

# Medizinische Biophysik

4

Struktur der Materie

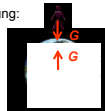


1

## Kraftgesetze (Beispiele):

- Gravitationsgesetz  $F = \gamma \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$  ( $\gamma$ : Gravitationskonstante)

Anwendung:



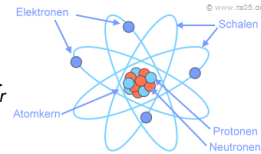
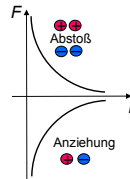
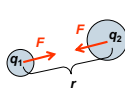
schwerkraft oder Gewichtskraft (G):

$$G = F = \gamma \frac{m_{\text{Erde}} \cdot m}{r^2} = mg$$

= Beschleunigung des freien Falles (9.81 m/s<sup>2</sup>)



- Coulomb-Gesetz  $F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$



- Starke Wechselwirkung (Kernkraft): anziehende Wechselwirkung zwischen den Nukleonen im Kern; stark; kurze Reichweite

3

## I. Atomare, molekulare Wechselwirkungen

### 1. Im Allgemeinen über Wechselwirkungen

#### a) Kraft

Wechselwirkung!!

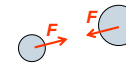
Formänderung (Deformation)

Bewegungsänderung (Beschleunigung, a)

$a \Rightarrow F$

Kraft (F):  $F = m \cdot a$   $\left( \text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \text{N (Newton)} \right)$

- 2. newtonsches Gesetz (Grundgleichung der Mechanik):  $\sum F_i = m \cdot a$   $F \Rightarrow a$
- 1. newtonsches Gesetz (Trägheitsprinzip):  $\sum F_i = 0 \Rightarrow a = 0 \Rightarrow v = \text{konstant}$  (Z.B.:  $v = 0$ )
- 3. newtonsches Gesetz (actio-reactio): „Gleichgewicht“

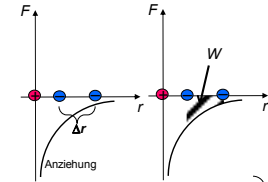
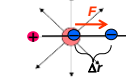


2

#### b) Arbeit und Energie

- Arbeit(W):  $W = F \cdot \Delta r$  (Nm = J (Joule))

Zum Beispiel:



Weitere Maßeinheiten:  
1 cal = 4,19 J  
1 eV = 1,6 · 10<sup>-19</sup> J

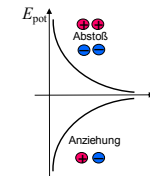
Da hier F nicht konstant ist:

$$W_{r \rightarrow \infty} = \int_r^{\infty} F dr = \int_r^{\infty} k \frac{q_1 q_2}{r^2} dr = -k q_1 q_2 \left[ \frac{1}{r} \right]_r^{\infty} = -k q_1 q_2 \left( \frac{1}{\infty} - \frac{1}{r} \right) = k \frac{q_1 q_2}{r}$$

- Energie(E): die im System gespeicherte Arbeit( J)

- elektrische potenzielle Energie (E<sub>pot</sub>):

$$E_{\text{pot}} = W_{r \rightarrow \infty} \quad E_{\text{pot}} = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r}$$

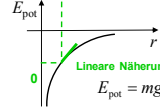


4

- o Lage- (potenzielle) Energie ( $E_{\text{pot}}$ ):  $E_{\text{pot}} = -\gamma \frac{m_1 \cdot m_2}{r}$

Potenzielle Energie im Gravitationsfeld der Erde:

$$E_{\text{pot}} = -\gamma \frac{m_{\text{Erde}} \cdot m}{r}$$



- o Bewegungs- (kinetische) Energie ( $E_{\text{kin}}$ ):  $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2$

### c) Energieerhaltung $\sum E_i = \text{konstant}$



R. Mayer  
(1814-1878)  
Schiffarzt  
und Physiker

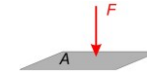
### d) Leistung

- Leistung ( $P$ ):  $P = \frac{W}{t}$   $\left( \frac{J}{s} = W \text{ (Watt)} \right)$

Weitere Maßeinheit: 1 PS = 750 W

### e) Druck

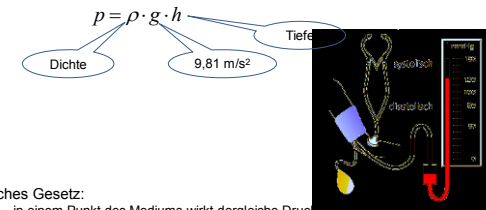
- Druck ( $p$ ):  $p = \frac{F}{A}$   $\left( \frac{N}{m^2} = Pa \text{ (Pascal)} \right)$



Weitere Maßeinheiten:  
1 bar = 100 kPa  
1 mmHg = 133 Pa

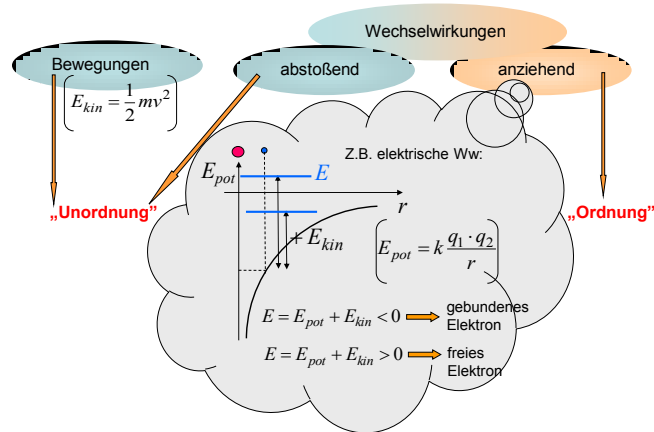
Normaldruck = 101 kPa

- o hydrostatischer Druck (Schweredruck)

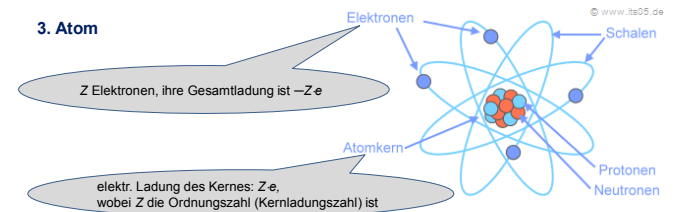


pascalsches Gesetz:  
in einem Punkt des Mediums wirkt dergleiche Druck in jeder Richtung

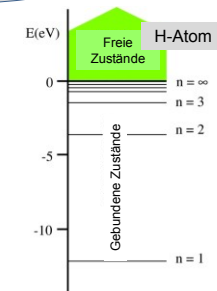
## 2. Entstehung von stabilen Körpersystemen - allgemeine Prinzipien



## 3. Atom

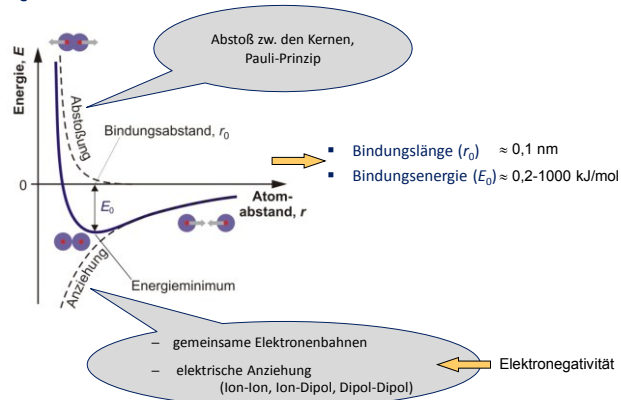


- Energieminimum
- Diskrete Energiezustände
- Pauli-Prinzip



#### 4. Atomare, molekulare Wechselwirkungen

##### a) Energiekurve

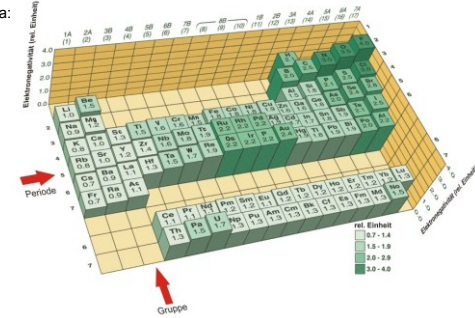


9

##### b) Elektronegativität

- Ionisationsenergie ( $I$ ): Zur Entfernung des äußersten Elektrons benötigte Energie (eV/Atom; kJ/mol)
- Elektronaffinität ( $A$ ): Bei der Aufnahme eines Elektrons freigesetzte Energie (eV/Atom; kJ/mol)
- Elektronegativität =  $|I| + |A|$   $\rightarrow$  Bindungstypen

Pauling-Skala:

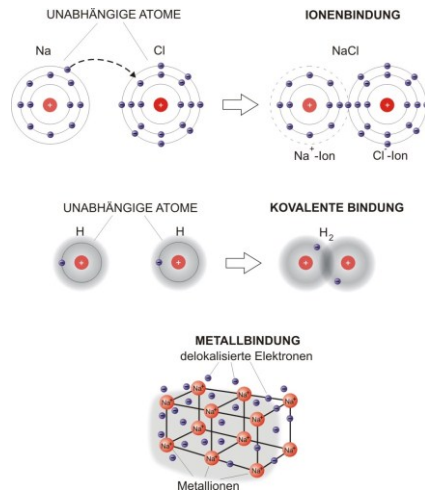


10

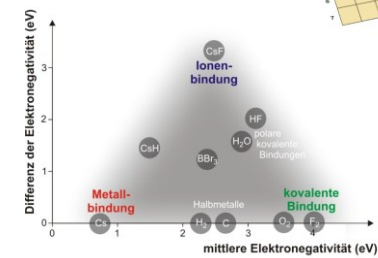
##### c) Primäre Bindungen

- Ionenbindung
- Kovalente Bindung
- Metallbindung

$\approx 100-1000$  kJ/mol



11



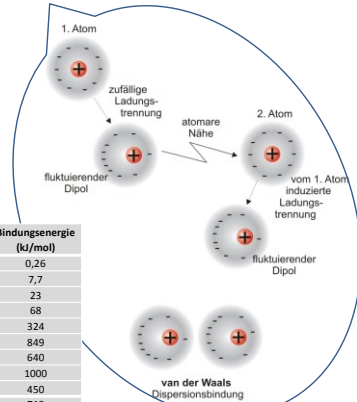
12

#### d) Sekundäre Bindungen

- van der Waals (Orientierung, Induktion, Dispersion)
- H-Brückenbindung

≈ 0,2-50 kJ/mol

Bindungsstärke	Bindungstyp	Material	Bindungsenergie (kJ/mol)
schwach (sekundär)	van der Waals	Neon (Ne)	0,26
		Argon (Ar)	7,7
	H-Bindung	Wasser (H <sub>2</sub> O)	23
stark (primär)	Metallbindung	Quecksilber (Hg)	68
		Aluminium (Al)	324
		Wolfram (W)	849
	Ionenbindung	NaCl	640
		MgO	1000
	kovalente Bindung	Silizium (Si)	450
		Kohlenstoff (C, Diamant)	713

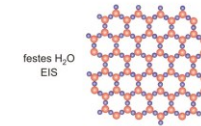
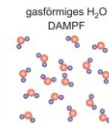
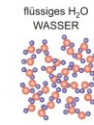


13

## II. Aggregatzustände

### 1. Allgemeine Beschreibung

	Fest	Flüssig	Gasförmig
Eigenvolumen	+	+	-
Eigenform	+	-	-



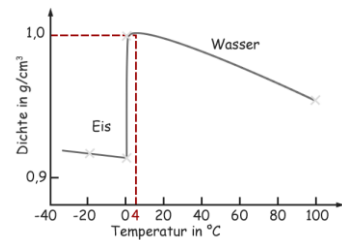
14

▪ Dichte ( $\rho$ ):  $\rho = \frac{m}{V} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$

Temperaturabhängigkeit der Dichte -  $\rho(T)$ :

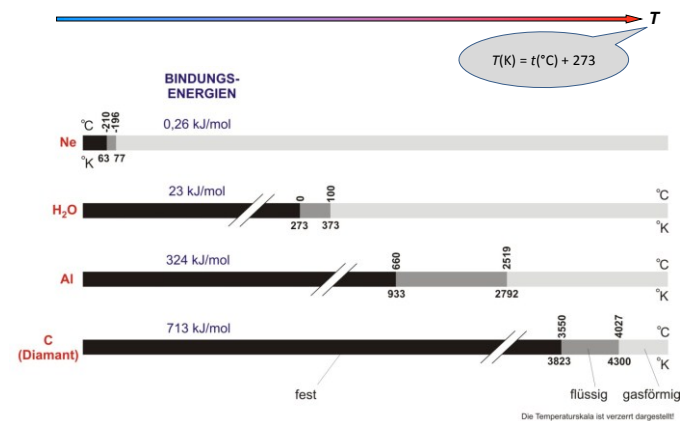


Stoff	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
Wasser	1
Fettgewebe	≈ 0,9
Blut	≈ 1,05
Knochen	≈ 1,8
Körpergewebe (Mittelwert)	≈ 1,04



15

Anziehende Wechselwirkungen  $\leftrightarrow$  Abstoßende Wechselwirkungen + Bewegungen



16

## 2. Gasförmiger Aggregatzustand

### a) Makroskopische Beschreibung:

- Kein Eigenvolumen und keine Eigenform
- Isotrop
- Messbare Größen:  $p, V, \nu, T$



allgemeine Gaskonstante  
 $R = 8,31 \text{ J/(molK)}$

$$pV = \nu RT \quad (\text{für ideale Gase})$$

### b) Mikroskopische Beschreibung:

- Ungeordnet
- Starke und fast freie Bewegungen



### c) Kinetische Deutung der Temperatur:

„Bewegungsstärke“  $\sim p \sim T$ :

durchschnittliche kinetische Energie eines Teilchens

$$\overline{E}_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \overline{v}^2 = \frac{3}{2} kT$$

Boltzmann-Konstante  
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

$kT = \text{thermische Energie}$

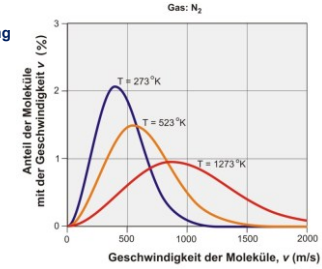
Masse eines Teilchens

Geschwindigkeit des Teilchens

Temperatur

17

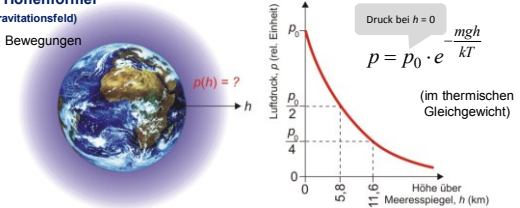
## d) Maxwell-Boltzmann-Verteilung



### e) Barometrische Höhenformel

(Gas im Gravitationsfeld)

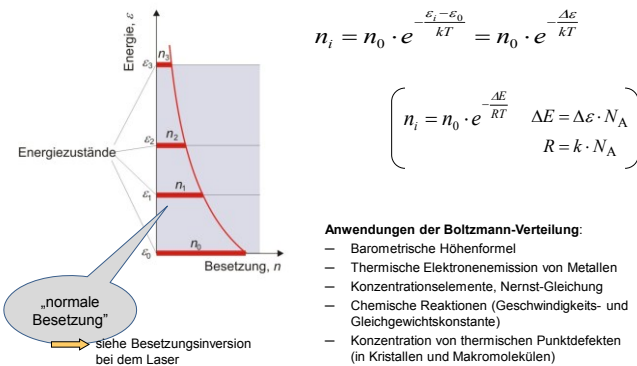
Gravitation  $\longleftrightarrow$  Bewegungen



18

## f) Boltzmann-Verteilung

Die Verteilung der Teilchen auf die Energiezustände im thermischen Gleichgewicht ( $T = \text{konstant}$ )



$$n_i = n_0 \cdot e^{-\frac{\epsilon_i - \epsilon_0}{kT}} = n_0 \cdot e^{-\frac{\Delta \epsilon}{kT}}$$

$$\left[ n_i = n_0 \cdot e^{-\frac{\Delta \epsilon}{RT}} \quad \Delta E = \Delta \epsilon \cdot N_A \right]$$

$$R = k \cdot N_A$$

### Anwendungen der Boltzmann-Verteilung:

- Barometrische Höhenformel
- Thermische Elektronenemission von Metallen
- Konzentrationselemente, Nernst-Gleichung
- Chemische Reaktionen (Geschwindigkeits- und Gleichgewichtskonstante)
- Konzentration von thermischen Punktdefekten (in Kristallen und Makromolekülen)
- Elektrische Leitfähigkeit von Halbleitern
- ...

19

## 2. Flüssiger Aggregatzustand

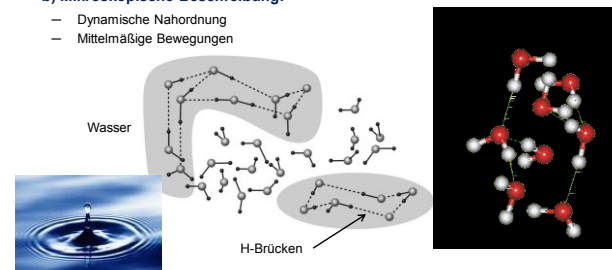
### a) Makroskopische Beschreibung:

- Eigenvolumen aber keine Eigenform
- Isotrop
- Viskosität (s. später bei Transportprozessen)



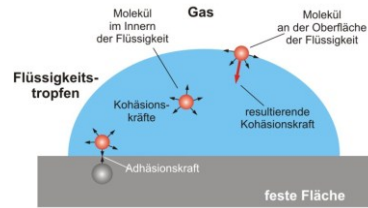
### b) Mikroskopische Beschreibung:

- Dynamische Nahordnung
- Mittelmäßige Bewegungen



20

### c) Oberflächenspannung



- Oberflächenspannung, -energie ( $\sigma$ ):

Zur Flächenvergrößerung von  $\Delta A$  nötige Energie

$$\sigma = \frac{\Delta E}{\Delta A} \quad \left( \frac{\text{J}}{\text{m}^2} = \frac{\text{N}}{\text{m}} \right)$$

Oberflächenvergrößerung

Stoff	$\sigma \text{ (J/m}^2\text{)}^*$
Wasser	0,073
Blut	0,06
Speichel	0,05
Alkohol	0,023
Quecksilber	0,484

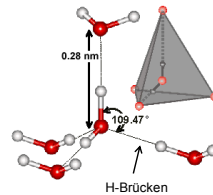
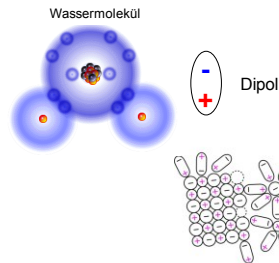
Ein Maß für „Marziemus“

\* In Bezug auf Luft, 20°C

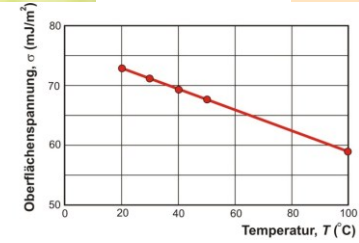
21

### d) Günstige Eigenschaften des Wassers:

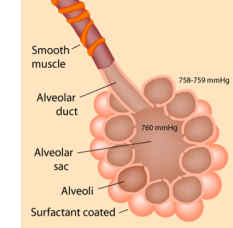
- hohe spezifische Wärmekapazität, Schmelzwärme und Verdampfungswärme
- hohe Oberflächenspannung
- gutes Lösungsmittel für viele Stoffe



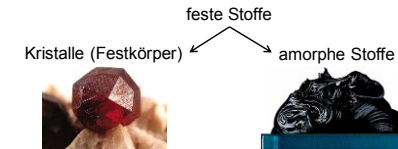
23



Die hohe Oberflächenspannung des Wassers kann Probleme verursachen!



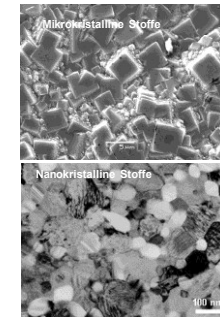
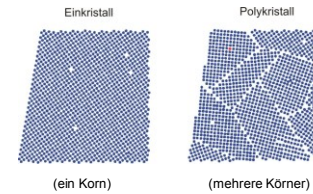
22



### 4. Fester Aggregatzustand - Kristalle

#### a) Makroskopische Beschreibung:

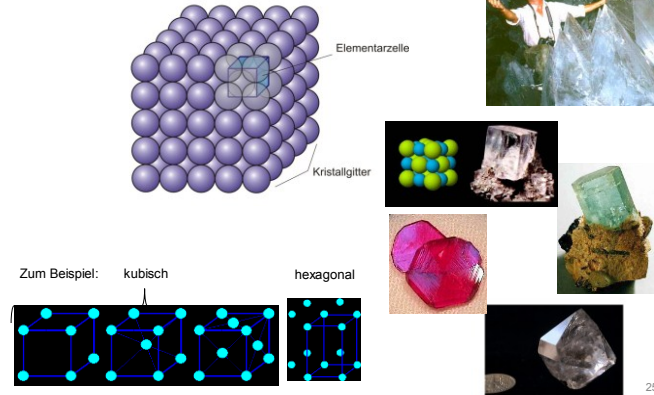
- Eigenvolumen, Eigenform
- Einkristalle: anisotrop; Polykristalle: isotrop



24

### b) Mikroskopische Beschreibung:

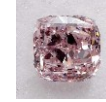
- Fernordnung
- Periodizität – Kristallgitter
- Schwache Bewegungen



25

### c) Kristalltypen:

- Atomkristall (kovalente Bindung)
- Ionenkristall (Ionenbindung)



Diamant



Salz

- Metalkristall (Metallbindung)



Gold

- Molekulkristall (sekundäre Bindung)



Eis

Bindungsenergie ( $E_0$ )  $\rightarrow$  Eigenschaften, wie Schmelzpunkt, Schmelzwärme, Steifigkeit, Wärmeausdehnungskoeffizient, ...



26

### Rechenaufgaben: ■ Praktikumsbuch 1 und 7

- Peter zieht einen mit Wasser aufgefüllten Eimer ( $m = 12 \text{ kg}$ ) aus einem 12 m tiefen Brunnen gleichmäßig mit einer konstanten Geschwindigkeit von 0,5 m/s auf. Wie groß sind a) die Arbeit, b) die Leistung von Peter?
- Die durchschnittliche Leistung des menschlichen Herzens ist 6 W. Welche Arbeit verrichtet das Herz im Laufe eines Lebens?
- Bei Zimmertemperatur fliegen die  $\text{O}_2$ -Moleküle in der Luft mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von etwa 400 m/s. Wie groß sind a) die durchschnittliche kinetische Energie; b) die Lageenergie eines  $\text{O}_2$ -Moleküls bei einer Höhe von 8000 m in eV-Einheit?
- Beim Kauen treten relativ große Kräfte, wie etwa 100 N auf. Setzen wir voraus, dass man auf einen winzigen harten Kern beißt und so diese Druckkraft auf eine kleine Fläche von 1 mm<sup>2</sup> ausgeübt wird. Welcher Druck entsteht dabei?
- Ein Druck von 200 kPa wirkt auf das Trommelfell (Fläche etwa 55 mm<sup>2</sup>) eines Tauchers. Welche Druckkraft belastet dabei das Trommelfell?
- Ein Gefäß enthält 5 kg Wasser. Um wie viel cm<sup>3</sup>, und um wie viel % erhöht sich das Volumen des Wassers beim Frieren? (Dichtewerte sind bei 0°C: Wasser 1 g/cm<sup>3</sup> und Eis 0,92 g/cm<sup>3</sup>)
- Bei einer Einatmung atmet man 0,5 l Luft ein. Wie viel Mol heißt das, wenn der Luftdruck 101 kPa und die Temperatur 20°C betragen. (In der Rechnung kann die Luft als ideales Gas betrachtet werden.)
- Berechnen Sie die mittlere Geschwindigkeit von  $\text{N}_2$  Molekülen und lesen Sie die Modalwerte für die Geschwindigkeit von der Abbildung auf Folie 18 bei einer Temperatur von a) 273 K; b) 1273 K.
- In der Luft schwebt ein kugelförmiger Wassertropfen des Durchmessers 10 mm. Um wie viel Mikrojoule würde die Oberflächenenergie zunehmen, wenn die Wassermenge des Tropfens in 10 gleich kleinen kugelförmigen Tropfen verteilt wäre?

27

### Lösungen:

- a) 1410 J; b) 58,9 W
- 15,1 GJ (mit 80 Jahren berechnet)
- a) 26,7 meV; b) 26,2 meV
- 100 MPa (also etwa 1000fache des Normaldruckes)
- 11 N
- Um 435 cm<sup>3</sup>, d. h. um 8,7%
- 0,21 mol
- a) Mittelwert: 493 m/s, Modalwert:  $\approx 400 \text{ m/s}$ ; b) Mittelwert: 1060 m/s, Modalwert:  $\approx 800 \text{ m/s}$
- 26,5  $\mu\text{J}$

28