

A2 Wir speichern Wärme – Vom Wasserspeicher zur Salzschnelze

Werden alle Teilerperimente in der vorgeschlagenen Abfolge durchgeführt, bilden sie eine Grundlage für eine Lerneinheit zum Thema Wärme, Wärmespeicherung, Temperatur, Phasenumwandlung (Aggregatzustände), Schmelzwärme und Latentwärme. Hinweise und Anregungen zur Erklärung und Vertiefung finden Sie in der vorliegenden Anleitung.

1 Zentrale Fragestellung

Bei vielen technischen Prozessen und insbesondere im Zusammenhang mit regenerativen Energiequellen fällt Wärme an, die oft ungenutzt an die Umwelt abgegeben wird. Eine wichtige Zukunftsfrage ist daher, wie diese Wärme gespeichert und genutzt werden kann. Diese Zukunftsfrage bietet bei dem Experiment einen möglichen Ausgangspunkt für einen Wertebezug. Eine entsprechende Impulsfrage ist in der Anleitung für Schülerinnen und Schüler bei Teilerperiment 1 zu finden.

Mit den vorgeschlagenen Experimenten wird gezeigt, dass und wie Wärme auch über längere Zeiträume gespeichert werden kann, im einfachsten Fall mittels Wasser, effektiver dann mit Salzschnelzen, die beim Erstarren (Kristallisieren) große Mengen Wärme abgeben können. Untersucht wird dazu ein handelsübliches Wärmekissen, das mit einem Natriumsalz der Essigsäure gefüllt ist.

Die Schülerinnen und Schüler erfahren bei der Auseinandersetzung mit diesen Versuchen, dass Wärme, die im Moment der Entstehung nicht genutzt werden kann, nicht unbedingt durch Temperaturengleich mit der Umgebung verloren gehen muss, sondern auch noch später genutzt werden kann. Sie lernen zu verstehen, nach welchen Prinzipien Temperatur-Wärmespeicher (z. B. Wasserboiler, saisonaler Wärmespeicher) oder (chemische) Latentwärmespeicher, die mit geschmolzenen Salzen arbeiten, funktionieren. Methodisch lernen sie, systematisch Einzel- und vergleichende Messungen auszuführen und zu interpretieren.

2 Einordnung des Experiments in den Unterrichtszusammenhang

2.1 Fachliche Grundlagen

Während die Übergänge zwischen den Zustandsformen fest – flüssig – gasförmig den Schülerinnen und Schülern schon früh aus dem Alltag bekannt sind, besonders am Beispiel des Wassers, ist ihnen die Tatsache, dass jeder Übergang mit Energieumsätzen verbunden ist, nicht immer bewusst. Die Experimente eignen sich, auf diesem alltäglichen Vorwissen aufzubauen und ein tieferes Verständnis dafür zu entwickeln, dass Schmelz- (und Verdampfungs-)Wärme auch zur Speicherung von Energie genutzt werden kann.

Eine Vertiefung stellt die Betrachtung auf der Teilchenebene dar, auf der Wärme als Bewegung interpretiert wird bzw. der Ordnungsgrad eine Rolle spielt für den Energiegehalt eines Stoffes.

2.2 Lehrplanrelevanz

Aggregatzustände und die Übergänge sind Gegenstand des Unterrichts in der Altersstufe ab 13 Jahre. Eine differenzierte Betrachtung der Energieumsätze dabei beginnt bereits früh, wird aber erst später fachlich vertieft.

Auch wenn die Thematik sowohl im Physik- wie im Chemieunterricht präsent ist, stellt sie einen grundsätzlich über die Fächergrenzen hinausreichenden Inhalt dar. Konkret können die Experimente in beiden Fächern eingesetzt werden, ebenso aber in Unterrichtsprojekten, die sich übergreifend mit der technischen Seite der Wärmespeicherung beschäftigen.

Im Kern geht es um die mögliche Nutzung von Wärme durch Speicherung mittels geeigneter Stoffe. In fachlicher Hinsicht steht das Konzept der Aggregatzustände mit ihren Übergängen und den damit verknüpften Energieumsätzen im Zentrum der Betrachtung.

Themen und Begriffe: Aggregatzustandsformen (fest, flüssig, gasförmig), Energieumsatz, Entropieeffekt, Gitterenergie, Isolation bzw. Isolierung, Kristallisation, Kristallisationswärme, Kristallisieren, Latentwärmespeicher, Natriumacetat, Ordnungsgrad, Phasenumwandlungen, Salzschnmelze, Schmelzwärme, Teilchenmodell der Wärme, Temperatur, Temperaturverlauf, Unterkühlung, Verdampfungswärme, Wärme, Wärmedämmung, Wärmekapazität, Wärmespeicher

2.3 Kompetenzen

Die Schülerinnen und Schüler ...

- beschreiben den Übergang zwischen dem flüssigen und festen Aggregatzustand als Ursache für Wärmefreisetzung.
- nennen eine Möglichkeit, anfallende Wärme zu speichern und später nutzen zu können.
- erläutern, dass alle Übergänge zwischen Aggregatzuständen mit Energieumsätzen verbunden sind.

2.4 Das Experiment im Erklärungszusammenhang

Vorgeschlagen werden hier zwei mal zwei Experimente:

- Die beiden ersten thematisieren die Möglichkeit, mittels Wasser Wärme zu speichern.
- Die beiden folgenden benutzen ein handelsübliches Wärmekissen bzw. dessen Inhalt (ein Natriumsalz der Essigsäure), um den Energieumsatz bei der Aggregatzustandsänderung (hier Kristallisieren) vorzuführen.

2.4.1 Telexperiment 1: Wasser als Wärmespeicher – Nicht nur der Tee wird kalt

Aufgrund seiner hohen Wärmekapazität kann Wasser Wärme gut speichern. Allerdings gibt Wasser ohne Isolation diese Wärme so lange kontinuierlich an die Umgebung ab, bis ein Temperaturausgleich stattgefunden hat. Die Schülerinnen und Schüler sollen den Temperaturverlauf ausgehend von Wasser von ca. 60 °C messend verfolgen, die gemessenen Werte in eine Tabelle eintragen und daraus einen Graphen (Temperatur über Zeit) anfertigen. Anhand des angefertigten Graphen sehen sie gut, wie die Temperatur des Wassers sinkt.

2.4.2 Telexperiment 2: Wasser als effektiver Wärmespeicher – Wasser kann länger warm bleiben, wenn ...

Um mittels Wasser gespeicherte Wärme auch nach längerer Zeit noch nutzen zu können, muss das betreffende Gefäß möglichst gut wärmeisoliert werden. Die Schülerinnen und Schüler sollen dazu das Telexperiment 1 wiederholen und dabei verschiedene alltäglich verfügbare Materialien einsetzen. Der Temperaturverlauf gibt dann Auskunft über die Güte der Wärmedämmung und die praktischen Speichermöglichkeiten. Wenn das ausgewählte Material gut isoliert, wird die Temperatur langsamer abfallen als ohne Isolierung.

2.4.3 Telexperiment 3: Wärme für kalte Finger – Ist das Wärmekissen ein Wärmespeicher?

Der erste Versuch zur Schmelz- bzw. Kristallisationswärme nutzt das Phänomen, dass ein Wärmekissen mit flüssigem Inhalt beim Kristallisieren heiß wird und über einen längeren Zeitraum Wärme bei konstanter Temperatur abgibt. Die Tatsache, dass zum Schmelzen eines Feststoffes Energie (in Form von Wärme) zugeführt werden muss, ist den Schülerinnen und Schülern aus dem Alltag bekannt (Kerzenwachs). Die Umkehrung, nämlich dass beim Erstarren (auch Festwerden oder Kristallisieren) Wärme frei wird, ist dennoch verblüffend. Beim Wärmekissen ist dieser Effekt besonders deutlich, da es sich bei der Flüssigkeit um eine unterkühlte Schmelze handelt, die erst durch Knicken eines Metallplättchens zum Kristallisieren angeregt wird. (Das Knicken bewirkt die Bildung von Kristallisationskeimen, ähnlich wie das Reiben mit einem Glasstab, siehe Telexperiment 4).

Der Versuch kann beliebig oft wiederholt werden, indem das Wärmekissen für ca. 10 Minuten bzw. bis zur völligen Schmelze der Kristalle in sehr heißes Wasser (ca. 90 °C) eingelegt wird. (Es empfiehlt sich, dass dies die Lehrkraft mit einem Wasserkocher in der Vor- oder Nachbereitung des Versuchs selbst macht.)

2.4.4 Telexperiment 4: Wie das Wärmekissen Wärme speichert – Ein Salz, mal fest, mal flüssig

Zur genaueren Untersuchung der Vorgänge kann ein Wärmekissen geöffnet werden. Der Inhalt wird dann teilweise in ein Reagenzglas gegeben, zum Schmelzen gebracht und nach dem Abkühlen durch Reiben mit einem Glasstab zum Kristallisieren gebracht. Dabei wird die Temperatur messend verfolgt.

Es zeigt sich, dass beim Festwerden immer die gleiche Temperatur erreicht wird (je nach Typ des Wärmekissens ca. 50 °C bis 58 °C), was dem Schmelzpunkt des Feststoffes entspricht. (Tatsächlich sind die gemessenen Werte beim Schülerexperiment wegen Wärmeverlusten oft niedriger.) Dieses Experiment kann nur bedingt wiederholt werden, da beim Erhitzen immer etwas Wasser entweicht. Dadurch verändert sich die Zusammensetzung von Schmelze und Feststoff und schließlich bildet sich keine klare Flüssigkeit mehr.

Hinweis: Das Auftrennen eines erstarrten Wärmekissens und das Verteilen des Salzes an die Schülerinnen und Schüler erfolgt am besten durch die Lehrkraft selbst. Der Rest des Salzes kann in einem dicht verschlossenen Gefäß aufgehoben und für Experimente mit weiteren Klassen verwendet werden. (Evtl. ab und zu ein paar Tropfen Wasser hinzufügen, um Verdampfungsverluste zu kompensieren).

2.4.5 Hintergrundinformationen zum Wärmekissen

Bei dem Feststoff handelt es sich i. d. R. um Natriumacetat-Trihydrat mit einem Schmelzpunkt von 58 °C. (In den derzeit im Handel befindlichen Wärmekissen wurde anscheinend wegen Verbrennungsgefahr der Wassergehalt geändert, sodass der Schmelzpunkt oft nur bei ca. 50 °C liegt.) Während die meisten anderen Salze zu spontaner Keimbildung und Kristallisation neigen (und sich daher in Schmelze nicht gut unterkühlen lassen), bleibt dieses Salz auch bei niedrigeren Temperaturen sehr lange Zeit flüssig. Falls wir bei unserem Experiment nicht exakt 58 °C messen, liegt es an den Messbedingungen bzw. der Zusammensetzung des Wärmekissens.

Eine typische Messkurve mit dem Wärmekissen sieht zum Beispiel so aus:

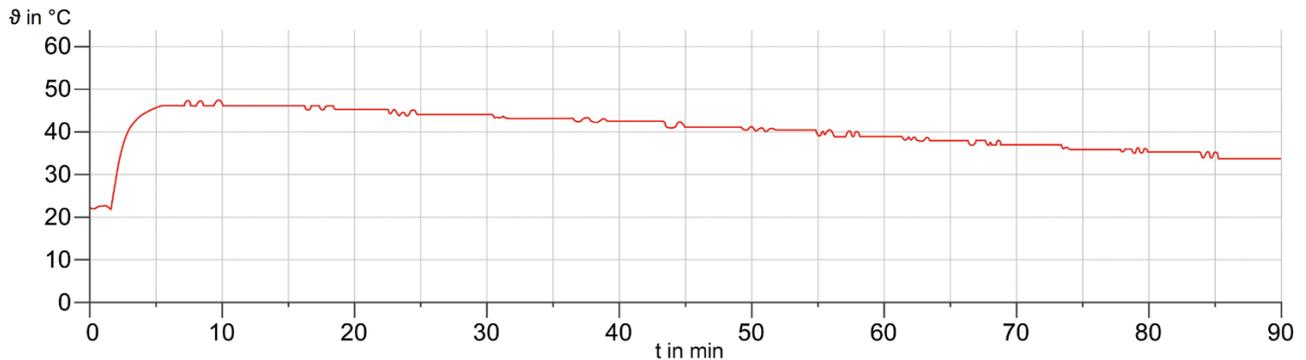


Abb. 1: Temperaturkurve eines Wärmekissens.

Aus physikalisch-chemischer Sicht ist die Erklärung des Energieumsatzes bzw. der Wärmefreisetzung noch etwas komplizierter: Man spricht von einem Entropieeffekt, da die Ordnung der Teilchen im Feststoff erheblich größer ist als im geschmolzenen Zustand. Diese Betrachtungsweise ist aber für den Unterricht in der Altersstufe 13 – 16 Jahre nur bedingt von Bedeutung.

Interessant ist auch die Klärung der Frage, warum die Kristallisation nach Knicken eines Metallplättchens oder Kratzen mit dem Glasstab ausgelöst wird. Gut verständlich ist die Kristallisation an winzigen Fremdkörpern als Kristallisationskeimen, auf denen die ersten Atome der erstarrenden Substanz aufwachsen. (Dieser Effekt wird oft beim Gießen von Metallen verwendet). Es geht aber auch ohne Fremdkörper. Was passiert also beim Knicken des Metallplättchens? Eine weit verbreitete „Erklärung“ besagt, es seien am Metall angelagerte Nanokristalle des Salzes, an denen beim Knicken die Kristallisation startet. Dem widerspricht, dass auch Reiben mit einem bisher unbenutzten, nanokristallfreien Glasstab (siehe Telexperiment 4) eine Kristallisation auslöst. Überträgt man die in der Werkstoffkunde beim Erstarren von Metallen gewonnenen Erkenntnisse auf die Auslösung der Kristallisation von Salzschnmelzen, kommt man zu einer anderen Erklärung: Die durch das Knicken bzw. Reiben erzeugten Schockwellen (Stoßwellen) sorgen dafür, dass einige Ionen sich so nahe kommen, dass sie Konglomerate (sog. „Energiezentren“) bilden, die dann als Kristallisationskeime wirken.

Wichtige Hinweise:

Starten der Kristallisation:

Beim Telexperiment 3 (Wärmekissen) ist darauf zu achten, dass das Metallplättchen nicht so stark geknickt wird, dass es bricht! Ein vorsichtiges Knicken, gerade so stark, dass man ein Knacken hören oder fühlen kann, reicht bei einem intakten Wärmekissen, um die Kristallisation auszulösen.

Wärmekissen liegt bereits erstarrt vor:

Durch Druck, Stöße oder Erschütterungen beim Transport liegt der Inhalt der Wärmekissen evtl. bereits vor Erstbenutzung nicht mehr im flüssigen Zustand vor. Dann sollte die Lehrkraft die Wärmekissen am besten in einem Wasserkocher regenerieren, wie unter Punkt 4.5 beschrieben. Danach sollten sie wieder einwandfrei funktionieren.

2.5 Durchführungsvarianten

- Alle Experimente können sowohl einzeln als auch in kleinen Gruppen durchgeführt werden. Die Messung des Temperaturverlaufs sollte in Arbeitsgruppen von mindestens zwei Schülerinnen oder Schülern durchgeführt werden, damit das Ablesen und das Notieren der Messwerte getrennt erfolgen kann.
- Um beim Telexperiment 3 eine gut reproduzierbare Messung zu erhalten, empfiehlt es sich, auf einer isolierenden Unterlage (z. B. Wellpappe) zu arbeiten, das Wärmekissen um den Fühler des Messgerätes herum zu legen und ggf. das Ganze mit einem Gummiring (oder Bindfaden) zu sichern.
- Falls aus dem Fundus Ihrer Schule genug Reagenzgläser und Stopfen zur Verfügung stehen, könnte nach Abschluss des Telexperiments 4 das Reagenzglas mit dem erstarrten Na-Acetat mit einem Stopfen verschlossen werden. So aufbewahrt, kann das Natriumacetat immer wieder verwendet werden.
- Die Telexperimente 1 und 3 sollten nach Anleitung durchgeführt werden. Telexperiment 2 könnte auch von den Schülerinnen und Schülern selbst entwickelt und dann durchgeführt werden. Diese Vorgehensweise stellt eine gute Möglichkeit dar, naturwissenschaftliche Arbeitsweisen aus dem Forschungskreis planvoll einzusetzen und anzuwenden.

Um bei Telexperiment 2 eine gute Isolation des Reagenzglases mit dem warmen Wasser zu erhalten, muss man mehrere Dämmstoffe ausprobieren (Möglichkeit zum Weiterforschen). Ein Wolltuch um das Reagenzglas gelegt bewirkt nur, dass die Temperatur im Lauf von 20 Minuten um 3 Grad weniger absinkt als ohne Isolierung (siehe Tabelle).

	Start- temperatur	Nach 3 min	Nach 6 min	Nach 9 min	Nach 12 min	Nach 15 min	Nach 18 min
Wasser im Reagenzglas	46,5 °C	41,4 °C	37,6 °C	35,1 °C	32,5 °C	30,3 °C	28,5 °C
Mit Wolltuch	47,4 °C	43,5 °C	40,5 °C	37,9 °C	35,5 °C	33,5 °C	31,6 °C

- Um das Verständnis für die Wärmeaufnahme beim Schmelzen zu vertiefen, kann man den Temperaturverlauf beim Erwärmen einer Eis-Wasser-Mischung aufnehmen lassen: Solange noch ein Rest Eis vorhanden ist, bleibt die Temperatur der Mischung bei 0 °C. Als Demonstrationsexperiment geeignet ist in gleicher Weise das Sieden und Verdampfen von Wasser: Hier bleibt die Temperatur der Flüssigkeit bis zum Schluss bei 100 °C (oder je nach Höhe und Luftdruck darunter).
- Bei älteren Schülerinnen und Schülern bzw. in höheren Klassen kann zur Erklärung der Wärme auch die Teilchenebene betrachtet werden.

Technikbezug: Thematisiert werden können die technisch-praktischen Anwendungen der Langzeitwärmespeicherung. So werden beispielsweise schon heute moderne Bürogebäude mittels saisonalen Wärmespeichers beheizt: Im Sommer heizt die Sonne Wasser auf, das in einem unterirdischen Kiesbecken gut gedämmt gespeichert wird. Im Winter gibt dieses Wasser dann wieder Wärme an die Heizungssysteme ab. Mit anderen Salzen als Natriumacetat kann Wärme auch in anderen Temperaturbereichen gespeichert werden. Zurzeit werden hochschmelzende Salz-mischungen bis ca. 800 °C genutzt. Die Energie wird dann häufig wieder in einen technischen Prozess eingespeist, z. B. zum Vorwärmen eines Stoffes vor einer chemischen Reaktion. Auch in Solarthermiekraftwerken wie Andasol in Südspanien werden Salzsammelze eingesetzt. Mit einer bei ca. 400 °C schmelzenden Kalium-Natriumnitratmischung läuft das Kraftwerk auch ohne Sonne nachts noch 7 Stunden mit Volllast weiter.

3 Ergänzende Informationen zum Experiment

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

Es sind keine besonderen Räumlichkeiten notwendig.

4.2 Zeitbedarf

	Vorbereitung und Durchführung
Telexperiment 1	20 – 30 min, Vorbereitung 5 min
Telexperiment 2	je nach Lerngruppe und Variation 20 min bis zu einer Unterrichtsstunde
Telexperiment 3	10 min inkl. Vorbereitung
Telexperiment 4	15 min inkl. Vorbereitung

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 diesen Experimenten achten Sie bitte auf folgende mögliche Gefahren und machen Sie auch Ihre Schülerinnen und Schüler darauf aufmerksam:

- Stellen Sie sicher, dass keine Schäden an wasserempfindlichen Materialien und Geräten entstehen können.
- Es besteht Verbrennungsgefahr und Brandgefahr beim Arbeiten mit Feuer. Vor der ersten Benutzung der Feuerzeuge sind diese von der Lehrkraft auf ordnungsgemäße Funktion zu überprüfen, insbesondere die Regulierung der Flammengröße.
- Bei der Verwendung von heißem Wasser (Telexperiment 1 und 2) besteht Verbrennungsgefahr.
- Kochendes Wasser zur Regeneration des Wärmekissens (Telexperiment 3) ist im normalen Klassenzimmer am Schülerarbeitsplatz zu gefährlich. Die Regeneration des Wärmekissens sollte daher von der Lehrkraft selbst im Vor- oder Nachlauf des Telexperiments 3 durchgeführt werden (alle Wärmekissen auf einmal regenerieren).
- Auch das Aufschneiden der Wärmekissen sollte nur unter Aufsicht der Lehrkraft bzw. am besten durch sie selbst vorgenommen werden. Natriumacetat-Trihydrat ist allerdings ebenso wie das wasserfreie Natriumacetat als nicht gefährlich eingestuft.
- Beim Umgang mit dem geschmolzenen Salz müssen die Schülerinnen und Schüler Schutzbrillen tragen!

4.4 Benötigte Materialien

Falls die Lehrkraft die Regeneration der Wärmekissen im Unterricht vorführen will, wird kochendes Wasser benötigt. Dafür ist ein großer elektrischer Wasserkocher mit abgedecktem Heizelement bestens geeignet. In diesen werden die Wärmekissen eingelegt, aufgekocht und ca. 10 min im heißen Wasser liegengelassen.

Ferner wird jeweils pro Gruppe eine Armbanduhr mit Sekundenanzeige oder eine Stoppuhr benötigt und ein Feuerzeug (wenn möglich ein Stabfeuerzeug) bzw. Streichhölzer.

Für die Telexperimente 2 und 3 sollten isolierende Materialien bereitliegen, z. B. Wollhandschuh, Schal, Wellpappe, Styropor o. Ä.

Wurde das Experiment bereits einmal durchgeführt, sollte das Salz aus dem aufgeschnittenen Wärmekissen verwendet werden.

Sicherheitsrelevante Materialien und Geräte sind vor Aushändigung an die Schülerinnen und Schüler auf ihre ordnungsgemäße Funktion zu testen.

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

Material	Anzahl
Digitalthermometer	1
Feuerzeug bzw. Streichhölzer	1
Glasstab	1
Gummiband	2
Isolierende Unterlage, z. B. Wellpappe, Styropor	1
Kaffeelöffel oder Spatel	1
Pflanzenclip (als Reagenzglasständer)	1
Reagenzglas aus Glas	2
Reagenzglasklammer aus Holz	1
Schutzbrille	1
Spritze (konische Spitze), 5 ml (oder Pipette)	1
Teelicht	1
Uhr	1
Verschiedene Materialien zur Isolation des Reagenzglases	1
Wärmekissen (mit Salzschnmelze)	1

Hinweis: Wird das Telexperiment 4 zum ersten Mal durchgeführt, so muss dabei ein Wärmekissen aufgeschnitten werden. Es wird also ein Wärmekissen „verbraucht“. Der Inhalt des aufgeschnittenen Wärmekissens muss aufbewahrt werden (siehe Abschnitt 2.4.4), sodass beim Durchführen des Experiments mit anderen Schülergruppen kein weiteres Wärmekissen mehr „verbraucht“ werden muss.



Abb. 2: 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.

Hinweis zur Regeneration des Wärmekissens: Sie bedarf einiger Zeit. Nach dem Einlegen in kochendes Wasser dauert es 10 – 15 Minuten, bis das gesamte Salz geschmolzen ist. Danach muss man das Kissen wieder auf Raumtemperatur abkühlen lassen, was je nach Umgebungstemperatur 30 Minuten und länger dauern kann. Keinesfalls darf das Abkühlen mit kaltem Wasser beschleunigt werden, da es dann oft zu keiner Unterkühlung kommt und das Kissen sofort wieder erstarrt!