

## A4 Verdampfungswärme – So kühlt man mit Wärme

Werden alle Telexperimente in der nachstehenden Reihenfolge durchgeführt, können sie zur experimentellen Ergänzung einer Lerneinheit zum Thema Verdampfungswärme bzw. Verdunstungskälte werden. Davon ausgehend ist dann eine Vertiefung in die allgemeine Wärmelehre bis hin zur Teilchenebene gut möglich.

### 1 Zentrale Fragestellung

Um seine Hände zu kühlen, kann man sie mit etwas Kaltem in Berührung bringen. Dann fließt Wärme von den Händen weg zu dem kalten Gegenstand hin. Es gibt aber auch noch andere Möglichkeiten, wie Wärme abgeführt werden kann. Dabei spielt die Verdunstung eine Rolle. Wir untersuchen das in zwei Telexperimenten:

- Warum friert man in nasser Kleidung?
- Wie kühlt ein nasses Wattepad?

### 2 Einordnung des Experiments in den Unterrichtszusammenhang

#### 2.1 Fachliche Grundlagen

Für eine theoretische Einordnung der Versuche in Energiebetrachtungen sind folgende Vorkenntnisse und Erfahrungen hilfreich:

- Kenntnis der Aggregatzustände und der Übergänge (fest, flüssig, gasförmig, schmelzen, verdampfen, kondensieren, erstarren)
- Wissen, dass für den Übergang der Aggregatzustände Energie benötigt wird.

Für eine Erklärung im Teilchenmodell sind folgende Vorkenntnisse nötig:

- Die Temperatur eines Stoffs ist ein Maß für die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen.
- Die Geschwindigkeit der Teilchen in einem Stoff ist bei gegebener Temperatur statistisch verteilt.

#### 2.2 Lehrplanrelevanz

Versuche zur Verdampfungswärme bzw. zur „Verdunstungskälte“ sind so einfach, dass das Phänomen der Abkühlung durch Verdunstung bereits in der Grundschule gezeigt werden kann. Ausgehend vom Phänomen können Experimente gemeinsam entwickelt werden, um das Phänomen messbar zu machen und genauer zu untersuchen. Dabei können Schülerinnen und Schüler Aspekte naturwissenschaftlichen Arbeitens kennen lernen. Erklärungen des Phänomens auf einer theoretischen Ebene sind dazu zunächst nicht zwingend notwendig. Die Anleitung für die Schülerinnen und Schüler orientiert sich an diesem Niveau (Altersstufe bis 14 Jahre).

Für eine stärkere theoretische Durchdringung ab einer Altersstufe von etwa 14 Jahre sind Energiebetrachtungen beim Übergang der Aggregatzustände erforderlich. Eine Deutung des Phänomens auf der Ebene der Teilchenmodelle kann zusätzlich zum Verständnis beitragen.

**Themen und Begriffe:** Aggregatzustände (flüssig, gasförmig), Bindungskräfte, Kühltisch, Teilchenmodell, Temperatur, Verdampfungswärme, Verdunstung/Kondensation, „Verdunstungskälte“, Wärmepumpe, Wärmeregulierung in der Natur

## 2.3 Kompetenzen

Die Schülerinnen und Schüler lernen vom Phänomen der „Verdunstungskälte“ ausgehend ein typisches naturwissenschaftliches Vorgehen kennen. Dieses Phänomen wird im Telexperiment 1 zunächst genauer erkundet. Einflussfaktoren werden herausgearbeitet. Im Telexperiment 2 werden die Beobachtungen durch gezielt präparierte quantitative Messungen präzisiert.

Schwerpunktmäßig anhand Telexperiment 1:

- Das Phänomen der „Verdunstungskälte“ beschreiben können.
- Den Einfluss der Luftzufuhr als Erhöhung der Verdunstungsrate interpretieren können.
- Unterschiedliche Flüssigkeiten in ihrer Verdunstungsneigung unterscheiden können.
- Ggf. den größeren Kühlungseffekt bei Alkohol auf eine stärkere Verdunstung zurückführen können.

Schwerpunktmäßig anhand Telexperiment 2:

Die im ersten Telexperiment qualitativ gefundenen Abhängigkeiten in einem Messexperiment quantitativ verifizieren können.

## 2.4 Das Experiment im Erklärungszusammenhang

Das Phänomen der „Verdunstungskälte“ ist eine Folge des Energiebedarfs beim Übergang eines Stoffes vom flüssigen in den gasförmigen Zustand. Auf der Teilchenebene lassen sich die verschiedenen Aggregatzustände so beschreiben, dass zwischen den Teilchen unterschiedliche Bindungskräfte wirksam sind. Um diese Bindungen zu lösen, ist Energie notwendig.

Im Alltagsverständnis ist der Übergang von einem in den anderen Aggregatzustand eine Begleiterscheinung der Temperaturerhöhung und nicht eine Folge von Energiezufuhr. Der Nachweis, dass beim Schmelzen von Eis auf einer Heizquelle die Temperatur eine Weile unverändert bleibt, kann diesen Aspekt deutlich machen. Es wird Energie (Schmelzwärme) zugeführt, die sich nicht in Temperaturerhöhung zeigt, sondern darin, dass festes Wasser („Eis“) von 0 °C in flüssiges Wasser von 0 °C verwandelt wird. Die notwendige Energie beim Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Zustand (Verdampfungswärme) lässt sich im Vergleich dazu experimentell weniger leicht nachweisen. Siehe auch Schmelz- bzw. Kristallisationswärme in Experiment **A2 Wir speichern Wärme – Vom Wasserspeicher zur Salzschmelze**.

Wenn Flüssigkeit verdunstet, bedeutet dies, dass Flüssigkeit in den gasförmigen Zustand übergeht. Auch dafür ist Energie notwendig. Wird diese Energie nicht von außen zugeführt, wird sie der Umgebung entzogen, die sich dadurch abkühlt.

Kälte ist kein physikalischer Begriff. Deshalb ist der Begriff „Verdunstungskälte“ nicht ganz glücklich. Andererseits hat sich der Begriff „Verdunstungskälte“ im Alltagssprachgebrauch eingebürgert. Um die Unterscheidung von einem physikalischen Begriff abzugrenzen, werden in diesem Text Anführungszeichen verwendet. Der korrekte Fachbegriff für dieses Phänomen ist die Verdampfungswärme. Mit diesem Hinweis wird auch der paradox klingende Titel des Experiments „So kühlt man mit Wärme“ verständlich!

Die Absenkung der Temperatur bei Verdunstung lässt sich auch auf andere Weise deuten, nämlich als Absenkung der mittleren Geschwindigkeit der Teilchen. Die nachfolgende Tabelle stellt makroskopische Beobachtungen den Deutungen auf der Teilchenebene gegenüber.

makroskopisch	Im Teilchenmodell
In einer Flüssigkeit herrscht eine bestimmte Temperatur vor.	Die Temperatur ist ein Maß für die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen. (Genauer: Die Temperatur ist proportional zum Mittelwert der Geschwindigkeitsquadrate.)
Ein Teil der Flüssigkeit verdunstet.	Einzelne Teilchen können deutlich höhere Geschwindigkeiten besitzen als andere. Die schnellsten Teilchen besitzen genügend Energie, um den Flüssigkeitsverband zu verlassen.
Die Flüssigkeit kühlt dabei ab.	Wenn die schnellsten Teilchen den Flüssigkeitsverband verlassen, bleiben die langsameren zurück und senken damit die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen nach unten ab.

Die Verdunstung von Wasser hängt auch von der Luftfeuchtigkeit ab. Bei hoher Luftfeuchtigkeit ist die Verdunstung geringer. Die Verdunstung kann gesteigert werden, wenn die Wasseroberfläche angeblasen wird. Es wird dadurch die mit Wassermolekülen bereits angereicherte Luft durch trockenere Luft ausgetauscht, die entsprechend mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann.

Wie viel Energie bei der Verdunstung benötigt wird, hängt zusätzlich von der Flüssigkeit ab. Alkohol verdunstet leichter als Wasser. Dadurch ist der Kühlungseffekt bei alkoholgetränkten Tüchern (z. B. „Erfrischungstücher“) noch größer als bei wassergetränkten Tüchern. Die stärkere Verdunstungsneigung von Alkohol hängt mit dem geringeren Siedepunkt von Alkohol zusammen. Dies ist auf der Teilchenebene gleichbedeutend mit geringeren Bindungskräften zwischen den Molekülen in der Flüssigkeit.

#### 2.4.1 Telexperiment 1: Warum friert man in nasser Kleidung?

Der Versuch knüpft an eine Alltagserfahrung an, dass man nämlich in nasser Kleidung (z. B. in einem nassen Badeanzug) deutlich stärker friert als in trockener. Dieses Phänomen wird dadurch bewusst erfahrbar gemacht, dass man die Hand mit Wasser anfeuchtet. Im nächsten Schritt wird zusätzlich mit einem Stück Pappe o. Ä. Luft über die nasse Haut gefächelt.

#### Transfer

Das Phänomen der „Verdunstungskälte“ ist in vielen Alltagsanwendungen wieder zu finden.

- Der menschliche Körper nutzt den Kühlungseffekt durch Verdunsten beim Schwitzen.
- Hunde verdunsten Wasser durch Hecheln.
- Kühlgefäße aus Ton arbeiten nach demselben Prinzip. Vor der Benutzung werden die Kühler mit Wasser angefeuchtet. In afrikanischen Ländern nutzt man wassergetränkte Tonkrüge, um darin Lebensmittel zu kühlen und länger lagern zu können.
- Feuchte Tücher, die im Raum aufgehängt werden, können im Hochsommer für Kühlung sorgen.
- Lehmhäuser in Wüstengebieten sind natürliche Klimaanlage ohne Bedarf an elektrischer Energie: Nachts kondensiert die Feuchtigkeit an den Wänden und gibt dabei Wärme an das Haus ab. Tagsüber verdunstet die Feuchtigkeit wieder und Wärme wird den Wänden entzogen.

Die Ausnutzung des Kühleffekts bei alkoholhaltigen Flüssigkeiten findet man z. B. bei Erfrischungstüchern, medizinischen Salben und Sprays oder Deodorant.

### 2.4.2 Telexperiment 2: Wie kühlt ein nasses Wattepad?

Dieser Versuch macht das Phänomen der „Verdunstungskälte“ objektivierbar und für Messungen zugänglich. Nun kann systematisch untersucht werden, wie groß der Abkühlungseffekt unter bestimmten Bedingungen ist. Der Einfluss der Luftzufuhr und der Flüssigkeit kann durch Messungen präzisiert werden. In der einfachsten Variante wird das Experiment nur mit Wasser durchgeführt. Als Ergänzung können auch alkoholhaltige Flüssigkeiten im Experiment untersucht werden. Die nachfolgenden Grafiken zeigen die Ergebnisse einer digitalen Messung für ein wassergetränktes und ein spiritusgetränktes Wattepad sowie für zwei wassergetränkte Wattepads, von denen eines mit einem Kaltluftföhn angeblasen wurde. Die Messungen wurden jeweils über einen Zeitraum von 10 Minuten durchgeführt.

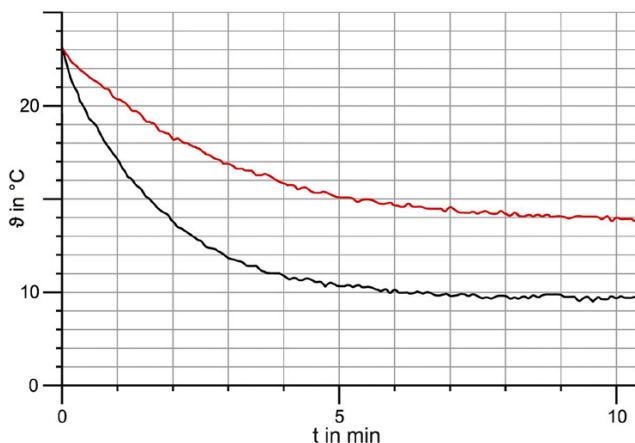


Abb. 1: Die Kurven zeigen die Abkühlung zweier Wattepads über einen Zeitraum von 10 Minuten; rot: wassergetränktes Pad, schwarz: spiritusgetränktes Pad.

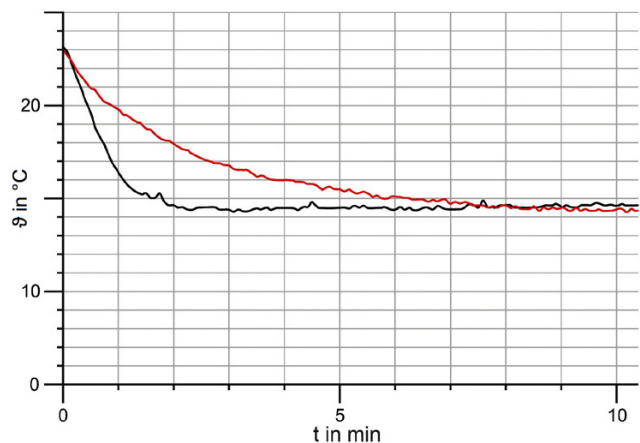


Abb. 2: Die Kurven zeigen die Abkühlung zweier wassergetränkter Wattepads über einen Zeitraum von 10 Minuten; rot: ungestört, schwarz: bei Anblasen mit einem Kaltluftföhn.

Die Messungen müssen nicht, wie hier abgebildet, digital durchgeführt werden, sondern können auch mit einer Armband- oder Stoppuhr von Hand gemacht werden. Die Diagramme dienen zur Abschätzung der Effekte.

- Die Temperatur sinkt etwa über einen Zeitraum von 10 Minuten. Nach 10 Minuten ist kaum noch eine Änderung zu beobachten.
- Der Temperaturunterschied beträgt in den Versuchen bei einem wassergetränkten Wattepad etwa 9 °C.
- Mit Spiritus ist der Temperaturunterschied mit etwa 14 °C deutlich größer. Er stellt sich bereits sehr früh ein.
- Durch Anblasen mit dem Föhn lässt sich die Temperatur nicht weiter nach unten drücken. Die tiefste Temperatur wird jedoch deutlich früher erreicht (hier bereits nach 2, statt nach 9 Minuten).
- Durch das Blasen wird auch der Temperatúrausgleich mit der Umgebung verstärkt. Deshalb wird nach 10 Minuten beim angeblasenen Wattepad eine höhere Temperatur gemessen als beim unbeeinflussten Wattepad.

### 2.4.3 Transfer

**Technikbezug:** Die Kühlung wird auch beim Kompressorkühlschrank letztlich durch das Verdampfen des Kühlmittels im Innenraum des Kühlgerätes hervorgerufen. Durch eine Pumpe wird dafür gesorgt, dass das Kühlmittel außerhalb des Kühlraums wieder verdichtet wird. Dabei wird die Energie, die beim Verdampfen dem Kühlraum entzogen wurde, beim Kondensieren wieder an die Umgebung abgegeben. Dasselbe Prinzip findet in umgekehrter Richtung bei der Wärmepumpe Anwendung.

## 2.5 Durchführungsvarianten

**Weiterforschen:** Die Abkühlung durch Luftbewegung kann auf verschiedene Weise realisiert werden (Anblasen mit dem Föhn, Verwendung eines Fächers, Anblasen mit dem Mund, Bewegen des Thermometers). Die Schülerinnen und Schüler können auch eigene Ideen zur Verstärkung des Abkühlungseffektes überlegen und entsprechend erproben.

## 3 Ergänzende Informationen zum Experiment

**Wertebezug:** Der nigerianische Lehrer Mohammed Bah Abba wurde für die Erfindung eines „Kühlschranks“ nach dem Prinzip der „Verdunstungskälte“ mit mehreren Preisen ausgezeichnet. Damit können tägliche Wege zu den Märkten reduziert werden. Hierzu kann sich beispielsweise in Telexperiment 2 eine Impulsfrage zur Wertebildung vor dem Hintergrund des „Energiesparens“ anschließen.

Zur Vorbereitung bzw. zur Vertiefung dieses Experiments finden Sie ergänzende Medien auf dem Medienportal der Siemens Stiftung: <https://medienportal.siemens-stiftung.org>

## 4 Hinweise zur Durchführung der Telexperimente

### 4.1 Räumlichkeiten

Das Experiment kann unter Anleitung und Beaufsichtigung der Lehrkraft von den Schülerinnen und Schülern in jedem Klassenraum durchgeführt werden.

### 4.2 Zeitbedarf

	Vorbereitung und Durchführung	Auswertung, Fragen
Telexperiment 1	10 bis 15 min	
Telexperiment 2	35 min*	15 min

\*Um den Zeitbedarf zu reduzieren, können die drei Versuchsvarianten auch arbeitsteilig durchgeführt werden.

### 4.3 Sicherheitsaspekte

Die Versuche dürfen nur bei Anwesenheit und unter Aufsicht der Lehrkraft durchgeführt werden. Die Schülerinnen und Schüler sind darauf hinzuweisen, dass die bereitgestellten Materialien nur entsprechend den jeweiligen Anweisungen eingesetzt werden dürfen.

Bei diesem Versuch bestehen keine besonderen Gefahren.

Bei Telexperiment 1 muss darauf geachtet werden, dass kein trinkbarer Alkohol verwendet wird und die Schülerinnen und Schüler auf die Ungenießbarkeit hingewiesen worden sind.

#### 4.4 Benötigte Materialien

Für **eine** Schülergruppe werden folgende Materialien benötigt:

Material	Anzahl
Digitalthermometer	1
eine kleine Flasche nicht trinkbarer Alkohol, z. B. Brennspritus oder Propanol	1
ggf. Erfrischungstücher (statt Alkohol)	nach Bedarf
Pappe, Schulhefte oder ähnliches als Fächer	1
Stoppuhren oder Uhren mit Sekundenanzeige	1
Tücher	nach Bedarf
Wasser	nach Bedarf
Wattepad, Packung	1



Abb. 3: Materialien für eine Schülergruppe, beispielhafte Abbildung

#### 4.5 Aufräumen, Entsorgen, Recyceln

Fast alle verwendeten Geräte und Materialien sind wiederverwendbar. Daher sollten sie nach Beendigung des jeweiligen Experiments ordentlich aufgeräumt werden. So stellen Sie sicher, dass Sie bzw. Ihre Kolleginnen und Kollegen beim nächsten Einsatz alles schnell wiederfinden.

Geräte, die beim Experimentieren verschmutzt wurden, wie z. B. Becher, Schalen, Löffel, Reagenzgläser, sollten vor dem Zurücklegen erst gereinigt werden. Sinnvollerweise lässt man dies die Schülerinnen und Schüler gleich nach Beendigung des Experiments erledigen.

Stellen Sie zudem sicher, dass die Geräte wieder für den nächsten Einsatz betriebsbereit sind.

Beispielsweise sind benutzte Akkus gleich aufzuladen (Auch bei längerer Nichtbenutzung ist das Aufladen der Akkus sinnvoll.).

Materialien, die nicht wiederverwendbar sind, wie z. B. gebrauchte pH-Messstäbchen oder Filterpapier, sollten fachgerecht entsorgt werden.

Die Entsorgung der in diesem Experiment anfallenden Abfälle kann über den normalen Hausmüll bzw. den Ausguss erfolgen.