1 Formeln und Gleichungen

1.1 Formeln sind Gleichungen

In der Technik wird häufig mit Formeln gerechnet. Formeln sind Gleichungen, bestehen also aus gleichwertigen Seiten. Diese Gleichwertigkeit wird durch das Gleichheitszeichen symbolisiert. Was auf der linken Seite steht, ist gleichwertig mit dem auf der rechten Seite. Deswegen werden oft Balkenwaagen zur Veranschaulichung von Gleichungen herangezogen. Bei Formeln gelten jedoch zwei Besonderheiten:

1. Bei Formeln steht auf der linken Seite meist nur ein Buchstabe, nämlich das Zeichen für eine mit der Formel zu berechnenden Größe.
2. Bei Formeln handelt es sich um Größengleichungen, d. h. Gleichungen mit benannten Zahlen. **Größen bestehen aus Zahlenwert mal Einheit**, allerdings wird das Malzeichen (der Punkt) nicht geschrieben, z. B. 17,5 m, 1,6 kg, 2058 kJ/kg, 20,6 kW.

Eine in der Kältetechnik häufig benötigte Formel lautet

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$ [1].

Das bedeutet, dass sich die Wärmemenge (Symbol Q in kJ) als Produkt aus Masse (m in kg), spezifischer Wärmekapazität (c in kJ/kgK) und Temperaturdifferenz (ΔT in K) berechnet. Damit das Ergebnis stimmt, müssen nicht nur die richtigen Zahlenwerte, sondern auch die dazu passenden Einheiten mitgeführt werden.

Beim Rechnen mit Formeln muss daher nicht nur auf die Gleichwertigkeit der Zahlenwerte, sondern auch auf die der Einheiten geachtet werden (Einheitenkontrolle). Das bietet besonders nach dem Umstellen einer Formel die Kontrollmöglichkeit, ob die Umstellung richtig war.

1.2 Umstellen von Formeln

Häufig müssen bekannte Formeln nach einer in ihr vorkommenden Größe umgestellt werden, weil diese Größe im Rahmen eines zu berechnenden Prozesses gesucht wird. Dabei gelten die gleichen Regeln wie beim Umformen von Gleichungen:

Die beiden Seiten einer Formel können vertauscht werden. Dadurch ändert sich ihre Gleichwertigkeit nicht. Diese Gleichwertigkeit wird im folgenden Beispiel durch den Doppelpfeil (⇔) symbolisiert:

Soll durch Umstellen einer Formel ein Glied isoliert werden, empfiehlt es sich, die Formelseiten zunächst so zu vertauschen, dass das gesuchte Glied vorne (links) steht.

1) Die Bedeutung dieser Formel wird in Kapitel 15.3 erklärt.

Dann muss das gesuchte Glied isoliert werden, so dass es alleine auf der linken Seite steht. Dazu werden die nicht gesuchten Glieder durch den Gegenoperator „entfernt" (Plus-Glieder (+) durch Subtrahieren (–), Minusglieder (–) durch Addieren (+), Faktoren (·) durch Teilung (:) und Teiler, die meist unter einem Bruchstrich stehen, durch Multiplikation (·). Sie tauchen so mit gegenteiligem Vorzeichen auf der anderen Seite auf. Vereinfacht wird oft gesagt, dass beim „auf die andere Seite Bringen" das Vorzeichen gewechselt wird (aus plus wird minus, aus mal wird geteilt usw.). Aber im Grunde wird auf jeder Seite der Formel das Gleiche gemacht, ihr Gleichungscharakter bleibt also erhalten. Um im Bild der Balkenwaage zu bleiben: Die Waage bleibt im Gleichgewicht, wenn man auf jeder der beiden Seiten das Gleiche hinzufügt oder wegnimmt.

Beispiel 1.1
Aus der Formel $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$ sind Q, m und c bekannt, ΔT wird gesucht, ist also zu isolieren.

1. Schritt: Formelseiten vertauschen, sodass ΔT links steht
$$m \cdot c \cdot \Delta T = Q$$

2. Schritt: Durch m und durch c teilen, dadurch wird ΔT isoliert, weil m und c sich heraus kürzen ($\frac{m}{m} = 1$, ebenso $\frac{c}{c} = 1$) und m und c erscheinen auf der anderen Seite als Teiler
$$m \cdot c \cdot \Delta T = Q \qquad |: m$$
$$c \cdot \Delta T = \frac{Q}{m} \qquad |: c$$
$$\Delta T = \frac{Q}{m \cdot c}$$

Kommen in einer Formel sowohl Summanden (Plus-/Minusglieder) als auch Faktoren (Malglieder/Teiler) vor, müssen diese durch Ausklammern separiert werden:

Beispiel 1.2
Die Formel für die Kreisringfläche[1)] $A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} - \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ ist nach D umzustellen:

1. Schritt: $\frac{\pi}{4}$ ausklammern, sodass Plus- und Malglieder getrennt sind:
$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2)$$

2. Schritt: Formelseiten vertauschen, sodass die Klammer mit der gesuchten Größe D (hier D^2) links steht
$$\frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = A$$

1) Vergleiche Kapitel 4.2

3. Schritt: Beide Seiten mit 4 multiplizieren und durch π teilen, dadurch wird die Klammer isoliert und 4 erscheint rechts als Multiplikator, π als Teiler. Da die Plusglieder der Klammer dann auf einer Seite separiert sind, kann die Klammer wegfallen:

$$\frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = A \quad | \cdot 4$$

$$\pi \cdot (D^2 - d^2) = 4A \quad |: \pi$$

$$D^2 - d^2 = \frac{4A}{\pi}$$

4. Schritt: d^2 addieren, dadurch wird die gesuchte Größe D (immer noch als D^2) isoliert:

$$D^2 - d^2 = \frac{4A}{\pi} \quad | + d^2$$

$$D^2 = \frac{4A}{\pi} + d^2$$

5. Schritt: Wurzel ziehen: $D = \sqrt{\frac{4A}{\pi} + d^2}$

1.3 Aufgaben

1. Stellen Sie die Formeln für die Dichte $\rho = \frac{m}{V}$ und das spezifische Volumen $v = \frac{V}{m}$ jeweils nach m und V um.
2. Stellen Sie die Formel für den Wärmestrom $\dot{Q} = A \cdot k \cdot \Delta T$ nach A, k und ΔT um.
3. Stellen Sie die Formel für die Kreisfläche $A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ nach d um.
4. Stellen Sie die Formel für die Kreisringfläche $A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} - \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ nach d um.
5. Stellen Sie die Formel für das Volumen des Quaders $V = l \cdot b \cdot h$ nach l, b und h um.
6. Stellen Sie die Formel für die sensible Wärmemenge $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$ nach m und c um.
7. Stellen Sie die Formel für das Volumen des Zylinders $V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h$ nach d und h um.
8. Stellen Sie die Formel für das Volumen des Hohlzylinders $V = \frac{\pi \cdot h}{4} \cdot (D^2 - d^2)$ nach d, D und h um.
9. Stellen Sie die Formel für den Wärmestrom $\dot{Q} = \frac{Q}{\tau}$ (Erklärung in Kapitel 15.4) nach der Wärmemenge Q um.

8 Arbeit, Energie, Leistung, Wirkungsgrad

8.1 Mechanische Arbeit – Einheiten und Formelzeichen

Mechanische Arbeit wird verrichtet, wenn eine Kraft längs eines Weges wirkt. Sie wird als Produkt aus Kraft und dem zugehörigen Kraftweg berechnet:

$$\text{Arbeit} = \text{Kraft} \times \text{Weg} \qquad W = F \cdot s \tag{8.1}$$

Die SI-Einheit der Arbeit ergibt sich als Produkt aus der Einheit der Kraft Newton (N) und der Einheit der Länge Meter (m) zu Newtonmeter (Nm). Zu Ehren des britischen Physikers James Prescott Joule (1818 – 1889) wird ein Newtonmeter auch Joule (J) (sprich: dschul) genannt:

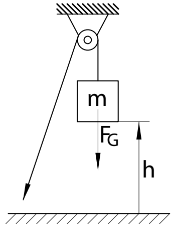
$$1\,\text{J} = 1\,\text{Nm} = 1\,\frac{\text{kg m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} = 1\,\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}$$

1 Joule ist 1 Newtonmeter und damit die Arbeit, die verrichtet wird, wenn die Kraft 1 N über eine Strecke von 1 m wirkt, z. B. beim Anheben einer Last um 1 m, deren Gewichtskraft 1 N beträgt.

Weitere Einheiten sind:

• Kilojoule (kJ)	1 kJ	=	1000 J	=	1000 Nm
• Megajoule (MJ)	1 MJ	=	1000 kJ	=	1 000 000 J
• Wattsekunde (Ws)	1 Ws	=	1 J	=	1 Nm
• Wattstunde (Wh)	1 Wh	=	3600 Ws	=	3600 J
• Kilowattstunde (kWh)	1 kWh	=	3600 kWs	=	3600 kJ

8.2 Hubarbeit



Wenn ein Körper angehoben wird, muss seine Gewichtskraft F_G aufgebracht werden, der zurückgelegte Weg entspricht der Hubhöhe, die dabei überwunden wird. Damit ergibt sich die Hubarbeit zu

Hubarbeit = Gewichtskraft × Hubhöhe

$$W = F_G \cdot h = m \cdot g \cdot h \qquad (8.2)$$

Beispiel 8.1
Ein Verflüssiger mit einem Gewicht von 830 kg wird von einem Kran auf ein Dach in 26 m Höhe gehoben. Welche Hubarbeit (kJ) verrichtet der Kran?

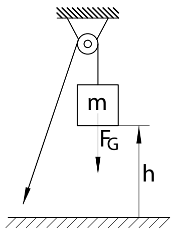
Lösung:
Geg.: m = 830 kg, h = 26 m

$$W = F_G \cdot h = m \cdot g \cdot h = 830\,\text{kg} \cdot 9{,}81\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 26\,\text{m} = 211\,699{,}8\,\text{J} = \underline{\underline{211{,}7\,\text{kJ}}}$$

8.3 Energie, Satz von der Erhaltung der Energie

Betrachten wir noch einmal den Fall der Hubarbeit: Ein Gewicht der Masse m wird über eine Seilrolle auf die Höhe h gezogen.

Dem Gewicht wird dabei die Hubarbeit $W_{Hub} = m \cdot g \cdot h$ zugeführt. Wo ist diese Arbeit geblieben?



Das Gewicht hat sich äußerlich nicht verändert, aber es hat eine andere Lage als vorher und kann jetzt selbst Arbeit verrichten, wenn es wieder auf die Ausgangshöhe absinkt. Es kann z. B. ein anderes Gewicht hochziehen, ein Uhrwerk antreiben (Standuhr) oder ein Geschoss beschleunigen (antike Schleuder). Im Fall der Schleuder würde die potenzielle Energie des Gewichts in Bewegungsenergie des Geschosses umgewandelt. Man bezeichnet die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten, als **Energie**. In diesem Fall hat das Gewicht durch die zugeführte Hubarbeit an Energie der Lage oder potenzieller Energie E_{pot} gewonnen.

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h \qquad (8.3)$$

Energie ist die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten. Sie ist in einem physikalischen System gespeicherte Arbeit.

Das Formelzeichen der Energie ist E, die Einheit genau so wie die der Arbeit, also Joule.

In der Mechanik tritt neben der potenziellen Energie hauptsächlich noch die schon oben erwähnte Bewegungsenergie auf. Sie wird auch kinetische Energie genannt:

$$E_{kin} = \frac{m}{2} \cdot w^2 \qquad (8.4)$$

m Masse in kg
w[1)] Geschwindigkeit in m/s

Es ist ein grundlegendes Naturgesetz, dass Energie weder erzeugt noch vernichtet werden kann. Diese Tatsache wird im **Energieerhaltungssatz** formuliert:

Energie kann weder erzeugt noch vernichtet, sondern nur von einer Energieform in eine andere umgewandelt werden.

Mit dem Satz von der Erhaltung der Energie lassen sich über eine Energiebilanz bei vielen Vorgängen Aussagen über das Ergebnis machen, ohne dass man über Zwischenzustände genau Bescheid wissen muss:

Beispiel 8.2
Ein Körper der Masse m = 10 kg wird auf die Höhe h = 10 m gehoben. Welche maximale Geschwindigkeit erreicht der Körper beim Herabfallen aus der gleichen Höhe (Luftwiderstand vernachlässigt)?

Lösung:
Geg.: m = 10 kg, h = 10 m
Beim Fallen wird die Lageenergie in Bewegungsenergie umgewandelt. Wenn der Körper um die Höhe h gefallen ist, entspricht seine Bewegungsenergie der abgegebenen Lageenergie:

$$E_{pot} = E_{kin}$$

$$m \cdot g \cdot h = \frac{m}{2} \cdot w^2 \quad |: m$$

$$g \cdot h = \frac{w^2}{2} \text{ daraus folgt durch Umstellen:}$$

1) Im Bereich der Kältetechnik wird für die Geschwindigkeit das Formelzeichen w verwendet, weil das sonst übliche kleine v für das spezifische Volumen reserviert ist.

$$\begin{aligned} w &= \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \\ &= \sqrt{2 \cdot 9{,}81\,m/s^2 \cdot 10\,m} \\ &= \underline{\underline{14{,}0\,m/s}} \end{aligned}$$

Die Rechnung zeigt, dass die Fallgeschwindigkeit unabhängig von der Masse ist (wenn der Luftwiderstand vernachlässigt wird).

8.4 Leistung

Welche Arbeit eine Maschine verrichtet, hängt von der Größe der wirksamen Kraft und dem zugehörigen Weg ab. Für wirtschaftliche Betrachtungen ist aber vor allem maßgeblich, in welcher Zeit eine bestimmte Arbeit verrichtet wird. Ein Kran, der einen Verflüssiger auf das Dach eines Supermarkts hebt und dafür 3 Stunden benötigt, ist wenig hilfreich. In der Physik führt man deshalb die Leistung ein, als ein Maß dafür, in welcher Zeit eine Arbeit verrichtet wird. Je kürzer die benötigte Zeit desto größer ist die Leistung:

Die (mittlere) Leistung innerhalb eines Zeitintervalls ist der Quotient aus verrichteter Arbeit W und dafür benötigter Zeit τ [1)]:

$$\text{Leistung} = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Zeit}} \quad \text{bzw.} \quad P = \frac{W}{\tau} \tag{8.5}$$

Die SI-Einheit der Leistung ist das Watt. Sie ergibt sich als Quotient aus der Einheit der Arbeit (Joule) und der Einheit der Zeit (Sekunde) zu:

$$1\,\frac{J}{s} = 1\,\frac{Nm}{s} = 1\,W$$

Die Einheit der Leistung ist zu Ehren des britischen Ingenieurs James Watt (1736 – 1819), der 1765 die erste brauchbare Dampfmaschine entwickelte, benannt worden.

Weitere Einheiten sind:
- Kilowatt (kW) 1 kW = 1000 W
- Megawatt (MW) 1 MW = 1000 kW = 1 000 000 W

1) Im Bereich der Kältetechnik wird für die Zeit das Formelzeichen τ (Tau) verwendet, weil das sonst übliche kleine t für die Celsius-Temperatur reserviert ist.

18 Kältebedarfsberechnung – Kühllast

Die Ermittlung des Kältebedarfs (oder der Kühllast) ist die Voraussetzung für eine exakte Auslegung der Kälteanlage. Dazu werden sämtliche Wärmeströme, die in den gekühlten Raum gelangen, addiert. Dabei wird üblicherweise in Kilowattstunden pro Tag (d) gerechnet, als Einheit des Wärmestroms folglich kWh/d verwendet bzw. in diese Einheit umgerechnet. Zu unterscheiden sind äußere und innere Lastanteile. Ihre Berechnung erfolgt im Wesentlichen mit den in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Gleichungen oder Abwandlungen derselben.

18.1 Äußere Lastanteile

1. Wärmestrom durch Einstrahlung $\dot{Q}_E$

$$\dot{Q}_E = k \cdot A \cdot \Delta T \text{ in W} \qquad (18.1)$$

$$1\,\text{W} = \frac{1}{1000}\,\text{kW},\ 1\,\text{kW} = \frac{24\,\text{kWh}}{\text{d}} \Rightarrow \mathbf{1\,W = \frac{24}{1000}\,\frac{kWh}{d}}$$

Dieser auch Transmissionswärme genannte Wärmestrom ist ggf. für Wände, Türen, Fußboden und Decke eines Kühlraums getrennt zu bestimmen, weil unterschiedliche k-Werte und Temperaturdifferenzen vorliegen können (vgl. Kapitel 16.5).

2. Wärmestrom durch Luftwechsel $\dot{Q}_{Lw}$

$$\dot{Q}_{Lw} = \dot{m}_L \cdot \Delta h \text{ in } \frac{\text{kJ}}{\text{d}} \qquad (18.2)$$

$\dot{m}_L$ Massenstrom der Erneuerungsluft in kg/d

Δh Enthalpiedifferenz der Luft in kJ/kg

$$\mathbf{1\,\frac{kJ}{d} = \frac{1}{3600}\,\frac{kWh}{d}}, \textbf{ denn } \mathbf{1\,kWh = 3600\,kJ}$$

Einzelheiten zu diesem Wärmestrom wurden in Kapitel 17.5 „Erneuerung der Kühlraumluft – Luftwechsel“ behandelt.

18.2 Innere Lastanteile

1. Wärmestrom des Kühlguts $\dot{Q}_{KG}$

Je nachdem, ob eine Ware nur abgekühlt oder gefroren und unterkühlt wird, kommen folgende Wärmemengen in Betracht (vgl. Kapitel 15.3 „Wärmearten" und Beispiel 15.2).

$$Q_{Abk} = m \cdot c_v \cdot \Delta T_{Abk}$$

$$Q_{Gefr} = m \cdot q$$

$$Q_{Uk} = m \cdot c_n \cdot \Delta T_{Uk}$$

$$Q_{KG} = Q_{Abk} + Q_{Gefr} + Q_{Uk}$$

m	Masse Kühlgut in 24 h in kg
c_v	spezifische Wärmekapazität vor dem Gefrieren in kJ/kgK
c_n	spezifische Wärmekapazität nach dem Gefrieren in kJ/kgK
q	Erstarrungsenthalpie des Kühlguts in kJ/kg
ΔT_{Abk}	in Temperaturdifferenz Abkühlung in K
ΔT_{Uk}	in Temperaturdifferenz Unterkühlung in K

Mit der so errechneten Wärmemenge wird der Kühlgutwärmestrom berechnet:

$$\dot{Q}_{KG} = \frac{Q_{KG}}{1\,d} \text{ in } \frac{kJ}{d} \qquad (18.3)$$

$$\mathbf{1\,\frac{kJ}{d} = \frac{1}{3600}\,\frac{kWh}{d}}\text{**, denn 1 kWh = 3600 kJ**}$$

2. Atmungswärmestrom $\dot{Q}_{Atm}$

Die Kühllagerung pflanzlicher Produkte verlangsamt deren Stoffwechselprozesse und die damit verbundene Wärmentwicklung, bringt sie jedoch nicht zum Stillstand. Diese so genannte Atmungswärme ist als Kühllast zu berücksichtigen.

$$\dot{Q}_{Atm} = m \cdot \dot{q}_A \text{ in } \frac{kJ}{d} \qquad (18.4)$$

m	Masse Obst/Gemüse in kg
$\dot{q}_{Atm}$	spezifischer Atmungswärmestrom in kJ/kg · d

3. Wärmestrom für Abtauung $\dot{Q}_{Abt}$

Je nach Feuchteabgabe des Lagerguts, Luftwechsel und Verdampfungstemperatur kommt es zur Reif- bzw. Eisbildung am Verdampfer, wodurch der Wärmeübergang behindert wird. Die deswegen erforderliche regelmäßige Abtauung stellt einen zeitabhängigen Lastanteil dar.

$$\dot{Q}_{Abt} = P \cdot \tau \text{ in } \frac{kWh}{d} \qquad (18.5)$$

P	elektrische Heizleistung in kW
τ	Abtauzeit in h/d

4. Personenwärmestrom $\dot{Q}_P$

Personen geben abhängig von Tätigkeit und Umgebungstemperatur Wärme an die Umgebung ab. Personenaufenthalt im Kühlraum stellt daher einen zeitabhängigen Lastanteil dar.

$$\dot{Q}_P = n \cdot \dot{q}_P \cdot \tau \text{ in } \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \tag{18.6}$$

n Personenanzahl
$\dot{q}_P$ spezifischer Personenwärmestrom in kW
τ Aufenthaltsdauer in h/d

Der Personenwärmestrom $\dot{Q}_P$ ist auch eine innere Kühllast bei der Komfortklimatisierung.

5. Wärmestrom der Beleuchtung $\dot{Q}_{Bel}$

Die elektrische Anschlussleistung der Beleuchtungsmittel wird vollständig in Wärme umgewandelt und stellt einen zeitabhängigen Lastanteil dar. Wenn die elektrische Leistung der Beleuchtungsquellen bekannt ist, gilt:

$$\dot{Q}_{Bel} = P \cdot \tau \text{ in } \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \tag{18.7}$$

P elektrische Leistung der Beleuchtungsquellen kW
τ Beleuchtungszeit h/d

Wenn der Wärmestrom der Beleuchtung $\dot{Q}_{Bel}$ über die flächenbezogene Wärmelast bestimmt wird, gilt:

$$\dot{Q}_{Bel} = A \cdot p_{Bel} \cdot \tau \text{ in } \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \tag{18.8}$$

A Fläche des Kühlraums in m^2
p_{Bel} flächenbezogene Leistung der Beleuchtungsquellen in kW/m^2
τ Beleuchtungszeit in h/d

Der Beleuchtungswärmestrom ist auch eine innere Kühllast bei der Komfortklimatisierung.

6. Wärmestrom der Luftumwälzung $\dot{Q}_{Ven}$

Außer bei der sogenannten stillen Kühlung wird die Luft im Kühlraum durch die Ventilatoren der Verdampfer bewegt. Die elektrische Anschlussleistung der Lüftermotoren wird vollständig in Wärme umgewandelt und stellt einen zeitabhängigen Lastanteil dar.

$$\dot{Q}_{Ven} = P \cdot \tau \text{ in } \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \tag{18.9}$$

P elektrische Leistung Lüftermotoren in kW
τ Laufzeit Lüfter in h/d

7. Wärmestrom der Hilfsmaschinen $\dot{Q}_H$

In Kühlräumen können Hilfsmaschinen, z. B. Flurförderzeuge, Regalbediengeräte, Fleischzerlegemaschinen usw. arbeiten. Das Wärmeäquivalent ihrer Antriebsleistung stellt einen zeitabhängigen Lastanteil dar.

$$\dot{Q}_H = P \cdot \tau \text{ in } \frac{kWh}{d} \qquad (18.10)$$

P Antriebsleistung Hilfsmaschinen kW
τ Laufzeit h/d

Büromaschinen u. Ä. bilden ggf. eine innere Kühllast in der Komfortklimatisierung.

18.3 Verdampferleistung $\dot{Q}_{0Verda}$

Der ermittelte Gesamtwärmestrom $\dot{Q}_{Kühllast}$ in Kilowattstunden pro Tag muss durch eine Kälteanlage abgeführt werden, die mit einer Laufzeit von 16–20 h/d ausgelegt wird, damit eine Zeitreserve für die Abtauung bzw. eine Leistungsreserve bleibt. Damit ergibt sich die Verdampferleistung in kW zu

$$\dot{Q}_{0Verda} = \frac{\dot{Q}_{Kühllast}}{\tau} \qquad (18.11)$$

$\dot{Q}_{Kühllast}$ Kühllast in kWh/d
τ Laufzeit der Anlage in h/d

Beispiel 18.1

Für einen Zerlegeraum für Fleisch gelten folgende Werte:

- Abmessungen: 10 m Länge, 6 m Breite und 3 m Höhe,
- Raumtemperatur 7 °C, Umgebungstemperatur 25 °C, Bodentemperatur 20 °C,
- Wärmedurchgangszahl für alle Flächen: $k = 0{,}42\ W/m^2K$,
- Belegung: 6 Personen, mit 240 W spezifischem Personenwärmestrom,
- Belegungszeit: Zweischichtbetrieb je 8 Stunden,
- Maschinen: Anschlusswert 20 kW, Gleichzeitigkeitsfaktor 0,7 (laufen zu 70 % der Arbeitszeit, Rest Handarbeit),
- Beleuchtung: $10\ W/m^2$,
- Luftwechsel: $30\ m^3/h$ Person,
- Luftzustand außen 25 °C / 60 %, innen 7 °C / 80 %,
- Einbringtemperatur der Rinderviertel: 7 °C
- Leistung der Ventilatoren der Luftkühler: 1200 W. Da die Abtauung über Umluft erfolgt, wird ihre Laufzeit mit 20 h/d angenommen.

Berechnen Sie den Wärmestrom durch

a) Einstrahlung
b) Luftwechsel
c) das Kühlgut
d) Personen
e) Maschinen
f) Beleuchtung
g) Ventilatoren