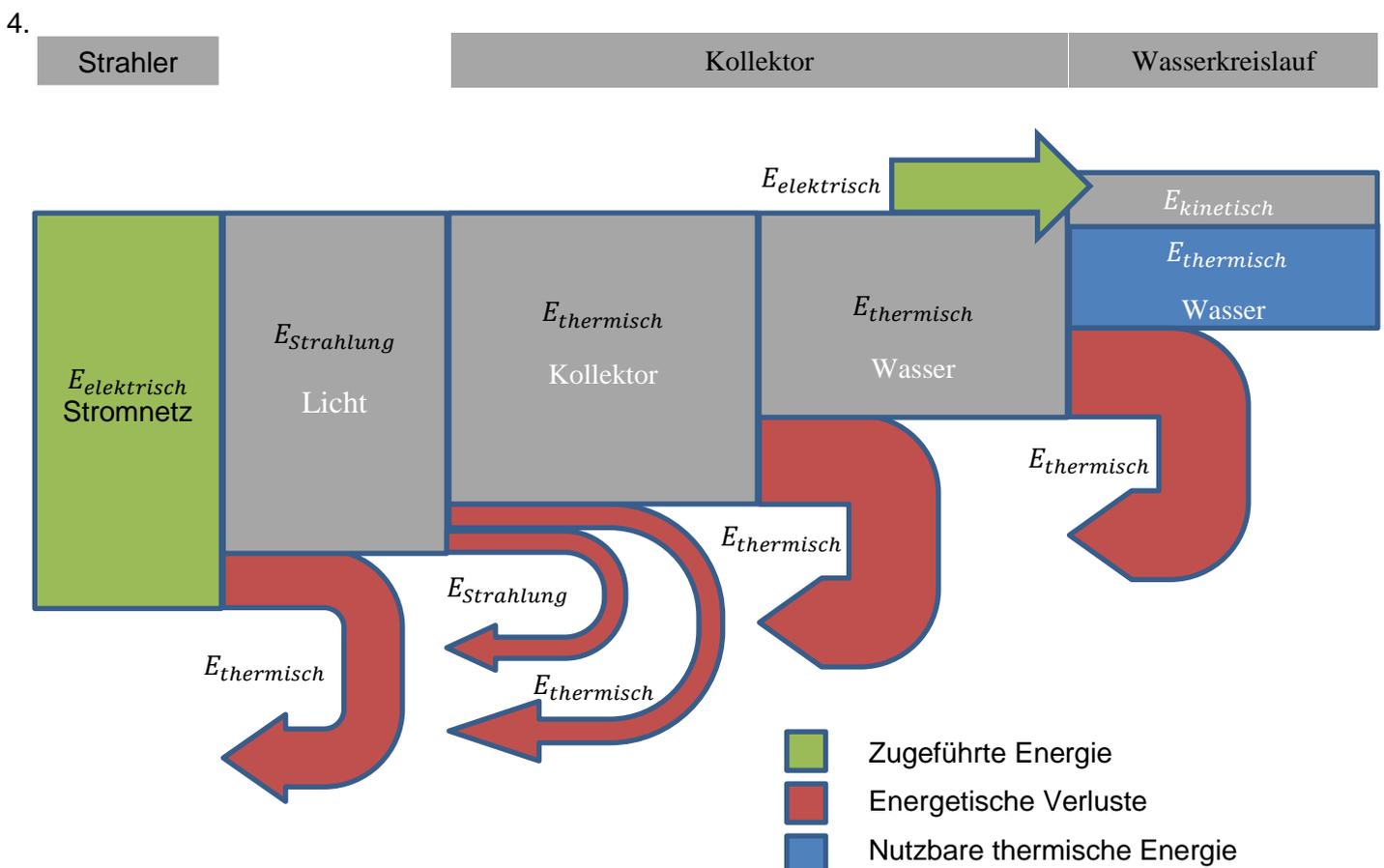


## 6. Solarkollektor mit Pumpenumlauf

## Auswertung

Einer der größten Verluste der Energiebilanz eines Solarkollektors entsteht durch thermische Abstrahlung des erwärmten Kollektormaterials. Anstatt über Wärmeleitungsprozesse vollständig auf das Transportmedium Wasser überzugehen, wird ein Teil der thermischen Energie in Form von Strahlung wieder an die Umgebung abgegeben. Aus diesem Grund wird der Kollektor von allen Seiten möglichst gut thermisch isoliert. Als Wärmedämmung auf der Rückseite dient Styropor, während auf der Vorderseite das aus Thermosflaschen bekannte Mehrschichtprinzip zur Isolation verwendet wird. Der Teil der thermischen Energie, welcher auf das Wasser übertragen werden kann, wird nun durch die Schläuche und das Ausgleichsgefäß im Kreislauf transportiert, wobei die Temperatur in Folge der steten Erwärmung weiter steigt. Während des gesamten Umlaufs treten weitere thermische Verluste an Schlauchtüllen, Schläuchen und dem Ausgleichsgefäß auf, was sich durch eine fühlbare Erwärmung der Bestandteile beobachten lässt.

Wenn man die energetische Betrachtung noch etwas weiter fasst, muss zusätzlich die elektrische Energie an der Pumpe betrachtet werden, welche über kinetische Energie der Rotation an einem kleinen Motor in kinetische Energie des Wassers umgewandelt wird. Ein sehr geringer Anteil der Bewegung des Wassers wird auch durch die Wärmeströmung aufgebracht, die sich aufgrund des Temperaturgefälles im Kollektor ausbildet.





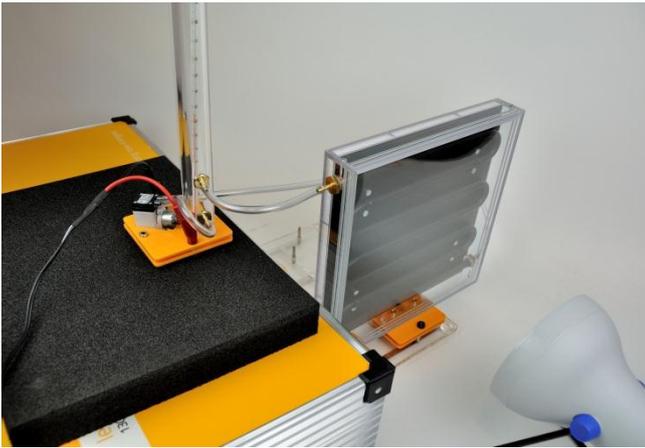
## 7. Solarkollektor mit Thermosiphonumlauf

### Aufgabe

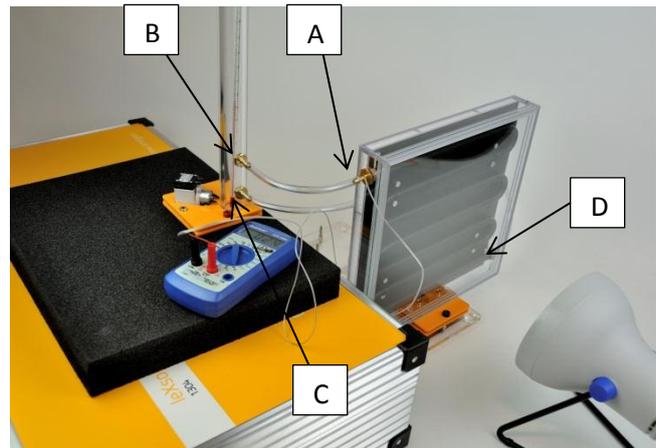
Zeige anhand verschiedener Temperaturmesspunkte, dass sich auch ohne aktive Pumpe ein Wasserumlauf in der Kollektoranlage einstellt.

### Aufbau

#### 7.1 Befüllung des Wasserkreislaufs



#### 7.2 Thermosiphonumlauf



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- Pumpenmodul
- Ausgleichsgefäß
- Solarkollektor
- Digitalmessgerät mit Temperaturmessfühler
- Strahler
- Schläuche
- Flüssigkeitsthermometer
- PowerModul
- Becherglas

### Durchführung

1. Stecke den Solarkollektor auf die Grundeinheit und stelle das Pumpenmodul mit Ausgleichsgefäß gegenüber dem Kollektor erhöht auf. Als Material zur Erhöhung der Position des Pumpenmoduls kannst du beispielsweise den Experimentierkoffer verwenden. Je höher das Ausgleichsgefäß positioniert ist, desto besser funktioniert der Versuch.
2. Verbinde die Bestandteile mit den beiliegenden Schläuchen. Dabei musst du darauf achten, dass der linke Pumpenanschluss über den langen Schlauch mit dem unteren Anschluss des Kollektors und der rechte Anschluss mit dem Ausgleichsgefäß verbunden werden.
3. Ausgleichsgefäß und Kollektor werden dann mit einem weiteren kurzen Schlauch verbunden, um den Wasserkreislauf zu schließen.
4. Fülle nun Wasser in das Ausgleichsgefäß und schließe das auf 9V eingestellte PowerModul an die Pumpe an. Diese befördert nun das Wasser in den Kreislauf, gegebenenfalls füllst du mit dem Messbecher noch einmal Wasser nach, bis sich ein stabiler Wasserkreislauf mit ca. 200ml Flüssigkeit eingestellt hat. Um restliche Lufteinschlüsse aus dem Kollektor zu bekommen, solltest du diesen vorsichtig schwenken.



## 7. Solarkollektor mit Thermosiphonumlauf

### Durchführung

5. Wenn der Kollektor ohne Lufteinschlüsse mit Wasser gefüllt ist, wird die Pumpe dem Kreislauf entnommen. Der fertige Aufbau für den Thermosiphonumlauf ist in Abbildung 7.2 dargestellt. Achte darauf, dass der Wasserstand im Ausgleichsgefäß nur kurz oberhalb des oberen Anschlusses steht.
6. Stelle das Flüssigkeitsthermometer in das Ausgleichsgefäß und lege eine Uhr zur Zeitmessung bereit. Positioniere nun den Strahler vor dem Kollektor (Abstand 15cm) und schalte ihn an.
7. Miss nun den Temperaturverlauf an den in der Abbildung 7.2 bezeichneten Messstellen mit Hilfe des Digitalmessgeräts und dem angeschlossenen Temperaturmessfühler.

**Hinweis:** Mit Hilfe des Flüssigkeitsthermometers kannst du während des Versuchs überprüfen, ob die von außen gemessenen Werte an den Anschlüssen auch repräsentativ für die jeweiligen Wassertemperaturen gewertet werden können.

8. Trage die entsprechenden Werte anschließend in die Tabelle ein.

### Messwerte

Zeit in Minuten	0	5	10	15	20	25	30	...
Temperatur A in °C	23	26	36	42	48	49	51	
Temperatur B in °C	22	24	31	37	42	44	45	
Temperatur C in °C	22	23	23	29	32	35	38	
Temperatur D in °C	21	24	25	26	29	30	32	
Mittlere Temperatur in °C	22	24,3	28,8	33,5	37,8	39,5	41,5	

### Auswertung

1. Erläutere den Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Dichte von Wasser.
2. Vergleiche die ermittelten Werte und erkläre anhand der Ergebnisse, warum sich im Kollektorkreislauf ein Wasserstrom bewegt, auch wenn keine Pumpe angeschlossen wurde.
3. Nenne mögliche Anwendungsmöglichkeiten für das Thermosiphonprinzip und schätze auch mögliche Vorteile und Probleme bei der Konstruktion solcher Anlagen ab.



## 7. Solarkollektor mit Thermosiphonumlauf

### Auswertung

1.

Die Dichte von Wasser ist temperaturabhängig. In das Teilchenmodell übertragen, bedeutet dies, dass sich mit dem Anstieg der Temperatur die mittlere kinetische Energie der Teilchen vergrößert. Die Wassermoleküle bewegen sich stärker, wodurch sie einen größeren Raum beanspruchen. Die Bindung der Teilchen untereinander nimmt ab und das Volumen des gesamten Mediums wird größer, wodurch schließlich die Dichte sinkt. Materialien mit einer geringeren Dichte erfahren einen Auftrieb, sodass sie sich in einem Gemisch stets an die Oberfläche bewegen. Ein Beispiel für einen solchen Vorgang ist die Ablagerung von Öl mit geringer Dichte auf der Oberfläche von Wasser höherer Dichte, wie man es mitunter in verunreinigten Pfützen oder beim Geschirrspülen beobachten kann.

2.

Die beiden Anschlüsse an der oberen Seite des Kollektors (A, B) sind während der gesamten Messdauer deutlich wärmer als die beiden unteren Anschlüsse (C,D). Im gesamten Kollektorkreislauf bildet sich eine Temperaturschichtung mit einer Differenz von mehr als 10K aus. Im Solarkollektor wird Wasser erwärmt und steigt aufgrund der abnehmenden Dichte nach oben, sodass sich auch das Wasser im oberen Teil des Ausgleichsgefäßes erwärmt. Das noch nicht erwärmte, kalte Wasser hoher Dichte sammelt sich am tiefsten Punkt des Kreislaufs und fällt dabei im langen Schlauch hinab. Während im Folgenden immer wieder warmes Wasser aus dem oberen Anschluss des Kollektors strömt, fließt im unteren Teil sofort kälteres Wasser nach, sodass ein steter Kreislauf entsteht. Infolgedessen erhöht sich die mittlere Temperatur im gesamten Kollektor. Der thermische Kreislauf lässt sich demzufolge auch ohne angeschlossene Pumpe betreiben. Bedingung dafür ist jedoch, dass sich das benötigte Wasserreservoir oberhalb des Kollektors befindet

3.

Besonders in südlichen Ländern wird das Prinzip des Thermosiphonumlaufs zur solaren Wassererwärmung genutzt. Auf den Dächern werden dann Wasserreservoirs angebracht, welche die Bewohner der entsprechenden Häuser mit Warmwasser aus Solarkollektoren versorgen. Durch die große Anzahl an Sonnenstunden und die höhere Strahlungsintensität wird dabei keine aufwendige und energieintensive Steuerungstechnik zum Betrieb der entsprechenden Anlagen benötigt. Dies erhöht den Wirkungsgrad und senkt die Energierücklaufzeit derselben. Solche Thermosiphonanlagen arbeiten meist ohne Wärmetauscher und erhitzen direkt das Nutzwasser, was in nördlicheren Gegenden aufgrund der Vereisungsgefahr im Winter ausgeschlossen werden muss.

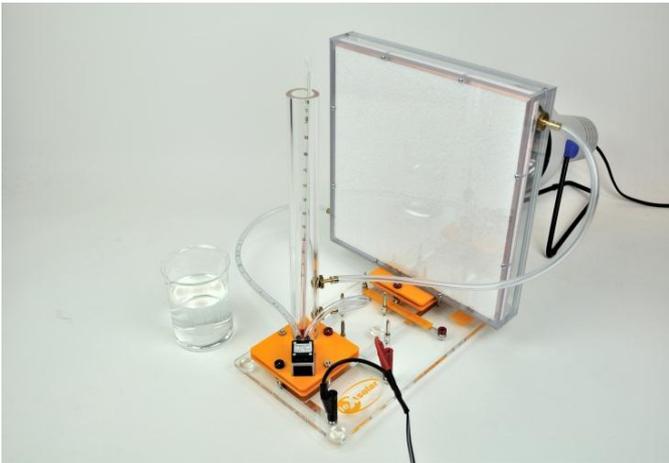


## 8. Variation der Durchflussgeschwindigkeit

### Aufgabe

Finde heraus mit welcher Durchflussgeschwindigkeit durch den solarthermischen Kreislauf der Solarkollektor am effektivsten arbeitet.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- Pumpenmodul
- Ausgleichsgefäß
- Solarkollektor
- Digitalmessgerät mit Messleitungen und Strahler
- Schläuche
- Flüssigkeitsthermometer
- PowerModul
- Becherglas
- Temperaturmessfühler

### Durchführung

1. Stecke den Solarkollektor und das Pumpenmodul mit Ausgleichsgefäß wie in der Abbildung auf die Grundeinheit und verbinde die Module mit den beiliegenden Schläuchen. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass der linke Pumpenanschluss mit dem unteren Anschluss des Kollektors und der rechte Anschluss mit dem unteren Ausgang des Ausgleichsgefäßes verbunden werden. Der obere Anschluss des Ausgleichsgefäßes wird anschließend mit dem oberen Anschluss des Kollektors verbunden, um den Wasserkreislauf zu schließen.
2. Fülle nun Wasser in das Ausgleichsgefäß und schließe das PowerModul an die Pumpe an (9V). Diese befördert nun das Wasser in den Kreislauf, gegebenenfalls füllst du mit dem Messbecher noch einmal Wasser nach, bis sich ein stabiler Wasserkreislauf mit ca. 200ml Flüssigkeit eingestellt hat. Um restliche Luft einschüsse aus dem Kollektor zu bekommen, solltest du diesen vorsichtig schwenken.
3. Um den Versuch zu beginnen, stellst du das Flüssigkeitsthermometer in das Ausgleichsgefäß und legst eine Uhr zur Zeitmessung bereit. An der Pumpe wird nun eine Spannung von 5V eingestellt.
4. Positioniere den Strahler vor dem Kollektor (Abstand 15cm) und schalte ihn an. Miss die Temperatur im Ausgleichsgefäß während der Erwärmung des Kollektors und trage die entsprechenden Werte in die Tabelle ein. Leere den Wasserkreislauf und fülle ihn erneut mit kaltem Wasser.
5. Wiederhole den Versuch mit einer Spannung von 9V. Halte auch diese Werte in der Tabelle fest.



## 8. Variation der Durchflussgeschwindigkeit

### Messwerte

**Tabelle 8.1 – Erwärmung bei 5V**

Zeit in Minuten	0	2	4	6	8	10	12	...
Temperatur in C°	25	28	30	32	34	36	37	

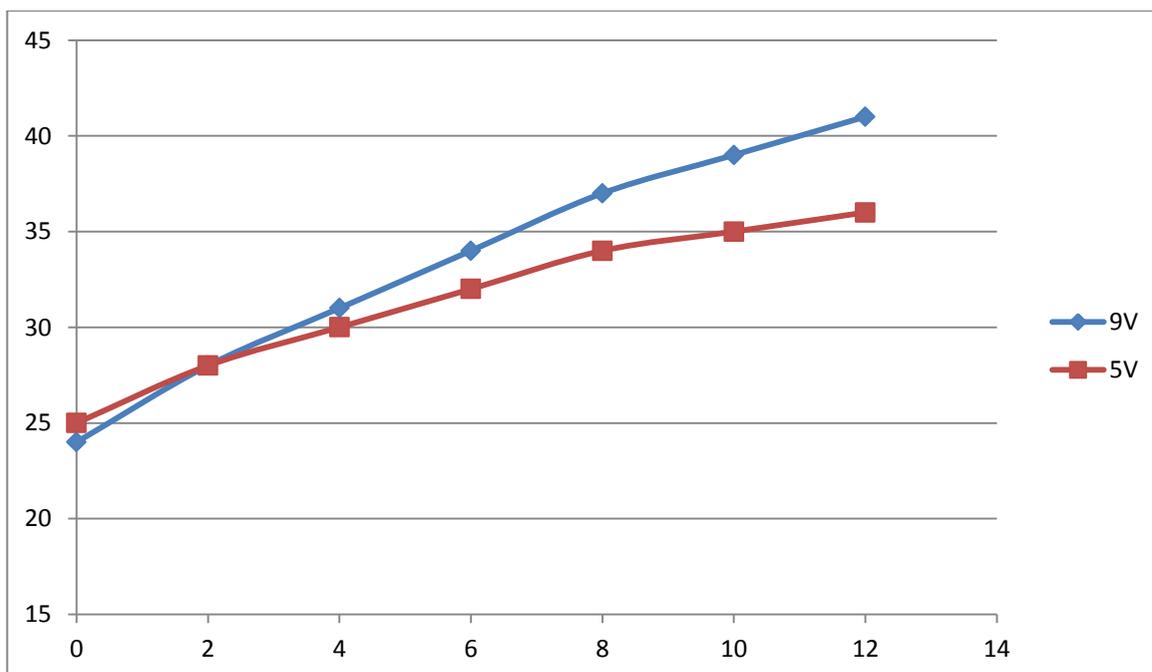
**Tabelle 8.2 – Erwärmung bei 9V**

Zeit in Minuten	0	2	4	6	8	10	12	...
Temperatur in C°	24	28	31	34	37	39	41	

### Auswertung

1. Übertrage deine Ergebnisse in das abgebildete Diagramm.
2. Vergleiche die Ergebnisse aus den beiden Teilerperimenten, indem du die Entwicklung der Temperatur für beide Fälle beschreibst.
3. Erkläre, weshalb die Variation der Durchflussgeschwindigkeit einen Einfluss auf die Erwärmung des Kollektorkreislaufs hat.
4. Nenne mögliche Verbesserungen an Kollektoranlagen, um die Erkenntnisse aus diesem Versuch in reale Anlagen zu integrieren.

### Diagramm





## Auswertung

2.

Die Temperaturentwicklung im Ausgleichsgefäß ist im Messintervall annähernd linear. Die leichte Abflachung der Kurve ist nur ansatzweise erkennbar. Zwischen den beiden Temperaturverläufen bei unterschiedlichen Durchflussgeschwindigkeiten besteht ein systematischer Unterschied. Die Kurven unterscheiden sich hinsichtlich des mittleren Temperaturanstiegs voneinander. Dies bedeutet, dass die Effektivität einer solarthermischen Anlage abhängig von der Durchflussmenge ist.

3.

Zwischen zwei unterschiedlich temperierten Reservoirs, die miteinander in thermischen Kontakt stehen, findet eine Angleichung der Temperatur statt. Dabei kühlt sich der wärmere Teil ab, während sich der kältere erwärmt, bis beide die gleiche Temperatur aufweisen. Dieser Vorgang läuft umso schneller ab, je größer die Temperaturdifferenz zwischen beiden Reservoirs ist. Im Fall des Solarkollektors bringt man die heiße Oberfläche des Kollektorröhrchens mit dem Wasser im Kreislauf in Kontakt. Dabei erwärmt sich das Wasser. Eine zu niedrige Durchflussgeschwindigkeit sorgt dafür, dass nicht genügend kühles Wasser nachgespeist wird, um den Wärmeübergang effektiv zu gestalten. Eine schnellere Durchflussgeschwindigkeit durch die Schläuche reduziert zudem thermische Verluste auf dem Weg zum Wärmespeicher. Solarthermische Systeme, die mit hohen Durchflussmengen arbeiten, nennt man High-Flow-Solaranlagen. Nachteilig ist dabei der höhere Energieverbrauch durch die Pumpe. Außerdem werden geringere Absoluttemperaturen im Kollektor erreicht, da sich das System gleichmäßiger aufheizt. Bei einer Low-Flow-Solaranlage mit Schichtenspeicher entsteht eine höhere Temperaturspreizung, sodass ein Schichtenspeicher schneller beheizt werden kann.

4.

Um für jede Anwendung und jeden Temperaturzustand einer solarthermischen Anlage die optimale Durchflussgeschwindigkeit zu nutzen, kann die Pumpenleistung variabel gestaltet werden. Solche Systeme sind unter dem Titel Matched-Flow-Solaranlage erhältlich, erzielen aber aufgrund der höheren Anschaffungskosten bislang noch einen relativ geringen Marktanteil.

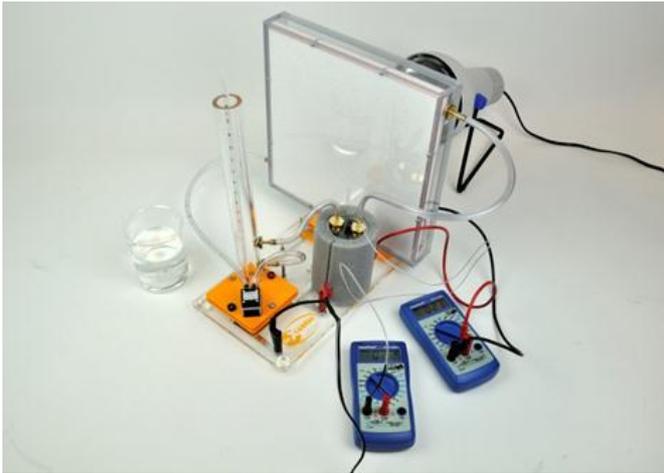


## 9. Kollektorumlauf mit Wärmetauscher

### Aufgabe

Zeige, dass sich mit Hilfe des Wärmetauschers auch Wasser außerhalb des Kreislaufs erwärmen lässt und wie schnell die Wärmeübergänge im System realisiert werden.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- Pumpenmodul
- Solarkollektor
- Schläuche
- 2x Digitalmessgerät mit Messleitungen
- Temperaturmessfühler
- Flüssigkeitsthermometer
- Strahler
- PowerModul
- Wärmetauscher mit Wärmedämmung

### Durchführung

1. Stecke den Solarkollektor und das Pumpenmodul mit Ausgleichsgefäß wie in der Abbildung ersichtlich, auf die Grundeinheit und verbinde die Module mit den beiliegenden Schläuchen.

**Hinweis:** Dabei muss darauf geachtet werden, dass der linke Pumpenanschluss mit dem unteren Anschluss des Kollektors und der rechte Anschluss mit dem Ausgleichsgefäß verbunden werden.

2. Füge zwischen dem oberem Anschluss des Kollektors und dem Ausgleichsgefäß den Wärmetauscher ein, um den Wasserkreislauf zu schließen. Verwende den Wärmetauscher mit der beigefügten Isolierung, um thermische Verluste zu minimieren.
3. Fülle nun Wasser in das Ausgleichsgefäß und schließe das PowerModul an die Pumpe an (9V). Diese befördert nun das Wasser in den Kreislauf

**Hinweis:** Gegebenenfalls muss mit dem Messbecher noch einmal Wasser nachgefüllt werden, bis sich ein stabiler Wasserkreislauf mit ca. 200ml Flüssigkeit eingestellt hat. Um restliche Lufteinschlüsse aus dem Kollektor zu bekommen, solltest du diesen vorsichtig schwenken.

4. Fülle nun auch den Wärmetauscher mit Wasser und notiere dir mit Hilfe der Skale am Messbecher für beide Wassersysteme das Gewicht des Wassers, welches du zum Befüllen benötigst hast.
5. Stelle das Flüssigkeitsthermometer in das Ausgleichsgefäß und lege eine Uhr zur Zeitmessung bereit. Stelle an den Digitalmessgeräten das Symbol °C ein, um die Temperaturmessung zu starten.
6. Verbinde außerdem den beiliegenden Temperaturmessfühler mit einem der Geräte. Das andere Messgerät verbindest du über zwei Kabel direkt mit dem Kollektor, um den internen Temperatursensor abzugreifen. Positioniere nun den Strahler vor dem Kollektor (Abstand 15cm) und schalte ihn an.



## 9. Kollektorumlauf mit Wärmetauscher

### Durchführung

7. Stecke den Messfühler in den Wärmetauscher und verschließe diesen mit dem mitgelieferten Stöpsel. Achte darauf, dass der Messfühler nicht am Kupfer anliegt und mittig im Wärmetauscher positioniert ist. Miss nun den Temperaturverlauf an allen drei Messstellen parallel und trage die entsprechenden Werte in die Tabelle ein.

### Messwerte

Gewicht des Wasser im Ausgleichsgefäß:  $m_{Au} = 0,2\text{kg}$

Gewicht des Wasser im Ausgleichsgefäß:  $m_{Wä} = 0,1\text{kg}$

Zeit in Minuten	Temperatur Kollektor $T_1$ in $^{\circ}\text{C}$	Temperatur Wärmetauscher $T_3$ in $^{\circ}\text{C}$	Temperatur Ausgleichsgefäß $T_2$ in $^{\circ}\text{C}$	Temperaturdifferenz Ausgleichsgefäß-Wärmetauscher $T_2 - T_3$ in K	Temperaturdifferenz Kollektor – Ausgleichsgefäß $T_1 - T_2$ in K
0	23	23	23	0	0
2	36	23	24,5	1,5	11,5
4	38	23	27	4	11
6	40	26	29	3	11
8	42	27	31	4	11
10	43	29	32	3	11
12	45	31	33,5	2,5	11,5
14	46	32	35	3	11
16	47	34	36,5	2,5	10,5
18	48	36	37,5	1,5	10,5
20	49	37	39	2	10
22	50	38	40	2	10
24	51	39	41	2	10
26	52	40	42	2	10
28	52	41	43	2	9
30	53	42	44	2	9

### Auswertung

1. Trage deine Ergebnisse in das abgebildete Diagramm ein.
2. Vergleiche die Ergebnisse an den verschiedenen Messstellen. Nimm dabei insbesondere Stellung zu den gemessenen Temperaturdifferenzen zwischen dem Kollektor und dem Wasserkreislauf bzw. zwischen dem Wasserkreislauf und dem Wärmetauscher.

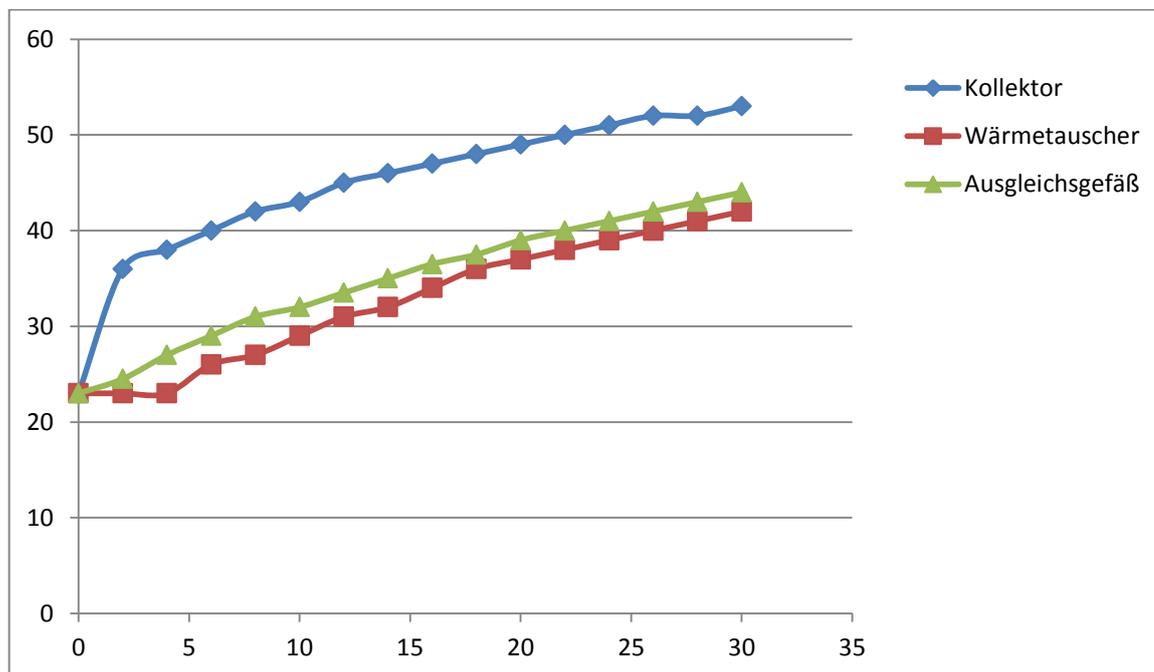


## 9. Kollektorumlauf mit Wärmetauscher

### Auswertung

- Bestimme mit Hilfe der ermittelten Werte und der Gesamtdauer die übertragene Wärmemenge im System.
- Bestimme die relevanten Wärmeströme an den thermischen Übergängen der Anlage und berechne den entsprechenden Wärmeübergangswiderstand.
- Vergleiche die ermittelten Wärmeübergangswiderstände und diskutiere, welche technischen Maßnahmen zur Minimierung dieses Widerstandswertes ergriffen werden können.

### Diagramm



### Auswertung

2. Der Kollektor erwärmt sich vor allem in den ersten Minuten sehr schnell und relativ stark. Danach ist ein relativ konstanter Anstieg zu verzeichnen. Die Temperatur in Wärmetauscher und Ausgleichsgefäß laufen der Temperatur im Kollektor während des Experiments um etwa 10K hinterher. Der Wärmeübergang am Wärmetauscher und Ausgleichsgefäß scheint demzufolge zunächst deutlich langsamer zu arbeiten, um sich später anzugleichen.

3. Temperaturdifferenz Ausgleichsgefäß-Wärmetauscher  $T_2 - T_3 = 2,3 \text{ K}$  (Mittelwert)

Temperaturdifferenz Kollektor – Ausgleichsgefäß  $T_1 - T_2 = 9,8 \text{ K}$  (Mittelwert)



## 9. Kollektorumlauf mit Wärmetauscher

## Auswertung

4.

Messintervall  $\Delta t = 1800s$ Temperaturerhöhung im Wärmetauscher im Messintervall  $\Delta T_{W\ddot{a}} = 19K$ Temperaturerhöhung im Ausgleichsgefäß im Messintervall  $\Delta T_{Au} = 21K$ 

Gesamtwärmemenge:

$$Q_{gesamt} = Q_{W\ddot{a}} + Q_{Au}$$

$$Q_{W\ddot{a}} = m_{W\ddot{a}} \cdot c_w \cdot \Delta T_{W\ddot{a}}$$

$$Q_{Au} = m_{Au} \cdot c_w \cdot \Delta T_{Au}$$

$$Q_{W\ddot{a}} = 0,1kg \cdot 4182 \frac{J}{kgK} \cdot 19K = 7945,8J$$

$$Q_{Au} = 0,2kg \cdot 4182 \frac{J}{kgK} \cdot 21K = 17564,4J$$

$$Q_{gesamt} = 7945,8J + 17564,4J = 25510,2J$$

5.

Die Effektivität des Wärmeübergangs in thermischen Anlagen zu berechnen, ist äußerst komplex, da sich Strömungsprozesse meist nur mit Hilfe von aufwendigen Simulationen vorhersagen lassen. Um dennoch einen Überblick über den Vorgang des thermischen Übergangs zu bekommen kann man die Messergebnisse aus der Temperaturentwicklung und die Energiebilanz des Systems nutzen. Unter Ausschluss einiger Randbedingungen lässt sich der Wärmeübergangswiderstand an den Grenzen zweier thermischer Systeme abschätzen, welcher die Qualität des Wärmeübergangs repräsentiert.

Wärmestrom für den Übergang von Kollektor zum gesamten Wasserkreislauf:

$$\dot{Q}_{gesamt} = \frac{Q_{gesamt}}{\Delta t}$$

$$\dot{Q}_{gesamt} = \frac{25510,2J}{1800s} = 14,2W$$



## 9. Kollektorumlauf mit Wärmetauscher

## Auswertung

Wärmestrom für den Übergang von Wasserkreislauf zum Wärmetauscher:

$$\dot{Q}_{W\ddot{a}} = \frac{Q_{W\ddot{a}}}{\Delta t}$$

$$\dot{Q}_{W\ddot{a}} = \frac{7945,8 \text{ J}}{1800 \text{ s}} = 4,4 \text{ W}$$

Wärmeübergangswiderstand für den Übergang von Kollektor zum Ausgleichsgefäß:

$$R_{s,gesamt} = \frac{T_1 - T_2}{\dot{Q}_{gesamt}}$$

$$R_{s,gesamt} = \frac{9,8 \text{ K}}{14,2 \text{ W}} = 0,69 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Wärmeübergangswiderstand für den Übergang von Wasserkreislauf zum Wärmetauscher:

$$R_{s,W\ddot{a}} = \frac{T_2 - T_3}{\dot{Q}_{W\ddot{a}}}$$

$$R_{s,W\ddot{a}} = \frac{2,3 \text{ K}}{4,4 \text{ W}} = 0,52 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$\Delta T$  .....mittlere Temperaturdifferenz der beiden am Wärmeübergang beteiligten Medien

$\dot{Q}_n$  .....mittlerer Wärmestrom, welcher sich aus der Energiebilanz der Kollektoranlage abschätzen lässt.

6.

Der Wärmeübergangswiderstand für die Erhitzung des Wassers im Ausgleichsgefäß ist höher als der entsprechende Wert am Wärmetauscher. Diese Werte ergeben sich vor allem aus dem sprunghaften Anstieg der Temperatur im Kollektor zu Beginn des Versuchs. Wird der Verlauf ab einem Zeitpunkt von etwa 3min betrachtet, so zeigt sich ein anderer Verlauf.

Die Fähigkeit thermische Energie auf das Wasser zu übertragen wird maßgeblich durch den Volumenstrom desselben und das Verhältnis von Kupferoberfläche zu Wasservolumen bestimmt. Um den Wärmetauscher zu optimieren, wäre es notwendig, die Oberfläche des Kupferrohrs zu vergrößern und das Wasser im Wärmetauscher umzuwälzen. In der Praxis werden Wärmetauscher von Wasser durchströmt und die metallischen Elemente sind helixförmig gebogen, um einen möglichst schnellen Wärmeübergang zu gewährleisten.



## 9. Kollektorumlauf mit Wärmetauscher

## Auswertung

Möchte man den Einfluss der Oberfläche in die Einschätzung der Funktionsfähigkeit eines Wärmeübergangs einbeziehen, nutzt man den Wärmeübergangskoeffizienten.

$$\alpha_n = \frac{1}{A_n \cdot R_{s,n}}$$
$$\alpha_{gesamt} = \frac{1}{A_{gesamt} \cdot R_{s,gesamt}} = \frac{1}{0,125\text{m}^2 \cdot 0,69 \frac{\text{K}}{\text{W}}} = 11,59 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$
$$\alpha_{w\ddot{a}} = \frac{1}{A_{w\ddot{a}} \cdot R_{s,w\ddot{a}}} = \frac{1}{0,02\text{m}^2 \cdot 0,52 \frac{\text{K}}{\text{W}}} = 96,15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$



## 10. Kollektorumlauf mit Paraffinwärmespeicher

### Aufgabe

Zeige, dass sich mit Hilfe des Paraffinwärmespeichers thermische Energie im Übergang vom festem zum flüssigen Aggregatzustand speichern lässt.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- Pumpenmodul
- Ausgleichsgefäß
- Solarkollektor
- Schläuche
- 2x Digitalmessgerät mit Messleitungen
- Temperaturmessfühler
- Flüssigkeitsthermometer
- Strahler
- PowerModul
- Wärmespeichermodul
- Stöpsel

### Durchführung

1. Stecke den Solarkollektor und das Pumpenmodul mit Ausgleichsgefäß, wie in der Abbildung ersichtlich auf die Grundeinheit und verbinde die Module mit den beiliegenden Schläuchen

**Hinweis:** Dabei musst du darauf achten dass, der linke Pumpenanschluss mit dem unteren Anschluss des Kollektors und der rechte Anschluss mit dem Ausgleichsgefäß verbunden werden. Füge zwischen dem oberem Anschluss des Kollektors und dem Ausgleichsgefäß den Wärmespeicher ein, um den Wasserkreislauf zu schließen.

2. Fülle nun Wasser in das Ausgleichsgefäß und schließe das PowerModul an die Pumpe (9V) an. Diese befördert nun das Wasser in den Kreislauf.

**Hinweis:** Gegebenenfalls füllst du mit dem Messbecher noch einmal Wasser nach, bis sich ein stabiler Wasserkreislauf mit ca. 200ml Flüssigkeit eingestellt hat. Um restliche Luft einschüsse aus dem Kollektor zu bekommen, solltest du diesen vorsichtig schwenken.

3. Stecke den Messfühler des Digitalmessgeräts - soweit möglich - in den Paraffinbehälter und schließe die Öffnung mit dem beiliegenden Stöpsel. Achte darauf, dass der Messfühler nicht am Kupfer anliegt und mittig im Wärmespeicher positioniert ist. Lege eine Uhr zur Zeitmessung bereit.
4. Stelle an den Digitalmessgeräten das Symbol °C ein, um die Temperaturmessung zu starten. Verbinde den Temperaturmessfühler mit einem der Geräte. Das andere Messgerät verbindest du über zwei Kabel direkt mit dem Kollektor, um den internen Temperatursensor abzugreifen. Positioniere nun den Strahler vor dem Kollektor (Abstand 15cm) und schalte ihn an.
5. Miss nun den Temperaturverlauf an allen Messstellen parallel und trage die entsprechenden Werte in die Tabelle ein.



## 10. Kollektorumlauf mit Paraffinwärmespeicher

### Durchführung

6. Schalte nach 80 Minuten die Lampe ab und beobachte weiterhin den Temperaturverlauf. Um das Experiment zu beschleunigen kannst du auch mit Hilfe des Becherglases am Beginn des Versuchs vorgewärmtes Wasser aus dem Warmwasseranschluss am Waschbecken einfüllen.

### Messwerte

Zeit in Minuten	Temperatur Kollektor in C°	Temperatur Wärmespeicher in C°	Temperatur Ausgleichsgefäß in C°
0	23	25	23
2	35	25	25
4	37	25	27
6	39	25	29
8	40	26	32
10	42	26	34
12	43	26	36
14	45	27	36
16	46	27	36
18	47	28	37
20	48	29	38
22	48	29	39
24	49	30	39
26	50	31	40
28	50	32	40
30	51	32	41
32	51	33	41
34	52	34	41
36	52	34	42
38	53	34	42
40	53	35	42
42	53	35	43
44	53	36	43
46	54	36	43
48	54	36	43
50	54	37	43
52	54	37	43
54	54	37	43
56	55	37	43
58	55	38	44
60	55	38	44
62	55	38	44
64	55	38	44



## 10. Kollektorumlauf mit Paraffinwärmespeicher

## Messwerte

66	55	38	44
68	55	38	44
70	55	38	44
72	55	40	45
74	55	40	45
76	55	40	45
78	55	40	46
80	53	40	46
82	44	40	46
84	42	40	46
86	40	40	46
88	39	40	45
90	38	40	44
92	37	40	43
94	36	40	42
96	35	40	41
98	34	40	40
100	33	40	39
102	33	40	38
104	32	40	37
106	32	40	37
108	31	40	36
110	31	40	35
112	30	40	35
114	30	40	34
116	29	40	33
118	29	40	33
120	29	39	32

## Auswertung

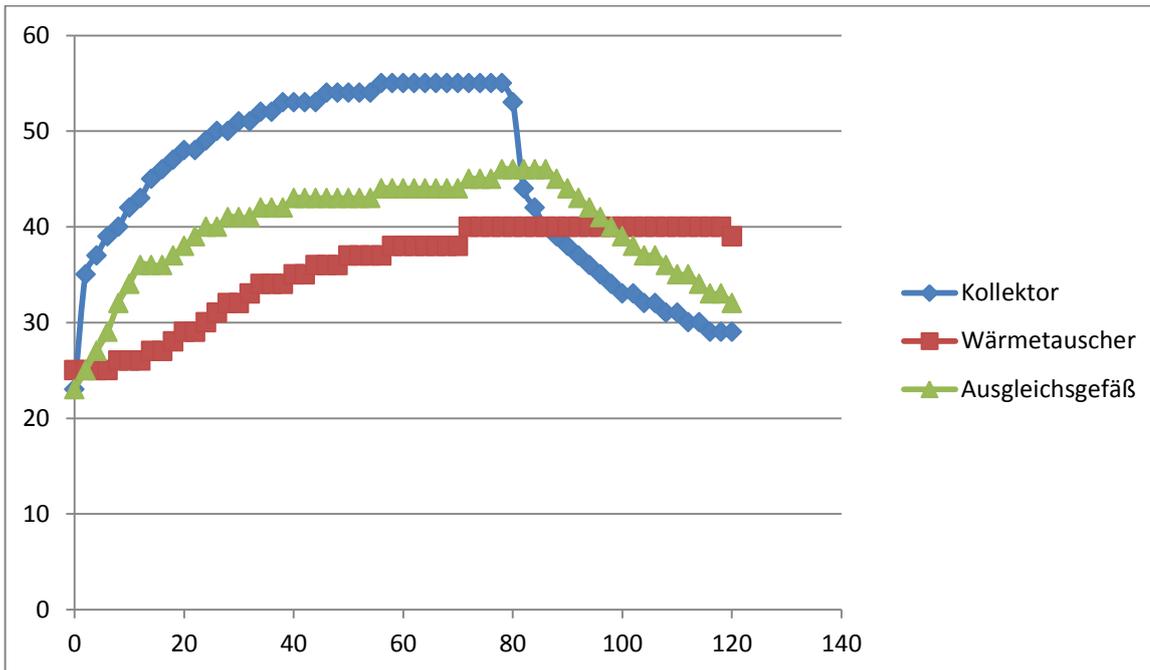
1. Trage deine Werte in das abgebildete Diagramm ein.
2. Vergleiche die Ergebnisse an den verschiedenen Messstellen. Beschreibe deine Beobachtung beim Abkühlen des Systems.
3. Erkläre deine Beobachtung am Wärmespeicher anhand deiner Kenntnisse über Aggregatzustandsänderungen.
4. Berechne welche Menge an Energie man im Volumen von  $0,1\text{dm}^3$  Wasser bzw. in  $0,1\text{dm}^3$  Paraffin speichern kann, wenn man das Material von  $20^\circ\text{C}$  auf  $60^\circ\text{C}$  erhitzt und dabei den Schmelzpunkt des Paraffins überschreitet. Diskutiere das Ergebnis und schlussfolgere daraus auf die Einsatzmöglichkeiten von Paraffinwärmespeichern.

(Dichte:  $\rho_{\text{Wasser}} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ,  $\rho_{\text{Paraffin}} = 800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , Spezifische Wärmekapazität:  $c_{\text{Wasser}} = 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ ,  
 $c_{\text{Paraffin}} = 2,89 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ , Spezifische Schmelzwärme:  $h_{\text{Paraffin}} = 220 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ )



## 10. Kollektorumlauf mit Paraffinwärmespeicher

### Diagramm



[Bei 80 Minuten wurde abgeschaltet]

### Auswertung

2.

Sowohl Kollektor als auch das Wasser im Kreislauf erwärmen sich stetig, bis sich nach einiger Zeit ein Gleichgewicht zwischen thermischen Verlusten und der absorbierten thermischen Energie einstellt. Da die thermischen Verluste im Wasserkreislauf um einiges geringer sind als im Kollektor, erreicht das Wasser eine geringere Maximaltemperatur. Der Wärmetauscher erwärmt sich noch etwas weniger, da der thermische Übergang einen hohen Wärmeübergangswiderstand aufweist. Diese Erwärmung erfolgt jedoch sehr gleichmäßig bis zu einer Schwelle von ca. 40°C, bei der die Temperatur konstant bleibt. Nach dem Abschalten des Strahlers sinkt die Temperatur des Kollektors sehr schnell ab, während dieser Abkühlungsprozess im Wasserkreislauf verzögert stattfindet. Der Wärmespeicher behält noch einige Zeit eine konstante Temperatur von 40°C bei.

3.

Die Temperaturschwelle von 40°C ist eine Folge des Schmelzvorgangs des Paraffins im Wärmespeicher. Zur Änderung des Aggregatzustandes von fest zu flüssig wird solange thermische Energie bei konstanter Temperatur aufgenommen, bis das gesamte Wachs geschmolzen ist. Nach dem Abschalten der Energiezufuhr im System beginnen alle Bestandteile, sich wieder abzukühlen. Auch das Wachs beginnt



## 10. Kollektorumlauf mit Paraffinwärmespeicher

## Auswertung

daraufhin, wieder zu erstarren. Bei der Änderung des Aggregatzustandes von flüssig zu fest wird die im Phasenübergang gespeicherte Energie wieder abgegeben, sodass in diesem Fall der Wärmespeicher den Wasserkreislauf nachheizen kann. Aus diesem Grund sinkt die Temperatur im Wasserkreislauf deutlich langsamer als im Kollektor. Wärmespeicher, die den Phasenübergang zur zusätzlichen Energiespeicherung verwenden, werden auch als Latentwärmespeicher bezeichnet.

4.

$$E_{\text{Wasser}} = m \cdot c_{\text{Wasser}} \cdot \Delta T$$

$$E_{\text{Wasser}} = \rho_{\text{Wasser}} \cdot V \cdot c_{\text{Wasser}} \cdot \Delta T$$

$$E_{\text{Wasser}} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,0001 \text{m}^3 \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 40 \text{K}$$

$$E_{\text{Wasser}} = 0,1 \text{kg} \cdot 167200 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$E_{\text{Wasser}} = 16720 \text{J}$$

$$E_{\text{Paraffin}} = \rho_{\text{Paraffin}} \cdot V \cdot c_{\text{Paraffin}} \cdot \Delta T + h_{\text{Paraffin}} \cdot \rho_{\text{Paraffin}} \cdot V$$

$$E_{\text{Paraffin}} = \rho_{\text{Paraffin}} \cdot V \cdot (c_{\text{Paraffin}} \cdot \Delta T + h_{\text{Paraffin}})$$

$$E_{\text{Paraffin}} = 800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,0001 \text{m}^3 \cdot \left( 2890 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 40 \text{K} + 220000 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right)$$

$$E_{\text{Paraffin}} = 0,08 \text{kg} \cdot \left( 115600 \frac{\text{J}}{\text{kg}} + 220000 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right)$$

$$E_{\text{Paraffin}} = 26848 \text{J}$$

Im Paraffin kann im Temperaturbereich des Phasenübergangs fast 50% mehr thermische Energie gespeichert werden. Der Effekt der Speicherung im Phasenübergang wird dabei durch die geringere Dichte des Materials und die geringere Wärmekapazität von Paraffin etwas kompensiert. Durch die deutlich höheren Anschaffungskosten ist vor der Anschaffung einer Paraffinwärmespeichers abzuschätzen, in welchem Verhältnis Kosten und Nutzen stehen. Um Temperaturen oberhalb des Schmelzpunkts zu erreichen, benötigt das mit Paraffin gefüllte Gefäß deutlich länger als ein vergleichbares Wasserreservoir. Dies ist ein Nachteil, der allerdings durch die längere Speicherdauer besonders in thermischen Inselsystemen aufgewogen wird.



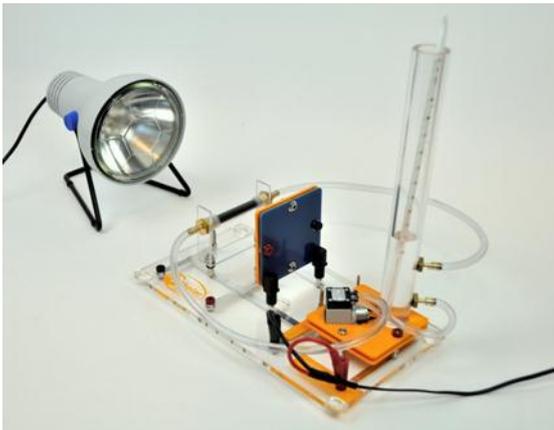
## 11. Parabolrinnenkollektor mit Pumpenumlauf

### Aufgabe

Stelle den Temperaturverlauf bei der Erwärmung des Solarkollektors mit Pumpenumlauf grafisch dar. Zeige, dass sich mit Hilfe der Konzentration des Lichts die Funktionsweise des Kollektors verbessern lässt.

### Aufbau

#### 11.1 Messung ohne Parabolspiegel



#### 11.2 Messung mit Parabolspiegel



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- Pumpenmodul
- Ausgleichsgefäß
- Absorbermodul für Linse
- Strahler
- Schläuche
- Flüssigkeitsthermometer
- PowerModul
- Parabolspiegel

### Durchführung

1. Stecke das Absorberröhrchen und das Pumpenmodul mit Ausgleichsgefäß, wie in der Abbildung 11.1 ersichtlich, auf die Grundeinheit und verbinde die Module mit den beiliegenden Schläuchen.

**Hinweis:** Achte beim Aufbau darauf, einen ununterbrochenen Kreislauf zwischen Pumpe, Ausgleichsgefäß und Absorber zu gewährleisten. Stecke nun zwischen die beiden Komponenten das Absorbermodul Linse, sodass es mit der blauen Seite in Richtung Pumpe gedreht ist.

2. Befülle das Ausgleichsgefäß nun mit 50ml Wasser und pumpe es durch den Anschluss des PowerModuls (9V) in den Wasserkreislauf.
3. Stelle das Flüssigkeitsthermometer in das Ausgleichsgefäß und achte darauf dass es sich zur Temperaturmessung immer auf gleicher Höhe befindet.
4. Lege eine Uhr zur Zeitmessung bereit und schalte den Strahler (Abstand 15cm) entfernt, an. Miss den Temperaturverlauf und trage die entsprechenden Werte in die Tabelle ein.



## 11. Parabolrinnenkollektor mit Pumpenumlauf

### Durchführung

- Leere den Kollektor, lass ihn einige Minuten abkühlen und befülle den Wasserkreislauf erneut mit der gleichen Menge an Wasser. Wiederhole die Messung nachdem du den Parabolspiegel in den Versuchsaufbau, wie in der Abbildung 11.2 dargestellt, integriert hast.

### Messwerte

Messung 1: Erwärmung ohne Spiegel

Zeit in Minuten	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Temperatur in C°	25	25,5	26,5	27,5	28	28,5	29	29,5	30	30,5	31

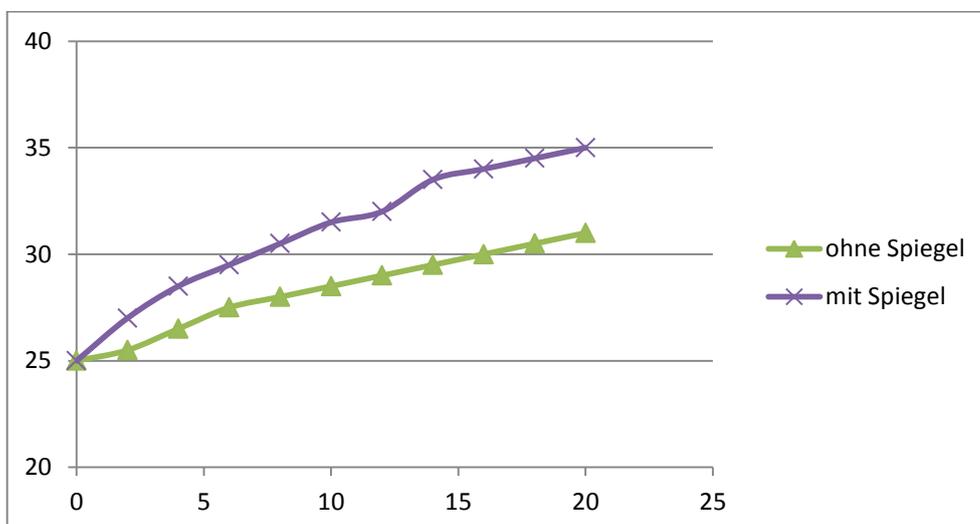
Messung 2: Erwärmung mit Spiegel

Zeit in Minuten	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Temperatur in C°	25	27	28,5	29,5	30,5	31,5	32	33,5	34	34,5	35

### Auswertung

- Übertrage deine Ergebnisse in das abgebildete Diagramm.
- Vergleiche die beiden Temperaturverläufe und beschreibe die Bedeutung der Ergebnisse für die Installation großer solarthermischer Anlagen.
- Schätze jeweils für jeden der beiden Fälle den Wirkungsgrad des Kollektors ab und ermittle damit die Effizienzsteigerung durch die Konzentration des Sonnenlichts. Vergleiche dazu die aufgewandte elektrische Leistung von Pumpe (1W) und Strahler (120W) mit der ermittelten thermischen Leistung des Systems. Gehe auch auf mögliche Störfaktoren im Versuchsaufbau ein

### Diagramm





## 11. Parabolrinnenkollektor mit Pumpenumlauf

## Auswertung

2.

Wie zu erwarten, erwärmt sich der Wasserkreislauf durch das Integrieren eines Spiegels in die Messanordnung deutlich stärker. Dieser Effekt der Temperaturspreizung ist besonders am Beginn der Messung deutlich zu beobachten. Im späteren Verlauf überlagern die Verluste im System, die aufgrund des kleinen Kollektors eine große Wirkung entfalten, den Effekt der Lichtfokussierung. Die wirksame Fläche konnte durch die Verwendung des Spiegels gesteigert werden, ohne die aufwendige Konstruktion des Absorbers zu modifizieren. Nicht nur die ökonomische Effektivität einer solarthermischen Anlage lässt sich durch die Verwendung von Spiegeln anstelle von großen Absorberflächen steigern. Auch die Maximaltemperatur im System kann durch einen solchen Aufbau vergrößert werden. Dies ist wichtig zur Anwendung für die solarthermische Stromerzeugung. Im Gegensatz zur thermischen Heizung muss dabei meist eine Turbine betrieben werden, die nur mit hohen Dampfdrücken bei entsprechend hohen Temperaturen ihr Potential entfaltet. Mit Hilfe der Fokussierung des Lichts kann auch bei schwachem Lichteinfall die notwendige Betriebstemperatur gewährleistet werden, um eine möglichst stabile Versorgungsleistung zu generieren.

3.

$$P_{\text{Pumpe}} = 1W$$

$$P_{\text{Strahler}} = 120W$$

$$P_{\text{therm}} = \frac{Q}{\Delta t}$$

$$Q_{\text{ohne}} = m_W \cdot c_W \cdot \Delta T_{\text{ohne}} = 50g \cdot 4182 \frac{J}{kgK} \cdot 6K = 1254,6J$$

$$Q_{\text{mit}} = m_W \cdot c_W \cdot \Delta T_{\text{mit}} = 50g \cdot 4182 \frac{J}{kgK} \cdot 10K = 2091J$$

$$P_{\text{therm,ohne}} = \frac{Q_{\text{ohne}}}{\Delta t} = \frac{1254,6J}{20min} = 1,0455W$$

$$P_{\text{therm,mit}} = \frac{Q_{\text{mit}}}{\Delta t} = \frac{2091J}{20min} = 1,7425W$$

$$\eta_{\text{ohne}} = \frac{P_{\text{therm,ohne}}}{P_{\text{Pumpe}} + P_{\text{Strahler}}} = 0,0086\%$$

$$\eta_{\text{mit}} = \frac{P_{\text{therm,mit}}}{P_{\text{Pumpe}} + P_{\text{Strahler}}} = 0,0144\%$$

$$\frac{\eta_{\text{mit}}}{\eta_{\text{ohne}}} = 1,6744$$



## 11. Parabolrinnenkollektor mit Pumpenumlauf

### Auswertung

Durch die Verwendung des Spiegels wird die Effizienz der Anlage um fast 70% gesteigert. Insgesamt ist der Wirkungsgrad des Aufbaus jedoch sehr gering. Zu beachten ist dabei, dass durch die geringe Größe der Kollektoroberfläche nur ein Bruchteil der einfallenden Strahlung überhaupt absorbiert werden kann. Ohne Unterstützung durch den Spiegel kann kaum die elektrische Leistung der Pumpe in das System zurückgeführt werden. Der Spiegel selbst kann bei der Verwendung von Kunstlicht nur einen Teil seiner Wirkung entfalten, da zur erfolgreichen Fokussierung paralleles Licht einfallen muss, welches im vorliegenden Versuchsaufbau nicht vorliegt.



## 12. Defokussierung

### Aufgabe

Stelle den Temperaturverlauf bei der Erwärmung des Solarkollektors mit Pumpenumlauf grafisch dar. Zeige, dass sich mit Hilfe der Fokussierung des Lichts die Effektivität des Spiegelkollektors steigern lässt.

### Aufbau

#### 12.1 Defokussierte Position des Parabolspiegels



#### 12.2 Fokussierte Position des Parabolspiegels



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- Pumpenmodul
- Ausgleichsgefäß
- Absorbermodul für Linse
- Strahler
- Schläuche
- Flüssigkeitsthermometer
- PowerModul
- Parabolspiegel

### Durchführung

1. Stecke das Absorberröhrchen und das Pumpenmodul mit Ausgleichsgefäß, wie in der Abbildung 12.1 ersichtlich, auf die Grundeinheit und verbinde die Module mit den beiliegenden Schläuchen.

**Hinweis:** Achte beim Aufbau darauf, einen ununterbrochenen Kreislauf zwischen Pumpe, Ausgleichsgefäß und Absorber vorzubereiten.

2. Stecke nun zwischen die beiden Komponenten das Absorbermodul für die Linse, sodass es mit der gelben Seite in Richtung Absorberröhrchen gedreht ist. Stecke außerdem den Parabolspiegel in Richtung Kollektor gerichtet auf das Absorbermodul für die Linse.
3. Befülle das Ausgleichsgefäß nun mit 50ml Wasser, sodass es knapp oberhalb des oberen Wasseranschlusses im Ausgleichsgefäß steht und pumpe es durch den Anschluss des PowerModuls (9V) in den Kreislauf. Stelle das Flüssigkeitsthermometer in das Ausgleichsgefäß.

**Hinweis:** Achte darauf, dass sich das Thermometer während der Messung immer auf gleicher Höhe befindet.



## 12. Defokussierung

### Durchführung

4. Lege eine Uhr zur Zeitmessung bereit und schalte den Strahler ein (Abstand zum Absorberröhrchen 15cm). Miss den Temperaturverlauf und trage die entsprechenden Werte in die Tabelle ein.
5. Leere den Kollektor, lass ihn einige Minuten abkühlen und befülle ihn erneut mit der gleichen Menge an Wasser. Wiederhole die Messung, nachdem du das Absorbermodul für die Linse mit der gelben Seite in Richtung Pumpe gedreht hast und den Spiegel damit wieder auf das Absorberröhrchen fokussierst (Abbildung 12.2).

### Messwerte

Messung 1: Erwärmung defokussiert:

Zeit in Minuten	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Temperatur in C°	25	27	28,5	29,5	30,5	31,5	32	33,5	34	34,5	35

Messung 2: Erwärmung fokussiert

Zeit in Minuten	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Temperatur in C°	23	25	27	28,5	30	31	32,5	33	34,5	35	36

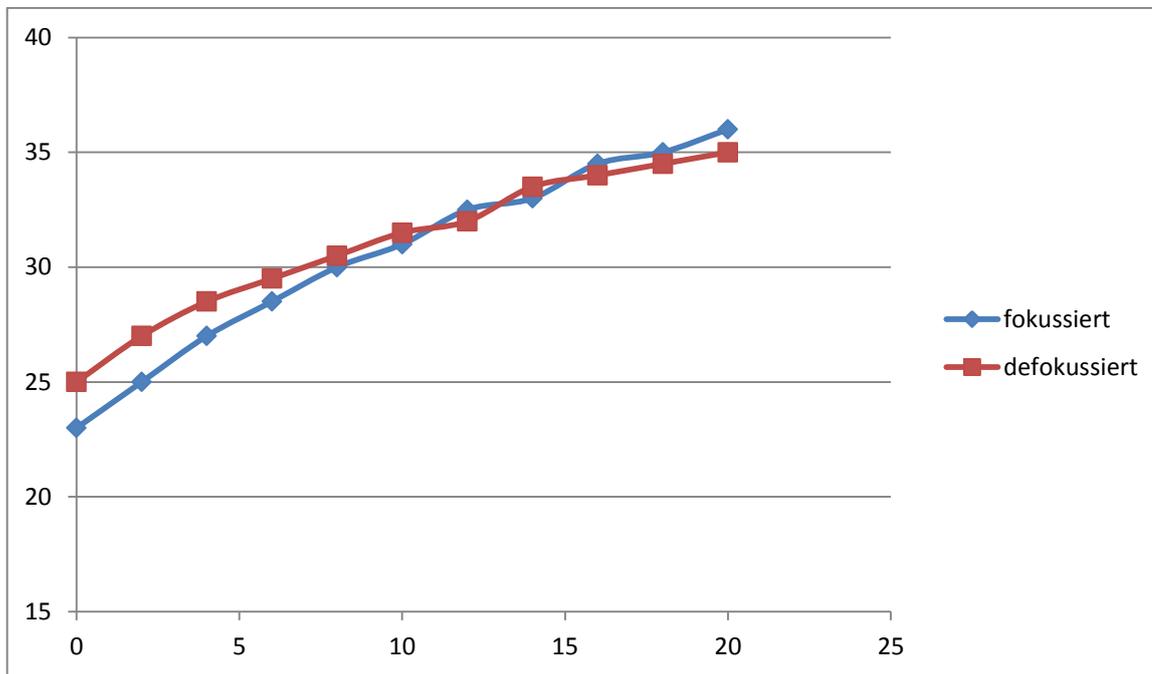
### Auswertung

1. Übertrage deine Ergebnisse in das abgebildete Diagramm.
2. Vergleiche die beiden Temperaturverläufe und beschreibe unter Verwendung konkreter Messergebnisse die Bedeutung des Ergebnisses für die Installation großer solarthermischer Anlagen.
3. Ergänze die Bezeichnungen des abgebildeten Strahlengangs und stelle eine allgemeine Gleichung zur Berechnung des Brennpunkts von sphärischen Hohlspiegeln auf. Gehe dabei vereinfacht von achsnahen Strahlen aus. Berechne auch die Brennweite des Hohlspiegels mit einem Radius von 12cm.



## 12. Defokussierung

## Diagramm

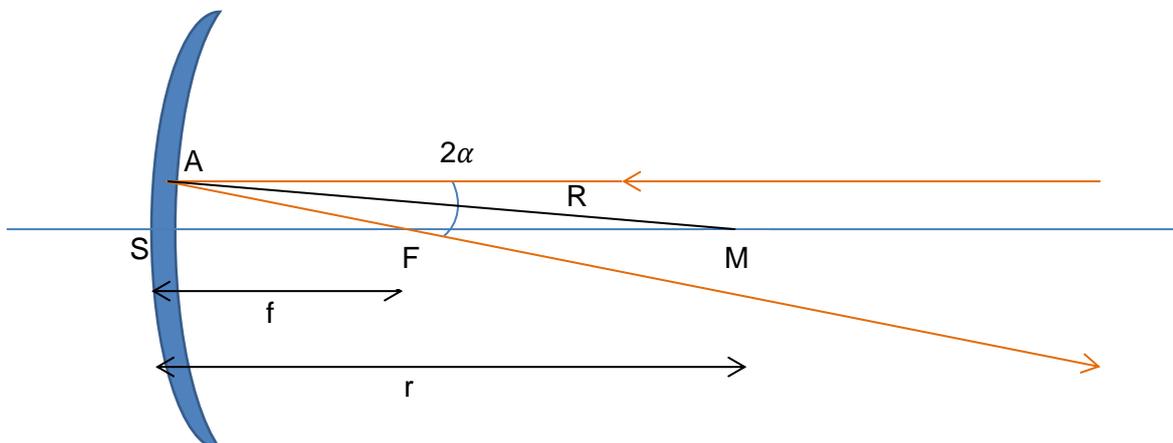


## Auswertung

2.

Die beiden Temperaturverläufe unterscheiden sich nur geringfügig voneinander. Dennoch ist klar ersichtlich, dass im defokussierten Fall nur eine Erwärmung um 10K im Messintervall erfolgte, während im fokussierten Fall eine Erwärmung um 13K erreicht wurde. Es konnten dementsprechend 30% mehr thermische Energie umgesetzt werden. Die Effektivität der Anlage lässt sich demzufolge durch eine genaue Justierung des Lichtfokus signifikant verbessern. In unserem Beispiel wurden der Spiegel nur ca. 1,5 cm verrückt. Um den Aufbau einer solarthermischen Anlage mit Spiegelkollektor zu berechnen, kann die Abbildungsgleichung verwendet werden.

3.





## 12. Defokussierung

## Auswertung

A: Reflexionspunkt

F: Brennpunkt (Fokus)

 $\alpha$ : Reflexionswinkel

M: Mittelpunkt

f: Brennweite

S: Scheitelpunkt

r: Radius

Der achsnahe und parallel zur optischen Achse eintreffende Lichtstrahl wird im Punkt A am Spiegel reflektiert. Aus geometrischen Überlegungen folgt:

$$f = r - \overline{MF}$$

$$\overline{MF} = \frac{r}{2 \cos \alpha}$$

$$f = r \left(1 - \frac{1}{2 \cos \alpha}\right) \quad \cos \alpha \approx 1, \text{ für achsnahe Strahlen, da } \alpha \text{ sehr klein}$$

$$f = \frac{1}{2} r = \frac{1}{2} \cdot 12 \text{ cm} = 6 \text{ cm}$$

Die Brennweite des Spiegelkollektors beträgt 6cm.

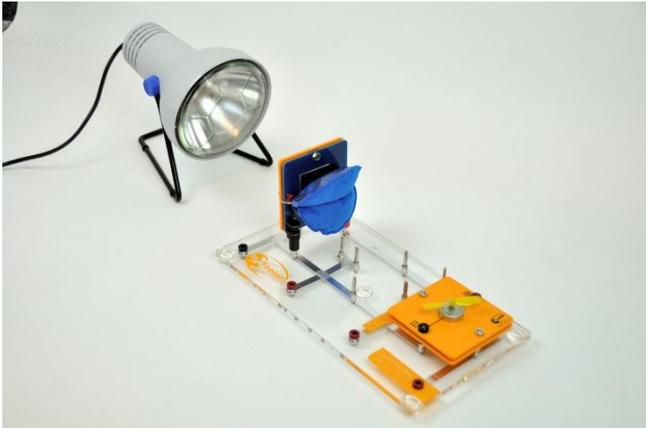


## 13. Funktionsweise eines Peltierelements

### Aufgabe

Zeige, dass durch die Temperaturdifferenz an einem Peltierelement eine Spannung generiert wird, welche zum Betrieb eines Kleinstverbrauchers nutzbar gemacht werden kann.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- Peltiermodul
- Motormodul
- Strahler
- gefrorenes Kühlpad
- Gummi

### Durchführung

1. Lege das Kühlpad für mindestens 2 Stunden in den Gefrierschrank, damit es für das Experiment einsatzbereit ist.
2. Stecke das Peltiermodul und das Motormodul wie abgebildet auf die Grundeinheit.
3. Lege eine Uhr zur Zeitmessung bereit. Stelle den Strahler im Abstand von 15cm zum Peltiermodul auf und schalte ihn an.
4. Heize das Peltierelement 5 Minuten lang auf und befestige das gefrorene Kühlpad mit Hilfe des beiliegenden Gummis an den Kühlrippen auf der gegenüberliegenden Seite des Peltiermoduls.
5. Beobachte den Motor und notiere deine Beobachtungen.
6. Entferne anschließend das Kühlpad und beobachte weiterhin das Verhalten des Motors.

### Beobachtungen

Hält man das Kühlpad an das Peltierelement, beginnt der Motor, sich zu drehen.

Entfernt man das Kühlpad, dann reicht der Temperaturunterschied zwischen kalter und warmer Seite nicht mehr aus, den Motor zu betreiben.

### Auswertung

1. Erkläre welche Bedingung erfüllt sein muss, damit sich der Motor zu drehen beginnt und begründe darauf aufbauend warum der Motor nach einigen Minuten wieder aufhört sich zu drehen.
2. Beschreibe Möglichkeiten, um diesen Prozess auch ohne Kühlpad zu optimieren. Nenne mögliche Anwendungsmöglichkeiten für diese Technologie.



## 13. Funktionsweise eines Peltierelements

### Auswertung

1.

Die Funktion des Thermoelektrischen Generators beruht auf dem Effekt der Thermodiffusion. In einem elektrischen Leiter mit Temperaturgradienten sammeln sich Elektronen auf der kalten Seite, sodass in diesem Bereich ein Ladungsträgerüberschuss entsteht. Die daraus resultierende Spannung lässt sich in Form elektrischer Energie nutzbar machen. Die generierte Spannung ist abhängig von der Temperaturdifferenz im Material, was sich auch im Experiment zeigt. Zum erfolgreichen Betrieb eines thermoelektrischen Generators gehört deshalb immer die Bereitstellung einer ausreichenden Wärmeableitung auf der kalten Seite des Elements. Wird diese nicht in ausreichendem Maße gewährleistet bricht die Spannung ein, sobald sich das Thermoelement durchgehend erhitzt hat.

2.

In der Praxis verwendet man Thermoelektrische Generatoren weitestgehend zum Betrieb von Kleinstanwendungen oder in der Raumfahrt. Es wird dabei versucht, eine passive Kühlung zu ermöglichen, da der Wirkungsgrad der Anwendung ohnehin vergleichsweise gering ausfällt. Im All gewährleisten die großen Temperaturdifferenzen zwischen Sonneneinstrahlung und Vakuum die erforderliche Temperaturdifferenz. Für irdische Anwendungen wird die Wärme mit sogenannten „Heatpipes“ und Kühlkörpern großer Oberfläche abgeleitet. Eine besonders spannende Anwendung, die sich aktuell noch in der Entwicklung befindet, ist die Nutzung thermoelektrischer Generatoren zur selbständigen Aufladung von Herzschrittmachern im menschlichen Körper.



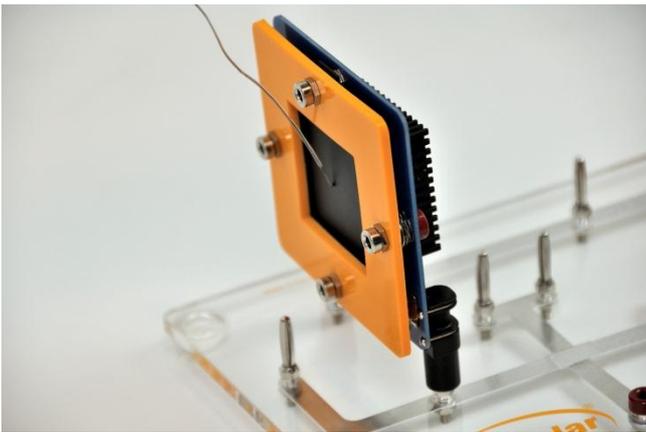
## 14. Untersuchung des Thermoelektrischen Generators

### Aufgabe

Untersuche die Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit eines thermoelektrischen Generators von der Temperaturdifferenz.

### Aufbau

#### 14.1 Temperaturmessung an der Vorderseite



#### 14.2 Temperaturmessung am Kühlkörper



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- Peltiermodul
- Digitalmessgerät mit Temperaturmessfühler
- Strahler

### Durchführung

1. Stecke das Peltiermodul und das Motormodul wie abgebildet auf die Grundeinheit
2. Verbinde das Digitalmessgerät mit dem Temperaturfühler. Halte den Temperaturmessfühler an die schwarze Oberfläche um die Oberflächentemperatur zu messen (Abb. 14.1). Schiebe diesen zwischen die Kühlrippen, um die Temperatur des Kühlkörpers zu messen (Abb. 14.2).
3. Stelle den Strahler in einem Abstand von 15cm zum Peltiermodul auf und beginne die Messung. Trage dabei den Verlauf der Temperaturen in die abgebildete Tabelle ein.



## 14. Untersuchung des Thermoelektrischen Generators

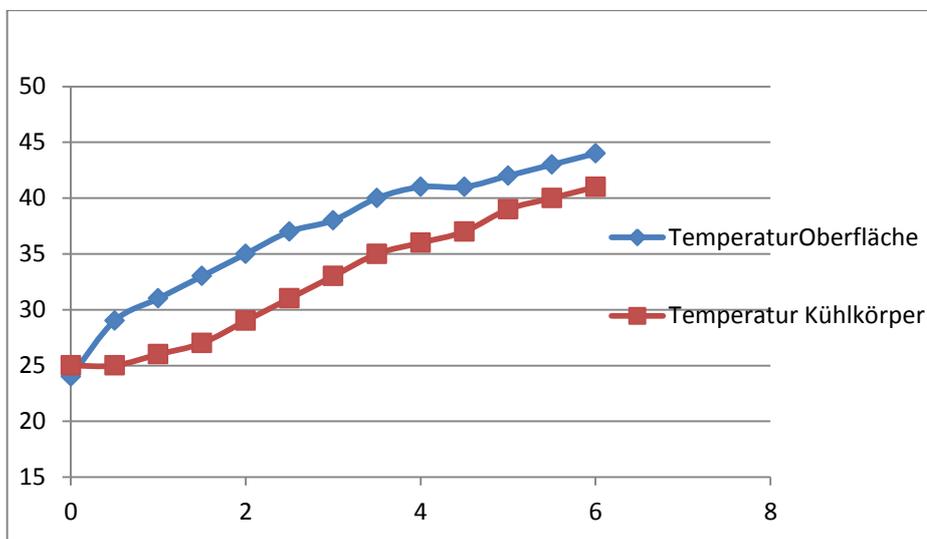
### Messwerte

Zeit in Minuten	Oberflächentemperatur in °C	Temperatur Kühlkörper in °C	Temperaturdifferenz in °C
0	24	25	1
0,5	29	25	4
1	31	26	5
1,5	33	27	5
2	35	29	6
2,5	37	31	6
3	38	33	5
3,5	40	35	5
4	41	36	5
4,5	41	37	4
5	42	39	3
5,5	43	40	3
6	44	41	3

### Auswertung

1. Berechne die Entwicklung der Temperaturdifferenz zwischen Vorder- und Rückseite im Verlauf des Experiments und trage die Werte in die Tabelle ein.
2. Trage deine Messwerte in die abgebildeten Diagramme ein.
3. Beschreibe deine Beobachtungen und erläutere welche Einflüsse Wärmeleitung und Wärmestrahlung auf das Experiment hat.

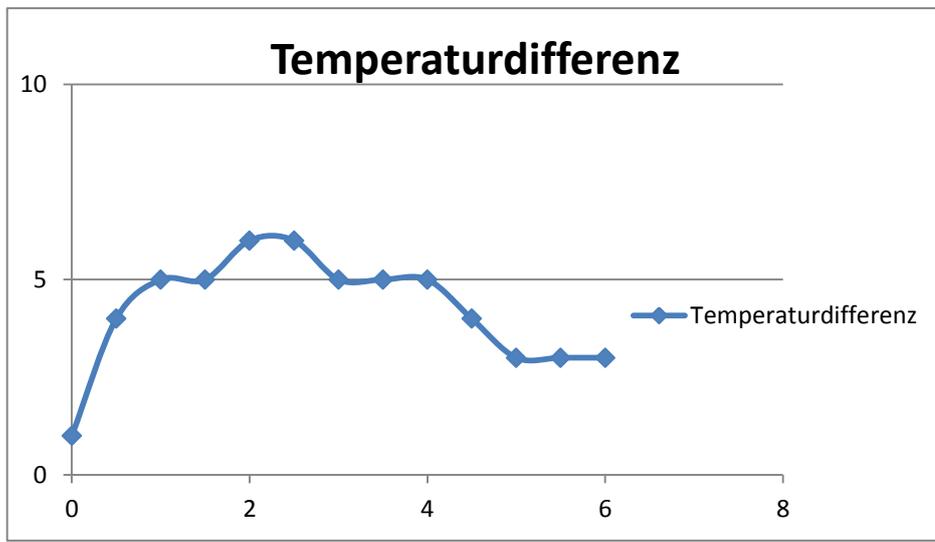
### Diagramm





## 14. Untersuchung des Thermoelektrischen Generators

### Diagramm



### Auswertung

3.

Die Oberfläche des thermoelektrischen Generators erwärmt sich anfangs sehr schnell. In diesem Zeitraum bleibt die Temperatur des Kühlkörpers noch konstant. Durch den Wärmeübergangswiderstand des Moduls tritt eine Erwärmung im Kühlkörper erst mit zeitlicher Verzögerung auf. Die Erwärmung der Oberfläche schwächt sich im weiteren Verlauf der Messung ab, da die thermischen Verluste durch Abstrahlung bei steigender Temperatur zunehmen. Durch Wärmeleitung erwärmt sich der Kühlkörper kontinuierlich. Dessen Wärmeabgabe an die Raumluft ist geringer als die Wärmeaufnahme über den thermoelektrischen Generator. Bei der Betrachtung der Temperaturdifferenz fällt deshalb auf, dass diese nach einem starken Anstieg zum Beginn des Versuchs, wieder abfällt. Dieses Durchheizen des thermoelektrischen Generators vermindert die Leistungsfähigkeit des Moduls und kann nur durch die Erweiterung der Kühlkonstruktion verhindert werden.



## 15. Quantitative Bestimmung der elektrischen Leistung

### Aufgabe

Zeige quantitativ, dass durch die Erwärmung von einer Seite eines Peltierelements eine Spannung generiert wird, welche zum Betrieb eines Kleinstverbrauchers nutzbar gemacht werden kann.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- Peltiermodul
- 2x Digitalmessgerät
- Messleitungen
- Strahler
- Motormodul

### Durchführung

1. Stecke das Peltiermodul wie abgebildet auf die Grundeinheit.
2. Verbinde außerdem die beiden Digitalmessgeräte mit der Grundeinheit und dem Peltiermodul wie abgebildet.

**Hinweis:** Das Digitalmessgerät am Peltierelement wird zur Temperaturmessung verwendet. Mit dem zweiten Messgerät werden dazu Spannung und Stromstärke bestimmt.

3. Stelle den Strahler in einem Abstand von 15cm zum Peltiermodul auf und beginne die Messung.
4. Beobachte den Verlauf von Temperatur, Spannung und Stromstärke und trage deine Messwerte in die Tabelle ein.

### Messwerte

Zeit in Minuten	Stromstärke in mA	Spannung in mV	Leistung in mW	Temperatur Peltierelement in °C
0	0,1	1,5	0,00	25
0,5	6	100	0,60	26
1	150	8,8	1,32	28
1,5	180	11	1,98	30
2	190	11	2,09	31
2,5	204	12	2,45	32



## 15. Quantitative Bestimmung der elektrischen Leistung

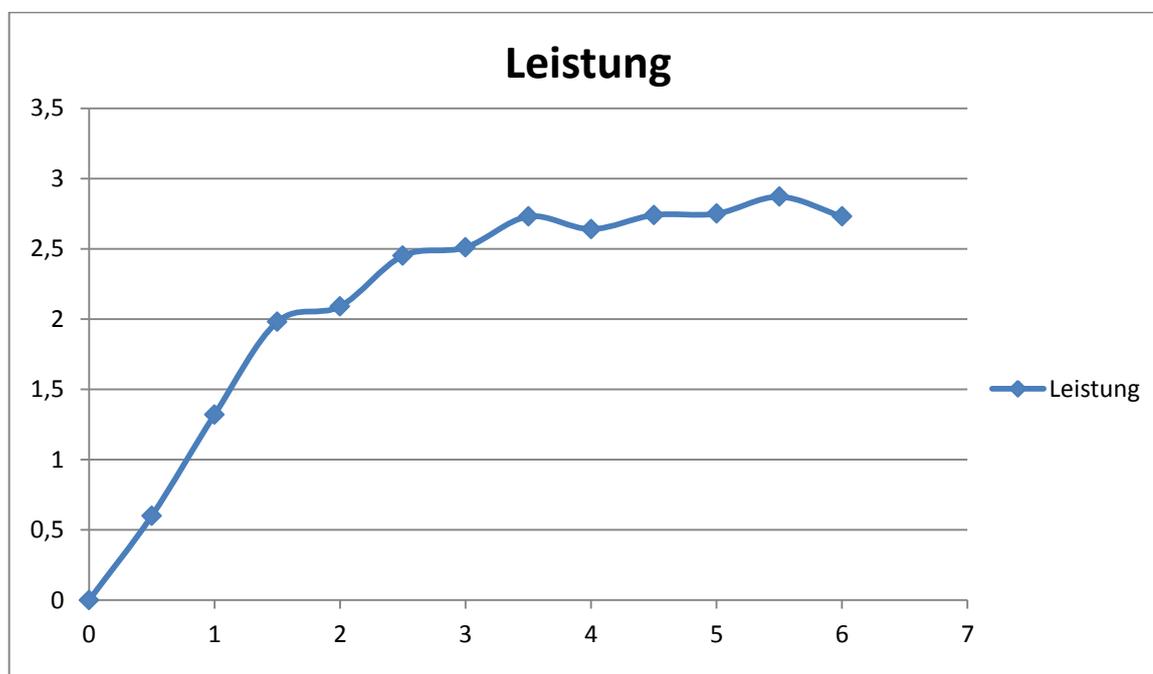
### Messwerte

3	209	12	2,51	33
3,5	215	12,7	2,73	34
4	215	12,3	2,64	35
4,5	219	12,5	2,74	35
5	220	12,5	2,75	36
5,5	224	12,8	2,87	37
6	218	12,5	2,73	37

### Auswertung

1. Berechne dabei die Leistung für jede Messwertreihe und notiere Sie ebenfalls in der Vorlage.
2. Trage deine Ergebnisse in das abgebildete Diagramm ein.
3. Schätze anhand der Messung die dauerhafte Leistung des thermoelektrischen Generators ab und berechne darauf aufbauend den Wirkungsgrad des Versuchsaufbaus.
4. Nenne eine Möglichkeit die Technologie des thermoelektrischen Generators trotz geringem Wirkungsgrad nutzbringend einzusetzen.

### Diagramm





## 15. Quantitative Bestimmung der elektrischen Leistung

### Auswertung

3. Die Leistung des thermoelektrischen Generators stellt sich nach kurzer Zeit auf ca. 2,75mW ein. In Anbetracht der elektrischen Leistung des Strahlers von 120W ergibt sich eine sehr geringe Effektivität von 0,000023%.
  
4. Auch unter Ausschluss thermischer Verluste durch die geringe effektive Einstrahlungsfläche und die Emission von Wärmestrahlung ergeben sich nur Wirkungsgrade im Promillebereich. Die technische Anwendung thermoelektrischer Generatoren ist demzufolge eher auf sehr spezielle Anwendungen im Bereich dezentraler Energieversorgung geeignet. Ein weiteres Beispiel als Einsatzvariante wäre der autarke Betrieb von Kleinstsensoren an warmen Maschinen- und Fahrzeugteilen. Der Vorteil dabei ist der geringe Installationsaufwand und der zuverlässige wartungsfreie Betrieb eines solchen Messsystems.

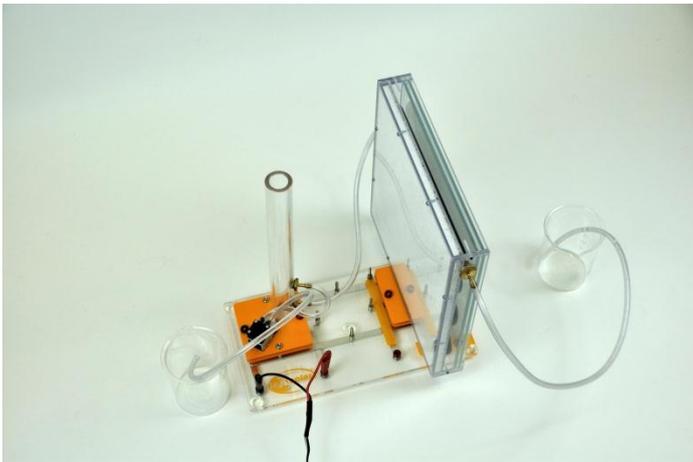


## 16. Bestimmung des Massenstroms durch den Kollektor

### Aufgabe

Bestimme den Massenstrom durch den Kollektor in Abhängigkeit von der Pumpenleistung.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- Wasserreservoir
- Pumpe mit PowerModul
- Kollektor
- Becherglas mit Volumenmaß
- Schläuche
- Stoppuhr

### Durchführung

1. Baue den Versuch wie oben abgebildet auf. Der Kollektor sollte für den Versuch vollständig mit Wasser gefüllt sein. Schließe dazu das auf 9V eingestellte PowerModul an die Pumpe an. Diese befördert nun das Wasser in den Kreislauf. Um restliche Lufteinschlüsse aus dem Kollektor zu bekommen, solltest du diesen vorsichtig schwenken.
2. Stelle anschließend an der Pumpe eine Spannung  $U_P$  von 5V ein.
3. Schalte die Pumpe ein und miss die Zeit, bis zu der 100g Wasser durch den Kollektor geströmt sind.
4. Wiederhole den Versuch für weitere Spannungen an der Pumpe und trage Deine Messwerte in die Tabelle ein.

### Messwerte

$U_P$ in V	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8
$t(100\text{ml})$ in s	81	66	54	49	47	44	43
$\dot{m}$ in g/s	1,23	1,52	1,85	2,04	2,13	2,27	2,33

$U_P$ in V	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12
$t(100\text{ml})$ in s	41	39	38	37	36	34	33	32
$\dot{m}$ in g/s	2,44	2,56	2,63	2,70	2,78	2,94	3,03	3,13

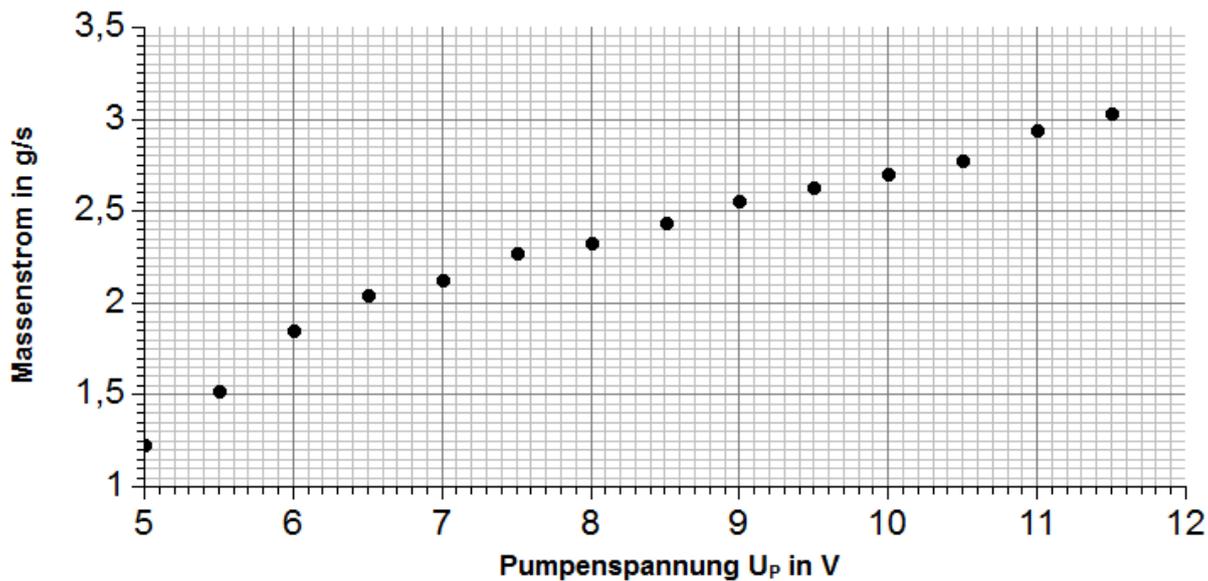


## 16. Bestimmung des Massenstroms durch den Kollektor

## Auswertung

1. Berechne aus den gegebenen Messwerten den Massenstrom  $\dot{m}$  durch den Kollektor und trage Deine Ergebnisse in die Tabelle ein.
2. Übertrage Deine Ergebnisse in das beigefügte Diagramm.

## Diagramm



## Auswertung

1. Der Massenstrom  $\dot{m}$  wird mithilfe folgender Formel berechnet:

$$\dot{m} = \frac{100g}{t(100ml)}$$

$$\dot{m} (U_P = 5V) = \frac{100g}{81s} = 1,23g/s$$

$$\dot{m} (U_P = 5,5V) = 100g/66s = 1,52g/s$$

$$\dot{m} (U_P = 6V) = 100g/54s = 1,85g/s$$

$$\dot{m} (U_P = 6,5V) = 100g/49s = 2,04g/s$$

$$\dot{m} (U_P = 7V) = 100g/47s = 2,13g/s$$

$$\dot{m} (U_P = 7,5V) = 100g/44s = 2,27g/s$$

$$\dot{m} (U_P = 8V) = 100g/43s = 2,33g/s$$

$$\dot{m} (U_P = 8,5V) = 100g/41s = 2,44g/s$$

$$\dot{m} (U_P = 9V) = 100g/39s = 2,56g/s$$

$$\dot{m} (U_P = 9,5V) = 100g/38s = 2,63g/s$$

$$\dot{m} (U_P = 10V) = 100g/37s = 2,70g/s$$

$$\dot{m} (U_P = 10,5V) = 100g/36s = 2,78g/s$$

$$\dot{m} (U_P = 11V) = 100g/34s = 2,94g/s$$

$$\dot{m} (U_P = 11,5V) = 100g/33s = 3,03g/s$$

$$\dot{m} (U_P = 12V) = 100g/32s = 3,13g/s$$

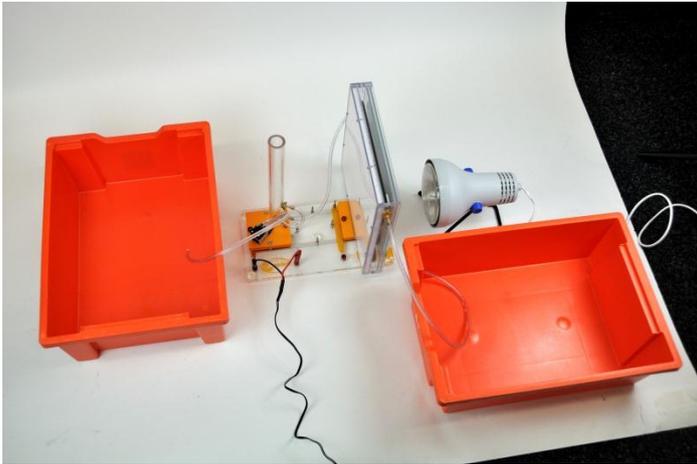


## 17. Bestimmung des Kollektorwirkungsgrads

### Aufgabe

Bestimme den Kollektorwirkungsgrad in Abhängigkeit von der Pumpenleistung.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 2x Wasserreservoir (Eimer o.ä.)
- Pumpe
- Kollektor
- Temperaturmessfühler
- Multimeter
- Schläuche

### Durchführung

1. Stecke den Solarkollektor und das Pumpenmodul mit Ausgleichsgefäß wie in der Abbildung auf die Grundeinheit und verbinde die Module mit den beiliegenden Schläuchen. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass der linke Pumpenanschluss mit dem unteren Anschluss des Ausgleichsgefäßes und der rechte Anschluss mit dem linken Wasserreservoir verbunden werden. Der untere Anschluss des Ausgleichsgefäßes wird anschließend mit dem oberen Anschluss des Kollektors und der obere Anschluss des Kollektors mit dem rechten Wasserreservoir verbunden.
2. Fülle nun Wasser in das Ausgleichsgefäß und schließe das PowerModul an die Pumpe an (9V). Diese befördert nun das Wasser in den Kreislauf, gegebenenfalls füllst du mit dem Messbecher noch einmal Wasser nach, bis sich ein stabiler Wasserkreislauf mit ca. 200ml Flüssigkeit eingestellt hat. Um restliche Luftpinschlüsse aus dem Kollektor zu bekommen, solltest du diesen vorsichtig schwenken.
3. Positioniere die Lampe in einem Abstand von 20cm vor dem Kollektor und stelle an der Pumpe eine Spannung  $U_P$  von 5V ein.
4. Miss die Temperatur am unteren Abschluss des Kollektors, in welchem das Wasser einströmt ( $T_{in}$ ).
5. Warte 5min und miss anschließend die Temperatur am oberen Anschluss des Kollektors, aus dem das Wasser heraus strömt ( $T_{out}$ ).
6. Wiederhole den Versuch für zwei weitere Spannungen an der Pumpe  $U_P$  und trage Deine Messwerte in die Tabelle ein.

### Messwerte

$U_P$ in V	5	9	12
$\dot{m}$ in g/s	1,23	2,56	3,13
$T_{in}$ in C°	22	22	22
$T_{out}$ in C°	27	25	24
$\Delta T$ in K	5	3	2



## 17. Bestimmung des Kollektorwirkungsgrads

## Auswertung

1. Entnimm aus dem ersten Teilversuch den zur jeweiligen Pumpenleistung gehörigen Massenstrom  $\dot{m}$  und trage den Wert in die Tabelle ein.
2. Berechne die Differenz  $\Delta T$  zwischen Eingangstemperatur  $T_{in}$  und Ausgangstemperatur  $T_{out}$  und trage den Wert ebenfalls in die Tabelle ein.
3. Bestimme die Kollektorfläche  $A_K$ .
4. Berechne den Kollektorwirkungsgrad  $\eta_K$  in Abhängigkeit von der Pumpenleistung  $U_P$ .

**Hinweis:** Der Wirkungsgrad des Kollektors kann mit Hilfe der folgenden Formel berechnet werden.

$$\eta_K = \frac{Q_{KN}}{E \cdot A_K} \quad \text{mit } Q_{KN} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T \quad \text{und } E = 800 \text{ W/m}^2$$

5. Welchen Einfluss hat die Durchflussgeschwindigkeit auf den Kollektorwirkungsgrad?
6. Welche Faktoren beeinflussen die Leistung und den Wirkungsgrad eines Solarkollektors?
7. Wie lassen sich die oben genannten Faktoren positiv beeinflussen, um den Wirkungsgrad des Kollektors zu verbessern?

## Auswertung

3.  $A_K = 0,24\text{m} \times 0,24\text{m} = 0,058\text{m}^2$

4.

$$U_P = 5\text{V:}$$

$$\eta_K = \frac{Q_{KN}}{E \cdot A_K} = \frac{\dot{m} \cdot c \cdot \Delta T}{E \cdot A_K} = \frac{\frac{1,23\text{kg}}{1000\text{s}} \cdot \frac{4182\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 5\text{K}}{\frac{800\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0,058\text{m}^2} = 0,55 \equiv 55\%$$

$$U_P = 9\text{V:}$$

$$\eta_K = \frac{Q_{KN}}{E \cdot A_K} = \frac{\dot{m} \cdot c \cdot \Delta T}{E \cdot A_K} = \frac{\frac{2,56\text{kg}}{1000\text{s}} \cdot \frac{4182\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 3\text{K}}{\frac{800\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0,058\text{m}^2} = 0,69 \equiv 69\%$$

$$U_P = 12\text{V:}$$

$$\eta_K = \frac{Q_{KN}}{E \cdot A_K} = \frac{\dot{m} \cdot c \cdot \Delta T}{E \cdot A_K} = \frac{\frac{3,13\text{kg}}{1000\text{s}} \cdot \frac{4182\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 2\text{K}}{\frac{800\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0,058\text{m}^2} = 0,56 \equiv 56\%$$



## 17. Bestimmung des Kollektorwirkungsgrads

### Auswertung

5.

Im Versuch wird der höchste Kollektor-Wirkungsgrad bei einer Pumpenspannung von 9V erzielt. Der höhere Wirkungsgrad bei 9V (High-Flow) gegenüber 5V (Low-Flow) ergibt sich aus dem größeren Massenstrom durch den Kollektor. Das Wasser wird zwar weniger stark erwärmt, es wird allerdings deutlich mehr Wasser durch das System gepumpt, wodurch sich in diesem Fall ein höherer Wirkungsgrad beim High-Flow-System ergibt. Ein weiterer Faktor sind die größeren Wärmeverluste bei höheren Temperaturen bei der Low-Flow-Variante. Der Prozess ist nicht unendlich steigerbar. Bei einer Pumpenspannung von 12V zeigt sich ein Absinken des Wirkungsgrads, da hier die geringe Temperaturerhöhung nicht mehr ausgeglichen werden kann durch den größeren Massenstrom.

6.

- Reflexion

---

- Konvektion (vor allem durch Luftbewegungen beim Flachkollektor)

---

- Wärmestrahlung

---

7.

- Reflexion: Frontscheiben-Materialien mit möglichst geringem Reflexionsgrad  $\rho$

---

- Konvektion: : Frontscheibe (verhindert Wärmeabstrahlung des Absorbers an die Umgebungsluft, ähnlich Treibhauseffekt), außerdem Vakuum zwischen Absorber und Frontscheibe (zum Bsp. bei Vakuumflach- und Vakuumröhrenkollektor genutzt)

---

- Wärmestrahlung: Wärmedämmung und selektive Absorber (erwärmt sich eine schwarze Oberfläche (Absorber), wird ein Teil der absorbierten Wärmeenergie wieder als Wärmestrahlung abgegeben. Um das zu verhindern, werden selektive Beschichtungen verwendet, die das Sonnenlicht gut absorbieren, aber einen geringeren Anteil an Wärmestrahlung aufweisen. Nachteil: komplizierte Beschichtungsverfahren notwendig)

---



## 18. Vergleich einer High-Flow und einer Low-Flow-Anlage

### Aufgabe

Vergleiche den Wirkungsgrad einer High-Flow-Anlage mit dem einer Low-Flow-Anlage.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- Pumpenmodul
- Solarkollektor
- Schläuche
- 2x Digitalmessgerät mit Messleitungen
- Temperaturmessfühler
- Flüssigkeitsthermometer
- Strahler
- PowerModul
- Wärmetauscher mit Wärmedämmung
- Becherglas

### Durchführung

1. Stecke den Solarkollektor und das Pumpenmodul mit Ausgleichsgefäß wie in der Abbildung ersichtlich, auf die Grundeinheit und verbinde die Module mit den beiliegenden Schläuchen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass der linke Pumpenanschluss mit dem unteren Anschluss des Kollektors und der rechte Anschluss mit dem Ausgleichsgefäß verbunden werden.
2. Füge zwischen dem oberem Anschluss des Kollektors und dem Ausgleichsgefäß den Wärmetauscher ein, um den Wasserkreislauf zu schließen. Verwende den Wärmetauscher mit der beigefügten Isolierung, um thermische Verluste zu minimieren.
3. Fülle nun Wasser in das Ausgleichsgefäß und den Wärmetauscher. Miss jeweils die Wassermenge im Kreislauf und im Wärmetauschergefäß ab.
4. Der Kollektor sollte für den Versuch vollständig mit Wasser gefüllt sein. Schließe dazu das auf 9V eingestellte PowerModul an die Pumpe an. Diese befördert nun das Wasser in den Kreislauf. Um restliche Lufteinschlüsse aus dem Kollektor zu bekommen, solltest du diesen vorsichtig schwenken.
5. Positioniere die Lampe in einem Abstand von 20cm vor dem Kollektor.
6. Stelle das Flüssigkeitsthermometer in das Ausgleichsgefäß und lege eine Uhr zur Zeitmessung bereit. Verbinde außerdem den beiliegenden Temperaturmessfühler mit einem der Messgeräte und stelle an diesem das Symbol °C ein.
8. Stelle an der Pumpe eine Spannung  $U_P$  von 5V ein (Low-Flow-System). Miss zusätzlich die Stromstärke am Pumpenmodul.
9. Im Versuch werden nun im Abstand von 5min folgende Temperaturen gemessen:
  - Temperatur  $T_{A,unten}$  am unteren Anschluss des Ausgleichsgefäß (Flüssigkeitsthermometer)
  - Temperatur  $T_{A,oben}$  am oberen Anschluss des Ausgleichsgefäß (Flüssigkeitsthermometer)
  - Temperatur  $T_S$  im Wärmetauschergefäß (Flüssigkeitsthermometer)
  - Temperatur  $T_{C,unten}$  am unteren Anschluss des Kollektors (Temp.-Messfühler + Digitalmultimeter)
  - Temperatur  $T_{C,oben}$  am oberen Anschluss des Kollektors (Temp.-Messfühler + Digitalmultimeter)



## 18. Vergleich einer High-Flow und einer Low-Flow-Anlage

## Durchführung

10. Wiederhole den Versuch für eine Pumpen-Spannung von 10V (High-Flow-System).  
 11. Nach Beendigung des Versuchs wird das Wasser aus dem Speicher und aus dem Kreis jeweils entnommen, umgerührt und die mittlere Temperatur bestimmt.

## Messwerte

Wassermenge Gesamtsystem: [150ml](#)

Wassermenge Speicher (Wärmetauschergefäß): [125ml](#)

1) Pumpenspannung  $U_P=5V$ , Stromstärke  $I_P=17mA$ 

Zeit t in min	$T_{A,oben}$ in °C	$T_{A,unten}$ in °C	$\Delta T_A$ in K	$T_S$ in °C	$T_{C,oben}$ in °C	$T_{C,unten}$ in °C	$\Delta T_C$ in K
0	24	24	0	24	24	24	0
5	28	27	1	27	29	27	2
10	33	32	1	30	34	31	3
15	36	35	1	34	37	34	3
20	40	39	1	36	39	37	2
25	41	40,5	0,5	39	42	40	2
30	43,5	43	0,5	41	45	42	3

Endtemperatur Gesamtsystem (nach Durchmischen): [42°C → ΔT=18K](#)

Endtemperatur Speicher (nach Durchmischen): [41°C → ΔT=17K](#)

2) Pumpenspannung  $U_P=10V$ , Stromstärke  $I_P=20mA$ 

Zeit t in min	$T_{A,oben}$ in °C	$T_{A,unten}$ in °C	$\Delta T_A$ in K	$T_S$ in °C	$T_{C,oben}$ in °C	$T_{C,unten}$ in °C	$\Delta T_C$ in K
0	25	25	0	25	25	25	0
5	30	30	0	27	30	29	1
10	35	35	0	31	35	33	2
15	38	38	0	34	37	36	1
20	41	41	0	38	40	39	1
25	43	43	0	40	42	41	1
30	46	46	0	43	45	43	2

Endtemperatur Gesamtsystem (nach Durchmischen): [45°C → ΔT=20K](#)

Endtemperatur Speicher (nach Durchmischen): [43°C → ΔT=18K](#)

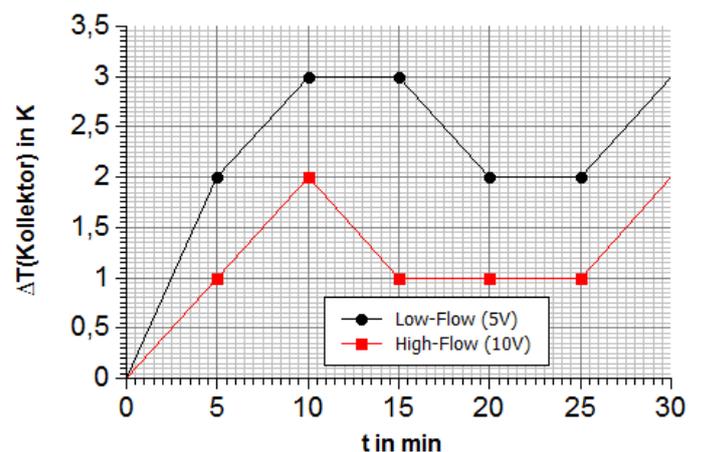
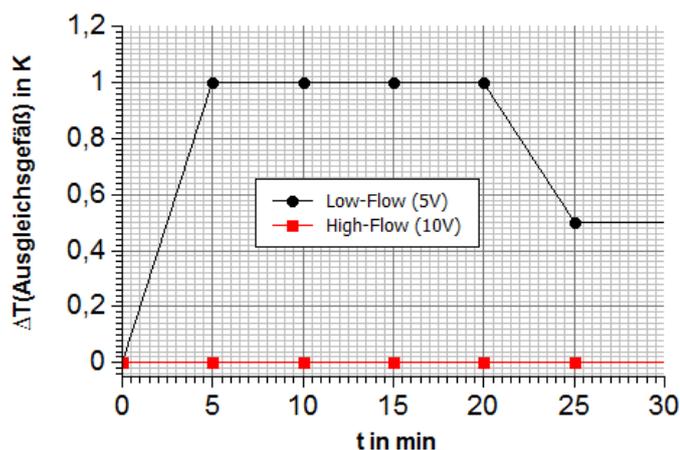


## 18. Vergleich einer High-Flow und einer Low-Flow-Anlage

### Auswertung

1. Berechne die Temperaturdifferenzen im Ausgleichsgefäß sowie Solarkollektor und trage die Werte in die Tabelle ein.
2. Übertrage deine Ergebnisse in die abgebildeten Diagramme.
3. Welche Aussage kannst du bezüglich einer Temperaturschichtung (im Ausgleichsgefäß und Kollektor) für den Low-Flow- und den High-Flow-Betrieb machen? Wie könnte dieser Aspekt in der Praxis genutzt werden?
4. Bestimme für beide Teilversuche jeweils die Wärmemenge, welche vom System in den Speicher (Wärmetauschergefäß) übergegangen ist.
5. Berechne die Energieänderung des Wassers im System ( $Q_{System}$ ) und die zugeführte thermische und elektrische Energie ( $Q_{Lampe}, W_{Pumpe}$ ). Berechne anschließend für beide Anlagensysteme jeweils den Wirkungsgrad  $\eta$ . Bestimme hierfür zusätzlich zu den ermittelten Größen die Kollektorfläche  $A_K$ .
6. Nenne Vor- und Nachteile beider Anlagensysteme. Wie könnten die Vorteile beider Systeme vereint werden?

### Diagramme



### Auswertung

3.

Beim Low-Flow-System können höhere Temperaturdifferenzen im Ausgleichsgefäß und im Kollektor erzielt werden. Bei geringer Sonneneinstrahlung kann dieser Effekt ausgenutzt werden, da in diesem Fall Wärme auf höherem Temperatur-Niveau produziert werden kann. Es muss daher nicht nachgeheizt werden und höhere Deckungsgrade können erreicht werden. Vor allem bei Anlagen, bei denen eine hohe Temperaturdifferenz erwünscht ist, bringen die Low-Flow-Anlagen Vorteile. Für Anwendungen, in denen geringere Temperaturerhöhungen nötig sind, werden zur Minimierung von Wärmeverlusten eher High-Flow-Anlagen angewandt. Beispiele hierfür sind Anlagen zur Warmwasservorwärmung in Mehrfamilienhäusern, zur Heizungsunterstützung oder zur Schwimmbaderwärmung.



## 18. Vergleich einer High-Flow und einer Low-Flow-Anlage

## Auswertung

4. Die Wärmemenge wird mit Hilfe folgender Formel berechnet:  $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$

$$U_p = 5V$$

$$Q_{\text{Speicher}} = m \cdot c \cdot \Delta T = 0,125 \text{kg} \cdot \frac{4,18 \text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 17 \text{K} = 8,88 \text{kJ}$$

$$U_p = 10V$$

$$Q_{\text{System}} = m \cdot c \cdot \Delta T = 0,125 \text{kg} \cdot \frac{4,18 \text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 18 \text{K} = 9,41 \text{kJ}$$

5. Folgende Formeln werden zur Berechnung des Wirkungsgrads benötigt:

$$Q_{\text{Lampe}} = E \cdot A_K \cdot \Delta t \quad \text{mit} \quad E = 800 \text{W/m}^2$$

$$Q_{\text{System}} = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$W_{\text{Pumpe}} = U \cdot I \cdot \Delta t$$

$$\eta = \frac{Q_{\text{System}}}{W_{\text{Pumpe}} + Q_{\text{Lampe}}}$$

$$U_p = 5V$$

$$Q_{\text{Lampe}} = E \cdot A_K \cdot \Delta t = \frac{800 \text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0,058 \text{m}^2 \cdot 30 \cdot 60 \text{s} = 83,5 \text{kJ}$$

$$Q_{\text{System}} = m \cdot c \cdot \Delta T = 0,15 \text{kg} \cdot \frac{4,18 \text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 18 \text{K} = 11,29 \text{kJ}$$

$$W_{\text{Pumpe}} = U \cdot I \cdot \Delta t = 5V \cdot 0,017 \text{A} \cdot 30 \cdot 60 \text{s} = 0,15 \text{kJ}$$

$$\eta_{\text{Low-Flow}} = \frac{Q_{\text{System}}}{W_{\text{Pumpe}} + Q_{\text{Lampe}}} = \frac{11,29 \text{kJ}}{83,5 \text{kJ} + 0,15 \text{kJ}} = 0,135 = \underline{13,5\%}$$



## 18. Vergleich einer High-Flow und einer Low-Flow-Anlage

## Auswertung

$$U_P = 10V$$

$$Q_{System} = m \cdot c \cdot \Delta T = 0,15kg \cdot \frac{4,18kJ}{kg \cdot K} \cdot 20K = 12,54kJ$$

$$W_{Pumpe} = U \cdot I \cdot \Delta t = 5V \cdot 0,020A \cdot 30 \cdot 60s = 0,18kJ$$

$$\eta_{High-Flow} = \frac{Q_{System}}{W_{Pumpe} + Q_{Lampe}} = \frac{12,54kJ}{83,5kJ + 0,18kJ} = 0,150 = \underline{15,0\%}$$

6.

Gegenüber "High-Flow"-Systemen gleicher Fläche können bei Low-Flow-Anlagen eine preisgünstigere Verrohrung, kleinere Wärmeübertrager und schwächere Pumpen verwendet werden. Wegen dieser Vorteile werden Großanlagen üblicherweise im "Low Flow" betrieben. Systeme mit sehr engen Rohrquerschnitten können nur als "Low-Flow"-Anlagen betrieben werden, da der Strömungswiderstand sonst zu sehr zunimmt. Enge Rohrquerschnitte sind erwünscht, damit der Kollektor selber eine geringe Wärmekapazität hat und sich schnell aufheizt.

Matched-Flow"-Systeme, in denen die Pumpenleistung in einem weiten Bereich geregelt wird, sind derzeit die Ausnahme. Sie müssen technisch wie eine "High-Flow"-Anlage teuer ausgerüstet werden, so dass ihr Vorteil gegenüber dieser nur gering ist.

leXsolar GmbH  
Strehleener Straße 12-14  
01069 Dresden / Germany

Telefon: +49 (0) 351 - 47 96 56 0  
Fax: +49 (0) 351 - 47 96 56 - 111  
E-Mail: [info@lexsolar.de](mailto:info@lexsolar.de)  
Web: [www.lexsolar.de](http://www.lexsolar.de)