

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zustandsänderungen</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation	1
1.2	Wie beschreibt die Thermodynamik die Knallgasreaktion?	1
1.3	Wie beschreiben wir den Zustand eines Systems?	3
1.4	Wie viele Angaben benötigen wir zur Beschreibung eines Systems?	4
1.5	Wie beschreiben wir einen Prozess mit thermodynamischen Größen?	5
1.6	Wie verändert sich die Energie während eines Prozesses?	6
1.7	Wie verändert sich das Chaos (Entropie) während eines Prozesses?	7
1.8	Wie verändert sich die Instabilität während eines Prozesses?	8
1.9	Welches Vorzeichen haben die Prozessgrößen Wärme und Arbeit?	9
1.10	Wie messen wir Wärme?	9
1.11	Wie messen wir Arbeit?	11
1.12	Wie beschreiben wir einen Prozess thermodynamisch?	12
1.13	Zusammenfassung	13
1.14	Testfragen	14
1.15	Übungsaufgaben	15
<b>2</b>	<b>Gase</b>	<b>17</b>
2.1	Motivation	17
2.2	Wo finden wir „ideale“ und „reale“ Gase im Zustandsdiagramm?	17
2.3	Wie verhalten sich Gase bei Volumenänderung?	19
2.4	Wie verhalten sich Gase bei Temperaturänderung?	20
2.5	Wie verhalten sich Gase bei Stoffmengenänderung?	21
2.6	Wie beschreiben wir den Zustand eines idealen Gases?	21
2.7	Wie beschreiben wir eine Gasmischung?	22
2.8	Welche Energie besitzen Gasteilchen?	23
2.9	Welche Geschwindigkeit besitzen Gasteilchen?	24
2.10	Wie häufig kollidieren Gasteilchen?	25

2.11	Welche Distanz legen Gasteilchen zwischen zwei Zusammenstößen zurück? . . . . .	26
2.12	Wie beschreiben wir Abweichungen vom idealen Verhalten? . . . . .	26
2.13	Was passiert bei der Kompression eines Gases oberhalb seiner kritischen Temperatur? . . . . .	28
2.14	Was passiert bei der Kompression eines Gases unterhalb seiner kritischen Temperatur? . . . . .	28
2.15	Was passiert bei der Annäherung an den kritischen Punkt? . . . .	29
2.16	Zusammenfassung . . . . .	30
2.17	Testfragen. . . . .	31
2.18	Übungsaufgaben. . . . .	33
<b>3</b>	<b>Thermisches Gleichgewicht . . . . .</b>	<b>35</b>
3.1	Motivation . . . . .	35
3.2	Wo liegt das Gleichgewicht und wie weit sind wir davon entfernt? . . . . .	35
3.3	Wie schnell geht ein System durch Konduktion ins Gleichgewicht? . . . . .	37
3.4	Wie schnell geht konduktiver Wärmetransport? . . . . .	38
3.5	Wie ändert sich das Temperaturprofil? . . . . .	39
3.6	Wie gut leitet ein (ruhendes) Gas die Wärme? . . . . .	40
3.7	Wie schnell geht Diffusion? . . . . .	40
3.8	Wie ändert sich das Konzentrationsprofil? . . . . .	41
3.9	Wie schnell diffundieren Gase? . . . . .	42
3.10	Wie verändern sich Energie und Entropie beim Wärmetransport? . . . . .	42
3.11	Was ist die Innere Energie und was fordert der Erste Hauptsatz der Thermodynamik? . . . . .	44
3.12	Was ist die Entropie und was fordert der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik? . . . . .	45
3.13	Wie viel Wärme können wir in Arbeit umwandeln? . . . . .	46
3.14	Wie berechnen wir den Wirkungsgrad einer CARNOT-Maschine aus den Hauptsätzen? . . . . .	48
3.15	Zusammenfassung . . . . .	49
3.16	Testfragen. . . . .	50
3.17	Übungsaufgaben. . . . .	51
<b>4</b>	<b>Affinität . . . . .</b>	<b>53</b>
4.1	Motivation . . . . .	53
4.2	Wie viel Innere Energie steckt in einem System? . . . . .	53
4.3	Wie können wir die Innere Energie messen? . . . . .	55
4.4	Wie machen wir aus der isobaren Wärme eine Zustandsgröße? . . . . .	55
4.5	Was ist Enthalpie? . . . . .	56
4.6	Wann verändert sich die Enthalpie? . . . . .	57

4.7	Ist die Enthalpieänderung vom Weg abhängig? . . . . .	57
4.8	Wie viel Enthalpie steckt in einem Molekül bzw. in einer chemischen Bindung? . . . . .	58
4.9	Wie ändert sich die Enthalpie bei einer Reaktion? . . . . .	59
4.10	Was ist die Entropie? . . . . .	60
4.11	Wie können wir die Entropie messen? . . . . .	61
4.12	Wann ändert sich die Entropie? . . . . .	62
4.13	Wie ändert sich die Entropie bei einer Reaktion? . . . . .	62
4.14	Wie erhalten wir aus den Hauptsätzen die freie Enthalpie als Maß für die Affinität? . . . . .	63
4.15	Wann ändert sich die Freie Enthalpie? . . . . .	64
4.16	Wie ändert sich die Freie Enthalpie während einer Reaktion? . . . . .	65
4.17	Wie klassifizieren wir einen Prozess thermodynamisch? . . . . .	66
4.18	Zusammenfassung . . . . .	66
4.19	Testfragen . . . . .	67
4.20	Übungsaufgaben . . . . .	68
<b>5</b>	<b>Chemisches Gleichgewicht</b> . . . . .	<b>71</b>
5.1	Motivation . . . . .	71
5.2	Wie quantifizieren wir die Lage des Gleichgewichts? . . . . .	71
5.3	Wie klassifizieren wir einen Prozess mit thermodynamischen Kenngrößen? . . . . .	71
5.4	Ist die Energie mit uns? . . . . .	73
5.5	Ist die Entropie mit uns? . . . . .	74
5.6	Wie berechnen wir den Standardantrieb (Standard-Affinität)? . . . . .	75
5.7	Ist die Freie Enthalpie mit uns? . . . . .	75
5.8	Wie formulieren wir die thermodynamische Gleichgewichtskonstante? . . . . .	76
5.9	Wie berechnen wir die thermodynamische Gleichgewichtskonstante? . . . . .	77
5.10	Wie klassifizieren wir einen Prozess in einem Entropie/ Enthalpie-Diagramm? . . . . .	78
5.11	Wie verändert die Temperatur Standardantrieb und Gleichgewichtskonstante? . . . . .	79
5.12	Wie können wir die Lage eines Gleichgewichts verändern? . . . . .	80
5.13	Wie können wir endergonische Reaktionen erzwingen? . . . . .	81
5.14	Zusammenfassung . . . . .	82
5.15	Testfragen . . . . .	83
5.16	Übungsaufgaben . . . . .	84
<b>6</b>	<b>Dampfdruck</b> . . . . .	<b>87</b>
6.1	Motivation . . . . .	87
6.2	Was ist der Dampfdruck? . . . . .	87
6.3	Wann sind zwei Phasen im Gleichgewicht? . . . . .	89

6.4	Welche Faktoren beeinflussen den Dampfdruck? . . . . .	90
6.5	Wie sieht das Dampfdruckdiagramm eines reinen Stoffes aus? . . . . .	91
6.6	Wie können wird die Dampfdruckkurve mathematisch beschreiben? . . . . .	93
6.7	Wie können wir die Dampfdruckkurve auswerten? . . . . .	93
6.8	Haben Feststoffe einen Dampfdruck? . . . . .	93
6.9	Wie können wir die Zusammensetzung einer Mischung beschreiben? . . . . .	95
6.10	Wie verteilt sich das Lösemittel zwischen Flüssigkeit und Gasphase? . . . . .	96
6.11	Wie verteilt sich der gelöste Stoff zwischen Flüssigkeit und Gasphase? . . . . .	97
6.12	Wie verteilt sich ein gelöster Stoff zwischen zwei Flüssigphasen? . . . . .	99
6.13	Zusammenfassung . . . . .	100
6.14	Testfragen. . . . .	101
6.15	Übungsaufgaben. . . . .	102
<b>7</b>	<b>Lösungen . . . . .</b>	<b>105</b>
7.1	Motivation . . . . .	105
7.2	Wie können wir die Zusammensetzung einer Mischung angeben? . . . . .	105
7.3	Wie können wir die Zusammensetzung einer Elektrolytlösung angeben? . . . . .	105
7.4	Wie gut vertragen sich zwei Komponenten A und B? . . . . .	108
7.5	Wie beschreiben wir einen Mischprozess thermodynamisch? . . . . .	109
7.6	Bei welcher Temperatur siedet eine Lösung? . . . . .	109
7.7	Bei welcher Temperatur gefriert eine Lösung? . . . . .	110
7.8	Warum wandert das Lösemittel in die konzentriertere Lösung? . . . . .	111
7.9	Wo begegnet uns der osmotische Druck in Natur und Technik? . . . . .	112
7.10	Zusammenfassung . . . . .	113
7.11	Testfragen. . . . .	114
7.12	Übungsaufgaben. . . . .	115
<b>8</b>	<b>Phasendiagramme. . . . .</b>	<b>117</b>
8.1	Motivation . . . . .	117
8.2	Wie beschreiben wir ein Zweikomponentensystem? . . . . .	117
8.3	Wie sieht das Phasendiagramm eines Zweikomponentensystems (2KS) aus? . . . . .	117
8.4	Wo finden wir im 3D-Phasendiagramm ein 2D-Siedediagramm? . . . . .	119

8.5	Bei welcher Temperatur beginnt eine flüssige Mischung zu siedен? . . . . .	120
8.6	Bei welcher Temperatur beginnt eine gasförmige Mischung zu kondensieren? . . . . .	120
8.7	Welche Zusammensetzung hat die Gasphase über einer siedenden Mischung? . . . . .	122
8.8	Welche Zusammensetzung hat die Flüssigphase, die aus einer Gasphase kondensiert? . . . . .	122
8.9	Heterogene Bereiche in Phasendiagrammen: Welche Phasen liegen in welchen Mengen vor? . . . . .	123
8.10	Wie lesen wir das Siedediagramm einer nichtidealen Mischung? . . . . .	124
8.11	Wie lesen wir das Schmelzdiagramm eines Mischkristallsystems? . . . . .	125
8.12	Wie sieht das Schmelzdiagramm aus, wenn die feste Phase eine Mischungslücke besitzt? . . . . .	125
8.13	Was ist inkongruentes Schmelzen? . . . . .	126
8.14	Wie stellen wir Dreikomponentensysteme grafisch dar? . . . . .	127
8.15	Wie verlaufen Binodalen und Konoden im GIBBS'schen Phasendreieck? . . . . .	128
8.16	Zusammenfassung . . . . .	129
8.17	Testfragen. . . . .	130
8.18	Übungsaufgaben. . . . .	131
<b>9</b>	<b>Reaktionskinetik . . . . .</b>	<b>133</b>
9.1	Motivation . . . . .	133
9.2	Hat ein Prozess einen Antrieb? . . . . .	133
9.3	Wie schnell verläuft eine Reaktion? . . . . .	134
9.4	Welche Faktoren beeinflussen die Reaktionsgeschwindigkeit? . . . . .	135
9.5	Wie können wir uns eine Reaktion am mechanischen Modell veranschaulichen? . . . . .	137
9.6	Wie sieht die Konzentrations-Zeit-Kurve bei einer Reaktion 0. Ordnung aus? . . . . .	137
9.7	Wie sieht die Konzentrations-Zeit-Kurve bei einer Reaktion 1. Ordnung aus? . . . . .	139
9.8	Wie sieht die Konzentrations-Zeit-Kurve bei einer Reaktion 2. Ordnung aus? . . . . .	140
9.9	Wie ändert sich die potenzielle Energie auf dem Weg vom Eduktmolekül zum Produktmolekül? . . . . .	141
9.10	Wie beeinflusst die Temperatur die Geschwindigkeit einer Reaktion? . . . . .	143
9.11	Wie berechnen wir die kinetischen Kenngrößen nach Arrhenius? . . . . .	144

9.12	Wie beeinflusst die Stabilität des Übergangszustands die Geschwindigkeit? . . . . .	144
9.13	Zusammenfassung zu Kapitel 9 . . . . .	145
9.14	Testfragen . . . . .	147
9.15	Übungsaufgaben . . . . .	148
<b>10</b>	<b>Reaktionsmechanismus . . . . .</b>	<b>149</b>
10.1	Motivation . . . . .	149
10.2	Welche kinetischen Kenngrößen besitzt eine einfache Reaktion $A \rightarrow B$ ? . . . . .	149
10.3	Aus welchen Elementarreaktionen besteht eine Reaktion? . . . . .	150
10.4	Welche Mechanismen können wir aus zwei Elementarreaktionen kombinieren? . . . . .	151
10.5	Wie beschreiben wir den Mechanismus einer Gleichgewichtsreaktion? . . . . .	152
10.6	Wie können wir eine Gleichgewichtsreaktion im Modell abbilden? . . . . .	153
10.7	Wie sehen die Konzentrations-Zeit-Kurven bei einer Gleichgewichtsreaktion aus? . . . . .	153
10.8	Wie ist der Zusammenhang zwischen Kinetik und Thermodynamik bei einer Gleichgewichtsreaktion? . . . . .	154
10.9	Wie beschreiben wir den Mechanismus einer Folgereaktion? . . . . .	155
10.10	Wie können wir eine Folgereaktion im Modell abbilden? . . . . .	155
10.11	Wie sehen die Konzentrations-Zeit-Kurven bei einer Folgereaktion aus? . . . . .	156
10.12	Ist das Zwischenprodukt stabil oder instabil? . . . . .	157
10.13	Wie beschreiben wir den Mechanismus einer Parallelreaktion? . . . . .	158
10.14	Wie können wir eine Parallelreaktion im Modell abbilden? . . . . .	158
10.15	Wie sehen die Konzentrations-Zeit-Kurven bei einer Parallelreaktion aus? . . . . .	158
10.16	Entsteht das kinetische oder das thermodynamische Produkt? . . . . .	160
10.17	Zusammenfassung . . . . .	161
10.18	Testfragen . . . . .	162
10.19	Übungsaufgaben . . . . .	163
<b>11</b>	<b>Leitfähigkeit . . . . .</b>	<b>165</b>
11.1	Motivation . . . . .	165
11.2	Wie funktioniert der Ladungstransport in einem Elektronenleiter? . . . . .	165
11.3	Wie funktioniert der Ladungstransport in einem Ionenleiter? . . . . .	167
11.4	Wie sieht die Struktur eines Elektrolyten aus? . . . . .	167
11.5	Wie groß ist die effektive Konzentration (Aktivität) eines Elektrolyten? . . . . .	168

11.6	Wie messen wir die elektrische Leitfähigkeit eines Elektrolyten? . . . . .	169
11.7	Wie erhalten wir aus der spezifischen Leitfähigkeit die molare Leitfähigkeit eines Elektrolyten? . . . . .	170
11.8	Wie ändert sich die molare Leitfähigkeit eines Elektrolyten beim Verdünnen? . . . . .	171
11.9	Wie können wir die Grenzleitfähigkeit eines Elektrolyten berechnen? . . . . .	172
11.10	Wie ist der Beitrag des Kations bzw. Anions zur Leitfähigkeit? . . . . .	173
11.11	Wie schnell bewegt sich ein Ion im elektrischen Feld? . . . . .	174
11.12	Zusammenfassung . . . . .	175
11.13	Testfragen. . . . .	176
11.14	Übungsaufgaben. . . . .	177
<b>12</b>	<b>Elektroden . . . . .</b>	<b>179</b>
12.1	Motivation . . . . .	179
12.2	Wie passiert beim Transport von Elektronen <i>in</i> den Elektrolyten? . . . . .	179
12.3	Wie passiert beim Transport von Elektronen <i>aus</i> dem Elektrolyten? . . . . .	181
12.4	Wie viel Stoffumsatz passiert an den Elektroden? . . . . .	181
12.5	Wie groß ist der Potenzi­alsprung an der Phasengrenze Metall/Elektrolyt? . . . . .	182
12.6	Wie hängt das Elektrodenpotenzial von der Konzentration ab? . . . . .	184
12.7	Wie nutzen wir die Spannungsreihe? . . . . .	185
12.8	Wie beschreiben wir eine Elektrode erster Art (Metall/Metallsalz)? . . . . .	185
12.9	Wie beschreiben wir eine Gaselektrode? . . . . .	186
12.10	Wie ermitteln wir Vorzeichen und Betrag der Leerlaufspannung („EMK“)? . . . . .	187
12.11	Wie unterscheiden sich eine spontane Redoxreaktion von einer GALVANI'schen Zelle? . . . . .	188
12.12	Wie groß ist der Potenzi­alsprung an einer semipermeablen Membran? . . . . .	190
12.13	Zusammenfassung . . . . .	191
12.14	Testfragen. . . . .	192
12.15	Übungsaufgaben. . . . .	193
<b>13</b>	<b>Serviceteil (Anhang) . . . . .</b>	<b>195</b>
13.1	Lösungen der Tests und Übungsaufgaben . . . . .	195
13.2	Klassische Praktikumsversuche der Physikalischen Chemie . . . . .	223
13.3	Links und QR-Codes zu den Multimedia-Kursen . . . . .	245
13.4	Vorschläge zur Gestaltung der Workshops. . . . .	246

---

13.5	Abkürzungsverzeichnis . . . . .	252
13.6	Naturkonstanten und Einheiten . . . . .	255
13.7	Bindungsenthalpien . . . . .	255
13.8	Thermodynamische Daten . . . . .	255
13.9	Eigenschaften von Gasen . . . . .	260
13.10	ANTOINE-Gleichung und Parameter . . . . .	260
13.11	Ionenleitfähigkeiten . . . . .	260
13.12	Spannungsreihe . . . . .	260
<b>Literatur.</b> . . . .		<b>263</b>