

Wärmekapazität

Definition

Um einen Stoff zu erwärmen, d. h. ihn von einer niedrigeren Temperatur auf eine höhere Temperatur zu bringen, muss man ihm Wärme (Q) zuführen. Je größer die zu erzielende Temperaturdifferenz (ΔT) sein soll, desto mehr Wärme muss man zuführen, man sagt, die beiden Größen sind einander direkt proportional:

$$Q \sim \Delta T \quad (1)$$

Wie viel Wärme man dabei genau aufwenden muss, hängt von der Beschaffenheit des Stoffs und seiner Menge, also seiner Masse ab. Das Verhältnis aus zugeführter Wärmemenge und erzielter Temperaturdifferenz heißt **Wärmekapazität C**, bezogen auf die Masse (m) des Materials spricht man von der **spezifischen Wärmekapazität $c = C/m$** (kurz und missverständlich spricht man oftmals auch von der „spezifischen Wärme“).

(Hinweis: Die spezifische Wärmekapazität ist selbst temperaturabhängig, bei gasförmigen Stoffen kommt noch eine Druck- bzw. Volumenabhängigkeit hinzu.)

Die erforderliche Wärmemenge lässt sich damit bei bekannter Wärmekapazität über folgende Formel berechnen:

$$Q = C \cdot \Delta T = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (2)$$

Die Wärmekapazität von Wasser

Um 1 kg Wasser mit 20 °C um 1 °C zu erwärmen, muss man die Energiemenge (Wärme) von 4,183 kJ zuführen. Wie ein Vergleich mit den Wärmekapazitäten anderer Stoffe zeigt, hat Wasser im flüssigen Zustand damit die höchste spezifische Wärmekapazität. Denn will man z. B. die Temperatur von 1 kg Kupfer bei 20 °C um 1 °C erhöhen, braucht man „nur“ eine Wärmemenge von 0,38 kJ.

Stoff	Wärmekapazität [kJ/kg K]
Wasser	4,183
Ethanol	2,4
Holz	2,5
Eis (0 °C)	2,1
Ammoniak	2,06
Luft	1,01
Aluminium	0,9
Kupfer	0,38
Quecksilber	0,14

Tabelle 1: Richtwerte für Wärmekapazitäten von Flüssigkeiten, Gasen und Festkörpern. Wenn nicht explizit angegeben, dann beziehen sich die Werte auf eine Temperatur von 20 °C. Die Angaben für Gase sind die Wärmekapazitäten bei konstantem Druck. (Quelle: Kuchling, 1978)

Warum hat flüssiges Wasser eine so hohe Wärmekapazität?

Den Grund für die hohe Wärmekapazität von Wasser in flüssigem Zustand kann man anschaulich aus dem Teilchenmodell ableiten: Die Teilchen im Teilchenmodell haben mehrere unabhängige Bewegungsmöglichkeiten: Geradlinige Bewegung (Translation), Drehbewegung (Rotation) und

Schwingung. (In der Fachsprache bezeichnet man diese unabhängigen Bewegungsmöglichkeiten als „Freiheitsgrade“.) Durch die Zufuhr von Wärme können all diese unterschiedlichen Bewegungen angeregt werden. Je mehr unterschiedliche Bewegungen angeregt werden können, desto höher ist die Wärmekapazität.

Flüssiges Wasser hat besonders viele Freiheitsgrade, da die Wassermoleküle gewinkelt sind (mehrere Freiheitsgrade bzgl. Rotation) und die Wassermoleküle zusätzlich zu ihren Eigenschwingungen auch Schwingungen gegeneinander ausführen können. In Summe führen diese vielen Freiheitsgrade zur hohen Wärmekapazität des flüssigen Wassers.

So bestimmt man die Wärmekapazität eines Stoffes

Zunächst ermittelt man die Temperatur und die Masse des Stoffes, dessen Wärmekapazität man ermitteln will. Dann führt man ihm eine definierte Wärmemenge zu, misst die Temperatur erneut und bestimmt die Temperaturdifferenz (ΔT). Die spezifische Wärmekapazität ergibt sich dann aus den gemessenen Größen über die Formel:

$$c = Q / (m \cdot \Delta T) \quad (3)$$

Flüssigkeiten oder Gase

Die experimentelle Bestimmung der Wärmekapazität funktioniert hier recht einfach, wie ein Beispiel aus der Küche zeigt.

Teewasser kochen: Ein Liter Wasser (Masse 1 kg) wird 3 Minuten lang mit einem Wasserkocher, der die elektrische Leistung von 2.000 Watt hat, erwärmt. Die zugeführte Wärmemenge kann man aus Leistung und Zeit berechnen ($Q = P \cdot t$), die Temperatur des Wassers beim Einfüllen und nach dem Erwärmen kann man messen und schon hat man alle Größen, um daraus die Wärmekapazität zu berechnen.

(Hinweis: Allerdings macht man dabei einen mehr oder weniger großen Messfehler. Ursache sind der Verlust von Wärme an die Umgebung und die Aufnahme von Wärme durch den Behälter des Wasserkochers. Will man also die spezifische Wärmekapazität des Wassers exakt bestimmen, muss man mit einem extrem isolierten Gefäß arbeiten und dessen eigene Wärmekapazität kennen.)

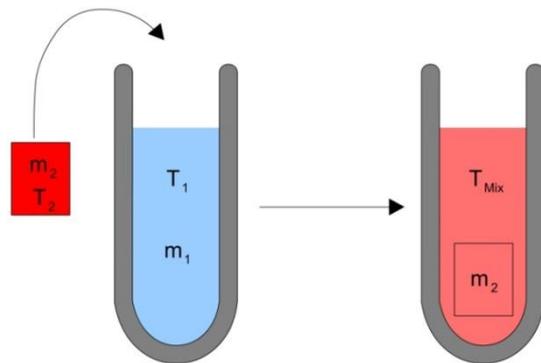
Festkörper

Bei Festkörpern bestimmt man die Wärmekapazität mithilfe eines **Kalorimeters**. Es basiert auf der sog. Mischungsregel (siehe Gleichung 4):

Bringt man zwei Körper mit verschiedenen Temperaturen miteinander in Kontakt, so geht Wärme vom heißeren Körper (m_1, T_1, c_1) zum kälteren Körper (m_2, T_2, c_2) über; und zwar so lange, bis beide die gleiche Temperatur (Mischtemperatur T_{Mix}) haben. Dabei ist die vom heißeren Körper abgegebene Wärmemenge (Q_1) gleich der vom kälteren Körper aufgenommenen Wärme (Q_2).

$$Q_1 = c_1 \cdot m_1 \cdot (T_1 - T_{\text{Mix}}) = c_2 \cdot m_2 \cdot (T_{\text{Mix}} - T_2) = Q_2 \quad (4)$$

Beim Kalorimeter bringt man nun den zu messenden Stoff (m_2, T_2) in Kontakt mit einem Wasserbad (m_1, T_1). Wichtig ist, dass das Gefäß, in dem sich das Wasser befindet, gut isoliert ist und somit wenig Wärme nach außen abgibt. Vom Wasser sind Wärmekapazität, Masse und Temperatur bekannt. Das Wasser wird nun eine bestimmte Zeit erhitzt. Nach Beendigung der Wärmezufuhr wird die Temperatur (T_{mix}) des Wassers gemessen.



Das Kalorimeter-Prinzip

Setzt man nun einen Festkörper in das Wasser, so stellt man fest, dass sich das Wasserbad abkühlt, da ein gewisser Teil der Wärme auf dem im Wasserbad befindlichen Festkörper übertragen wird. Sobald keine Änderung der Temperatur mehr stattfindet, sind Wasser und Festkörper in einem sog. thermischen Gleichgewicht. Die Mischtemperatur T_{Mix} ist erreicht und die Wärmekapazität des Festkörpers kann durch Auflösen der Formel (4) nach der Wärmekapazität des kälteren Stoffes (c_2) berechnet werden.

$$c_2 = c_1 \cdot m_1 \cdot (T_1 - T_{\text{Mix}}) / m_2 \cdot (T_{\text{Mix}} - T_2) \quad (5a)$$

Auch hier macht man allerdings den Fehler, dass die Wärmekapazität des Kalorimeters und des Thermometers (zusammen als C_K bezeichnet) nicht berücksichtigt werden. Um exakt zu sein, müsste man also zunächst mit Wasser diese Wärmekapazität C_K bestimmen und dann in der Berechnung der spezifischen Wärmekapazität c_2 des Festkörpers mit berücksichtigen. Die Formel lautet dann:

$$c_2 = (c_1 \cdot m_1 + C_K) \cdot (T_1 - T_{\text{Mix}}) / m_2 \cdot (T_{\text{Mix}} - T_2) \quad (5b)$$

Wärmekapazität und Wärmespeicher

In Zusammenhang mit der Nutzung von regenerativen Energien zur Stromerzeugung ist das Thema „Energiespeicherung“ in aller Munde. Eine Möglichkeit, Energie zu speichern, ist in Form von Wärme.

Jeder kennt das aus dem täglichen Leben: Im Winter macht man sich abends gerne eine Wärmflasche, die einen dann die ganze Nacht im Bett schön warm hält. Die Wärme wird hier in Form einer Temperaturerhöhung „gepuffert“. Für diese Art von Wärmespeicherung sind Stoffe mit hoher Wärmekapazität besonders von Vorteil, also z. B. Wasser: Je größer die Wärmekapazität ist, desto weniger Masse braucht man von einem Stoff, um eine bestimmte Wärme darin zu speichern (Wärmflaschen sind ja auch in der Regel nicht besonders groß).

Hinweis: Bei der großtechnischen Speicherung von Energie in Form von Wärme ist die Größe der Wärmekapazität des Speicherstoffs eher zweitrangig. Es werden bevorzugt andere Arten von Speichern eingesetzt, z. B. Latentwärmespeicher (hier wird Wärme in Form eines Phasenübergangs gespeichert) oder chemische Wärmespeicher (Wärme wird in Form von chemischen Reaktionen gespeichert). Beispielsweise speichert ein Natriumacetatspeicher mit Masse 100 kg beim Schmelzen bei 58 °C das Fünffache der Wärmemenge eines Wasserspeichers mit Masse 100 kg beim Erhitzen von 0 °C auf 99 °C.