

1 Energiebedarf zur Erwärmung von Stoffen

Der Energiebetrag, der benötigt wird, um 1 kg einer bestimmten Substanz um 1 °C zu erwärmen, wird als die Wärmekapazität (auch: Spezifische Wärme) dieser Substanz bezeichnet. Die Wärmekapazität hängt vom Aggregatzustand der Substanz (fest, flüssig oder gasförmig) und auch mehr oder weniger von ihrer Temperatur und vom Druck ab. Bei den allermeisten Stoffen, auch beim Wasser, ist die Wärmekapazität im flüssigen Zustand am größten.

Wie viel Wärmeenergie pro kg und pro °C Temperaturerhöhung benötigt wird, ist eine Konstante, die vom jeweiligen Stoff, seinem Aggregatzustand und in geringerem Maße auch von seiner Temperatur und dem Druck abhängig ist, die sogenannte Wärmekapazität oder spezifische Wärme. Üblicherweise wird hierfür als Symbol c_p verwendet (c für capacity und p für pressure = constant), wenn der Vorgang bei konstantem Druck abläuft, wie es im Alltag normalerweise der Fall ist.

2 Energiebedarf für die Erwärmung von Wasser

Was passiert, wenn Wasser (Wärme-)Energie zugeführt wird?

Es sind drei Fälle zu unterscheiden:

•Eis

Durch die Wärmezufuhr steigt zunächst die Temperatur des Eises. (Die c_p -Werte für Eis, Wasser und Wasserdampf sind in der u.a. Tabelle aufgelistet. Beim Eis ist c_p stark temperaturabhängig, so dass für den betr. Temperaturbereich u.U. ein Mittelwert berechnet oder abgeschätzt werden muss, bei Wasser und Wasserdampf kann die Temperaturabhängigkeit von c_p normalerweise vernachlässigt werden.) Um 1 kg Eis von -100 °C auf 0 °C zu erwärmen, werden etwa 170 kJ Energie benötigt.

Wird nun weiterhin Energie zugeführt, erwärmt sich das Eis zunächst überhaupt nicht weiter (2), sondern es schmilzt. Je mehr Energie zugeführt wird, umso mehr Wasser und umso weniger Eis erhalten wir. Die Wärmemenge, die zugeführt werden muss, um 1 kg Eis von 0°C vollständig zu Wasser von 0°C zu schmelzen, nennt man Schmelzwärme oder Schmelzenthalpie (Die Bezeichnung Enthalpie weist darauf hin, dass der betreffende Vorgang bei konstantem Druck stattfindet), das Symbol ist ΔH_{Sm} . Für Wasser beträgt ΔH_{Sm} bei 0°C 334 kJ/kg.

Um 1 kg Eis mit 0 °C vollständig zu 1 kg Wasser mit 0 °C zu schmelzen, benötigt man also eine Energiemenge von 334 kJ. Das ist fast doppelt so viel wie für das Erwärmen von -100 °C auf 0 °C gebraucht wurde.

•Wasser

Bei weiterer Energiezufuhr erwärmt sich das Wasser, bis die Siedetemperatur des Wassers (bei normalem Luftdruck 100 °C) erreicht ist. (Pro kg Wasser wird wegen des c_p -Wertes von ca. 4,2 kJ/kg/°C hierfür eine Energiemenge von ca. 420 kJ benötigt.) Von da an bleibt auch bei weiterer Zufuhr von Energie die Temperatur so lange konstant, bis das Wasser vollständig verdampft ist und nun ausschließlich in Form von Dampf vorliegt.

Die Wärmemenge, die zugeführt werden muss, um 1 kg Wasser von 100°C vollständig zu Wasserdampf von 100°C zu verdampfen, nennt man Kondensations- oder Verdampfungswärme oder Verdampfungsenthalpie, das Symbol ist ΔH_V . Für Wasser beträgt ΔH_V bei 100°C 2256

Wärmekapazität

Prof. Dr. Werner Bidlingmaier & Dr.-Ing. Christian Springer

Projekt Orbit | Dr. W. Bidlingmaier | Bauhaus Universität Weimar | www.orbit-online.net

kJ/kg. DeltaHV ist temperaturabhängig, nimmt mit zunehmender Temperatur ab und erreicht bei der kritischen Temperatur den Wert Null. Die Druckabhängigkeit von DeltaHV ist gering und kann normalerweise vernachlässigt werden.

•Wasserdampf

Wenn der entstandene Dampf nicht einfach in die Luft entweicht, sondern z.B. durch eine Rohrleitung abgeführt wird, kann durch weitere Wärmezufuhr seine Temperatur praktisch beliebig weit über die Siedetemperatur ("Siedepunkt") hinaus erhöht werden.

Beispiel 1:

70 kg Eis mit einer Temperatur von -20°C sollen in Wasser mit 40°C überführt werden. Welche Energie(Wärme-)menge Q muss dem Eis/Wasser dazu zugeführt werden?

1. Erwärmen des Eises auf Schmelztemperatur (0°C):

$$Q_1 = m(\text{Eis}) * c_p(\text{Eis}) * (0^\circ\text{C} - -20^\circ\text{C}) = 70\text{kg} * 2,0\text{kJ/kg/}^\circ\text{C} * 20^\circ\text{C} = 2800 \text{ kJ}$$

2. Schmelzen des Eises bei Schmelztemperatur:

$$Q_2 = m(\text{Eis}) * \Delta H_{\text{Sm}}(\text{Wa.}) = 70\text{kg} * 334\text{kJ/kg} = 23380 \text{ kJ}$$

3. Erwärmen des Wassers von 0°C auf 40°C:

$$Q_3 = m(\text{Wa.}) * c_p(\text{Wa.}) * (40^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) = 70\text{kg} * 4,2\text{kJ/kg/}^\circ\text{C} * 40^\circ\text{C} = 11760 \text{ kJ}$$

Gesamtwärmebedarf:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 37940 \text{ kJ}$$

Umrechnung in kWh (1 kWh = 3600 kJ):

$$37940 \text{ kJ} = 10,54 \text{ kWh}$$

Beispiel 2:

70 kg Wasser mit einer Temperatur von 20°C sollen auf Wasser mit 70°C erwärmt werden. Welche Energie(Wärme-)menge Q muss dem Wasser dazu zugeführt werden?

Erwärmen des Wassers auf Siedetemperatur (100°C):

$$Q = m(\text{Wa.}) * c_p(\text{Wa.}) * (70^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 70\text{kg} * 4,2\text{kJ/kg/}^\circ\text{C} * 50^\circ\text{C} = 14700 \text{ kJ}$$

Umrechnung in kWh (1 kWh = 3600 kJ):

$$14700 \text{ kJ} = 4,08 \text{ kWh}$$

Wärmekapazität

Prof. Dr. Werner Bidlingmaier & Dr.-Ing. Christian Springer

Projekt Orbit | Dr. W. Bidlingmaier | Bauhaus Universität Weimar | www.orbit-online.net**Beispiel 3:**

70 kg Wasser mit einer Temperatur von 40°C sollen in Dampf mit 170°C überführt werden. Welche Energie(Wärme-)menge Q muss dem Wasser dazu zugeführt werden?

1. Erwärmen des Wassers auf Siedetemperatur (100°C):

$$Q_1 = m(\text{Wa.}) * c_p(\text{Wa.}) * (100^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}) = 70\text{kg} * 4,2\text{kJ/kg/}^\circ\text{C} * 60^\circ\text{C} = 17640 \text{ kJ}$$

2. Verdampfen des Wassers bei Siedetemperatur:

$$Q_2 = m(\text{Wa.}) * \Delta\text{H}_V(\text{Wa.}) = 70\text{kg} * 2256\text{kJ/kg} = 157920\text{kJ}$$

3. Erwärmen des Dampfes von 100°C auf 170°C:

$$Q_3 = m(\text{Da.}) * c_p(\text{Da.}) * (170^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}) = 70\text{kg} * 2,0\text{kJ/kg/}^\circ\text{C} * 70^\circ\text{C} = 9800 \text{ kJ}$$

Gesamtwärmebedarf:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 185360\text{kJ}$$

Umrechnung in kWh (1 kWh = 3600 kJ):

$$185360 \text{ kJ} = 51,49 \text{ kWh}$$

Wärmekapazität

Prof. Dr. Werner Bidlingmaier & Dr.-Ing. Christian Springer

Projekt Orbit | Dr. W. Bidlingmaier | Bauhaus Universität Weimar | www.orbit-online.net

Im Folgenden sind Wärmekapazitäten von Eis, Wasser und Dampf bei verschiedenen Temperaturen aufgelistet. Wasser gehört zu den Stoffen mit den höchsten Wärmekapazitäten.

Temperatur **Wärmekapazität cp**
in °C **in kJ/kg/°C**

=====

Eis

-100	1,38
- 60	1,64
- 31	1,86
- 25	1,93
- 15	2,00
- 5	2,06
- 2	2,10

Wasser

0	4,22
10	4,19
20	4,18
40	4,18
60	4,18
70	4,19
80	4,20
90	4,21
100	4,22

Dampf

110	2,01
120	2,00
150	1,98
200	1,96
250	1,98
300	2,00
400	2,05
500	2,12

3 Erwärmung von Luft

Die Dichte der Luft bei 0°C ist 1,293 kg/m³, die spez. Wärmekapazität 0,715 - 1,004 kJ/kg x K je nach Zustand ohne Wasser, also trocken.

Beispiel

Die Wärmekapazität von Luft ist ca. 1,0

Das Gewicht von 1L Luft ist ca. 1,3g = 1m³ ca. 1,3kg

Somit gibt die Erhöhung um 1°C: 1,3 KJ = 0,000367 kwh

Wärmekapazität

Prof. Dr. Werner Bidlingmaier & Dr.-Ing. Christian Springer

Projekt Orbit | Dr. W. Bidlingmaier | Bauhaus Universität Weimar | www.orbit-online.net**4 Erwärmung anderer Stoffe**

Wärmekapazitäten einiger anderer Stoffe bei üblichen Umgebungstemperaturen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Material, Substanz	Wärmekapazität c_p in kJ/kg/°C
Alkohol	2,46
Alkoholdampf	1,43
Eisen	0,45
Aluminium	0,90
Zink	0,39
Kupfer	0,39
Schwefel	0,74
Quecksilber	0,14
Eichenholz	2,40
Nadelholz	2,40
Papier	1,20
Sand (trocken)	0,80
Glas	0,80
Gummi	1,40
Kompost (trocken)	1,90
org. Substanz (trocken)	1,70
min. Substanz (trocken)	0,70

Beispiel:

1000 Kg Rottegut bestehend aus 65% Wassergehalt und 35% Trockenmasse. Von der Trockenmasse sind 75% org. Substanz und 25% mineralische Substanz. Das Rottegut soll von 20°C auf 70°C erwärmt werden.

$$\bullet m_w = 65,00\%$$

$$\bullet m_{org} = 26,25\%$$

$$\bullet m_{min} = 8,75\%$$

$$Q_1 = m_w \cdot c_p(\text{Wasser}) \cdot \Delta T = 650 \cdot 4,18 \cdot (70 - 20) = 135.850 \text{ KJ}$$

$$Q_2 = m_{org} \cdot c_p(\text{org. Substanz}) \cdot \Delta T = 262,5 \cdot 1,7 \cdot (70 - 20) = 22.312 \text{ KJ}$$

$$Q_3 = m_{min} \cdot c_p(\text{min. Substanz}) \cdot \Delta T = 87,5 \cdot 0,7 \cdot (70 - 20) = 3.063 \text{ KJ}$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 135.850 + 22.312 + 3.063 = 161.225 \text{ KJ}$$

Umrechnung in kWh (1 kWh = 3600 kJ):

$$161.225 \text{ kJ} = 44,78 \text{ kWh}$$

Wärmekapazität

Prof. Dr. Werner Bidlingmaier & Dr.-Ing. Christian Springer

Projekt Orbit | Dr. W. Bidlingmaier | Bauhaus Universität Weimar | www.orbit-online.net

Quellennachweis:

D'Ans-Lax: Taschenbuch für Chemiker und Physiker, Band 1: Makroskopische chem.-physikal. Eigenschaften, Springer-Verlag, 3. Auflage, 1967

Weast, Handbook of Chemistry and Physics, 64th Edition, 1983-1984, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida

Meyer/Schiffner, Technische Thermodynamik, VEB Fachbuchverlag, Leipzig