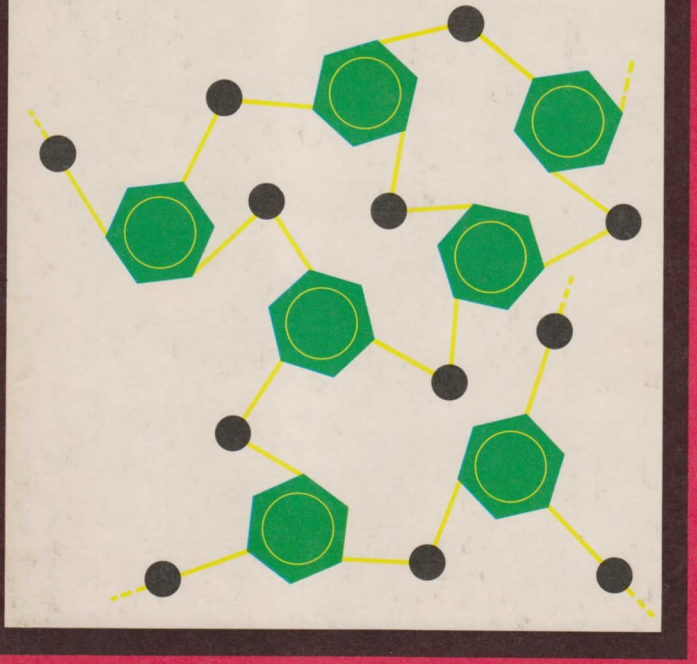
CHEMIE

9



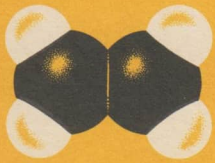
1 Äthan
2 Monochlormethan
3 Äthen
4 Monochloräthen
5 Äthin
6 Benzol
7 Methylbenzol
8 Phenol



1



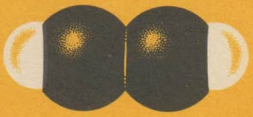
2



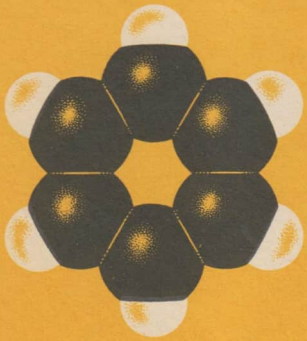
3



4



5



6



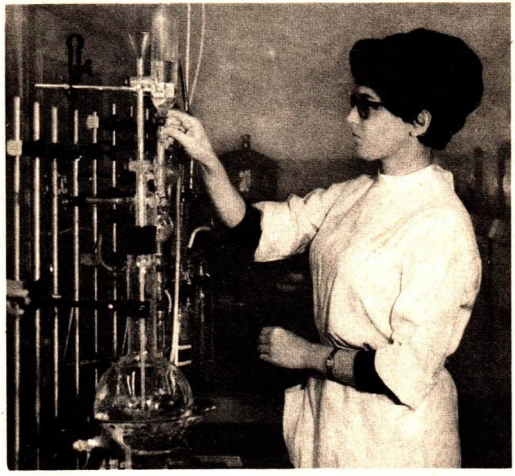
7



8

CHEMIE

Lehrbuch für Klasse 9



Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin · 1970

Autoren:

Jochen Teichmann (Chemische Reaktion; Systematisierung)
Heinz Obst (Organische Verbindungen mit einer funktionellen Gruppe, Lerneinheiten 8 ··· 15;
Organische Verbindungen mit mehreren funktionellen Gruppen; Systematisierung)
Barbara Arndt (Organische Verbindungen mit einer funktionellen Gruppe, Lerneinheiten 16 ··· 21; Plaste, Elaste und Chemiefaserstoffe; Systematisierung)

Herausgegeben von Jochen Teichmann

Redaktionelle Bearbeitung:
Edward Gutmacher, Klaus Sommer

Vom Ministerium für Volksbildung der Deutschen Demokratischen Republik als Schulbuch bestätigt

1. Auflage
Ausgabe 1970
Lizenz Nr. 203 · 1000/69 (E)
ES 11 H
Zeichnungen: Fritz Hampel
Fotos: Volker Ettelt, Berlin (Innentitelbild),
Humboldt-Universität Berlin (Abb. 41),
VEB Leuna-Werke „Walter Ulbricht" (Abb. 19),
Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin (Abb. 42).
Ausstattung: Günter Runschke
Gesetzt aus der Gill
Satz und Druck: Grafischer Großbetrieb Völkerfreundschaft Dresden (III/9/1)
Redaktionsschluß: 15. November 1969
Bestell-Nr. 03 09 01-1
Preis: 2,25

Inhalt

Chemische Reaktion

Seite

1 Reaktionsbedingungen 7
2 Reaktionsverlauf 9
Voraussetzungen für eine chemische Reaktion *9* Aktivierung und Umsetzung *13*
3 Geschwindigkeit chemischer Reaktionen 17
Reaktionsgeschwindigkeit *17* Konzentrations- und Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit *19*
4 Chemisches Gleichgewicht 21
Umkehrbare Reaktionen *21* Einstellung und Lage des chemischen Gleichgewichts *22*
5 Verschiebung der Gleichgewichtslage 27
6 Katalyse 31
Erscheinung der Katalyse und chemisches Gleichgewicht *31* Verlauf der Katalyse *34*
7 Wiederholung und Übung 38

Einige organische Verbindungen mit einer funktionellen Gruppe

8 Alkanole 39
9 Methanol 44
10 Äthanol (Äthylalkohol) 47
11 Phenol 50
12 Wiederholung und Übung 52
13 Alkanale 52
14 Methanal (Formaldehyd) 57
15 Äthanal (Azetaldehyd) 58
16 Alkansäuren 59
17 Methansäure (Ameisensäure) 63
18 Äthansäure (Essigsäure) 64
19 Höhermolekulare Alkansäuren 67
20 Ester 68
Bildung und Zerfall von Estern *68* Einige Ester *71*

Seite

21 Wiederholung und Übung 72
Alkanole, Alkanale und Alkansäuren als Sauerstoffderivate der Alkane *72* Chemisches Gleichgewicht und Katalyse bei ausgewählten anorganisch- und organisch-chemischen Reaktionen *73* Chemische Bindung bei anorganischen und organischen Verbindungen *74*

Einige organische Verbindungen mit mehreren funktionellen Gruppen

22 Glyzerin 75
23 Fette 76
24 Glukose (Traubenzucker) 78
25 Maltose (Malzzucker) und Saccharose (Rohrzucker) 80
26 Stärke und Zellulose 81
27 Aminosäuren 83
28 Eiweiße 86
29 Wiederholung und Übung 88

Plaste, Elaste und Chemiefaserstoffe

30 Polyamide - Polykondensation 89
31 Phenoplaste 92
32 Aminoplaste 95
33 Polyakrylnitril - Polymerisation 96
34 Synthetischer Kautschuk 98
35 Wiederholung und Übung 100

Systematisierung

36 Organische Verbindungen 101
Einteilung organischer Verbindungen *101* Zusammenhang zwischen der Struktur der Moleküle und den chemischen Reaktionen organischer Verbindungen *102* . . . . . .
37 Die chemische Reaktion in der organischen Chemie 103
Teilchenmäßige und energetische Betrachtung der chemischen Reaktion *103* Organisch-chemische Reaktionstypen *106*
38 Herstellung organischer Verbindungen aus Kohle und Erdöl 106

Anhang: Schülerexperimente 107
Register 111

Erläuterungen

1 *Lehrbuchabschnitte.* Das Buch ist in 38 Abschnitte gegliedert, von denen jeder inhaltlich einen abgeschlossenen Gedankengang darstellt. Diese Abschnitte sind fortlaufend numeriert.

Tabellen und Abbildungen im Text sind fortlaufend numeriert.

▼[1] *Beschreibungen der Experimente* sollen in kurzer Form über das Wesentliche der wichtigsten Unterrichtsexperimente informieren. Sie stellen jedoch keine Experimentieranleitung dar! Das Wort **Vorsicht** weist darauf hin, daß im Ablauf der Experimente Gefahren auftreten können oder die verwendeten Stoffe gefährlich sind. Die Beschreibungen der Experimente sind fortlaufend numeriert.

▼[1] Im Anhang *Schülerexperimente* werden ausführliche Anleitungen zum Experimentieren gegeben.

① *Aufgaben* befinden sich stets im oberen Teil der rechten Seiten. Im Text wird auf sie verwiesen. Die Aufgaben sind für jede Doppelseite gesondert numeriert.

▶ *Zusammenfassungen und Merkstoff*

■ *Beispiele* zur Erläuterung des Textes

↗ *Hinweise* auf andere Seiten des Buches beziehungsweise auf andere Schulbücher

Chemische Reaktion

Die Wissenschaft Chemie ist die Lehre vom Aufbau, den Eigenschaften und den chemischen Reaktionen der Stoffe. Chemische Reaktionen sind Stoffumwandlungen. Das Wesen chemischer Reaktionen besteht in der Umordnung von Atomen und Ionen oder in der Umwandlung dieser beiden Teilchenarten ineinander. Bei der Umwandlung der Stoffe verändern sich die Bindungsverhältnisse. Diese Vorgänge sind oft mit einer Umgruppierung von Elektronen verknüpft. Chemische Reaktionen sind zugleich auch Prozesse der Energieumwandlung. Bei jeder chemischen Reaktion wird Reaktionswärme abgegeben oder aufgenommen. Zum Auslösen einer chemischen Reaktion ist Aktivierungsenergie erforderlich.

Reaktionsbedingungen 1

1 ▼ Schwefel wird einmal an der Luft und im Vergleich dazu in reinem Sauerstoff verbrannt.

Jede chemische Reaktion ist von **Reaktionsbedingungen** abhängig. Die Reaktionsbedingungen werden in Form von Zustandsgrößen ausgedrückt: **Temperatur, Druck** und **Konzentration.** Sie kennzeichnen den Zustand, daß heißt die augenblickliche Beschaffenheit der Stoffe. Eine chemische Reaktion kommt dann zustande, wenn die Ausgangsstoffe in einem ganz bestimmten Zustand vorliegen. So wird zum Beispiel die Oxydation von Schwefel mit Sauerstoff erst unter der Bedingung einer bestimmten Mindesttemperatur eingeleitet (Experiment 1).

Die **Temperatur** kennzeichnet als Zustandsgröße die mittlere kinetische Energie der Teilchen eines Stoffes oder Stoffgemisches. Jede Temperaturänderung ist ihrem Wesen nach eine Änderung der mittleren kinetischen Energie der sich bewegenden Teilchen. Die Wärmeenergie ist eine Energie; die Temperatur kennzeichnet den Wärmezustand eines Stoffes. Zwischen der Wärmemenge und der Temperaturänderung besteht direkte Proportionalität: $W = c \cdot m \cdot \Delta\vartheta$. Bei Kenntnis der spezifischen Wärme c, die von der spezifischen Eigenart der Teilchen abhängig ist, und der Masse m eines Stoffes läßt sich mit Hilfe dieser Gleichung die jeweils aufgenommene oder abgegebene Wärme W aus einer direkt meßbaren Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ berechnen. ① ② (↗ S. 9)

Die Zustandsgröße **Druck** ist der Quotient aus Druckkraft und gedrückter Fläche: $p = \frac{F}{A}$. Diese Zustandsgröße ist vor allem für Gase bedeutsam. Durch das Auftreffen

von Teilchen auf die Begrenzung des Gasvolumens üben die Gase einen Druck aus, den man als Gasdruck bezeichnet. Je höher die Konzentration eines gasförmigen Stoffes ist, desto größer ist der Gasdruck. Viele chemische Reaktionen, beispielsweise technisch wichtige Hydrierungen, sind vom Druck abhängig. Ein Druck von 1 at und eine Temperatur von 0 °C kennzeichnen den Normzustand. ③

Die Zustandsgröße **Konzentration** ist eine weitere Reaktionsbedingung. Sie wird zur Kennzeichnung bei flüssigen und festen Stoffen verwendet. Man unterscheidet zum Beispiel konzentrierte und verdünnte Lösungen eines Stoffes. Der Unterschied zwischen beiden Lösungen besteht darin, daß in einem bestimmten Volumen einer konzentrierten Lösung die Menge des gelösten Stoffes größer ist als im gleichen Volumen einer verdünnten Lösung. Die Konzentration c ist der Quotient aus der Stoffmenge n und dem Volumen der Mischung V, in der sich der Stoff befindet: $c = \frac{n}{V}$. Die Angabe der Konzentration erfolgt meist in $mol \cdot l^{-1}$.

Da die Stoffmenge die Anzahl der Teilchen angibt, läßt sich die Konzentration mit Hilfe des Teilchenbegriffes erklären. Ein Stoff liegt in einer Mischung in hoher Konzentration vor, wenn sich eine verhältnismäßig große Stoffmenge in einem festgelegten Volumen der Mischung befindet.

■ Eine wäßrige Zuckerlösung hat eine verhältnismäßig hohe Konzentration an Zucker, wenn sich in einem bestimmten Volumen der Zuckerlösung eine große Anzahl Zuckermoleküle im Vergleich zur Gesamtanzahl aller vorhandenen Teilchen (Zuckermoleküle + Wassermoleküle) befindet.

Stickstoff liegt im Gasgemisch Luft in relativ hoher Konzentration vor, da in einem bestimmten Luftvolumen etwa 80% aller Teilchen des Gemisches Luft Stickstoffmoleküle sind.

Man spricht von niedriger Konzentration eines Stoffes, wenn eine verhältnismäßig kleine Stoffmenge in einem vorgegebenen Volumen der Mischung vorhanden ist.

▶ **Die Konzentration eines Stoffes ist der Quotient aus Stoffmenge und Volumen der Mischung.**

Bei Gasen besteht direkte Proportionalität zwischen Konzentration und Druck. Der Druck eines Gases (↗ S. 8) ist um so größer, je höher seine Konzentration ist. Die Teilchen gasförmiger Stoffe liegen unter der Bedingung eines hohen Druckes in verhältnismäßig großer Anzahl vor.

■ Es herrscht hoher Luftdruck. In einem bestimmten Luftvolumen hohen Druckes sind verhältnismäßig viele Stickstoff-, Sauerstoff- und Kohlendioxidmoleküle vorhanden.

Die Konzentration eines Stoffes hat Einfluß auf den Ablauf der chemischen Reaktion. Beispielsweise verbrennt Schwefel in reinem Sauerstoff schnell mit kräftiger, veilchenblauer Flamme. Die Verbrennung von Schwefel an der Luft verläuft hingegen langsam und weniger heftig, was sich durch eine schwache, fahlblaue Flamme zeigt (Experiment 1). ④

Die Konzentration eines Stoffes läßt sich auf verschiedene Weise erhöhen (Tab. 1). Entsprechend kann die Konzentration eines Stoffes erniedrigt werden. ⑤

① Erklären Sie den Begriff Temperatur, und geben Sie die Einheit der Temperatur an!

② Informieren Sie sich über die Einheit der Wärmemenge und die Wärmeausbreitung (↗„Physik in Übersichten")!

③ Erklären Sie den Begriff Druck, und geben Sie Einheiten des Druckes an!

④ Begründen Sie die größere Heftigkeit der Oxydation von Eisen in reinem Sauerstoff gegenüber der Oxydation dieses Elements an der Luft!

⑤ Leiten Sie aus dem Zusammenhang: Konzentration eines Stoffes ist der Quotient aus Stoffmenge und Volumen der Mischung Möglichkeiten zum Verringern der Konzentration eines Stoffes in einer vorgegebenen Mischung ab!

Tabelle 1 Möglichkeiten der Konzentrationserhöhung

Möglichkeiten zur Konzentrationserhöhung eines Stoffes	■
Vergrößerung der Anzahl der Teilchen in einem bestimmten Volumen	Erhöhung der Sauerstoffkonzentration in der Luft durch Sauerstoffanreicherung
Verringerung der Anzahl der in der Mischung außerdem vorhandenen Teilchen	Konzentrationserhöhung eines gelösten Stoffes durch Verdampfen des Lösungsmittels
Verringerung des Volumens der Mischung bei gleichbleibender Anzahl der Teilchen	Konzentrationserhöhung durch Volumenverringerung beim Komprimieren eines Gases

▶ **Jede chemische Reaktion hängt von Reaktionsbedingungen ab. Die Reaktionsbedingungen werden in Form der Zustandsgrößen Temperatur, Druck und Konzentration angegeben.**

Reaktionsverlauf 2

Voraussetzungen für eine chemische Reaktion

2 ▼ Ein leeres, dickwandiges Glasgefäß wird mit einer Projektionslampe angestrahlt. In Höhe des Lichtkegels wird in das Gefäß etwas fein zerteiltes Messingpulver eingestäubt (Abb. 1, S. 10). Das Gefäß betrachtet man in einer Entfernung von 1 ··· 1,5 m.

Bei einer chemischen Reaktion entstehen aus **Ausgangsstoffen**, die *vor* Beginn der Reaktion vorhanden sind, die **Reaktionsprodukte**, die *nach* Ablauf der Reaktion vorliegen. Die Reaktionsprodukte sind neue Stoffe mit neuen Eigenschaften. Während der Reaktion sind außerdem physikalische Vorgänge zu beobachten.
Jede chemische Reaktion kann als System aufgefaßt werden. Unter einem **System** versteht man die Einheit von Teilen und ihren Wechselwirkungen. Die chemische Reaktion als System ist eine Stoffansammlung aus Ausgangsstoffen und Reaktionsprodukten und die zwischen diesen Stoffen vorhandenen Wechselwirkungen.

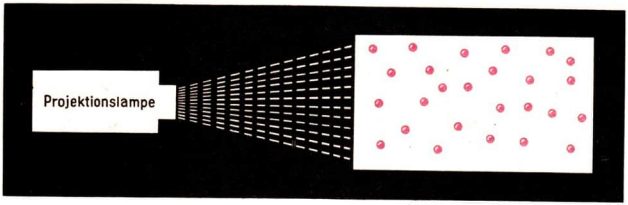


Abb. 1 Modellexperiment zur ungeordneten Bewegung
Die Teilchen werden durch regellos umherfliegende Metallflitter verkörpert. Sie bewegen sich in alle Richtungen, auch entgegen der Schwerkraftwirkung und um ihre eigenen Achsen.

Die Ausgangsstoffe farbloses Wasserstoffgas und violetter Joddampf reagieren zu einem farblosen, stechend riechenden, gasförmigen Reaktionsprodukt, dem Jodwasserstoff:

$H_2 + J_2 \longrightarrow 2\,HJ; \quad Q = -2{,}6$ kcal

Dieses System besteht, sobald die Reaktion begonnen hat, aus Wasserstoff-, Jod- und Jodwasserstoffmolekülen sowie aus den zwischen ihnen auftretenden Wechselwirkungen, die durch Entstehung, Lösung oder Veränderung chemischer Bindungen zum Ausdruck kommen, und den damit verbundenen Prozessen der Energieumwandlung (z. B. Wärmeabgabe).

Die Ausgangsstoffe Wasserstoff und Jod liegen in der Ausgangsmischung in einer bestimmten Konzentration vor. In einem abgegrenzten Volumen befindet sich also eine bestimmte Anzahl an Wasserstoff- und Jodmolekülen. Außerdem wirken die Zustandsgrößen Temperatur und Druck als weitere Reaktionsbedingungen. Bei einer bestimmten Temperatur besitzen die Stoffe eine bestimmte **innere Energie** (auch **Energieinhalt** genannt); das ist die Summe aller Energien der Teilchen. Der Zustand der Ausgangsstoffe wird also durch die Zustandsgrößen Temperatur, Druck und Konzentration bestimmt. ① ②

Der eigentliche **Reaktionsverlauf** ist nicht direkt wahrnehmbar. Er ist das Geschehen zwischen den Teilchen während der Stoffumwandlung. Zur Deutung dient die **kinetische Theorie**. Das sind modellmäßige Betrachtungen über Stoffteilchen und ihre Energien. Der Reaktionsverlauf bei Gasreaktionen, wie die Bildung von Jodwasserstoff aus Elementen bei erhöhter Temperatur, kann bei Anwendung dieser Betrachtungsweise folgendermaßen erklärt werden:

Als eine Voraussetzung für das Zustandekommen von chemischen Reaktionen gilt das **Vorhandensein von Teilchen der Ausgangsstoffe**. Durch die Temperatur ist die mittlere kinetische Energie aller Teilchen festgelegt (↗ S. 7). Infolge ihrer kinetischen Energie **bewegen** sich die Wasserstoff- und Jodmoleküle.

Jedes Teilchen kann sich nur auf einer ganz kurzen Strecke geradlinig bewegen. Es stößt dann notwendigerweise mit anderen Teilchen zusammen. Die Gesamtbewegung ist **ungeordnet, regellos**.

Die Brownsche Molekularbewegung ist ein Beweis für diese ungeordnete Bewegung

① Unterscheiden Sie die Begriffe Temperatur, innere Energie (Energieinhalt) und Wärmeenergie! Wenden Sie Kenntnisse aus dem Physikunterricht an!

② Erläutern Sie den Druck eines Gases, das in einem bestimmten Volumen eingeschlossen ist! Wenden Sie dabei kinetische Vorstellungen an!

③ Erklären Sie die Vorgänge, die bei einer Temperatur- und einer Druckerhöhung bei einem Gas beobachtet werden, mit Hilfe der kinetischen Theorie!

④ Erklären Sie die Konzentration als Reaktionsbedingung!

der Teilchen. Durch Experiment 2 (Abb. 1) wird diese Bewegung im Modell veranschaulicht.

Durch **Zusammenstöße** zwischen den Teilchen findet ein ständiger Energieaustausch statt, und die Teilchen durchmischen sich. Energie und damit Geschwindigkeit sowie Bewegungsrichtung eines Teilchens ändern sich bei jedem Zusammenstoß mit einem anderen Teilchen. Es gibt stets energiereichere und energieärmere und damit schnellere und langsamere Teilchen in einem System. Die Energien der Teilchen sind demnach untereinander und zu bestimmten Zeitpunkten verschieden. Zur Charakterisierung eines ganzen Systems wird daher die mittlere kinetische Energie angegeben.

Um von der modellmäßigen Betrachtung der Einzelteilchen und deren Energien auf das Verhalten eines ganzen Systems schließen zu können, bedient man sich der Gesetzmäßigkeiten der Statistik und Wahrscheinlichkeit. Aus der Vielzahl von vorhandenen Wasserstoff- und Jodmolekülen mit ihren unterschiedlichen Energien und Geschwindigkeiten ergeben sich Mittelwerte. Es lassen sich also auf der Grundlage von Mittelwerten exakte Aussagen machen über die chemische Reaktion als System. Hingegen sind Aussagen über das Verhalten eines einzelnen Moleküls nicht möglich. Solche gesetzmäßigen Zusammenhänge, die sich auf eine Vielzahl von Einzelteilchen oder Einzelvorgängen beziehen, heißen **statistische Gesetzmäßigkeiten**.

Die Anzahl möglicher Zusammenstöße hängt von der Konzentration der Ausgangsstoffe und der Temperatur ab. Die Wahrscheinlichkeit des Zusammenstoßens von Wasserstoff- und Jodmolekülen ist um so größer, je mehr Teilchen in einem bestimmten Volumen vorhanden sind und je größer die mittlere kinetische Energie der Teilchen ist. ③④

Die Anzahl der Zusammenstöße, die zwischen gleichartigen Teilchen eines Gases in einem Volumen von 1 cm^3 je Sekunde möglich ist, liegt bei 0 °C und 1 at in der Größenordnung von 10^{29}.

Beim Zusammenstoßen von Wasserstoff- und Jodmolekülen kann es zur Bildung von Jodwasserstoff kommen. Jedoch nicht jeder stattfindende Zusammenstoß führt zur Stoffumwandlung (Abb. 2, S. 12). Nur solche Zusammenstöße führen zur Reaktion, bei denen die Moleküle erstens eine bestimmte **Mindestenergie** besitzen und zweitens in bestimmter Lage zusammentreffen (Abb. 3, S. 12). In einem Reaktionsgemisch sind stets mindestens einige Moleküle mit so hoher Energie vorhanden, daß bei deren Zusammenstoß eine Reaktion erfolgt. Wenn die bei einer Reaktion frei werdende Energie ausreicht, genü-



Abb. 2 Unwirksamer Zusammenstoß
zwischen einem Wasserstoff- und einem Jodmolekül

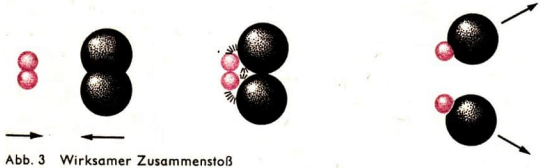


Abb. 3 Wirksamer Zusammenstoß
zwischen einem Wasserstoff- und einem Jodmolekül

gend weiteren Molekülen Energie, die für das wirksame Zusammenstoßen notwendig ist, zuzuführen, dann läuft die Reaktion weiter. Reicht jedoch diese Energie nicht aus, um weitere Teilchen auf das zur Reaktion erforderliche Energieniveau zu heben, so kommt die Reaktion zum Stillstand. Um eine Reaktion in Gang zu setzen, ist es daher erforderlich, die mittlere kinetische Energie der Teilchen durch Energiezufuhr so weit zu erhöhen, daß eine ausreichend große Anzahl von Molekülen wirksam zusammenstoßen kann. Je größer der Energieinhalt des Systems ist, das heißt je größer die mittlere Energie der Teilchen ist, desto größer ist die Anzahl der Teilchen, die für wirksame Zusammenstöße die notwendige Mindestenergie aufweisen.

Viele Ionenreaktionen verlaufen praktisch ungehindert, weil dabei sehr viele zusammenstoßende Ionen im Besitz der erforderlichen Mindestenergie sind, die bei dieser Reaktion sehr gering ist. Hingegen tritt zum Beispiel die Bildung von Jodwasserstoff aus den Elementen erst dann merklich ein, wenn im System genügend Wasserstoff- und Jodmoleküle mit einem bestimmten Mehrbetrag an Energie gegenüber der mittleren Energie der Teilchen vorhanden sind. Diese Differenz zwischen der Energie, die die Teilchen besitzen müssen, um reagieren zu können, und der mittleren Energie der Teilchen im Ausgangszustand (Ausgangsstoffe) bezeichnet man als **Aktivierungsenergie**. Sie ist zum Auslösen einer Stoffumwandlung erforderlich.

Kalziumkarbonat verändert sich unter den Bedingungen des Normzustandes nicht, weil praktisch kein Teilchen die zur Stoffumwandlung erforderliche Mindestenergie besitzt. Dagegen verläuft die thermische Zersetzung des Kalziumkarbonats in Kalziumoxid und Kohlendioxid bei 1 000 °C; denn unter diesen Bedingungen haben sehr viele Teilchen die erforderliche Mindestenergie.

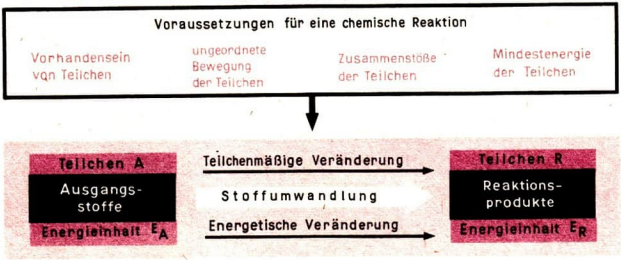
Durch Temperaturerhöhung wird der Energieinhalt des Systems erhöht. Dies bedeutet, daß die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen ansteigt.

① Erläutern Sie den Verlauf einer chemischen Reaktion zwischen gasförmigen Stoffen auf der Grundlage der kinetischen Theorie!

② Nennen Sie Möglichkeiten zur Aktivierung!

Für Wasserstoffmoleküle ist die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen bei 0 °C mit 1 674 $m \cdot s^{-1}$ und bei 200 °C mit 2 230 $m \cdot s^{-1}$ ermittelt worden. Für die größeren Jodmoleküle beträgt sie bei 200 °C etwa 200 $m \cdot s^{-1}$.

Diese Vorstellungen der kinetischen Theorie gelten im Prinzip für den Verlauf aller chemischen Reaktionen. ①
Die folgende schematische Übersicht faßt die Betrachtungen über die chemische Reaktion als System und die Voraussetzungen für die chemische Reaktion zusammen.



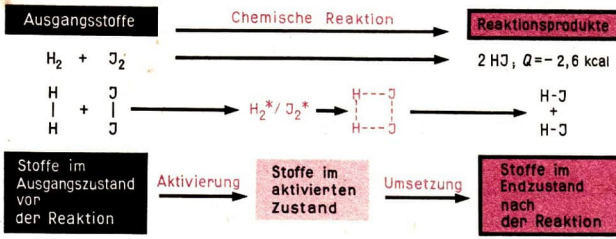
Vorhandensein, ungeordnete Bewegung, Zusammenstöße und Mindestenergie der Teilchen sind Voraussetzungen für eine chemische Reaktion.

Aktivierung und Umsetzung

Beim Reaktionsverlauf der Jodwasserstoffbildung lassen sich zwei Abschnitte unterscheiden. Im Abschnitt der **Aktivierung** stoßen Wasserstoff- und Jodmoleküle infolge Erhöhung ihres Energieinhaltes wirksam zusammen. Dabei werden beispielsweise die Bindungen in den Molekülen gelockert. Es entstehen *aktivierte* Wasserstoff- und Jodmoleküle H_2^*/J_2^* als energiereichere Teilchen, die unbeständig sind. Vorübergehend können sich unbeständige Atomverbände bilden. ②



Während der **Umsetzung** entstehen aus den aktivierten Wasserstoff- und Jodmolekülen durch Stoffumwandlung Jodwasserstoffmoleküle. Für die Jodwasserstoffbildung lassen sich diese Zusammenhänge vereinfacht folgendermaßen darstellen:



Aktivierung und Umsetzung sind Abschnitte des Reaktionsverlaufes. Während der Aktivierung werden die Stoffe im Ausgangszustand (Ausgangsstoffe) in Stoffe im aktivierten Zustand übergeführt. Durch die Umsetzung entstehen aus den Stoffen im aktivierten Zustand die Stoffe im Endzustand (Reaktionsprodukte) als neue Stoffe mit neuen Eigenschaften.

Im Verlaufe der chemischen Reaktion erfolgen sowohl energetische Veränderungen als auch Veränderungen der Teilchen. Während der chemischen Reaktion ändert sich die Anordnung oder die Art der Teilchen.

Aus Wasserstoff- und Jodmolekülen, die jeweils aus zwei gleichartigen Atomen bestehen, bilden sich durch Umgruppierung von Elektronen Jodwasserstoffmoleküle, die ihrerseits aus zwei verschiedenartigen Atomen aufgebaut sind und Dipole darstellen. Bei der thermischen Zersetzung von Kalziumkarbonat, das aus Ionenkristallen aufgebaut ist, entstehen aus Kalzium-Ionen und Karbonat-Ionen Kalziumoxid-Ionenkristalle und Kohlendioxidmoleküle. ①

Während einer chemischen Reaktion ändert sich der Energieinhalt des Systems. Aus chemischer Energie können durch Umwandlung bei chemischen Reaktionen zum Beispiel Wärmeenergie, Lichtenergie oder elektrische Energie entstehen.
Es gibt aber auch Reaktionen, bei denen Energie zugeführt werden muß. Die zugeführte Energie (Wärmeenergie, Lichtenergie, elektrische Energie) wird dabei in chemische Energie übergeführt.
Wird bei einer chemischen Reaktion **Reaktionswärme** vom System nach außen abgegeben, so spricht man von einer **exothermen Reaktion**. Der Energieinhalt der Ausgangsstoffe ist in diesem Falle größer als der der Reaktionsprodukte.
Eine **endotherme Reaktion** verläuft unter Wärmeaufnahme von außen. Der Energieinhalt der Ausgangsstoffe ist kleiner als der der Reaktionsprodukte. ② ③ ④
Stellt man in einem Funktionsdiagramm den Energieinhalt der Stoffe in Abhängigkeit vom zeitlichen Verlauf der chemischen Reaktion dar (Abb. 4), so lassen sich zwei Abschnitte des Reaktionsverlaufes unterscheiden:
Im Teilprozeß der Aktivierung erhalten viele Teilchen durch Energiezufuhr die für die Reaktion erforderliche Energie. Aus den Stoffen im Ausgangszustand entstehen durch Zufuhr von Aktivierungsenergie die Stoffe im aktivierten Zustand.

① Erklären Sie die Begriffe Dipol und Ionenkristall (↗ „Chemie in Übersichten", S. 28, 36)!

② Was ist Reaktionswärme, und wie wird sie bei chemischen Reaktionsgleichungen angegeben?

③ Erklären Sie den Unterschied zwischen exothermen und endothermen Reaktionen!

④ Erläutern Sie den aus dem Biologieunterricht bekannten Begriff energiereiche Verbindung!

Während des Teilprozesses der Umsetzung geben die Teilchen einen Teil ihrer Energie wieder ab. Der Energieinhalt des Systems sinkt. Die energiereicheren Stoffe im aktivierten Zustand gehen in die energieärmeren Stoffe im Endzustand über.

Wenn man die Reaktionsgleichung zugrunde legt, ist zum Auslösen der Bildung von Jodwasserstoff eine Aktivierungsenergie von etwa 40 kcal notwendig. Die exotherm verlaufende Bildung des Jodwasserstoffs aus den gasförmigen Elementen hat eine Reaktionswärme von $Q = -2{,}6$ kcal, das heißt, es wird Wärme nach außen abgegeben.

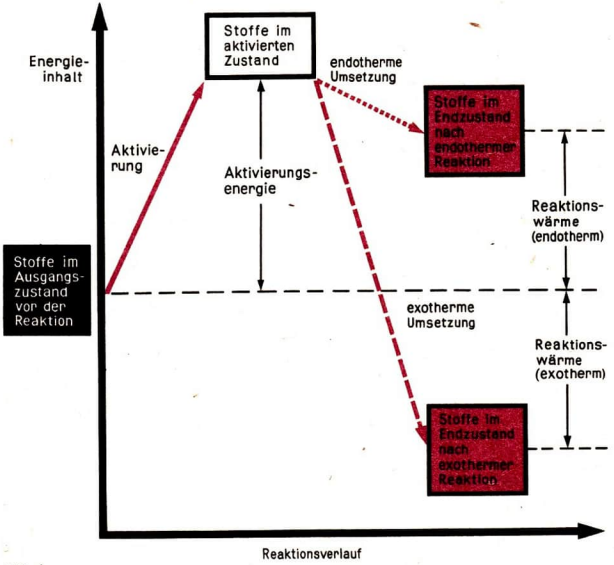


Abb. 4
Abhängigkeit des Energieinhaltes der Stoffe vom zeitlichen Verlauf der chemischen Reaktion

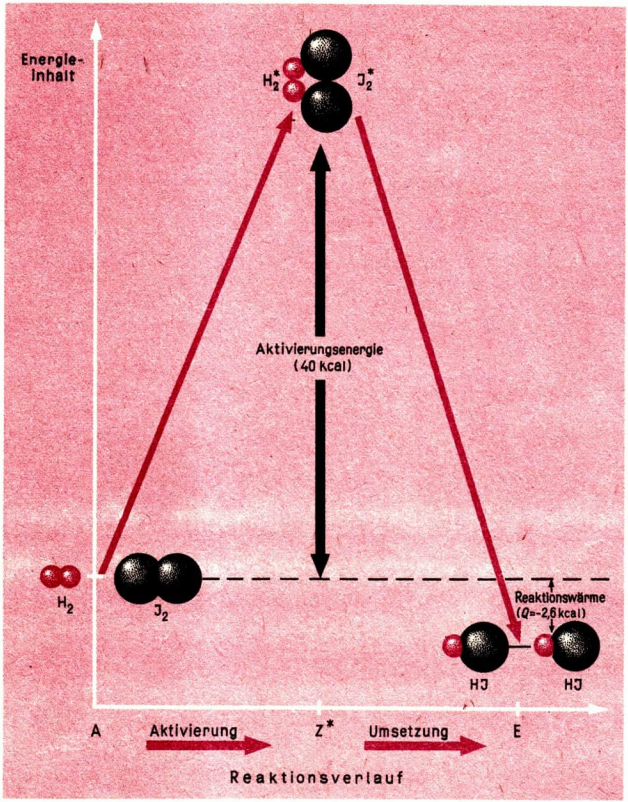


Abb. 5 Aktivierung und Umsetzung bei der Synthese von Jodwasserstoff aus den Elementen Wasserstoff und Jod

A: Stoffe im Ausgangszustand (Ausgangsstoffe): Wasserstoff und Jod
Z*: Stoffe im aktivierten Zustand: Atomverband aus Wasserstoff- und Jodatomen
E: Stoffe im Endzustand (Reaktionsprodukte): Jodwasserstoff

Die Energieinhalte sind Mittelwerte der Energien aller Teilchen.

① Erläutern Sie die Reaktionsbedingungen und den Reaktionsverlauf für die Synthese von Jodwasserstoff aus den Elementen! Verwenden Sie dabei Abbildung 4, Seite 15!

② Erklären Sie den Begriff Konzentration!

③ Erläutern Sie Voraussetzungen für die chemische Reaktion!

Abbildung 5 veranschaulicht schematisch am Beispiel der Jodwasserstoffbildung aus den Elementen die Abschnitte des Reaktionsverlaufes sowie die stofflichen und energetischen Veränderungen während der chemischen Reaktion. ①

▶ **Der Verlauf einer chemischen Reaktion ist mit stofflichen und energetischen Veränderungen verbunden. Die Stoffumwandlung ist ihrem Wesen nach eine Veränderung von Anordnung und Art der Teilchen bei Änderung des Energieinhaltes des Systems.**

Geschwindigkeit chemischer Reaktionen 3

Reaktionsgeschwindigkeit

Chemische Reaktionen laufen langsam oder schnell ab.

■ Die Zersetzung von Wasserstoffperoxid in Wasser und Sauerstoff sowie viele organisch-chemische Reaktionen, wie Hydrierungen und Dehydrierungen, verlaufen verhältnismäßig langsam. Hingegen gehen Ionenreaktionen, zum Beispiel viele Fällungsreaktionen, oder die fotochemische Bildung von Chlorwasserstoff mit großer Geschwindigkeit vor sich.

Das Fortschreiten des Reaktionsverlaufes läßt sich an Hand folgender Überlegung erläutern:
In einem abgeschlossenen Raum, in dem beispielsweise die Reaktion zwischen Wasserstoff und Jod unter Bildung von Jodwasserstoff ablaufen soll, werden zu verschiedenen Zeitpunkten die Konzentrationen der Ausgangsstoffe Wasserstoff und Jod sowie des Reaktionsproduktes Jodwasserstoff betrachtet. Wenn man sich vorstellt, der Reaktionsverlauf könnte in sehr kleinen, gleichen Zeitabständen fotografiert werden, dann würden die erhaltenen Momentaufnahmen die augenblicklich vorhandenen Anzahlen aller Teilchen, die sich im gleichbleibenden Volumen des Reaktionsgefäßes befinden, erfassen. Abbildung 6, Seite 18, veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Konzentration und Zeit am Beispiel willkürlich gewählter Teilchenanzahlen für die Jodwasserstoffsynthese. ② ③
Zu Beginn der Reaktion zum Zeitpunkt Null (am Anfang) liegen nur die Ausgangsstoffe Wasserstoff und Jod in festgelegten Konzentrationen vor. Bestimmte Anzahlen von Wasserstoff- und Jodmolekülen sind im vorgegebenen Volumen vorhanden. Sind die Voraussetzungen für die chemische Reaktion erfüllt, kommt es zu wirksamen

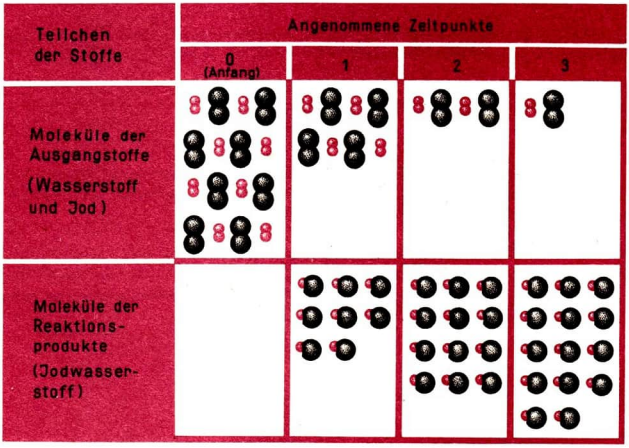


Abb. 6 Zusammenhang zwischen Konzentration und Zeit bei der Reaktion von Wasserstoffmolekülen mit Jodmolekülen zu Jodwasserstoffmolekülen

Zusammenstößen. Dadurch werden Jodwasserstoffmoleküle gebildet. Gleichzeitig nimmt die Anzahl von Wasserstoff- und Jodmolekülen im gegebenen Volumen ab; denn immer mehr dieser Teilchen wandeln sich in Jodwasserstoffmoleküle um. Während also die Anzahl der Jodwasserstoffmoleküle wächst, nimmt die Anzahl der Wasser-

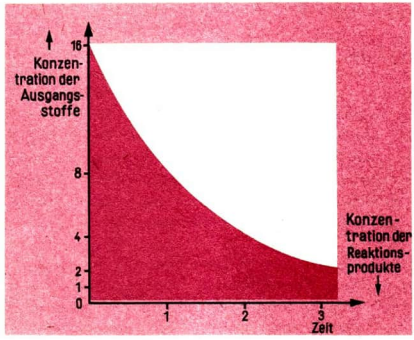


Abb. 7 Zusammenhang zwischen Konzentration und Zeit (Konzentrations-Zeit-Diagramm)

① Worin besteht der grundsätzliche Unterschied zwischen der Reaktionsgeschwindigkeit und der Geschwindigkeit, mit der sich Körper bewegen?

② Erklären Sie am Beispiel der Reaktion von Wasserstoff und Jod zu Jodwasserstoff die Konzentrationsänderungen von Ausgangsstoffen und Reaktionsprodukt in Abhängigkeit von der Zeit! Benutzen Sie dabei Abbildung 7!

stoff- und Jodmoleküle ab. Anders ausgedrückt bedeutet das: Ständige Abnahme der Konzentration an Ausgangsstoffen ist mit ständiger Zunahme der Konzentration an Reaktionsprodukten verbunden. Die Abhängigkeit der Konzentration von der Zeit läßt sich in einem Diagramm grafisch darstellen (Abb. 7).
Bei jeder chemischen Reaktion besteht ein solcher funktionaler Zusammenhang zwischen der Anzahl der in einem bestimmten Volumen reagierenden Teilchen und der Zeit oder – anders ausgedrückt – zwischen umgesetzter Stoffmenge, die sich in einem bestimmten Volumen befindet, und der Zeit. Diese Beziehung zwischen der Änderung der Konzentration der Stoffe, die an der Reaktion beteiligt sind, und der für diese Konzentrationsänderung benötigten Zeit heißt **Reaktionsgeschwindigkeit** v.
Ändern sich die Konzentrationen der Stoffe schnell beziehungsweise langsam, so verläuft die chemische Reaktion mit großer beziehungsweise kleiner Geschwindigkeit. ① ②

Die Reaktionsgeschwindigkeit v ist der Quotient aus der Konzentrationsänderung Δc und der dazu benötigten Zeit Δt.

$$v = \frac{c_2 - c_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta c}{\Delta t}$$

Konzentrations- und Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit

3

Wasserstoffperoxid wird in Gegenwart von Natriumhydroxidlösung bei verschiedenen Temperaturen zersetzt (Abb. 8). Nach der Entwicklung von 20 ml Sauerstoff ist die Zeit für die Zunahme des Sauerstoffvolumens um 15 ml zu messen. Die Zeit für die Entwicklung weiterer 15 ml wird nicht erfaßt. Danach ist erneut die Zeit für die Zunahme des Sauerstoffvolumens um 15 ml zu bestimmen. Die Messungen werden bei Badtemperaturen von 50 °C und 65 °C vorgenommen.



Abb. 8
Messen des Sauerstoffvolumens bei der Zersetzung von Wasserstoffperoxid

Die Reaktionsgeschwindigkeit wird von der Konzentration der reagierenden Stoffe und von der Temperatur beeinflußt.
Die Geschwindigkeit vieler Reaktionen ist um so größer, je höher die Konzentration der Stoffe ist.

Wasserstoffperoxid H_2O_2, ein Oxid des Wasserstoffs, zerfällt in Gegenwart von Hydroxid-Ionen in Wasser und in Sauerstoff.

$$2\,H_2O_2 \xrightarrow{(OH^-)} 2\,H_2O + O_2$$

Bei hoher Konzentration des Ausgangsstoffes Wasserstoffperoxid zu Beginn der Reaktion bildet sich das gleiche Volumen Sauerstoff schneller als nach einer gewissen Zeit, bei der die Konzentration des Wasserstoffperoxids niedriger ist (Experiment 3). ①

Die Ursache dafür ist, daß bei hoher Stoffkonzentration die Teilchen in großer Anzahl vorliegen. Damit ist die Anzahl möglicher Zusammenstöße größer als bei niedriger Konzentration (Abb. 9). Es wird daher häufiger zu wirksamen Zusammenstößen und somit zur Stoffumwandlung kommen.

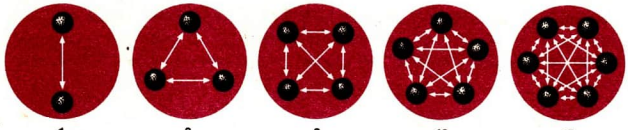


Abb. 9 Mögliche Zusammenstöße in Abhängigkeit von der Anzahl der Teilchen in einem bestimmten Volumen

Die Reaktionsgeschwindigkeit ist stark temperaturabhängig. Bei einer Temperaturerhöhung um 10 grd verläuft die chemische Reaktion im allgemeinen mit der doppelten bis dreifachen Geschwindigkeit.

Die Zersetzung von Wasserstoffperoxid unter Bildung von Wasser und Sauerstoff verläuft bei 65 °C mit größerer Geschwindigkeit als bei 50 °C. Deshalb entsteht das gleiche Sauerstoffvolumen bei höherer Temperatur in kürzerer Zeit (Experiment 3).

Der Einfluß von Temperaturänderungen auf die Reaktionsgeschwindigkeit kann auf der Grundlage der kinetischen Theorie erklärt werden. Bei niedriger Temperatur haben im allgemeinen nur verhältnismäßig wenige Teilchen die für eine Reaktion erforderliche Mindestenergie. Die Reaktionsgeschwindigkeit ist daher gering.
Nur wenn die Aktivierungsenergie einer Reaktion äußerst niedrig ist, zum Beispiel bei vielen Ionenreaktionen, läuft die Reaktion sehr schnell ab (↗ S. 17). Bei höherer Temperatur ist die Anzahl der Teilchen mit der erforderlichen Mindestenergie stets größer. Dadurch erhöht sich die Anzahl der wirksamen Zusammenstöße. Die Folge einer Temperaturerhöhung ist demnach eine Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit. ②
Die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von der Konzentration und der Tem-

① Entscheiden Sie am Beispiel der Hydrierungsreaktion von Äthen, in welchem Falle die Reaktionsgeschwindigkeit größer ist: Einmal liegt die einfache und zum anderen die doppelte Anzahl Wasserstoffmoleküle unter sonst gleichen Bedingungen in demselben Volumen vor. Begründen Sie die Antwort!

② Erläutern Sie mit Hilfe kinetischer Vorstellungen den Temperatureinfluß auf die Reaktionsgeschwindigkeit!

③ Begründen Sie den Vorteil des Einsatzes von reinem Sauerstoff an Stelle von Luft beim Hochofenprozeß!

④ Warum werden chemische Reaktionen in der Technik oftmals bei hohen Temperaturen durchgeführt?

⑤ Nennen Sie praktische Anwendungen für die Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit durch a) Konzentrationserhöhung und b) Temperaturerhöhung!

peratur wird beim chemischen Experimentieren im Labor und vor allem für die technische Reaktionsführung bei der industriellen Chemieproduktion ausgenutzt. ③ ④ ⑤

▶ **Die Reaktionsgeschwindigkeit ist von der Konzentration der reagierenden Stoffe und der Temperatur abhängig.**

Chemisches Gleichgewicht 4

Umkehrbare Reaktionen

4 ▼ Festes Kalziumhydroxid wird aus einer Kalziumchloridlösung durch Zugabe von Natriumhydroxidlösung ausgefällt.

5 ▼ Festes Kalziumhydroxid wird in einer wäßrigen Natriumchloridlösung aufgelöst. Nach dem Filtrieren ist die Lösung auf Hydroxid-Ionen zu prüfen.

Bei der Reaktion des farblosen Wasserstoffgases mit violettem Joddampf entsteht farbloses Jodwasserstoffgas.

$H_2 + J_2 \longrightarrow 2\,HJ$

Erwärmt man in einem abgeschlossenen Gefäß reinen Jodwasserstoff, so zersetzt sich dieser Jodwasserstoff in die Elemente Wasserstoff und Jod. Durch das Auftreten violetter Dämpfe läßt sich das erkennen.

$2\,HJ \longrightarrow H_2 + J_2$

Betrachtet man beide Reaktionen, so stellt man fest:
Aus Wasserstoff und Jod entsteht Jodwasserstoff, der seinerseits unter Rückbildung der ursprünglichen Ausgangsstoffe Wasserstoff und Jod reagiert. Eine solche Reaktion heißt **umkehrbare Reaktion**. Die Jodwasserstoffbildung bezeichnet man dabei als **Hinreaktion** und die Jodwasserstoffzersetzung als **Rückreaktion**.

Bei der Hinreaktion reagieren Wasserstoffmoleküle mit Jodmolekülen zu Jodwasserstoffmolekülen. Dabei nehmen die Konzentrationen von Wasserstoff und Jod ständig ab. Somit sinkt auch die Reaktionsgeschwindigkeit der Hinreaktion.
Im Verlaufe der Rückreaktion zersetzen sich die gebildeten Jodwasserstoffmoleküle in Wasserstoff- und Jodmoleküle. Da durch die Hinreaktion ständig Jodwasserstoff gebildet wird und somit dessen Konzentration zunimmt, wächst die Reaktionsgeschwindigkeit der Rückreaktion.
Jede umkehrbare Reaktion besteht aus Hinreaktion und Rückreaktion. Umkehrbare Reaktionen werden durch entgegengesetzt gerichtete Reaktionspfeile gekennzeichnet.

$$H_2 + J_2 \underset{\text{Rückreaktion}}{\overset{\text{Hinreaktion}}{\rightleftharpoons}} 2\,HJ; \quad Q = -2{,}6\ \text{kcal}$$

Die Reaktionswärme Q wird bei umkehrbaren Reaktionen immer für die Hinreaktion angegeben. Das bedeutet für die Jodwasserstoffbildung und -zersetzung: Die Hinreaktion (Jodwasserstoffbildung) ist eine exotherme Reaktion, die Rückreaktion (Jodwasserstoffzersetzung) ist eine endotherme Reaktion.
Viele chemische Reaktionen sind umkehrbar.

■ Bei der Fällungsreaktion treten frei bewegliche Ionen zu Ionenkristallen zusammen. Zum Beispiel fällt aus Kalziumchloridlösung durch Zugabe von Natriumhydroxidlösung festes Kalziumhydroxid als Niederschlag aus (Experiment 4).

$$Ca^{2+} + 2\,Cl^- + 2\,Na^+ + 2\,OH^- \longrightarrow Ca(OH)_2 + 2\,Na^+ + 2\,Cl^-$$
$$Ca^{2+} + 2\,OH^- \longrightarrow Ca(OH)_2$$

Im Ergebnis der Dissoziation werden die Ionen frei beweglich. So dissoziiert Kalziumhydroxid in wäßriger Lösung in Kalzium-Ionen und Hydroxid-Ionen (Experiment 5).

$$Ca(OH)_2 \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2\,OH^- \quad ①$$

Hydrierung und Dehydrierung sind ebenfalls umkehrbare Reaktionen.
Auch viele physikalische Vorgänge, zum Beispiel die Aggregatzustandsänderungen, sind umkehrbar. ② ③ ④

▶ **Eine umkehrbare chemische Reaktion liegt vor, wenn gleichzeitig aus den Ausgangsstoffen die Reaktionsprodukte entstehen (Hinreaktion) und aus den Reaktionsprodukten die Ausgangsstoffe gebildet werden (Rückreaktion).**

Einstellung und Lage des chemischen Gleichgewichts

6

▼ Angefärbtes Wasser, das sich in einem Meßgefäß befindet, wird auf ein weiteres Meßgefäß verteilt. Die Aufteilung zwischen beiden Meßgefäßen erfolgt durch gleichzeitiges gegenseitiges Übertragen mit Hilfe von zwei Glasrohren, die unterschiedliche Durchmesser haben und als Stechheber dienen (↗ Anhang, ▼ 1, S. 107).

Werden in einem abgeschlossenen Volumen Wasserstoff und Jod unter geeigneten Bedingungen zur Reaktion gebracht, so entsteht ein Gasgemisch, das die Ausgangs-

① Erklären Sie die Umkehrbarkeit der Dissoziation am Beispiel
$NaCl \rightleftarrows Na^+ + Cl^-$!

② Erläutern Sie den Zusammenhang von Hydrierung des Äthens und Dehydrierung des Äthans!

③ Formulieren Sie die Reaktionsgleichung für die Umkehrung der Benzolhydrierung!

④ Beschreiben Sie an Hand kinetischer Vorstellungen das Verdampfen und das Kondensieren von Wasser als umkehrbare Aggregatzustandsänderungen!

stoffe Wasserstoff und Jod sowie das Reaktionsprodukt Jodwasserstoff enthält. Die Ausgangsstoffe Wasserstoff und Jod reagieren nicht vollständig zu Jodwasserstoff; denn es laufen unter gleichen Reaktionsbedingungen in einem abgeschlossenen Volumen die Hinreaktion Jodwasserstoffbildung und auch die Rückreaktion Jodwasserstoffzersetzung gleichzeitig ab.

Vor Beginn der chemischen Reaktion haben Wasserstoff und Jod vorgegebene Konzentrationen. Somit liegen Wasserstoff- und Jodmoleküle im festgelegten Volumen in bestimmter Anzahl vor. Nachdem einige Wasserstoffmoleküle mit Jodmolekülen unter Bildung von Jodwasserstoffmolekülen reagiert haben, beginnt auch die Zersetzung der Jodwasserstoffmoleküle unter Rückbildung von Wasserstoff- und Jodmolekülen. Die Reaktionsgeschwindigkeit der Hinreaktion v_{Hin} ist zu Beginn der Jodwasserstoffbildung auf Grund der vorliegenden Konzentrationen an Wasserstoff und Jod verhältnismäßig groß, die Reaktionsgeschwindigkeit der Rückreaktion $v_{Rück}$ für die Jodwasserstoffzersetzung ist hingegen zu Beginn Null.

Mit abnehmender Konzentration an Wasserstoff und Jod sinkt die Reaktionsgeschwindigkeit v_{Hin} (Abb. 10). Gleichzeitig steigt die Reaktionsgeschwindigkeit $v_{Rück}$ wegen der zunehmenden Konzentration an Jodwasserstoff an. Nach einer bestimmten Zeit sind

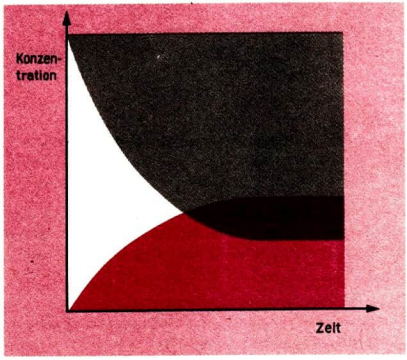


Abb. 10 Zusammenhang zwischen Konzentration und Zeit für Ausgangsstoffe und Reaktionsprodukte:
Im Verlaufe der Reaktion nehmen die Konzentrationen der Ausgangsstoffe bis zu einem bestimmten Wert ab; die Konzentrationen der Reaktionsprodukte nehmen bis zu einem bestimmten Wert zu. Nach Einstellung des chemischen Gleichgewichts ändert sich das Konzentrationsverhältnis nicht mehr.

die Geschwindigkeiten von Hin- und Rückreaktion dem Betrage nach gleich, jedoch entgegengesetzt gerichtet: $v_{Hin} = v_{Rück}$. Dann bilden sich zum Beispiel je Sekunde genauso viele Moleküle Jodwasserstoff wie in dieser Zeit Jodwasserstoffmoleküle wieder zerfallen. Dieser Zustand wird als **chemisches Gleichgewicht** bezeichnet. Dabei ist es gleichgültig, ob man von Wasserstoff und Jod oder von Jodwasserstoff ausgegangen ist. Stets ergibt sich unter gleichartigen Reaktionsbedingungen dasselbe chemische Gleichgewicht. ① ②

Das chemische Gleichgewicht stellt einen besonderen Zustand des chemischen Systems dar. Beim chemischen Gleichgewicht laufen Hin- und Rückreaktion ständig ab. Es herrscht kein Zustand der Ruhe.

Da sowohl Ausgangsstoffe als auch Reaktionsprodukte vorhanden sind, die wechselseitig miteinander reagieren, werden die an der Reaktion beteiligten Stoffe allgemein als **reagierende Stoffe** bezeichnet. ③

Alle umkehrbaren Reaktionen führen in einem abgeschlossenen Volumen unter gleichbleibenden Reaktionsbedingungen zu einem chemischen Gleichgewicht. Die reagierenden Stoffe setzen sich nicht vollständig um. Es liegen Ausgangsstoffe und Reaktionsprodukte gleichzeitig vor.

Das Erreichen des chemischen Gleichgewichts in einem System erfolgt durch das Annähern der Geschwindigkeiten für Hin- und Rückreaktion auf den gleichen Betrag. Es wird **Einstellung des chemischen Gleichgewichts** genannt. Das chemische Gleichgewicht stellt sich von beiden Seiten her ein. Die Zeit, die vom Beginn einer umkehrbaren Reaktion bis zur Ausbildung des chemischen Gleichgewichts benötigt wird, heißt **Einstellzeit** des chemischen Gleichgewichts.

Sie ist von der Reaktionsgeschwindigkeit und somit auch von der Temperatur abhängig. Bei Temperaturerhöhung verlaufen Hin- und Rückreaktion mit größeren Geschwindigkeiten, so daß sich das Gleichgewicht schneller einstellen kann. ④

Bedingung für die Einstellung des chemischen Gleichgewichts ist, daß die Geschwindigkeiten von Hin- und Rückreaktion dem Betrage nach gleich sind: $v_{Hin} = v_{Rück}$.

Man kennzeichnet daher das eingestellte chemische Gleichgewicht in der Reaktionsgleichung durch zwei gleich lange, entgegengesetzt gerichtete Reaktionspfeile.

$H_2 + J_2 \rightleftarrows 2\,HJ$ ⑤

Als Folge der Einstellung des Gleichgewichts liegen alle reagierenden Stoffe in bestimmten Konzentrationsverhältnissen vor. Im chemischen Gleichgewicht sind die Konzentrationen an Ausgangsstoffen und Reaktionsprodukten nicht gleich, aber konstant.

Das chemische Gleichgewicht zwischen Wasserstoff, Jod und Jodwasserstoff ist bei einer Temperatur von 425 °C dadurch gekennzeichnet, daß im System 78,3% aller Teilchen Jodwasserstoffmoleküle und 21,7% Wasserstoffmoleküle und Jodmoleküle vorhanden sind.

Das erreichte Verhältnis zwischen den Konzentrationen der reagierenden Stoffe bleibt im chemischen Gleichgewicht unverändert. Dieses Konzentrationsverhältnis wird als **Lage des chemischen Gleichgewichts** bezeichnet. ⑥ ⑦

① Erklären Sie den Zusammenhang zwischen Reaktionsgeschwindigkeit und Konzentration!

② Beschreiben Sie die Vorgänge in einem abgeschlossenen Volumen, in dem sich am Anfang nur Jodwasserstoff bei 200 °C befindet!

③ Warum ist es prinzipiell unmöglich, Silber-Ionen durch Zugabe von Chlorid-Ionen vollständig auszufällen?

④ Erklären Sie den Zusammenhang zwischen Reaktionsgeschwindigkeit und Temperatur sowie zwischen Reaktionsgeschwindigkeit und Einstellzeit des chemischen Gleichgewichts!

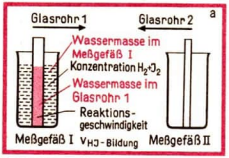
⑤ Formulieren Sie als chemisches Gleichgewicht
a) das System Äthen/Wasserstoff/Äthan, b) Dissoziation und Fällung von Silberchlorid, c) die Redoxreaktion zwischen Kohlendioxid und Kohlenstoff!
Erläutern Sie die Aussagen dieser chemischen Gleichungen!

⑥ Erklären Sie Einstellung und Lage des chemischen Gleichgewichts
Benutzen Sie dazu Abbildung 10, Seite 23!

⑦ Erläutern Sie den Unterschied zwischen dem chemischen Gleichgewicht und dem Gleichgewicht an der Balkenwaage!

▶ **Das chemische Gleichgewicht ist von beiden Seiten einstellbar. Nach Einstellung des chemischen Gleichgewichts sind die Reaktionsgeschwindigkeiten von Hin- und Rückreaktion dem Betrage nach gleich ($v_{Hin} = v_{Rück}$). Die Lage des chemischen Gleichgewichts ergibt sich als ein bestimmtes Konzentrationsverhältnis der reagierenden Stoffe.**

Die Zusammenhänge in einem System, das sich im chemischen Gleichgewicht befindet, lassen sich durch ein **Modell** deutlich machen.
Ein Modell ist eine Abbildung komplizierterer Systeme durch einfachere und übersichtlichere Systeme. Das Modell gibt nur bestimmte, für die Betrachtung wichtige Seiten des Gegenstandes oder des Vorganges richtig wieder. Es verschafft uns eine Ersatzvorstellung oder ein vereinfachtes Bild der Wirklichkeit. Die aus dem Modell gewonnenen Erkenntnisse lassen sich auf ähnliche Fälle übertragen.
Beispiele für Modelle in der Chemie sind die Modelle für das Atom und die Arten der chemischen Bindung. Auch ein Vorgang, wie der in einem Experiment, kann Modellcharakter tragen. Man spricht dann von einem Modellexperiment. Es ist dadurch gekennzeichnet, daß an Stelle des eigentlich zu betrachtenden Vorganges ein dem Wesen nach ähnlicher Vorgang gezeigt wird, an dem die Zusammenhänge besser erkennbar sind.
Das Experiment 6 (↗ Anhang, ▼ 1, S. 107) ist ein Modell für das chemische Gleichgewicht des Systems Bildung und Zersetzung von Jodwasserstoff: Das Meßgefäß I enthält 10 ml Wasser, das Meßgefäß II ist leer. In das Meßgefäß I wird ein Glasrohr 1 mit großem Durchmesser, in das Meßgefäß II ein Glasrohr 2 mit kleinerem Durchmesser jeweils bis auf den Gefäßboden eingetaucht. Die Glasrohre dienen als Stechheber.
Während mit Hilfe des Glasrohres 1 Wasser vom Meßgefäß I in das Meßgefäß II übertragen wird, erfolgt gleichzeitig das Überführen des Glasrohres 2 vom Meßgefäß II in

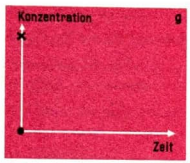


Ausgangszustand



x Wassermasse im Meßgefäß I vor der Übertragung

● Wassermasse im Meßgefäß II vor der Übertragung



x Konzentration von $H_2 + J_2$ vor der Reaktion

● Konzentration von HJ vor der Reaktion



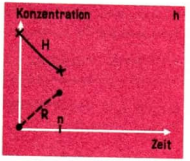
Zustand nach der *n*-ten Übertragung



n Übertragungsoperation *n*

A Abnahme der Wassermasse im Meßgefäß I

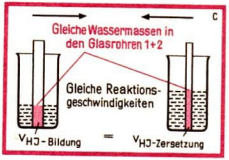
B Zunahme der Wassermasse im Meßgefäß II



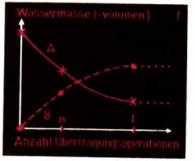
n Zeitpunkt *n*

H Abnahme der Konzentration von $H_2 + J_2$

R Zunahme der Konzentration von HJ



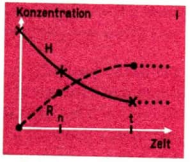
Gleichgewicht



t Anzahl Übertragungsoperationen, bei der sich der Wasserstand in den Meßgefäßen nicht mehr ändert

Überführung gleicher Wassermassen durch die Glasrohre

gleichbleibendes Verhältnis der Wassermasse im Meßgefäß I zur Wassermasse im Meßgefäß II



Einstellzeit des chemischen Gleichgewichts

$v_{HJ\text{-Bildung}} = v_{HJ\text{-Zersetzung}}$

gleichbleibendes (konstantes) Verhältnis der Konzentrationen von $H_2 + J_2$ und HJ (Lage des chemischen Gleichgewichts)

Abb. 11 Modellexperiment zur Einstellung des chemischen Gleichgewichts
a) ··· c) Phasen des Experiments 6 und Beziehungen zwischen Modell und System
$H_2 + J_2 \rightleftarrows 2\,HJ$
d) ··· f) Grafische Darstellungen über den Zusammenhang zwischen Wassermassen in den Meßgefäßen I und II und der Anzahl von Übertragungsoperationen
g) ··· i) Grafische Darstellungen über den Zusammenhang zwischen Konzentration und Zeit für die Ausgangsstoffe Wasserstoff und Jod und das Reaktionsprodukt Jodwasserstoff.

① Warum ändert sich nach Einstellung des Gleichgewichts die Wasserverteilung auf die Meßgefäße I und II im Modellexperiment nicht mehr?

② Vergleichen Sie in Abbildung 11 die Diagramme d ··· f mit den Diagrammen g ··· i! Erläutern Sie die Kurvenverläufe, und benutzen Sie dabei die Abbildungen 11 a ··· c!

③ Erläutern Sie die Merkmale des chemischen Gleichgewichts an Hand des Modellexperiments und mit Hilfe der Abbildung 11!

das Meßgefäß I. Nach jedem Hebervorgang wird der Wasserstand in beiden Meßgefäßen abgelesen. Diese Übertragungsoperationen werden abwechselnd so oft wiederholt, bis sich der Wasserstand in den Meßgefäßen I und II nicht mehr ändert.
① ② ③
Einzelne Phasen des Experiments sowie die Beziehungen zwischen dem Modellexperiment und dem System $H_2 + J_2 \rightleftarrows 2\,HJ$ sind in den Abbildungen 11a ··· 11 c angegeben. Der Zusammenhang zwischen den Wassermassen in den Meßgefäßen und der Anzahl von Übertragungsoperationen ist in den Abbildungen 11 d ··· 11 f grafisch dargestellt. Die Verhältnisse in den Meßgefäßen werden durch die Kurven A und B wiedergegeben. Entsprechend sind in den Abbildungen 11 g ··· 11 i einzelne Phasen des Einstellens des chemischen Gleichgewichts im System Bildung und Zerfall von Jodwasserstoff dargestellt.

Verschiebung der Gleichgewichtslage 5

7 Eine wäßrige Lösung von Jod und Stärke wird erwärmt und danach stark abgekühlt.

Die Lage des chemischen Gleichgewichts ist von den Reaktionsbedingungen abhängig. Gleiche Reaktionsbedingungen bewirken in einem System die Einstellung des gleichen chemischen Gleichgewichts mit unveränderten Konzentrationsverhältnissen der reagierenden Stoffe. Bei veränderten Reaktionsbedingungen bildet sich ein neues Gleichgewicht aus, das sich vom vorhergehenden durch ein verändertes Verhältnis der Konzentrationen der reagierenden Stoffe unterscheidet (Tab. 2).

Tabelle 2 Konzentrationen von Wasserstoff und Jod sowie von Jodwasserstoff im Gleichgewicht $H_2 + J_2 \rightleftarrows 2\,HJ$ bei verschiedenen Temperaturen (Angabe der Konzentrationen in % aller Teilchen des Systems)

Temperatur in °C	Wasserstoff- und Jodmoleküle	Jodwasserstoffmoleküle
327	18,9	81,1
425	21,7	78,3
508	24,0	67,0

Diese Änderung im Verhältnis der Konzentrationen der reagierenden Stoffe wird als **Verschiebung der Gleichgewichtslage** bezeichnet. Die gesetzmäßigen Zusammenhänge zwischen der Verschiebung der Gleichgewichtslage und den Reaktionsbedingungen können mit Hilfe des **Prinzips von Le Chatelier** erklärt werden. Die Gesetzmäßigkeit, die für chemische Gleichgewichte gilt, besagt:

Eine Veränderung der bestimmenden Reaktionsbedingungen bewirkt in einem System, das sich in Gleichgewicht befindet, eine Verschiebung der Gleichgewichtslage. ① ②

Die Gleichgewichtslage ist temperaturabhängig. Eine Temperaturänderung hat Einfluß auf die Verschiebung der Gleichgewichtslage. Die Wirkung der Temperaturänderung im System einer Reaktion hängt mit der Reaktionswärme zusammen.

Bei der Reaktion von Jod mit Stärke zu intensiv blau gefärbter Jodstärke bildet sich ein chemisches Gleichgewicht aus, das unter den Bedingungen des Normzustandes auf der Seite von Jodstärke liegt.



Die Bildung von Jodstärke ist eine exotherme Reaktion.
Eine Temperaturerhöhung bewirkt in diesem System einen verstärkten Ablauf des endothermen Zerfalls von Jodstärke, so daß das chemische Gleichgewicht nunmehr auf der Seite von Jod und Stärke liegt. Das Konzentrationsverhältnis aller reagierenden Stoffe ist im System unter diesen Bedingungen zugunsten der Stoffe Jod und Stärke verschoben. Abkühlen bewirkt die entgegengesetzte Verschiebung der Gleichgewichtslage (Experiment 7).

Durch Temperaturerhöhung wird die Reaktionsgeschwindigkeit einer endothermen Reaktion stark erhöht, weil die endotherme Reaktion unter Wärmeaufnahme erfolgt.
Die Temperaturerhöhung begünstigt die Wärmeaufnahme. Die Reaktionsgeschwindigkeit einer exothermen Reaktion wird durch Temperaturerhöhung weniger gesteigert, weil sie unter Wärmeabgabe abläuft. Die Erhöhung der Temperatur wirkt der Wärmeabgabe entgegen.
Erhöht man daher die Temperatur eines im Gleichgewicht befindlichen Systems, so werden die Geschwindigkeiten der Hin- und Rückreaktion unterschiedlich stark vergrößert; denn eine von beiden Reaktionen ist endotherm, die andere exotherm. Damit ist das chemische Gleichgewicht gestört. Es stellt sich schließlich mit veränderter Gleichgewichtslage wieder ein.

Durch Erwärmen erhöht sich die Geschwindigkeit des Zerfalls von Jodstärke (Rückreaktion) stärker als die Geschwindigkeit der Bildung von Jodstärke (Hinreaktion). Die Folge einer Temperaturerhöhung ist also die Verschiebung der Gleichgewichtslage in Richtung der endotherm verlaufenden Reaktion. ③ ④

Eine Temperaturerniedrigung wirkt sich dagegen auf die Verminderung der Reaktionsgeschwindigkeit bei exothermen Reaktionen stärker aus als bei endothermen Reaktionen.

① Unterscheiden Sie Einstellung des chemischen Gleichgewichts und Verschiebung der Gleichgewichtslage!

② Was sind Reaktionsbedingungen?

③ Bestimmen und begründen Sie den Einfluß einer Temperaturerhöhung auf die thermische Zersetzung von Kalziumkarbonat!

④ Ermitteln Sie die Art der Temperaturänderung für die Verschiebung des Gleichgewichts
$CO_2 + C \rightleftarrows 2\,CO$; $Q = +\,41{,}2$ kcal in Richtung der Bildung von Kohlenmonoxid!

⑤ Bestimmen Sie die Wirkung einer Abkühlung auf ein Gleichgewicht, bei dem die Bildung eines gewünschten Reaktionsproduktes in exothermer Reaktion verläuft!

⑥ Erläutern Sie den Einfluß einer Temperaturerniedrigung auf das Gleichgewicht
$H^+ + OH^- \rightleftarrows H_2O$; $Q = -\,13{,}7$ kcal!

⑦ Erklären Sie den Temperatureinfluß auf die Reaktionsgeschwindigkeit!

■ Durch Abkühlen wird die Geschwindigkeit der Bildung von Jodstärke (Hinreaktion) nicht so stark verringert wie die Geschwindigkeit des Zerfalls von Jodstärke (Rückreaktion). Daher ist diese Temperaturerniedrigung mit einer Verschiebung der Gleichgewichtslage in Richtung der exotherm verlaufenden Reaktion verbunden. ⑤ ⑥

Der Einfluß der Temperatur auf die Verschiebung der Gleichgewichtslage ist nicht gleichzusetzen mit dem Zusammenhang zwischen Temperatur und Reaktionsgeschwindigkeit. Eine Temperaturänderung wirkt sich auf exotherme oder endotherme Reaktionen unterschiedlich aus. Hingegen führt eine Temperaturerhöhung stets zu einer Vergrößerung der Reaktionsgeschwindigkeit. ⑦

▶ **Temperaturerhöhung bewirkt im System die verstärkte Bildung von Stoffen, die Produkte einer endothermen Reaktion sind. Temperaturerniedrigung bewirkt die verstärkte Bildung von Stoffen, die Produkte einer exothermen Reaktion sind.**

Die Lage eines chemischen Gleichgewichts ist druckabhängig, wenn das Volumen der Ausgangsstoffe sich vom Volumen der Reaktionsprodukte unterscheidet.
Das wirkt sich besonders bei Gleichgewichten zwischen gasförmigen Stoffen aus.

■ Im System

$C_6H_6 + 3\,H_2 \rightleftarrows C_6H_{12}$; $Q = -\,51{,}6$ kcal

ist die jeweilige Lage des Gleichgewichts durch die Reaktionsbedingungen Temperatur und Druck bestimmt (Tab. 3, S. 30). Aus den Angaben in den waagerechten Reihen in Tabelle 3 geht hervor, daß die Lage des Gleichgewichts bei konstanter Temperatur durch Druckerhöhung in Richtung einer abnehmenden Benzolkonzentration verändert wird. Druckerhöhung fördert also die Bildung von Zyklohexan (Hydrierung von Benzol), die Zersetzung von Zyklohexan (Dehydrierung von Zyklohexan) wird hingegen zurückgedrängt.

Tabelle 3 Einfluß von Druck und Temperatur
auf die Lage des chemischen Gleichgewichts bei der Benzolhydrierung
(Angabe der Benzolkonzentration in % des Volumens)

Temperatur in °C	Druck in at				
	1	10	50	100	200
250	6,94	0,007	0,000 06	0,000 007	0,000 000 9
300	85,00	0,56	0,004	0,000 6	0,000 07
350	99,54	18,00	0,18	0,02	0,03
400	99,98	83,30	3,86	0,50	0,06
450	100,00	98,09	37,80	7,07	0,95

Der Zusammenhang zwischen Druck und Lage des chemischen Gleichgewichts ergibt sich aus den Volumenverhältnissen bei der Hin- und Rückreaktion. ①

Im Falle des Systems Benzol/Wasserstoff/Zyklohexan reagieren folgende Stoffmengen, denen bestimmte Volumen zugeordnet werden können, miteinander:

1 mol Benzol + 3 mol Wasserstoff $\rightleftarrows$ 1 mol Zyklohexan

Bei der Bildung des Zyklohexans (Hinreaktion) nimmt das Volumen ab; bei der Zersetzung des Zyklohexans (Rückreaktion) nimmt es zu. Eine Druckänderung führt zur Verschiebung der Gleichgewichtslage entsprechend dem Prinzip von Le Chatelier.

Druckerhöhung verstärkt den Ablauf derjenigen Reaktion, die mit Volumenverminderung verbunden ist. Bei Druckerniedrigung läuft dagegen die Reaktion verstärkt ab, die zur Volumenvergrößerung führt. Die Beziehungen zwischen Druckänderungen und Verschiebung der Gleichgewichtslage gelten für alle Reaktionen, die unter Volumenänderung verlaufen. ② ③ ④

Druckerhöhung bewirkt im System den verstärkten Ablauf solcher Reaktionen, bei denen das Volumen abnimmt. Druckerniedrigung bewirkt den verstärkten Ablauf solcher Reaktionen, bei denen das Volumen zunimmt.

Bei Reaktionen gasförmiger Stoffe besteht ein Zusammenhang zwischen Stoffkonzentration und Gasdruck (↗ S. 8).
Konzentrationsänderung eines Stoffes bedeutet Veränderung der Anzahl von Teilchen dieses Stoffes in einem bestimmten Volumen. Erhöht man in einem System die Konzentration eines Stoffes durch Zufuhr dieses Stoffes von außen, so verschiebt sich die Lage des chemischen Gleichgewichts. Es läuft die Reaktion verstärkt ab, die unter Verbrauch dieses Stoffes verläuft. Bei Konzentrationserniedrigung durch Entzug von Stoffen läuft die Reaktion verstärkt ab, die zur erneuten Bildung des entzogenen Stoffes führt.

Konzentrationserhöhung bewirkt im System den verstärkten Ablauf solcher Reaktionen, bei denen der zugeführte Stoff verbraucht wird. Konzentrationserniedrigung bewirkt den verstärkten Ablauf solcher Reaktionen, bei denen der abgeführte Stoff erneut gebildet wird.

① Erklären Sie den Zusammenhang zwischen Druck und Volumen eines Gases!

② Bestimmen Sie die Art der Druckänderung für die Verschiebung des Gleichgewichts $C_2H_4 + H_2 \rightleftarrows C_2H_6$ in Richtung der Hydrierung!

③ Diskutieren Sie am Beispiel des Gleichgewichts $H_2 + J_2 \rightleftarrows 2\,HJ$; $Q = -2{,}6$ kcal den Einfluß a) einer Temperaturänderung und b) einer Druckänderung!

④ Ermitteln und begründen Sie günstige Bedingungen für eine hohe Konzentration an Zyklohexan im System Benzol/Wasserstoff/Zyklohexan! Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit den Angaben in Tabelle 3!

⑤ Nennen Sie zwei Reaktionen, bei denen Stoffe als Katalysatoren wirken! Wenden Sie dabei Kenntnisse aus dem Chemie- und Biologieunterricht der Klasse 8 an!

⑥ Erläutern Sie Eigenschaften des Katalysators!

Katalyse 6

Erscheinung der Katalyse und chemisches Gleichgewicht

8

Wasserstoffperoxid wird in Gegenwart von Mangan(IV)-oxid zersetzt. Das gasförmige Reaktionsprodukt ist nachzuweisen.

Es gibt viele chemische Reaktionen, die in Gegenwart bestimmter Stoffe mit veränderter Reaktionsgeschwindigkeit verlaufen.

Wasserstoffperoxid zerfällt unter den Bedingungen des Normzustandes allmählich in Wasser und Sauerstoff, der sich durch Bildung von Gasbläschen anzeigt. Die Sauerstoffentwicklung erfolgt schneller, wenn zum Beispiel Mangan(IV)-oxid zugegen ist (Experiment 8). Ähnlich wirken beispielsweise Hydroxid-Ionen (↗ Experiment 3, S. 19).

Stoffe, die durch ihre Anwesenheit den Ablauf chemischer Reaktionen beeinflussen, werden als **Katalysatoren** bezeichnet. Sie zeigen ihren Einfluß oft erst unter bestimmten Reaktionsbedingungen. So wird der Katalysator Hydroxid-Ionen bei der Zersetzung von Wasserstoffperoxid erst bei erhöhter Temperatur wirksam (↗ Experiment 3, S. 19). Katalysatoren sind wiederholt verwendbar.
Beispielsweise wirkt dasselbe Mangan(IV)-oxid, das durch Abfiltrieren vom System der reagierenden Stoffe abgetrennt wurde, wiederum in gleicher Weise, wenn es in Berührung mit frischem Wasserstoffperoxid gebracht wird. Katalysatoren verbrauchen sich also nicht.
Verschiedenartige Katalysatoren können auf ein und dasselbe System unterschiedlich wirken.
Das Einwirken von Katalysatoren auf chemische Reaktionen wird **Katalyse** genannt. ⑤ ⑥
Je nach dem Einfluß auf die Reaktionsgeschwindigkeit unterscheidet man positive und negative Katalyse. **Positive Katalyse** ist Beschleunigung der Reaktionsabläufe im

System (Experiment 8); **negative Katalyse** bedeutet Verzögerung der Reaktionsabläufe im System.

Der Zerfall von Wasserstoffperoxid in Wasser und Sauerstoff geht in Anwesenheit von Mangan(IV)-oxid mit größerer Geschwindigkeit vor sich als ohne diesen Stoff (Experiment 8). Es handelt sich um positive Katalyse des Wasserstoffperoxidzerfalls. Wird hingegen an Stelle von Mangan(IV)-oxid beispielsweise Harnstoff (↗ S. 96) zu Wasserstoffperoxid hinzugegeben, so erfolgt die Entwicklung von Sauerstoff wesentlich langsamer als ohne irgendeinen Zusatz. Es liegt negative Katalyse des Wasserstoffperoxidzerfalls vor. ①

Katalysatoren ändern die Reaktionsgeschwindigkeit. Sie liegen am Ende der Reaktion in unveränderter Form vor.

Katalysatoren wirken im System stets auf Hin- und Rückreaktion in gleichem Maße. Bei positiver Katalyse wird die Reaktionsgeschwindigkeit der Hinreaktion im gleichen Verhältnis vergrößert wie die Reaktionsgeschwindigkeit der Rückreaktion. Die Katalysatoreinwirkung auf das chemische Gleichgewicht läßt sich teilchenmäßig deuten (Abb. 12).

Es mögen sich unter bestimmten Reaktionsbedingungen beispielsweise 20% der Ausgangsstoffe mit 80% der Reaktionsprodukte im chemischen Gleichgewicht befinden. Dabei sollen sich in einer bestimmten Zeit ein Teilchen des Ausgangsstoffes in ein Teilchen des Reaktionsproduktes und in der gleichen Zeit ein anderes Teilchen des Reaktionsproduktes in ein anderes Teilchen des Ausgangsstoffes umwandeln (Abb. 12 a). In Gegenwart eines Katalysators mögen dann im gleichen Zeitraum je drei Teilchen umgewandelt werden. Das Konzentrationsverhältnis der reagierenden Stoffe ändert sich dabei nicht (Abb. 12 b).

Das bedeutet: Durch Katalyse verändern sich die Geschwindigkeiten von Hin- und Rückreaktion im gleichen Verhältnis; die Lage des Gleichgewichts bleibt erhalten. Die positive Katalyse bringt also eine Verkürzung der Einstellzeit des chemischen Gleichgewichts, nicht aber eine Verschiebung der Gleichgewichtslage. Ein Diagramm über die Abhängigkeit der Konzentration von der Zeit für Ausgangsstoffe und Reaktions-



a) *ohne* Katalysator b) *mit* Katalysator

Abb. 12 Chemisches Gleichgewicht

① Unterscheiden Sie positive und negative Katalyse!

② Erklären Sie die Wirkung von Katalysatoren auf das chemische Gleichgewicht am Beispiel einer Hydrierung/Dehydrierung! Verwenden Sie dabei Abbildung 13!

③ Erläutern Sie den Unterschied zwischen der Katalysatorwirkung und dem Einfluß von Änderungen der Reaktionsbedingungen auf das chemische Gleichgewicht!

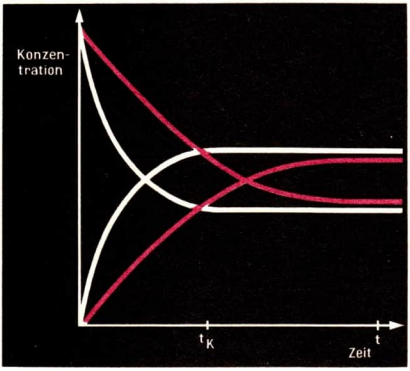


Abb. 13 Im System *ohne* Katalysator stellt sich das chemische Gleichgewicht nach der Einstellzeit t ein. Im System *mit* Katalysator erfolgt die Einstellung des chemischen Gleichgewichts zu einem früheren Zeitpunkt (Einstellzeit t_K). Der Katalysator beeinflußt die Gleichgewichtslage nicht; das Verhältnis der Konzentrationen bleibt konstant.

produkte zeigt den Unterschied zwischen einem System im chemischen Gleichgewicht mit und ohne Katalysator (Abb. 13). ② ③
Katalysatoren verkürzen oder verlängern die Einstellzeit des chemischen Gleichgewichts. Sie fördern oder hemmen also das Erreichen des chemischen Gleichgewichts.

Beispielsweise reagieren Wasserstoff und Sauerstoff im Normzustand praktisch nicht: Zur Reaktion von nur 0,15% des Gasgemisches bei 9 °C ist die unvorstellbar lange Zeit von 100 Milliarden (10^{11}) Jahren nötig. Bringt man dieses Gemisch hingegen mit fein verteiltem Platin in Berührung, so reagieren die Stoffe praktisch im Bruchteil einer Sekunde. Das unter diesen Bedingungen mögliche chemische Gleichgewicht, dessen Lage fast vollständig auf die Seite von Wasser verschoben ist, wird in Gegenwart des Katalysators verwirklicht.

Katalysatoren beschleunigen (positive Katalyse) oder verzögern (negative Katalyse) das Einstellen des chemischen Gleichgewichts. Die Lage des chemischen Gleichgewichts wird dabei nicht verändert.

Viele chemische Reaktionen sind Katalysen. Die Katalyse hat große Bedeutung. Oftmals wird erst durch Katalyse die großtechnische Durchführung chemischer Reaktionen im wirtschaftlich erfolgreichen Maßstab möglich.

Ammoniak NH_3, das zur Herstellung von Düngemitteln und anderer wichtiger Chemieerzeugnisse große volkswirtschaftliche Bedeutung besitzt, kann durch Synthese dargestellt werden. Dabei läßt man Wasserstoff und Stickstoff unter Einwirkung großer elektrischer Energien im Lichtbogen reagieren. Die Herstellung großer Mengen Ammoniak in technischen Anlagen der Chemiebetriebe konnte aber erst dann erfolgen, als ein geeigneter Katalysator – eine Mischung aus Eisen, Aluminiumoxid und Kaliumoxid – gefunden worden war. Nunmehr wurde ein Verfahren möglich, zu dem nicht so viel Energie benötigt wurde.

Die positive Katalyse führt zur Verkürzung der Produktionszeit. Nicht die absolut gewinnbare Menge eines Stoffes wird verändert, sondern die gleiche Menge läßt sich in kürzerer Zeit herstellen. Eine Möglichkeit, die Menge an technisch wichtigen Reaktionsprodukten in einer bestimmten Produktionszeit zu steigern, ist der Einsatz hochwirksamer Katalysatoren. Sie verkürzen die Einstellzeiten der chemischen Gleichgewichte, die den chemisch-technischen Prozessen zugrunde liegen.
Die Wissenschaftler und Techniker in den großen Chemiebetrieben unserer Republik sind darum bemüht, immer wirksamere Katalysatoren zu entwickeln.
Beispielsweise werden im VEB Leuna-Werke „Walter Ulbricht" neue Katalysatoren für das Kracken von Erdölfraktionen erprobt. In diesem größten Chemiebetrieb unserer Republik werden die meisten technisch wichtigen Katalysatoren, die man als **Kontakte** bezeichnet, hergestellt. In der Deutschen Demokratischen Republik werden in speziellen Katalyse-Forschungsinstituten, die zur Deutschen Akademie der Wissenschaften gehören und sich in Berlin und Rostock befinden, Probleme der Theorie und Praxis der Katalyse bearbeitet. ①
Auch für die physiologischen Prozesse im lebenden Organismus ist die Katalyse bedeutsam. Die Katalyse im biologischen Bereich wird **Biokatalyse** genannt. Zu den Biokatalysen gehören zum Beispiel die Stoffwechselvorgänge, wie Verdauung, biologische Oxydation und Assimilation durch Fotosynthese. Daß beispielsweise physiologische Prozesse bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen mit ausreichender Geschwindigkeit verlaufen, ist auf die Wirkung von Biokatalysatoren zurückzuführen. Zu den Biokatalysatoren gehören alle Enzyme, Hormone und Vitamine. ②

Verlauf der Katalyse

9 ▼ Auf festes Kaliumdichromat wird wenig Wasserstoffperoxid getropft.

Um die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff unter Bildung von Wasser auszulösen, ist eine bestimmte Aktivierungsenergie erforderlich. In diesem Falle läßt sich durch Erwärmen auf etwa 600 °C erreichen, daß sehr viele Teilchen die zur Reaktion notwendige Mindestenergie erhalten. Wird hingegen Wasserstoff in Gegenwart von Platin als Katalysator mit Sauerstoff zusammengebracht, so treten bereits unter den Reaktionsbedingungen des Normzustandes nach kurzer Zeit Entzündung und Verbrennung des Wasserstoffs ein.
Bei positiver Katalyse wird also die erforderliche Aktivierungsenergie herabgesetzt. Da die Energie auf die Teilchen ungleichmäßig verteilt ist (↗ S. 11), bedeutet diese Herabsetzung der Aktivierungsenergie: Im System mit Katalysator weist eine größere

① Erörtern Sie an einem Beispiel die positive Katalyse als Steigerung der Ausbeute in einer bestimmten Zeit (↗ Experiment 8, S. 31)!

② Beschreiben Sie einen physiologischen Prozeß als Biokatalyse!

Anzahl von Teilchen die für die Reaktion erforderliche Mindestenergie auf als im System ohne Katalysator.

Zur Zersetzung von Wasserstoffperoxid unter den Bedingungen des Normzustandes muß eine Aktivierungsenergie von 36 kcal aufgewendet werden. Durch Katalyse läßt sie sich herabsetzen und beträgt unter gleichen Bedingungen bei Verwendung der Katalysatoren Jodid-Ionen 27 kcal, Platin 23,4 kcal und Enzym Katalase nur noch 12 kcal.

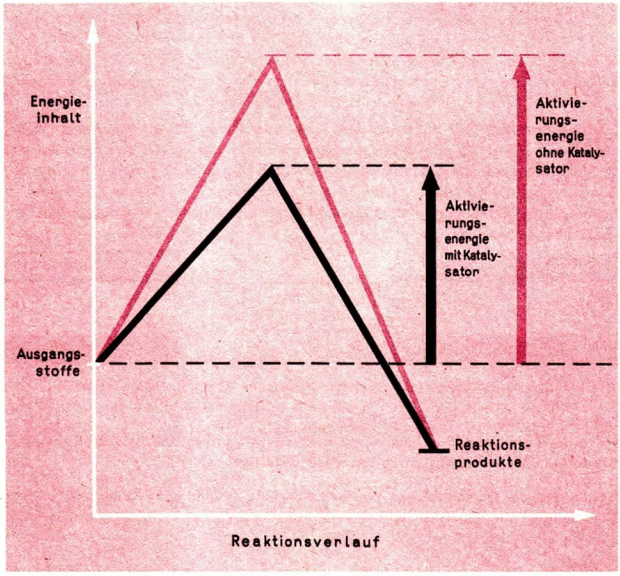


Abb. 14 Abhängigkeit des Energieinhaltes der Stoffe vom zeitlichen Verlauf der chemischen Reaktion *mit* Katalysator und *ohne* Katalysator. Der Katalysator bewirkt eine Herabsetzung der Aktivierungsenergie. (Die Verkürzung der Einstellzeit des chemischen Gleichgewichts durch den Katalysator wurde in dieser Darstellung nicht berücksichtigt.)

Die Energieverhältnisse bei chemischen Reaktionen mit und ohne Katalysator werden deutlich durch das Diagramm über den funktionalen Zusammenhang zwischen Energieinhalt der Stoffe und zeitlichem Verlauf der chemischen Reaktion (Abb. 14, S. 35). Die Herabsetzung der Aktivierungsenergie ist ein Merkmal der Katalyse. Die Reaktionswärme der chemischen Reaktion bleibt hingegen unverändert. ① ②

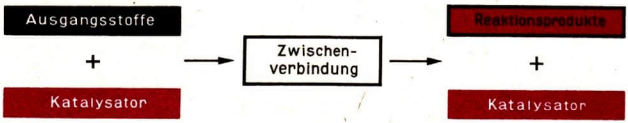
Durch Katalyse werden im chemischen Gleichgewicht die Aktivierungsenergien sowohl für die Hinreaktion als auch für die Rückreaktion gleichmäßig verändert. Diese Änderung der Aktivierungsenergien bedingt die Veränderung in der Einstellzeit des chemischen Gleichgewichts. ③

▶ **Katalysatoren verändern die Aktivierungsenergien für Hin- und Rückreaktion einer umkehrbaren Reaktion.**

Der Katalysator ist an der chemischen Reaktion beteiligt.

■ Bei der Einwirkung von Wasserstoffperoxid auf orange gefärbtes festes Kaliumdichromat entsteht zunächst eine intensiv blau gefärbte Zwischenverbindung. Diese Zwischenverbindung wandelt sich unter ständiger Farbaufhellung und Gasentwicklung in Wasser und Sauerstoff um. Außerdem bildet sich – an der Orangefärbung erkennbar – kristallines Kaliumdichromat zurück (Experiment 9, S. 34).

Das Wasserstoffperoxid bildet mit dem Kaliumdichromat, das als Katalysator wirkt, eine Zwischenverbindung. Diese Zwischenverbindung gibt Wasser und Sauerstoff ab, wobei der Katalysator zurückgebildet wird. Die Katalyse ist allgemein durch die Bildung und den Zerfall von unbeständigen Zwischenverbindungen oder Zuständen, an denen der Katalysator beteiligt ist, gekennzeichnet. Nicht immer sind diese Zwischenverbindungen nachweisbar.



Die Beteiligung des Katalysators an der chemischen Reaktion ist die Ursache für die Änderung der Aktivierungsenergien. Sie stellt ein weiteres Merkmal der Katalyse dar.

▶ **Katalysatoren sind durch Bildung und Zerfall unbeständiger Zwischenverbindungen an der chemischen Reaktion beteiligt.**

Am Beispiel der Zersetzung von Wasserstoffperoxid mit und ohne Katalysator wird in Abbildung 15 die Katalyse als Änderung von Teilchenanordnung und Aktivierungsenergie betrachtet. ④

▶ **Ein Katalysator ist ein Stoff, der sich an der chemischen Reaktion beteiligt und die Aktivierungsenergie herabsetzt und somit die Einstellung des chemischen Gleichgewichts beschleunigt (positive Katalyse) oder verzögert (negative Katalyse). Der Katalysator beeinflußt die Lage eines chemischen Gleichgewichts nicht und verändert auch nicht die Reaktionswärme.**

① Unterscheiden Sie Aktivierungsenergie und Reaktionswärme!

② Erläutern Sie das Diagramm in Abbildung 14, S. 35!

③ Erklären Sie die Verkürzung der Einstellzeit des chemischen Gleichgewichts durch Herabsetzung der Aktivierungsenergie!

④ Erläutern Sie die Katalyse am System Wasserstoffperoxid/Wasser/Sauerstoff! Verwenden Sie dazu Abbildung 15!

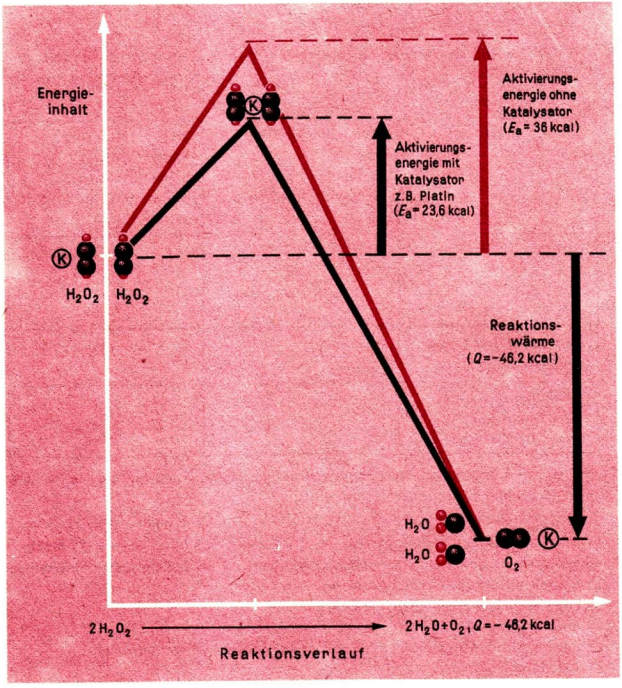


Abb. 15 Zersetzung von Wasserstoffperoxid *mit* Katalysator und *ohne* Katalysator als Stoffumwandlung bei Änderung der Teilchenanordnung und als energetische Veränderung des Systems

Wiederholung und Übung 7

1. Erläutern Sie Einflußfaktoren auf die Reaktionsgeschwindigkeit!
2. Erklären Sie Merkmale des chemischen Gleichgewichts!
3. Diskutieren Sie die Wirkung einer Temperaturerhöhung a) auf Auslösung und Geschwindigkeit der chemischen Reaktion, b) auf das chemische Gleichgewicht!
4. Ermitteln Sie die Volumenverhältnisse folgender Gasreaktionen, und schließen Sie auf den Einfluß des Druckes:
   a) $2\,H_2 + O_2 \rightleftarrows 2\,H_2O$;
   b) $H_2 + J_2 \rightleftarrows 2\,HJ$;
   c) $2\,CO + O_2 \rightleftarrows 2\,CO_2$!
5. Schließen Sie von der Anzahl der in einer bestimmten Zeit entstehenden und zerfallenden Moleküle auf das Vorhandensein des chemischen Gleichgewichts im System $A + B \rightleftarrows C$!

In einer bestimmten Zeit	chemisches Gleichgewicht vorhanden (+) nicht vorhanden (—)	insgesamt gesehen entsteht C (+) bleibt die Konzentration an C gleich (0) zerfällt C (—)
entstehen 2 Moleküle C; zerfallen 2 Moleküle C		
entstehen 3 mol C; zerfallen 2 mol C		
verbinden sich 2 mol A mit 1 mol B; zersetzen sich 2 mol C		

6. Ermitteln und begründen Sie optimale Reaktionsbedingungen für die Herstellung einer höchstmöglichen Konzentration an
   a) Wasserstoff im Gleichgewicht $CO + H_2O \rightleftarrows CO_2 + H_2$; $Q = -10$ kcal,
   b) Ammoniak NH_3 im Gleichgewicht $N_2 + 3\,H_2 \rightleftarrows 2\,NH_3$; $Q = -22$ kcal!
7. Vergleichen Sie das chemische Gleichgewicht mit und ohne Katalysator hinsichtlich
   a) Einstellzeit des chemischen Gleichgewichts,
   b) Lage des chemischen Gleichgewichts,
   c) absolut gewinnbarer Menge an Reaktionsprodukt,
   d) gewinnbarer Menge an Reaktionsprodukt in einer bestimmten Zeit,
   e) Aktivierungsenergie,
   f) Reaktionswärme!

Einige organische Verbindungen mit einer funktionellen Gruppe

Außer den Kohlenwasserstoffen, wie den Alkanen, Alkenen, Alkinen und Benzol, gibt es organische Verbindungen mit einer Atomgruppe im Molekül, die die chemischen Eigenschaften des betreffenden Stoffes weitgehend bestimmt. Diese Atomgruppen bezeichnet man als **funktionelle Gruppen**.
Bei einigen dieser Verbindungen ist in der funktionellen Gruppe Sauerstoff enthalten, so daß diese Verbindungen aus den Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff zusammengesetzt sind. Solche Verbindungen können als **Sauerstoffderivate** der Kohlenwasserstoffe aufgefaßt werden. Sie unterscheiden sich von den Kohlenwasserstoffen durch ihre Eigenschaften, die durch die unterschiedliche Struktur ihrer Moleküle bedingt sind. Stoffe mit der gleichen funktionellen Gruppe im Molekül werden zu Stoffklassen zusammengefaßt.

▶ **Funktionelle Gruppen sind Atomgruppen, die die chemischen Eigenschaften von Stoffen weitgehend bestimmen.**

Alkanole 8

10 ▼ Wenige Milliliter einer verdünnten Kaliumhydroxidlösung sowie wenige Milliliter eines Gemisches von Methanol und Wasser werden mit Unitest oder Lackmus geprüft.

11 ▼ Jeweils gleiche geringe Massen Methanol, Äthanol und Propanol werden mit jeweils gleichen geringen Massen Natrium zur Reaktion gebracht. Es wird die Zeit gemessen, die erforderlich ist, um jeweils 10 ml des entstehenden Gases zu entwickeln.

12 ▼ Auf einer Uhrglasschale werden wenige Tropfen Methanol oder Äthanol abgebrannt.

Zu den Sauerstoffderivaten der Kohlenwasserstoffe gehören die **Alkohole**. Sie enthalten als funktionelle Gruppen eine oder mehrere **Hydroxylgruppen —OH** im Molekül. Die Hydroxylgruppe ist eine Atomgruppe, die sich aus einem Wasserstoffatom und einem Sauerstoffatom zusammensetzt.

▶ **Alkohole sind organische Verbindungen, deren Moleküle Hydroxylgruppen enthalten.**

Derivate der Alkane mit einer Hydroxylgruppe im Molekül werden als **Alkanole** bezeichnet. Sie gehören zu den Alkoholen. Alkanole kann man sich aus den Alkanen abgeleitet denken, indem ein Wasserstoffatom durch eine Hydroxylgruppe ersetzt ist. Da jedes beliebige Wasserstoffatom des Alkanmoleküls durch eine Hydroxylgruppe ersetzt sein kann, kann auch die Hydroxylgruppe an jedes beliebige Kohlenstoffatom im Molekül gebunden sein. Die Hydroxylgruppe der Alkanole ist für diese Stoffe kennzeichnend. Sie ist ein Strukturmerkmal der Alkanole. Die Struktur der Moleküle bestimmt weitgehend die chemischen Eigenschaften der Alkanole. Die Hydroxylgruppe ist als funktionelle Gruppe der Alkanole zugleich der reaktionsfähigste Teil des Alkanolmoleküls.
Im folgenden werden die Alkanole betrachtet, bei denen die Hydroxylgruppe an das erste Kohlenstoffatom der Kohlenstoffkette gebunden ist (Abb. 16). ① ②

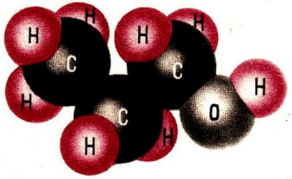
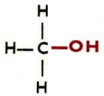


Abb. 16 Molekülmodell von Propanol

▶ **Alkanole können als Derivate der Alkane aufgefaßt werden, bei denen im Molekül ein Wasserstoffatom durch eine Hydroxylgruppe —OH ersetzt ist. Die funktionelle Gruppe der Alkanole ist die Hydroxylgruppe.**

Im Alkanolmolekül besteht zwischen dem Sauerstoffatom der Hydroxylgruppe und dem Kohlenstoffatom des Alkyls eine Atombindung.

■



Infolge der unterschiedlichen Bindung der Hydroxylgruppe der Alkanole und des Hydroxid-Ions der Hydroxide zeigen Alkanole im Gegensatz zu den Hydroxiden in wäßriger Lösung keine Reaktion mit Indikatoren (Experiment 10). ③

▶ **In den Molekülen der Alkanole besteht zwischen der Hydroxylgruppe und dem Alkyl eine Atombindung.**

Die systematischen Namen der Alkanole sind aus dem Namen des Alkans mit der gleichen Anzahl an Kohlenstoffatomen im Molekül und der Endung **ol** zusammengesetzt. Die Endung gibt die Art der funktionellen Gruppe an. Neben den systematischen Namen werden noch Trivialnamen verwendet. Das sind Namen, die meist aus Vorkommen oder aus der Bildungsreaktion der Verbindung abgeleitet sind (Tab. 4, S. 42). ④

① Erklären Sie den Begriff Derivat an einem Beispiel! (↗„Chemie in Übersichten", S. 95)

② a) Nennen Sie die Stoffklassen der Kohlenwasserstoffe!
b) Erläutern Sie für jede Stoffklasse die Strukturmerkmale der entsprechenden Moleküle!
c) Inwiefern bestimmt die Struktur der Moleküle die Eigenschaften der betreffenden Stoffe? (↗„Chemie in Übersichten", S. 101 ··· 104)

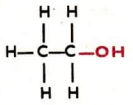
③ Wie können Hydroxid-Ionen nachgewiesen werden?

④ Nennen Sie die Namen der Alkane mit 1 ··· 10 Kohlenstoffatomen im Molekül!

⑤ Übertragen Sie die folgende Tabelle in Ihr Heft! Ergänzen Sie die fehlenden Angaben!

Anzahl der Kohlenstoffatome im Molekül	Name des Alkanols	Summenformel des Alkanols
	Butanol	
6		$C_6H_{17}OH$
10		

⑥ Kennzeichnen Sie das Wesen der Substitution an einem Beispiel!

	Name des Alkans mit der gleichen Anzahl von Kohlenstoffatomen	Endung ol (Kennzeichnung der funktionellen Gruppe)
Name	Äthan	ol
	Äthanol	
Bedeutung	2 Kohlenstoffatome im Molekül	1 Hydroxylgruppe im Molekül
Strukturformel		

⑤

Alkanole lassen sich im Experiment aus Alkanen herstellen. Aus Alkanen können Alkanole dargestellt werden, indem zunächst Wasserstoff durch Chlor substituiert wird. Es ist jedoch nicht möglich, die Hydroxylgruppe direkt gegen Wasserstoff auszutauschen. ⑥

$$CH_4 + Cl_2 \longrightarrow CH_3Cl + HCl$$

Das entstehende Substitutionsprodukt Monochlormethan wird anschließend mit Kalium-

hydroxidlösung zur Reaktion gebracht. Dabei wird das Chloratom im Molekül durch eine Hydroxylgruppe ersetzt.

■ $CH_3Cl + KOH \longrightarrow \mathbf{CH_3OH} + KCl$

Bei dieser Reaktion findet eine Neuverteilung der Elektronen statt, indem die Hydroxid-Ionen zu Hydroxylgruppen und die Chloratome zu Chlorid-Ionen werden. Die Hydroxid-Ionen steuern 2 Elektronen zur Ausbildung eines gemeinsamen Elektronenpaares zwischen Hydroxylgruppe und Kohlenstoffatom bei. Das gemeinsame Elektronenpaar zwischen Kohlenstoffatom und Chloratom wird hingegen vom Chlorid-Ion aufgenommen. ①

■ $CH_3Cl + K^+ + OH^- \rightleftharpoons \mathbf{CH_3OH} + K^+ + Cl^-$

Alkanole können aber auch aus Alkenen dargestellt werden, indem katalytisch Wasser angelagert wird. Die Wasseranlagerung ist eine Addition. Auf Grund der Doppelbindung des Alkenmoleküls reagiert jeweils ein Wassermolekül mit einem Alkenmolekül. ② ③ ④ ⑤ ⑥

■ $CH_2{=}CH_2 + H_2O \overset{\text{Kat.}}{\rightleftharpoons} \mathbf{CH_3{-}CH_2{-}OH}$

Diese Reaktion ist umkehrbar und kann zur Darstellung von Alkenen aus Alkanolen genutzt werden, indem katalytisch Wasser abgespalten wird. Die Wasserabspaltung ist eine Eliminierung.

▶ **Alkanole können aus Alkanen durch schrittweise Substitution oder aus Alkenen durch Addition von Wasser dargestellt werden.**

Die Alkanole bilden wie die Alkane, von denen sie sich ableiten, eine homologe Reihe (Tab. 4). Die Formeln der benachbarten Glieder dieser Reihe unterscheiden sich jeweils um die Differenz von CH_2.

Tabelle 4 Einige Alkanole

systematischer Name	Trivialname	Summenformel	vereinfachte Strukturformel
Methanol	—	CH_3OH	$CH_3{-}OH$
Äthanol	Äthylalkohol	C_2H_5OH	$CH_3{-}CH_2{-}OH$
Propanol	Propylalkohol	C_3H_7OH	$CH_3{-}CH_2{-}CH_2{-}OH$
Butanol	Butylalkohol	C_4H_9OH	$CH_3{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}OH$
Pentanol	Amylalkohol	$C_5H_{11}OH$	$CH_3{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}OH$

Die Alkanale unterscheiden sich auf Grund der unterschiedlichen Länge der Kohlenstoffkette im Alkyl in ihren physikalischen Eigenschaften. So nimmt die Wasserlöslichkeit mit zunehmender Molekülgröße ab. Der Einfluß des Alkyls überwiegt zunehmend gegenüber dem Einfluß der funktionellen Gruppe. Die Schmelz- und die Siedetemperaturen ändern sich ebenfalls gesetzmäßig (Abb. 17). ⑦ ⑧ ⑨

① Erklären Sie, inwiefern bei der Reaktion von Monobrommethan mit Kaliumhydroxid eine Neuverteilung von Elektronen stattfindet! Beachten Sie die Bindungsverhältnisse bei den Ausgangsstoffen und den Reaktionsprodukten!

② a) Worin besteht das Wesen der Addition? (↗ „Chemie in Übersichten", S. 56)
b) Begründen Sie, daß die Wasseranlagerung an Alkene eine Addition ist!

③ Welchen Einfluß hat eine Druckänderung auf die Gleichgewichtslage, wenn Ausgangsstoffe und Reaktionsprodukte gasförmig sind?

④ a) Berechnen Sie, wieviel Tonnen Propanol durch Wasseranlagerung an 21 t, 42 t und 84 t Propen maximal hergestellt werden können!
b) Wieviel Tonnen Propanol entstehen aus den angegebenen Massen Propen, wenn jeweils nur 80% des Propens reagieren?

⑤ Warum ist es unmöglich, Methanol durch Wasseranlagerung an Alkene darzustellen?

⑥ Nennen Sie Beispiele für Additionsreaktionen des Äthens! Geben Sie dazu die Reaktionsgleichungen an! (↗ „Chemie in Übersichten", S. 103)

⑦ Erläutern Sie das Wesen homologer Reihen! (↗ „Chemie in Übersichten", S. 93)

⑧ Bestimmen Sie an Hand der Abbildung 17 den Aggregatzustand der angegebenen Alkanole bei 20 °C (Zimmertemperatur)!

⑨ Geben Sie Namen und Summenformeln für die Alkanole mit 5, 7 und 9 Kohlenstoffatomen im Molekül an!

Die chemischen Eigenschaften aller Alkanole sind auf Grund der gleichen funktionellen Gruppe ähnlich. So reagieren Alkanole mit Natrium. Dabei wird Wasserstoff frei (Experiment 11). Das Wasserstoffatom der Hydroxylgruppe ist durch Atombindung

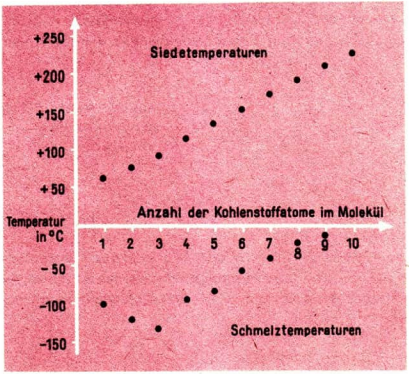


Abb. 17
Schmelztemperaturen und Siedetemperaturen einiger Alkanole

mit teilweisem Ionencharakter an das Sauerstoffatom gebunden. Es kann durch ein Natriumatom substituiert werden.

$$2\ CH_3OH + 2\ Na \rightleftarrows 2\ CH_3ONa + H_2$$

Die Größe des Alkyls beeinflußt die chemische Wirksamkeit der funktionellen Gruppe im Molekül. So ist bei der Reaktion eines Alkanols mit Natrium die Reaktionsgeschwindigkeit vom Bau des Alkanols abhängig.

Die Reaktionsgeschwindigkeit der Reaktion von Äthanol mit Natrium beträgt etwa $\frac{1}{4}$ und die der Reaktion von Propanol mit Natrium $\frac{1}{20}$ der Reaktionsgeschwindigkeit der Reaktion von Methanol mit Natrium (Experiment 11). ①

Alkanole sind brennbar. Sie verbrennen auf Grund ihrer Zusammensetzung zu Kohlendioxid und Wasser (Experiment 12). ②

$$2\ CH_3OH + 3\ O_2 \longrightarrow 2\ CO_2 + 4\ H_2O$$

Die Alkanole Methanol, Äthanol und Propanol sind Glieder einer homologen Reihe. Die funktionelle Gruppe im Molekül und die Länge der Kohlenstoffkette des jeweiligen Alkyls bestimmen die Eigenschaften der Alkanole.

Methanol 9

13

Vorsicht! Proben von Schmalz und Speiseöl werden mit Methanol versetzt und geschüttelt.

Methanol CH_3OH ist das Alkanol mit der geringsten Molekülgröße. Es kann als Sauerstoffderivat des Methans aufgefaßt werden. Die vier bindenden Elektronen des Kohlenstoffatoms sind wie beim Methanmolekül nach den vier Ecken eines Tetraeders gerichtet. Dabei bestehen drei Atombindungen zwischen dem Kohlenstoffatom und den drei Wasserstoffatomen und eine zwischen dem Kohlenstoffatom und der Hydroxylgruppe (Abb. 18).

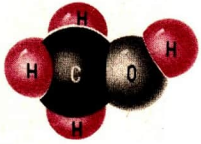




Abb. 18 Molekülmodell und Strukturformel von Methanol

Methanol wird großtechnisch im VEB Leuna-Werke „Walter Ulbricht" aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff hergestellt (Abb. 19). Diese Ausgangsstoffe werden gegenwärtig noch aus Kohle, in der Zukunft aber aus Erdgas erzeugt. Das Kohlenmonoxid wird hydriert.

$$CO + 2\ H_2 \overset{\text{Kat.}}{\rightleftarrows} CH_3OH; \qquad Q = -21{,}7\ \text{kcal}$$

① Erklären Sie den Begriff Reaktionsgeschwindigkeit!

② Geben Sie die Verbrennungsprodukte von Propanol an! Entwickeln Sie für die vollständige Verbrennung von Propanol die Reaktionsgleichung!

③ Legen Sie dar, wie ein Gemisch von Kohlenmonoxid und Wasserstoff (Synthesegas) auf Kohlenbasis hergestellt werden kann! (↗ „Chemie in Übersichten", S. 144)

④ Erläutern Sie das Wesen des chemischen Gleichgewichts am Beispiel der Methanolsynthese!

⑤ a) Erklären Sie den Begriff Katalyse!
b) Welchen Einfluß hat ein Katalysator auf die Reaktionsgeschwindigkeit sowie auf die Einstellung und die Lage des chemischen Gleichgewichts!

⑥ a) Welche Reaktionsbedingungen beeinflussen bei der Reaktion

$$CO + 2\,H_2 \underset{\blacktriangleleft}{\overset{\text{Kat.}}{\rightleftharpoons}} CH_3OH; \quad Q = -21{,}7 \text{ kcal}$$

die Gleichgewichtslage zugunsten des Methanols?
b) Vergleichen Sie das Ergebnis Ihrer Überlegungen mit den Ausführungen auf Seite 45 f. und den Angaben in Tabelle 5, Seite 46!

⑦ Weisen Sie nach, daß die auf Seite 45 f. getroffene Feststellung über die theoretisch günstigen Reaktionsbedingungen für die Methanolsynthese richtig sind!

Bei dieser Reaktion entsteht aus anorganischen Stoffen ein organischer Stoff. Die Reaktionsbedingungen wurden so gestaltet, daß die Ausbeute an Methanol möglichst groß ist. Eine wichtige Voraussetzung für die ökonomisch bestmögliche Durchführung der Methanolsynthese ist die Berücksichtigung der Theorie des chemischen Gleichgewichts und der Katalyse. Diese Gesetzmäßigkeiten gelten für Reaktionen der organischen Chemie in gleicher Weise wie für Reaktionen der anorganischen Chemie. ③ ④ ⑤ ⑥
Das Prinzip von Le Chatelier (↗ S. 28) gilt auch für die Methanolsynthese. Da die Methanolbildung durch Hydrierung von Kohlenmonoxid unter Volumenverringerung und exotherm verläuft, liegen die theoretisch günstigsten Bedingungen für eine hohe Methanolausbeute bei hohem Druck und niedriger Temperatur vor (Tab. 5, S. 46). ⑦

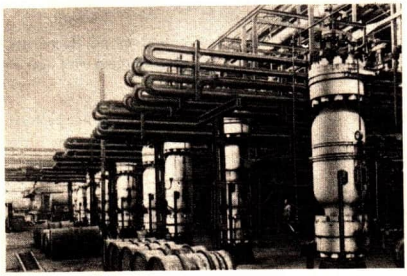


Abb. 19
Methanol wird technisch durch Synthese aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff hergestellt.

Tabelle 5
Einfluß von Druck und Temperatur auf die Lage des chemischen Gleichgewichts bei der Methanolsynthese
(Angabe der Methanolkonzentration in % des Volumens)

Temperatur in °C	Druck in at		
	100	150	200
250	79,0	etwa 100	etwa 100
300	19,8	43,7	etwa 100
350	4,0	7,1	11,0

Aber auch die Erhöhung der Konzentration an Wasserstoff oder Kohlenmonoxid bewirkt eine Verschiebung der Gleichgewichtslage zugunsten der Methanolbildung. Die theoretischen Erkenntnisse lassen sich jedoch nicht ohne weiteres auf die Produktionspraxis übertragen. Sie müssen hinsichtlich ihrer technischen Realisierbarkeit verändert werden.
Durch Berücksichtigung der gesellschaftlichen Erfordernisse kann man den günstigsten Weg für die technische Durchführung finden.
Sehr geringe Temperaturen sind für die Durchführung der Methanolsynthese nicht sinnvoll, da die Reaktionsgeschwindigkeit sehr gering wäre. Dazu wird die Reaktionsgeschwindigkeit durch einen Katalysator gesteigert, der aus Zinkoxid und Chromoxid besteht. Dieser Katalysator arbeitet bei einer Temperatur von etwa 380 °C. Damit wird deutlich, daß die theoretisch günstigste Temperatur nicht verwirklicht werden kann. Die Synthese wird bei einer Temperatur von 380 °C durchgeführt. Die Ausbeute an Methanol kann somit nur noch durch Druck und Konzentration beeinflußt werden. Der Druck läßt sich wegen der technischen Anforderungen an das Material der Reaktionsräume und Rohrleitungen sowie aus Gründen des Arbeitsschutzes nicht unbegrenzt steigern. Die Methanolsynthese wird bei einem Druck von etwa 200 at durchgeführt. Es ist aber möglich, die Konzentrationsverhältnisse der Ausgangsstoffe zu verändern und mit einem Überschuß an Wasserstoff zu arbeiten. So werden Kohlenmonoxid und Wasserstoff nicht der chemischen Gleichung entsprechend im Gemisch von 1 : 2, sondern im Gemisch von 1 : 2,2 zur Reaktion gebracht.
Technische Verfahren, die unter erhöhtem Druck ablaufen, werden als Hochdruckverfahren bezeichnet. Die technische Durchführung der Methanolsynthese wird deshalb auch **Hochdruckhydrierung** genannt. ① ②

Methanol wird technisch durch katalytische Hochdruckhydrierung hergestellt. Die Synthese von Methanol aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff ist eine katalytische Reaktion, die zu einem chemischen Gleichgewicht führt.

Methanol ist eine farblose Flüssigkeit. Es ist brennbar (↗ Experiment 12, S. 39). Mit Wasser ist es in jedem Verhältnis mischbar. Es besitzt ein gutes Lösungsvermögen für viele organische Stoffe (Experiment 13). Methanol ist sehr giftig. Der Genuß schon weniger Milliliter Methanol führt zur Erblindung oder sogar zum Tode. Um Verwechs-

① Welcher Zusammenhang besteht zwischen Temperatur und Reaktionsgeschwindigkeit?

② Berechnen Sie, wieviel Kilogramm Methanol hergestellt werden können, wenn 112 m³, 336 m³ und 784 m³ Kohlenmonoxid umgesetzt werden!

③ Das bei Experiment 15 entstehende Gas entfärbt Bromwasser. Welche Schlußfolgerung kann daraus gezogen werden?

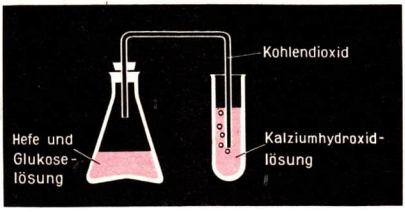
lungen mit alkoholischen Getränken auszuschließen, wird der Name Methylalkohol vermieden.

Vorsicht! Methanol ist sehr giftig!

Methanol wird als Lösungsmittel, als Brennstoff sowie zur Herstellung anderer organischer Stoffe verwendet.

Äthanol (Äthylalkohol) 10

14



Glukoselösung wird mit Hefeaufschlämmung gemischt. Das entstehende Gas wird durch Kalziumhydroxidlösung geleitet (Abb. 20).

Abb. 20 Glukose wird zu Äthanol vergoren.

15

Äthanoldampf wird über einen Katalysator (Aluminiumoxid) geleitet. Das entstehende Gas wird pneumatisch aufgefangen und mit Bromwasser geprüft (Abb. 21). ③

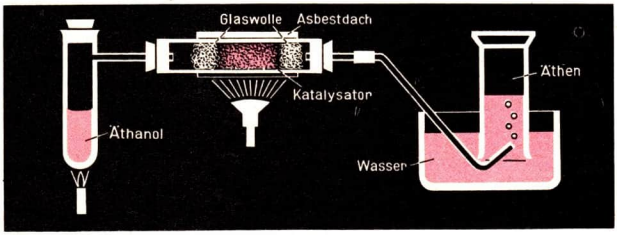
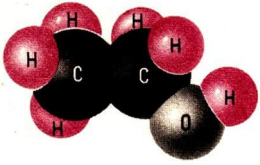


Abb. 21 Äthen wird durch katalytische Wasserabspaltung aus Äthanol dargestellt.

Äthanol (Äthylalkohol) C_2H_5OH ist unter der Bezeichnung Alkohol bekannt. Äthanol kann als Sauerstoffderivat des Äthans aufgefaßt werden (Abb. 22).



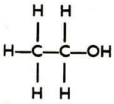


Abb. 22 Molekülmodell und Strukturformel von Äthanol

Äthanol läßt sich aus Äthan oder Äthen darstellen. Außerdem entsteht es durch Vergären von Glukose (Experiment 14). Zur technischen Äthanolherstellung durch Gärung wird in der Deutschen Demokratischen Republik vorwiegend Melasse verwendet, die bei der Gewinnung von Rübenzucker anfällt. Einige Enzyme, die in den Zellen von Hefepilzen gebildet werden, dienen dabei als Biokatalysatoren. Alle bei der Gärung wirksamen Enzyme werden unter der Bezeichnung Zymase zusammengefaßt. Diese Enzyme wirken auch unabhängig von den Lebensprozessen der Hefepilze. Da die Hefepilze, die die Enzyme liefern, bei diesem Prozeß wachsen und sich vermehren, müssen deren Lebensbedingungen eingehalten werden. Die Gärung wird in geschlossenen eisernen Gärkesseln bei 20 ··· 30 °C durchgeführt und dauert einige Tage. Die Gärung ist ein biokatalytischer Prozeß, der vereinfacht durch die folgende Gleichung angegeben werden kann:

$$\underset{\text{Glukose}}{C_6H_{12}O_6} \xrightarrow{\text{Zymase}} \underset{\text{Äthanol}}{2\,C_2H_5OH} + 2\,CO_2;\quad Q = -25\ \text{kcal}$$

Die Reaktion verläuft in mehreren Stufen. Es entstehen kompliziert gebaute Zwischenverbindungen, an deren Bildung Enzyme beteiligt sind. Die „alkoholische Gärung" ist eine exotherme Reaktion. Die Hefepilze gewinnen aus diesem Prozeß Energie. ① ②
Das Gärungsprodukt enthält nur 10 ··· 14% Äthanol, da bei einem höheren Äthanolgehalt die Hefepilze absterben. Um Äthanol aus dem Stoffgemisch zu isolieren, muß das Gärungsprodukt destilliert werden. Die weitgehende Trennung von Äthanol und Wasser durch Destillation ist auf Grund der unterschiedlichen Siedetemperaturen der beiden Stoffe möglich. ③
Äthanol wird auch petrolchemisch hergestellt. An Äthen wird katalytisch Wasser angelagert. Dabei bildet der Katalysator zunächst mit dem Äthen eine Zwischenverbindung, die mit Wasser reagiert. Es entsteht Äthanol, und der Katalysator bleibt erhalten.

$$CH_2{=}CH_2 + H_2O \underset{}{\overset{\text{Kat.}}{\rightleftharpoons}} CH_3{-}CH_2{-}OH$$

Auch hier zeigt sich die zunehmende Bedeutung des Äthens als Ausgangsstoff für chemische Prozesse. ④ ⑤
Da Äthen vorwiegend aus Erdöl und Erdgas gewonnen wird, unterstreicht dieses Beispiel die volkswirtschaftliche Bedeutung der Erdöllieferungen aus der Sowjetunion für

① Erklären Sie die Begriffe Biokatalyse und Biokatalysator am Beispiel der Äthanolherstellung!

② Begründen Sie, daß Gärungsprozesse zum Energiegewinn für Organismen führen!

③ Wie können Flüssigkeitsgemische, deren Bestandteile unterschiedliche Siedetemperaturen haben, in ihre Bestandteile zerlegt werden?

④ Erklären Sie den Begriff Petrolchemie!

⑤ Nennen Sie Beispiele für die zunehmende Bedeutung des Äthens als petrolchemischer Ausgangsstoff!

⑥ Entwickeln Sie die chemische Gleichung für die katalytische Wasseranlagerung an Äthen!

⑦ Berechnen Sie, wieviel Kubikmeter Äthen benötigt werden, um 23 t, 46 t und 60 t Äthanol durch katalytische Wasseranlagerung herzustellen, wenn vollständige Umsetzung angenommen wird!

⑧ Berechnen Sie, wieviel Gramm Äthanol reagieren müssen, um 500 ml Äthen darzustellen!

⑨ Wie kann die Doppelbindung im Äthenmolekül nachgewiesen werden?

die chemische Industrie der Deutschen Demokratischen Republik und die Bedeutung der Zusammenarbeit der sozialistischen Staaten im Rat für Gegenseitige Wirtschaftshilfe.

In Umkehrung der katalytischen Wasseranlagerung an Äthen ist es möglich, im Labor Äthen durch katalytische Wasserabspaltung aus Äthanol darzustellen (Experiment 15). ⑥⑦⑧⑨

$$CH_3—CH_2—OH \overset{\text{Kat.}}{\rightleftharpoons} CH_2=CH_2 + H_2O$$

▶ **Äthanol kann biokatalytisch durch Gärung oder petrolchemisch durch katalytische Wasseranlagerung an Äthen hergestellt werden.**

Äthanol ist farblos, brennbar und bei Zimmertemperatur flüssig. Es ist mit Wasser in jedem Verhältnis mischbar und vermag viele organische Stoffe zu lösen. Äthanol bringt Eiweiß zum Gerinnen. Dadurch kann Äthanol Organe und Gewebe schädigen.

Auf Grund seiner Eigenschaften findet Äthanol vielseitig als Brennstoff (Brennspiritus), als Raketentreibstoff und als Lösungsmittel Verwendung.

Brennspiritus ist ein Gemisch von Äthanol und giftigen Zusätzen. Brennspiritus ist ungenießbar. Er darf nicht mit Äthanol verwechselt werden.

▶ **Vorsicht! Brennspiritus enthält giftige Zusätze!**

Äthanol findet darüber hinaus wegen seiner anregenden Wirkung Verwendung in Form alkoholischer Getränke. Übermäßiger Äthanolgenuß führt jedoch zu schweren gesundheitlichen Schädigungen. Auf Grund seiner unbegrenzten Mischbarkeit mit Wasser und seines Lösevermögens für Fette vermag Äthanol sehr leicht in alle Zellen des menschlichen Körpers einzudringen. Leber und Gehirn werden besonders betroffen, da der Fettgehalt dieser Zellen verhältnismäßig groß ist. Geringe Massen an Äthanol treten im normalen Stoffwechselprozeß kurzfristig auf. Die Leber enthält aber

Enzyme, die eine Oxydation des Äthanols im Körper beschleunigen. Die Masse des mit alkoholischen Getränken aufgenommenen Äthanols übersteigt jedoch die Grenze des von der Leber verarbeitbaren Äthanols. Nicht oxydiertes Äthanol gelangt mit dem Blut innerhalb weniger Sekunden ins Gehirn. Dort wirkt Äthanol auf das Zellplasma lähmend. Das gilt für junge Zellen stärker als für ältere, verfestigte Zellen.

Bei geringem Alkoholgenuß treten nach anfänglicher Anregung des Kreislaufs zunächst Störungen des Bewußtseins, der Sprache, der Urteilskraft und der Selbstbeherrschung auf. Später sind auch Bewegungsstörungen festzustellen. Weiterer Alkoholgenuß führt zu völliger Hilflosigkeit, bis schließlich Herz- und Atemstillstand und damit der Tod eintreten.

Nach Alkoholgenuß stellt der Mensch eine Gefahr für seine Umwelt dar. Er schädigt nicht nur seinen eigenen Körper, sondern durch seine verminderte Leistungsfähigkeit schädigt er die Gesellschaft. Darüber hinaus überschätzt er seine eigenen Fähigkeiten und kann nicht nur sich selbst, sondern auch andere in Gefahr bringen. Deshalb werden in der Deutschen Demokratischen Republik Maßnahmen gegen den Alkoholmißbrauch ergriffen, wie das Verbot von Alkoholausschank an Jugendliche, das Verbot des Alkoholgenusses für Kraftfahrer vor Antritt oder während der Fahrt und andere Maßnahmen gegen Trunkenheit im Straßenverkehr sowie weitestgehender Wegfall des Versicherungsschutzes bei Unfällen, die in Trunkenheit schuldhaft verursacht werden. ①

Äthanol (Äthylalkohol) ist eine farblose, brennbare Flüssigkeit. Im menschlichen und tierischen Organismus wirkt es als Nervengift.

Phenol 11

16

Phenol wird mit Wasser versetzt und geschüttelt. Zum entstandenen Gemisch wird Natriumhydroxidlösung bis zur Bildung einer Lösung hinzugefügt.

Phenol C_6H_5OH kann als Sauerstoffderivat des Benzols aufgefaßt werden. Es gehört nicht zu den Alkoholen. Man kann es als Substitutionsprodukt des Benzols betrachten, bei dem ein Wasserstoffatom des Benzolmoleküls durch eine Hydroxylgruppe ersetzt ist (Abb. 23). Die Hydroxylgruppe ist durch Atombindung an ein Kohlenstoffatom des aromatischen Ringes gebunden. Der aromatische Zustand des Kohlenstoffringes ist durch ein Elektronensextett gekennzeichnet. Er wirkt sich auf die Hydroxylgruppe aus, so daß zwischen Sauerstoffatom und Wasserstoffatom eine Atombindung mit teilweisem Ionencharakter ausgebildet wird. ②

Phenol ist ein farbloser, kristalliner, eigentümlich riechender Stoff. Die farblosen Kristalle färben sich an der Luft rötlich. Phenol ist in Wasser nur begrenzt löslich. Deshalb bleibt ein Gemisch von Phenol und Wasser meist trüb (Experiment 16). Phenol ist giftig und wirkt ätzend. Mit Hydroxiden reagiert es wie eine Säure. Dabei entstehen Salze, die **Phenolate**. Phenolate sind in Wasser leichter löslich als Phenol. Deshalb wird ein Gemisch von Phenol und Wasser bei Zusatz von Hydroxidlösung klar (Experiment 16).

① Begründen Sie staatliche Maßnahmen gegen den Alkoholmißbrauch!

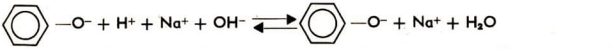
② Kennzeichnen Sie das Wesen des aromatischen Zustands!

③ Erläutern Sie das Wesen einer Säure beziehungsweise der sauren Reaktion eines Stoffes!

④ Deuten Sie die Reaktion von Phenol mit Natriumhydroxid als Neutralisation!

⑤ Berechnen Sie, wieviel Gramm Natriumhydroxid zur Umwandlung von Phenol in 5,8 g Natriumphenolat benötigt werden!

⑥ Entwickeln Sie die chemische Gleichung für die Reaktion von Phenol mit Kaliumhydroxid in Ionenschreibweise! Beachten Sie, daß Kaliumphenolat dissoziiert vorliegt!



Die saure Reaktion des Phenols ist auf den Einfluß des Benzolringes im Molekül zurückzuführen. Das Wasserstoffatom der Hydroxylgruppe kann als Wasserstoff-Ion abgespalten werden. Bei der Dissoziation des Phenols stellt sich ein Gleichgewicht ein, das sehr stark auf der Seite des undissoziierten Phenols liegt. ③ ④ ⑤ ⑥



▶ **Phenol ist ein giftiger fester Stoff. Das Wasserstoffatom der Hydroxylgruppe im Phenolmolekül kann als Wasserstoff-Ion abgespalten werden. Phenol reagiert schwach sauer. Die Salze des Phenols heißen Phenolate.**

Wird Phenol mit den Alkanolen verglichen, so stellt man fest, daß in den Molekülen beider Stoffe das Wasserstoffatom der Hydroxylgruppen durch Natriumatome substituiert werden kann. Durch den Unterschied zwischen den Alkylen und dem aromati-

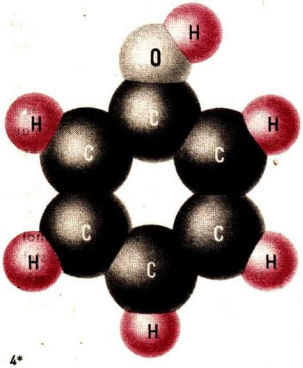




Abb. 23 Molekülmodell und Strukturformel von Phenol

schen Kohlenstoffring kann das Wasserstoffatom der Hydroxylgruppe des Phenolmoleküls leichter substituiert werden als das Wasserstoffatom der alkoholischen Hydroxylgruppen.

Phenol wird als Ausgangsstoff zur Herstellung von Plasten (Phenoplaste), Chemiefaserstoffen (Dederon), Farbstoffen und Arzneimitteln sowie als Desinfektionsmittel verwendet.

Die Verwendung von Phenol während der Zeit des Faschismus in Deutschland ist aber auch ein Beispiel dafür, wie chemische Erzeugnisse zur Vernichtung von Menschen eingesetzt werden können, um imperialistische Bestrebungen gegen den Willen der Völker durchzusetzen. So wurde Phenol in faschistischen Konzentrationslagern von Lagerärzten bewußt benutzt, um Kommunisten, deutsche und ausländische Antifaschisten und Juden zu ermorden, indem sie ihnen Phenollösung injizierten. Dieses Beispiel charakterisiert die Verbrechen des Imperialismus an der Menschheit.

Wiederholung und Übung 12

1. Kennzeichnen Sie das Wesen der drei grundlegenden Reaktionstypen der organischen Chemie! (↗ „Chemie in Übersichten", S. 56)
2. a) Entwickeln Sie die chemischen Gleichungen für folgende Reaktionen: Reaktion von Äthen mit Brom, Reaktion von Methan mit Chlor, Bildung von Äthen aus Äthanol!
   b) Bestimmen Sie jeweils den Reaktionstyp für die unter a) genannten Reaktionen!
3. Erklären Sie den Begriff funktionelle Gruppe!
4. Berechnen Sie, wieviel Kubikmeter an Kohlenmonoxid und an Wasserstoff umgesetzt werden müssen, um 64 t Methanol herzustellen!
5. Wieviel Kilogramm Glukose müssen restlos vergoren werden, um 23 kg Äthanol zu erhalten?
6. Erläutern Sie am Beispiel der Alkanole und des Phenols den Einfluß der Molekülstruktur auf die Wirkung der funktionellen Gruppe!
7. Erläutern Sie am Beispiel der Kohlenwasserstoffe den Einfluß der Molekülstruktur auf die Eigenschaften eines Stoffes!

Alkanale 13

17 ▼ **Vorsicht!** Eine glühende Kupferdrahtwendel wird in Methanol oder Äthanol getaucht. Eine Geruchsprobe wird durchgeführt.

18 ▼ **Vorsicht!** Eine geringe Masse Methanallösung wird mit Fehlingscher Lösung versetzt und unter ständigem Schütteln zum Sieden erhitzt (↗ Anhang, ▼ 2 a, S. 108).

19 ▼ Wenige Tropfen Methanallösung werden im Reagenzglas mit frisch bereiteter ammoniakalischer Silbernitratlösung versetzt und erwärmt (↗ Anhang, ▼ 2 b, S. 108).

20 ▼ Wenige Tropfen Methanallösung werden im Reagenzglas mit fuchsinschwefliger Säure versetzt.

① Erklären Sie den Begriff funktionelle Gruppe! Nennen Sie Beispiele!

② Erklären Sie den Begriff Derivat am Beispiel der Alkanale! (↗ „Chemie in Übersichten", S. 95)

③ Vergleichen Sie den Bau der funktionellen Gruppe der Alkanole mit dem Bau der funktionellen Gruppe der Alkanale!

21

Methanol- oder Äthanoldampf wird über einen glühenden Silber- oder Kupferkatalysator geleitet. Das Reaktionsprodukt wird nachgewiesen (Abb. 24).

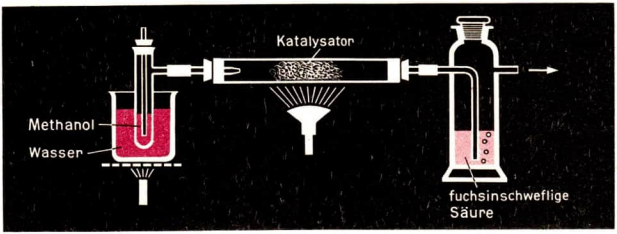


Abb. 24 Methanol wird katalytisch dehydriert.

Aldehyde bilden eine weitere Stoffklasse von Sauerstoffderivaten der Kohlenwasserstoffe. Sie enthalten **Aldehydgruppen** im Molekül. Die Aldehydgruppe $-C\begin{matrix}O\\H\end{matrix}$ ist die funktionelle Gruppe der Aldehyde.

Aldehyde sind organische Verbindungen, deren Moleküle Aldehydgruppen enthalten.

Derivate der Alkane mit einer Aldehydgruppe im Molekül werden als **Alkanale** bezeichnet. Alkanale gehören zu den Aldehyden. Die Aldehydgruppe ist mit einem Alkyl verbunden. Im folgenden werden nur Alkanale mit unverzweigtem Alkyl betrachtet (Abb. 25). ① ② ③

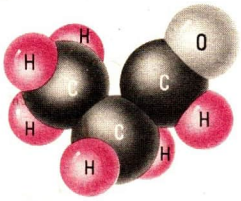
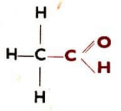


Abb. 25 Molekülmodell von Propanal

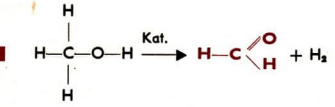
Die Schreibweise —CHO in Summenformeln soll deutlich machen, daß das Wasserstoffatom im Unterschied zu dem einer Hydroxylgruppe direkt an das Kohlenstoffatom gebunden ist. Zwischen dem Sauerstoffatom und dem Kohlenstoffatom der funktionellen Gruppe liegt eine Doppelbindung vor. Die Bindung zwischen Kohlenstoffatom und Sauerstoffatom und die zwischen Kohlenstoffatom und Wasserstoffatom sind Atombindungen.

Alkanale können als Derivate der Alkane aufgefaßt werden. Sie enthalten eine Aldehydgruppe —CHO als funktionelle Gruppe im Molekül.

Der systematische Name der Alkanale setzt sich aus dem Namen des Alkans mit der gleichen Anzahl Kohlenstoffatome im Molekül und der Endung **al** zusammen. Dabei ist zu beachten, daß das Kohlenstoffatom der funktionellen Gruppe mitgezählt werden muß. Neben den systematischen Namen werden aber auch Trivialnamen benutzt (Tab. 6, S. 55). ①

	Name des Alkans mit der gleichen Anzahl von Kohlenstoffatomen	Endung al (Kennzeichnung der funktionellen Gruppe)
Name	Äthan	al
	Äthanal	
Bedeutung	2 Kohlenstoffatome im Molekül	1 Aldehydgruppe im Molekül
Strukturformel		

Wird eine heiße Kupferdrahtwendel in Methanol oder Äthanol getaucht, dann entsteht Methanal oder Äthanal (Experiment 17).
Werden Methanol- oder Äthanoldämpfe über einen glühenden Silberkatalysator geleitet, dann entsteht ebenfalls Methanal oder Äthanal (Experiment 21).



Am Katalysator (Kupfer oder Silber) werden aus den Alkanolmolekülen je zwei Wasserstoffatome eliminiert. Es entstehen die entsprechenden Alkanalmoleküle. Die Reaktion ist eine Dehydrierung. Alkanale können nur aus solchen Alkanolen gebildet werden, in deren Molekülen die Hydroxylgruppe an das 1. Kohlenstoffatom der Kohlenstoff-

① Entwickeln Sie die Formeln, und nennen Sie die Namen für die Alkanale mit 5 · · · 7 Kohlenstoffatomen im Molekül!

② Berechnen Sie, wieviel Milliliter Wasserstoff bei der Dehydrierung von 24 g, 48 g und 56 g Methanol abgespalten werden!

③ Entwickeln Sie die Reaktionsgleichung für die Dehydrierung von Propanol zu Propanal!

④ Begründen Sie, warum Alkanale nur durch Dehydrierung von Alkanolen entstehen können, in deren Molekülen die Hydroxylgruppe an das 1. Kohlenstoffatom der Kette gebunden ist!

⑤ Weisen Sie an Hand der Strukturformeln der Alkanale mit 1 · · · 4 Kohlenstoffatomen im Molekül nach, daß sie Glieder einer homologen Reihe sind!

⑥ Weisen Sie an Hand der Abbildung 26, Seite 56, nach, daß zwischen der Kettenlänge der Alkyle im Molekül und den Siedetemperaturen der Alkanale ein Zusammenhang besteht!

kette gebunden ist; da die Aldehydgruppe das 1. Kohlenstoffatom der Kohlenstoffkette im Molekül enthält. ② ③ ④

▶ **Alkanale können durch katalytische Dehydrierung von Alkanolen dargestellt werden, deren Hydroxylgruppe im Molekül an das 1. Kohlenstoffatom der Kohlenstoffkette gebunden ist.**

Die Alkanale bilden wie die Alkanole, aus denen sie dargestellt werden können, eine homologe Reihe (Tab. 6).

Tabelle 6 Einige Alkanale

systematischer Name	Trivialname	Summenformel	vereinfachte Strukturformel
Methanal	Formaldehyd	$HCHO$	$H-C(=O)-H$
Äthanal	Azetaldehyd	CH_3CHO	$CH_3-C(=O)-H$
Propanal	Propionaldehyd	C_2H_5CHO	$CH_3-CH_2-C(=O)-H$
Butanal	Butyraldehyd	C_3H_7CHO	$CH_3-CH_2-CH_2-C(=O)-H$

Die chemischen Eigenschaften aller Alkanale sind auf Grund der gleichen funktionellen Gruppe ähnlich. Die Alkanale unterscheiden sich jedoch wegen der unterschiedlichen Molekülgrößen vor allem hinsichtlich der physikalischen Eigenschaften, wie Siedetemperatur und Schmelztemperatur (Abb. 26, S.56).
⑤ ⑥

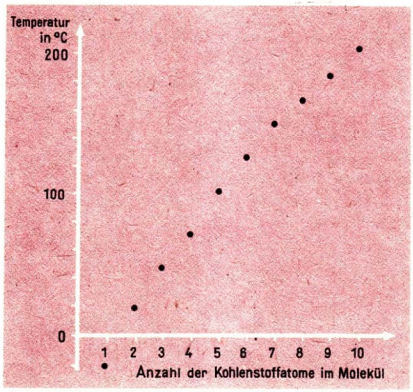


Abb. 26 Siedetemperaturen einiger Alkanale

Die Alkanale Methanal, Äthanal und Propanal sind Glieder einer homologen Reihe.

Die funktionelle Gruppe der Alkanale, die Aldehydgruppe, bestimmt weitgehend deren chemische Eigenschaften. Auf Grund der Doppelbindung zwischen Kohlenstoffatom und Sauerstoffatom der Aldehydgruppe können an Alkanale andere Stoffe addiert werden. So ist es möglich, Wasserstoff zu addieren. Dabei werden Alkanale zu Alkanolen hydriert.

$$CH_3—C\begin{matrix}O\\H\end{matrix} + H_2 \xrightarrow{\text{Kat.}} CH_3—CH_2—OH \qquad ① ②$$

Alkanale können zu Alkanolen hydriert werden.

Fehlingsche Lösung, die zweifach positiv geladene Kupfer-Ionen enthält, wird durch Methanal oder Äthanal verändert. Dabei entstehen auch Verbindungen des einwertigen Kupfers oder elementares Kupfer (Experiment 18).

$Cu^{2+} + e^- \longrightarrow Cu^+$ oder
$Cu^{2+} + 2\,e^- \longrightarrow Cu$

Aus ammoniakalischer Silbernitratlösung, die einfach positiv geladene Silber-Ionen enthält, wird durch Methanal oder Äthanal elementares Silber als Silberspiegel abgeschieden (Experiment 19).

$Ag^+ + e^- \longrightarrow Ag$

In beiden Fällen liegen Reaktionen mit Elektronenübergang vor. Diese Reaktionen

① Entwickeln Sie die Reaktionsgleichung für die Hydrierung a) von Methanal zu Methanol und b) von Propanal zu Propanol!

② Erklären Sie am Beispiel der Umwandlung von Methanol in Methanal und umgekehrt die Wirkungsweise von Katalysatoren!

③ Wieviel Kilogramm Methanol müssen mindestens umgesetzt werden, um 600 kg und 900 kg Methanal herzustellen?

④ Begründen Sie, warum es nicht sinnvoll ist, die Dehydrierung von Methanol unter Druck vorzunehmen!

⑤ Beschreiben Sie die Methanolsynthese!

werden durch die Aldehydgruppen der Alkanalmoleküle bewirkt. Dabei treten auch an diesen funktionellen Gruppen Veränderungen ein.

▶ **Alkanale sind zu Reaktionen mit Elektronenübergang fähig.**

Farblose fuchsinschweflige Säure wird durch Methanal oder Äthanal rotviolett gefärbt (Experiment 20). Diese Farbänderung sowie die Reaktionen mit Fehlingscher Lösung oder ammoniakalischer Silbernitratlösung werden häufig zum Nachweis von Alkanalen benutzt. Sie sind jedoch keine echten Nachweise, da sie nicht nur bei Alkanalen auftreten.

Auch in den Molekülen der Alkanale wird die Wirksamkeit der Aldehydgruppe durch die Größe des Alkyls beeinflußt. Mit wachsender Molekülgröße nimmt der Einfluß der Aldehydgruppe auf die chemischen Eigenschaften der Alkanale ab.

Methanal (Formaldehyd)

14

22 ▼ Eine Eiweißlösung wird mit Methanallösung versetzt.

Methanal (Formaldehyd) HCHO ist das erste Glied in der homologen Reihe der Alkanale. Auf Grund seiner Struktur nimmt es eine Sonderstellung ein. Das Kohlenstoffatom der funktionellen Gruppe ist gleichzeitig das einzige Kohlenstoffatom im Molekül. Im Gegensatz zu den Molekülen anderer Alkanale ist die funktionelle Gruppe mit einem Wasserstoffatom und nicht mit einem Alkyl verbunden (Abb. 27). ③ ④ ⑤ Methanal kann durch Dehydrierung von Methanol dargestellt werden (Experimente 17,

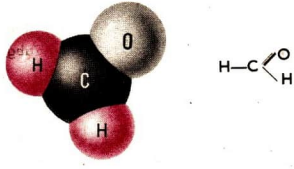


Abb. 27 Molekülmodell und Strukturformel von Methanal

S. 52 und 21, S. 53). Dazu wird Methanoldampf über einen Katalysator geleitet. Diese Reaktion wird auch in der Technik zur Herstellung von Methanal genutzt.

Methanal entsteht durch Dehydrierung von Methanol.

Methanal ist ein farbloses, stechend riechendes, giftiges Gas, das sich leicht in Wasser löst. Im Handel ist es in wäßriger Lösung erhältlich. Methanal zeigt die allgemeinen Reaktionen der Alkanale (↗ S. 56). Es reagiert mit Fehlingscher Lösung und mit ammoniakalischer Silbernitratlösung und färbt fuchsinschweflige Säure rotviolett. Außerdem ist es auf Grund der besonderen Struktur auch besonders reaktionsfähig. So wird Eiweiß durch Methanal gehärtet. Es entsteht Kunsthorn (Experiment 22). ① ② Auf Grund seiner Reaktion mit Eiweiß wird Methanal als Desinfektionsmittel und zur Konservierung biologischer und medizinischer Präparate verwendet. Außerdem dient es wegen seiner Reaktionsfähigkeit als ein Ausgangsstoff zur Herstellung einiger makromolekularer Verbindungen, wie zusammen mit Phenol oder anderen Verbindungen zur Herstellung von Plasten. ③

Methanal (Formaldehyd) ist ein farbloses, stechend riechendes, giftiges Gas, das sich sehr leicht in Wasser löst und Eiweiß härtet.

Äthanal (Azetaldehyd) 15

Äthanal (Azetaldehyd) CH_3CHO ist das erste Alkanal in der homologen Reihe der Alkanale, dessen Moleküle aus einem Alkyl und der Aldehydgruppe aufgebaut sind (Abb. 28).

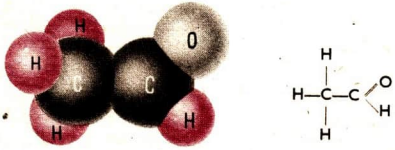


Abb. 28 Molekülmodell und Strukturformel von Äthanal

Äthanal kann durch Dehydrierung von Äthanol dargestellt werden (Experimente 17, S. 52 und 21, S. 53).

$$CH_3—CH_2—OH \longrightarrow CH_3—C\begin{matrix}O\\H\end{matrix} + H_2$$

In Ländern, in denen Äthanol großtechnisch durch Gärung hergestellt wird, nutzt man die Dehydrierung des Äthanols auch zur technischen Herstellung von Äthanal.
In der Deutschen Demokratischen Republik wird zunehmend Äthen als Ausgangsstoff zur Herstellung von Äthanal verwendet. Das Äthen erhält man als petrolchemischen Rohstoff aus Erdöl oder Erdgas, das auf Grund der wirtschaftlichen Zusammenarbeit beider Länder der Deutschen Demokratischen Republik aus der Sowjetunion geliefert

① Welche allgemeinen Reaktionen zeigen Alkanale?

② a) Erläutern Sie das Wesen der Polymerisation! (↗ „Chemie in Übersichten", S. 57)
b) Erklären Sie die Polymerisationsfähigkeit des Methanals mit dessen Molekülstruktur!

③ Erklären Sie die Desinfektionswirkung von Methanal!

④ Berechnen Sie, wieviel Kubikmeter Äthen umgesetzt werden müssen, um 220 kg und 660 kg Äthanal herzustellen!

⑤ Erörtern Sie an Hand der Oxydation von Äthen die Rolle eines Katalysators!

⑥ Ordnen Sie die Reaktionen, die zur Herstellung von Äthanal genutzt werden, den Reaktionstypen der organischen Chemie zu!

wird. Auch dieses Beispiel zeigt, daß die Zusammenarbeit der sozialistischen Staaten die wirtschaftliche Entwicklung der einzelnen Staaten fördert.
Durch katalytische Oxydation von Äthen entsteht Äthanal.

$$2\,CH_2=CH_2 + O_2 \xrightarrow{\text{Kat.}} 2\,CH_3-C\begin{matrix}\nearrow O\\ \searrow H\end{matrix}\;;\quad Q = -104\text{ kcal}$$

Aus der Gleichung ist zu ersehen, daß Sauerstoff addiert wird und daß innerhalb des Moleküls die Umlagerung eines Wasserstoffatoms erfolgt. Der Katalysator bewirkt dabei eine Senkung der Aktivierungsenergie in dem Maße, daß die zur Verbrennung erforderliche Aktivierungsenergie nicht erreicht wird. ④ ⑤ ⑥

▶ **Äthanal kann durch katalytische Dehydrierung von Äthanol oder durch katalytische Oxydation von Äthen hergestellt werden.**

Äthanal ist farblos und riecht stechend. Auf Grund der Siedetemperatur von 20 °C ist es bei Zimmertemperatur flüssig. Es verdampft jedoch sehr schnell. Äthanal zeigt die allgemeinen Reaktionen der Alkanale (↗ S. 56). So läßt es sich zu Äthanol hydrieren und reagiert mit Fehlingscher Lösung, mit ammoniakalischer Silbernitratlösung und mit fuchsinschwefliger Säure.

▶ **Äthanal (Azetaldehyd) ist eine farblose, bei 20 °C siedende Flüssigkeit.**

Besondere Bedeutung kommt dem Äthanal als Zwischenprodukt bei der Herstellung von Äthansäure (↗ S. 65) aus Äthen zu.

Alkansäuren 16

23 ▼ **Vorsicht!** Eine zum Glühen erhitzte Kupferdrahtwendel wird mehrmals schnell in Äthanollösung getaucht. Das entstehende Reaktionsprodukt wird mit einem Indikator geprüft.

24 ▼ Methan- oder Äthansäure wirkt in einem Reagenzglas auf Magnesium oder Zink ein. Das entstehende gasförmige Reaktionsprodukt wird durch Brennprobe geprüft.

Weitere Sauerstoffderivate der Kohlenwasserstoffe sind die **Karbonsäuren**. Karbonsäuren enthalten **Karboxylgruppen —COOH** als funktionelle Gruppen im Molekül. Die **Alkansäuren** gehören zu den Karbonsäuren. Sie können als Derivate der Alkane aufgefaßt werden. Ein Alkansäuremolekül baut sich aus einem Alkyl (oder nur einem Wasserstoffatom) und der funktionellen Gruppe, der Karboxylgruppe, auf. Am bekanntesten sind die Alkansäuren, deren Moleküle aus unverzweigten Alkylen und einer Karboxylgruppe bestehen. Die funktionelle Gruppe enthält ein Kohlenstoffatom des Alkansäuremoleküls, das mit zwei Sauerstoffatomen gemeinsame Elektronenpaare bildet (Abb. 29).

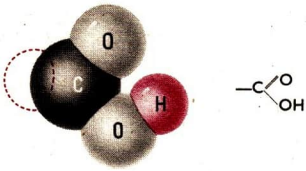
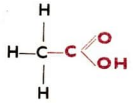


Abb. 29 Modell vom Bau der Karboxylgruppe

Alkansäuren können als Derivate der Alkane aufgefaßt werden. Sie enthalten eine Karboxylgruppe —COOH als funktionelle Gruppe im Molekül.

Der systematische Name jeder Alkansäure wird aus dem des Alkans, das die gleiche Anzahl von Kohlenstoffatomen wie die Alkansäure hat, und der Endung **säure** gebildet. Dabei wird das Kohlenstoffatom der Karboxylgruppe einbezogen.

	Name des Alkans mit der gleichen Anzahl von Kohlenstoffatomen	Endung säure (Kennzeichnung der funktionellen Gruppe)
Name	Äthan	säure
	Äthansäure	
Bedeutung	2 Kohlenstoffatome im Molekül	1 Karboxylgruppe im Molekül
Strukturformel		

Neben den systematischen Namen werden jedoch auch Trivialnamen verwendet, die sich oft von den Vorkommen dieser Verbindungen in der Natur ableiten (Tab. 7).
In ihrem Molekülbau unterscheiden sich die Alkansäuren von entsprechenden anderen Sauerstoffderivaten der Alkane, den Alkanolen und Alkanalen, nur durch die Art der

① Begründen Sie durch Betrachtung des Molekülbaus sowie ausgewählter physikalischer und chemischer Eigenschaften der Alkansäuren mit 1 · · · 5 Kohlenstoffatomen, daß diese Verbindungen zur homologen Reihe der Alkansäuren gehören!

funktionellen Gruppe. Deshalb können Alkansäuren durch chemische Reaktionen aus Alkanolen beziehungsweise Alkanalen dargestellt werden (Experiment 23).
Bei der Oxydation von Alkanalen entstehen Alkansäuren. Die Aldehydgruppe in den Molekülen der Alkanale wird durch Oxydation zur Karboxylgruppe.

$$2\,CH_3—CHO + O_2 \longrightarrow 2\,CH_3—COOH$$

Alkansäuren entstehen durch Oxydation von Alkanalen.

Die Alkansäuren bilden wie die entsprechenden Alkanole und Alkanale eine homologe Reihe (Tab. 7).

Tabelle 7 Einige Alkansäuren

systematischer Name	Trivialname	Summenformel	vereinfachte Strukturformel
Methansäure	Ameisensäure	$HCOOH$	$H—COOH$
Äthansäure	Essigsäure	CH_3COOH	$CH_3—COOH$
Propansäure	Propionsäure	C_2H_5COOH	$CH_3—CH_2—COOH$
Butansäure	Buttersäure	C_3H_7COOH	$CH_3—CH_2—CH_2—COOH$

Auch innerhalb dieser homologen Reihe ist mit zunehmender Molekülgröße der Stoffe eine Veränderung der Eigenschaften festzustellen. Eine Regelmäßigkeit wird besonders bei einigen physikalischen Eigenschaften, wie Aggregatzustand, Geruch und Löslichkeit, sichtbar (Tab. 8, S. 62, und Abb. 30). ①

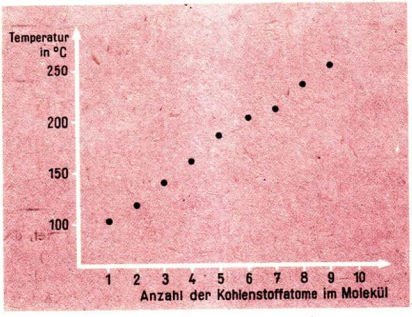


Abb. 30 Siedetemperaturen einiger Alkansäuren

Tabelle 8 Einige physikalische Eigenschaften von Alkansäuren

Summenformel der Alkansäure	Aggregatzustand bei 20 °C	Geruch	Löslichkeit in Wasser
$HCOOH$ CH_3COOH	flüssig leicht beweglich	stechend sauer	unbegrenzt löslich
C_4H_9COOH $C_5H_{11}COOH$	flüssig leicht ölig	unangenehm	weniger gut löslich
$C_{15}H_{31}COOH$	fest	geruchlos	sehr schwer löslich

Die Alkansäuren Methansäure und Äthansäure sind Glieder einer homologen Reihe.

Die chemischen Eigenschaften dieser Verbindungen werden sowohl durch die funktionelle Gruppe als auch durch die Molekülgröße bestimmt. Bei den chemischen Eigenschaften der ersten Glieder der homologen Reihe der Alkansäuren, den niedrigmolekularen Verbindungen, überwiegt der Einfluß der Karboxylgruppe im Molekül. Mit Zunahme der Molekülgröße beeinflußt dagegen das Alkyl stärker die chemischen Eigenschaften der höhermolekularen Alkansäuren.

Wie anorganische Säuren dissoziieren Alkansäuren in wäßriger Lösung ebenfalls in Wasserstoff- und Säurerest-Ionen. ① ②

$$CH_3COOH \rightleftarrows CH_3COO^- + H^+$$

Die saure Reaktion dieser Verbindungen in wäßriger Lösung wird durch den Überschuß an Wasserstoff-Ionen, die von der Karboxylgruppe stammen, hervorgerufen (Experiment 23).

Wirken Alkansäuren auf unedle Metalle ein, entwickelt sich Wasserstoff, und eine wäßrige Salzlösung entsteht (Experiment 24). Die Salzlösung enthält neben den Ionen des Wassers positiv geladene Metall-Ionen und einfach negativ geladene Säurerest-Ionen der Alkansäure. Bei diesem Einwirken von Alkansäuren auf unedle Metalle findet eine Reaktion mit Elektronenübergang statt. ③ ④ ⑤

$$\underbrace{2\,CH_3{-}COO^- + 2\,H^+}_{\text{Ionen der Äthansäure}} + Mg \longrightarrow \underbrace{2\,CH_3{-}COO^- + Mg^{2+}}_{\text{Ionen des Salzes der Äthansäure}} + H_2$$

Einige Metalloxide reagieren mit Alkansäuren ebenfalls unter Bildung wäßriger Salzlösungen. Alkansäurelösungen können durch Reaktion mit Basenlösungen neutralisiert werden. ⑥ ⑦

Alkansäuren dissozlieren in wäßriger Lösung und zeigen saure Reaktion. Sie reagieren mit einigen unedlen Metallen, Metalloxiden und Basenlösungen unter Bildung wäßriger Salzlösungen.

① a) Entwickeln Sie die Dissoziationsgleichungen der Salzsäure, Schwefelsäure, Salpetersäure und Kohlensäure!
b) Erläutern Sie den Begriff Säure! (↗ „Chemie in Übersichten", S. 10)

② Stellen Sie die Dissoziationsgleichungen der Propansäure, der Äthansäure und der Methansäure auf!

③ Entwickeln Sie die chemische Gleichung für die Reaktion von a) Äthansäure mit Zink und b) Methansäure mit Magnesium!

④ a) Erläutern Sie die chemischen Reaktionen bei der Bildung des Kalziumsalzes der Äthansäure!
b) Welche Möglichkeiten zur Bildung wäßriger Salzlösungen sind Ihnen bekannt?

⑤ Erläutern Sie die Veränderung der Atome beziehungsweise der Ionen bei der Reaktion von Äthansäure mit Zink unter Verwendung der entsprechenden Energieniveauschemas!

⑥ Erklären Sie das Wesen einer Neutralisation! (↗ „Chemie in Übersichten", S. 55)

⑦ Erläutern Sie, worauf die neutrale Reaktion einer wäßrigen Natriumchloridlösung beruht!

⑧ Die Dämpfe der Methansäure sind an der Luft entzündbar, brennen mit blauer Flamme und bilden mit Luft explosive Gasgemische. Stellen Sie Vermutungen über die bei der Reaktion entstehenden Produkte an!

Methansäure (Ameisensäure) 17

25 ▼ Natriumformiatlösung wird jeweils mit Fehlingscher Lösung und mit ammoniakalischer Silbernitratlösung versetzt.

Methansäure HCOOH wird wegen ihres natürlichen Vorkommens in den Drüsen der Ameise auch als **Ameisensäure** bezeichnet. Die Methansäure ist als Derivat des Methans die einfachste Alkansäure. Ihre Moleküle enthalten außer der charakteristischen Karboxylgruppe nur ein Wasserstoffatom (Abb. 31).

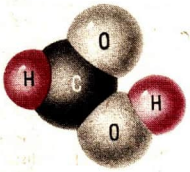




Abb. 31 Molekülmodell und Strukturformel der Methansäure

Eine Möglichkeit zur Darstellung von Methansäure ist die katalytische Oxydation von Methanal mit Sauerstoff. ⑧

$$2\,HCHO + O_2 \xrightarrow{Kat.} 2\,HCOOH$$

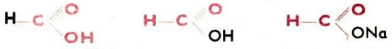
Methansäure ist eine farblose, leichtbewegliche Flüssigkeit von stechendem Geruch. Sie wirkt stark ätzend und erzeugt bei Berührung auf der Haut Blasen.

Bei der katalytischen Oxydation von Methanal entsteht Methansäure (Ameisensäure). Die farblose, stark ätzend wirkende Methansäure ist die einfachste Alkansäure.

Die wäßrige Lösung von Methansäure zeigt auf Grund der Dissoziation saure Reaktion (↗ S. 62). Beim Einwirken von Methansäure auf unedle Metalle bildet sich Wasserstoff (↗ S. 62). In der gleichzeitig entstehenden Salzlösung sind einfach negativ geladene **Formiat-Ionen** enthalten. Die Salze der Methansäure werden **Formiate**[1] genannt. ①

$$\underbrace{2\,HCOO^- + 2\,H^+}_{\text{Ionen der Methansäure}} + Mg \longrightarrow \underbrace{2\,HCOO^- + Mg^{2+}}_{\text{Ionen des Magnesiumformiats}} + H_2$$

Auch andere Alkansäuren haben die angeführten Eigenschaften. Hingegen zeigt die Methansäure auf Grund ihrer Molekülstruktur besondere Eigenschaften. Wie bei der Betrachtung der Strukturformel deutlich wird, kann die Methansäure sowohl als Alkansäure als auch als Alkanal reagieren.



Methansäure Natriumformiat

Sowohl die Karboxylgruppe als auch die Aldehydgruppe sind in ihrem Molekül erkennbar. Auch die Salze der Methansäure, die Formiate, zeigen Reaktionen, die für Alkanale kennzeichnend sind (Experiment 25). Diese von anderen Alkansäuren und ihren Salzen abweichenden chemischen Eigenschaften der Methansäure und der Formiate haben ihre Ursache in der Molekülstruktur dieser Verbindungen. ② ③
Wegen ihrer bakterientötenden Wirkung wird die Methansäure als Konservierungsmittel für medizinische und biologische Präparate verwendet. In großem Umfang werden Methansäure und einige ihrer Salze auch in der Textilveredlung benötigt.

Äthansäure (Essigsäure) 18

26

Verdünnte Äthansäure wird mit einigen Tropfen Unitest-Indikator versetzt. Der Lösung wird tropfenweise verdünnte Natriumhydroxidlösung zugegeben.

Äthansäure CH_3COOH, der saure Bestandteil des Essigs, wird häufig auch als **Essigsäure** bezeichnet. Die Äthansäure ist die wichtigste niedrigmolekulare Alkansäure. Sie kann als Sauerstoffderivat des Äthans aufgefaßt werden (Abb. 32).

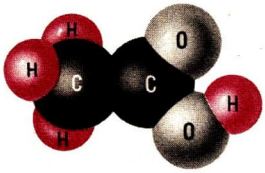
[1] abgeleitet von formica (lat.) = Ameise

① Stellen Sie die Formeln für die Formiate, Karbonate und Sulfate der Metalle Kalzium und Kalium auf!

② Nennen Sie geeignete Reaktionen zum Nachweis der alkanalähnlichen Eigenschaften der Formiate!

③ Erläutern Sie, daß bei der Reaktion von Fehlingscher Lösung mit Formiaten ein Elektronenübergang stattfindet!

④ a) Wieviel reine Äthansäure kann durch katalytische Oxydation beliebiger Massen an Äthanal hergestellt werden? Ermitteln Sie den funktionalen Zusammenhang zwischen gegebenen Massen an Ausgangsstoff Äthanal und gesuchten Massen an Reaktionsprodukt Äthansäure!
b) Welche Massen an Äthansäure können aus 110 kg, 440 kg und 770 kg Äthanal hergestellt werden?



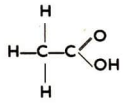


Abb. 32 Molekülmodell und Strukturformel der Äthansäure

Die Äthansäure ist Reaktionsprodukt bei der katalytischen Oxydation von Äthanal. ④

$$2\ CH_3—CHO + O_2 \xrightarrow{\text{Kat.}} 2\ CH_3—COOH$$

In der Technik wird Äthansäure vorwiegend nach dem Verfahren der Essiggärung oder durch Synthese über Äthanal hergestellt.

Die chemische Grundlage der **Essiggärung** ist die katalytische Oxydation von Äthanol zu Äthansäure. Aus äthanolhaltigen Rohstoffen wie Wein und vergorenen Früchten wird Äthansäure gewonnen. Die Ausgangsstoffe werden mit Essigbakterien versetzt, die frei in dem flüssigen, äthanolhaltigen Gemisch schweben und ständig mit Luft versorgt werden.

Bei einem ähnlichen Verfahren rieseln in großen Gärbehältern äthanolhaltige Flüssigkeiten über Buchenholzspäne, auf denen sich Essigbakterien angesiedelt haben. Im Gegenstrom wird Luft durch die Gärbehälter geblasen. Der Sauerstoff der Luft dient als Oxydationsmittel bei dieser Reaktion. Die dem Gemisch zugesetzten Essigbakterien erzeugen Enzyme, die als Biokatalysatoren den Prozeß der Essiggärung beschleunigen. Nach dem beschriebenen Verfahren kann nur etwa 15%ige Äthansäure hergestellt werden, da die benötigten Essigbakterien nur bis zu dieser Säurekonzentration lebensfähig sind. Das Verfahren der Essiggärung wird zur Herstellung von Speiseessig angewandt. Die bei der Essiggärung ablaufenden komplizierten biochemischen Reaktionen werden durch die folgende chemische Gleichung sehr vereinfacht dargestellt.

$$CH_3—CH_2OH + O_2 \longrightarrow CH_3—COOH + H_2O$$

Von größerer Bedeutung für die chemische Industrie ist die **Äthansäuresynthese.** Bei diesem Verfahren wird Äthanal katalytisch mit Luft zu Äthansäure oxydiert.

$$2\ CH_3—CHO + O_2 \xrightarrow{\text{Kat.}} 2\ CH_3—COOH$$

Der für die Reaktion benötigte Ausgangsstoff Äthanal wird mit wachsendem Einfluß der Rohstoffe Erdöl und Erdgas auf die chemische Industrie unserer Republik durch Oxydation von Äthen (↗ S. 59) gewonnen. Die Äthansäuresynthese ist damit ein weiteres Beispiel für die Veränderung der Rohstoffsituation in der chemischen Industrie. Die Äthansäuresynthese liefert eine hochkonzentrierte, rohe Säure, die durch Destillation noch gereinigt werden muß. ① ②

▶ **Äthansäure wird in der Technik durch Synthese über Äthanal und durch katalytische Oxydation von Äthanol (Essiggärung) hergestellt.**

Wasserfreie Äthansäure ist eine stechend sauer riechende, farblose, stark ätzende Flüssigkeit. Bereits bei 16,6 °C erstarrt sie zu Kristallen und wird in dieser Form als Eisessig bezeichnet. Die wasserfreie Äthansäure ist brennbar und verbrennt mit leuchtender Flamme zu Kohlendioxid und Wasser.

Die Äthansäure zeigt alle für die Alkansäuren typischen chemischen Reaktionen. Wie andere Säuren dissoziiert die Äthansäure in wäßriger Lösung. Sie reagiert mit unedlen Metallen oder deren Verbindungen unter Bildung von Salzlösungen (Experiment 26). Die Salze der Äthansäure heißen **Azetate**[1]. ③ ④

■ $CH_3COO^- + H^+ + K^+ + OH^- \longrightarrow CH_3COO^- + K^+ + H_2O$

Die Äthansäure wird zu Synthesen vieler technisch wertvoller organischer Produkte verwendet. Als Würzstoff und Konservierungsmittel wird sie in verschiedenen Konzentrationen gehandelt. Während der Speiseessig 5% oder 10% Äthansäure enthält, stellt die gehandelte Essigessenz 40%ige Äthansäure dar. Wegen der ätzenden Wirkung der konzentrierten Äthansäure muß die Essenz vor Gebrauch stark verdünnt werden.

[1] abgeleitet von acetum (lat.) = Essig

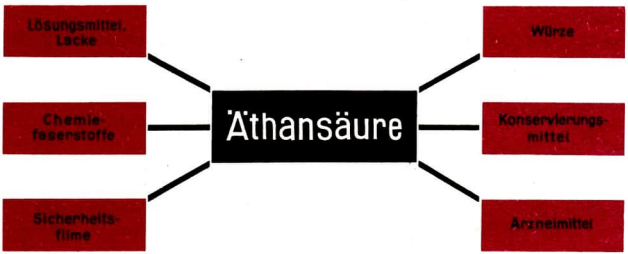


Abb. 33 Verwendungsmöglichkeiten der Äthansäure

① Vergleichen Sie die alkoholische Gärung und die Essiggärung bezüglich der Ausgangsstoffe und der Reaktionsprodukte, der Wirkung von Biokatalysatoren und der Rolle des Sauerstoffes bei den Reaktionen!

② Erläutern Sie die chemischen Reaktionen zur Herstellung der Ausgangsstoffe für die Äthansäuregewinnung!

③ Vergleichen Sie die Methansäure mit der Äthansäure bezüglich ihrer Molekülstruktur und ihrer Eigenschaften!

④ Entwickeln Sie die Reaktionsgleichung für die Neutralisation von Äthansäure mit Natriumhydroxidlösung (Experiment 26, S. 64)!

⑤ Berechnen Sie die molaren Massen der Hexadekan- und der Oktadekansäure!

Einen Überblick über weitere wichtige Anwendungsgebiete der Äthansäure gibt Abbildung 33.

▶ **Äthansäure (Essigsäure) ist eine farblose, ätzend wirkende Flüssigkeit, die als Würzstoff und Konservierungsmittel sowie vor allem zur Herstellung von Lösungsmitteln verwendet wird.**

Höhermolekulare Alkansäuren 19

27
▼ In einem Becherglas wird ein Gemisch höhermolekularer Alkansäuren erhitzt. Unter Rühren wird ihm verdünnte Natriumhydroxidlösung zugegeben.

Hexadekansäure (Palmitinsäure) $C_{15}H_{31}COOH$ (Abb. 34) und **Oktadekansäure (Stearinsäure)** $C_{17}H_{35}COOH$ sind zwei wichtige höhermolekulare Verbindungen aus der homologen Reihe der Alkansäuren. Die Moleküle dieser beiden Alkansäuren sind aus einer verhältnismäßig langen, unverzweigten Kohlenstoffkette und einer Karboxylgruppe aufgebaut. Sie können als Derivate der höhermolekularen Alkane aufgefaßt werden und ähneln diesen in physikalischen und chemischen Eigenschaften. ⑤

In der homologen Reihe der Alkansäuren werden die chemischen Eigenschaften der höhermolekularen Verbindungen zunehmend durch die Molekülgröße bestimmt. Der Einfluß der funktionellen Gruppe tritt gegenüber dem des Alkyls zurück (↗ S. 62). Die physikalischen Eigenschaften dieser Verbindungen entsprechen den Gesetzmäßigkeiten der homologen Reihe. Hexadekan- und Oktadekansäure sind farblose, wachs-

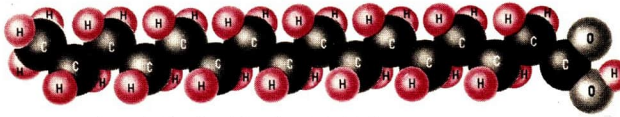


Abb. 34 Molekülmodell der Hexadekansäure (Palmitinsäure)

artige, feste Stoffe. Sie sind in Wasser schwerlöslich. Dagegen lösen sie sich in organischen Lösungsmitteln wie Äthanol und Benzol gut. Verbindungen der Hexadekan- und Oktadekansäure sind in pflanzlichen und tierischen Fetten enthalten (↗ S. 76). Höhermolekulare Alkansäuren reagieren mit Basenlösungen unter Bildung von Salzlösungen und Wasser (Experiment 27). Die Salze der höhermolekularen Alkansäuren werden allgemein **Seifen** genannt. Diese höhermolekularen Alkansäuren sowie ihre Salze haben Bedeutung für die Herstellung von Waschmitteln und Seifen, kosmetischen und pharmazeutischen Erzeugnissen. ① ②

Hexadekansäure (Palmitinsäure) und Oktadekansäure (Stearinsäure) sind höhermolekulare Alkansäuren. Die Salze höhermolekularer Alkansäuren werden Seifen genannt.

Ester 20

Bildung und Zerfall von Estern

28 **Vorsicht!** In einem Reagenzglas werden Äthansäure, Äthanol und wenig konzentrierte Schwefelsäure vorsichtig erhitzt. Der Geruch der an der Reaktion beteiligten Stoffe wird vor und nach der Reaktion geprüft.

29 **Vorsicht!** Butansäure und Äthanol werden unter Zusatz von konzentrierter Schwefelsäure in der Apparatur nach Abbildung 35 zur Reaktion gebracht. Der Geruch der an der Reaktion beteiligten Stoffe wird geprüft. Der entstehende Ester wird abgetrennt, mit Natriumhydroxidlösung versetzt und unter Rückfluß zum Sieden erhitzt.

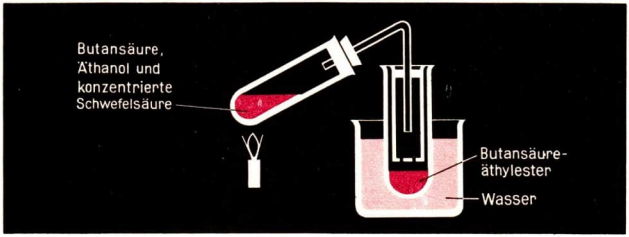
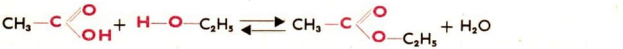


Abb. 35 Bildung von Butansäureäthylester

Eine der wichtigsten Reaktionen der Alkansäuren läuft bei der Reaktion mit Alkanolen ab. Alkansäuren bilden bei der Reaktion mit Alkanolen **Ester** (Abb. 36). Gleichzeitig entsteht als weiteres Reaktionsprodukt Wasser (Experimente 28 und 29). ③



① Stellen Sie die Reaktionsgleichung für die Neutralisation von Hexadekansäure mit Natriumhydroxidlösung auf (Experiment 27, S. 67)!

② Erläutern Sie den Zusammenhang zwischen Molekülstruktur und Eigenschaften der Stoffe am Vergleich der Äthansäure mit der Hexadekansäure!

③ Entwickeln Sie die chemische Gleichung für die Reaktion von Butansäure mit Äthanol (Experiment 29)!

④ a) Entwickeln Sie die Formeln des Äthansäureäthylesters und des Propansäurebutylesters!
b) Benennen Sie $C_3H_{11}COOC_2H_5$ und $HCOOCH_3$!

⑤ Erläutern Sie das Wesen der Substitution! (↗ „Chemie in Übersichten", S. 56)

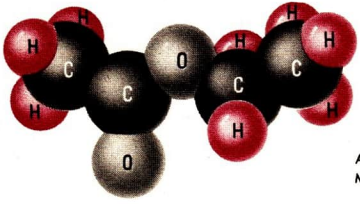
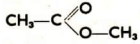
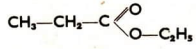


Abb. 36
Molekülmodell des Äthansäureäthylesters

Die Namen dieser als Ester bezeichneten organischen Stoffe setzen sich aus den Namen der Ausgangsstoffe zusammen. Zunächst wird die Alkansäure benannt, dann der Kohlenwasserstoffrest des Alkanols und schließlich das Wort **ester** angefügt. ④



Äthansäuremethylester



Propansäureäthylester

Die Reaktion einer Alkansäure mit einem Alkanol unter Bildung eines Esters wird auch **Veresterung** genannt. Die Hydroxylgruppe des Säuremoleküls sowie das Wasserstoffatom der funktionellen Gruppe des Alkanolmoleküls werden bei der Veresterung abgetrennt und bilden Wassermoleküle. Allgemein wird eine Reaktion, bei der sich jeweils zwei Moleküle unter Abspaltung eines einfach gebauten dritten Moleküls vereinigen, als **Kondensation** bezeichnet.
Die Kondensation ist jedoch *kein* weiterer Reaktionstyp der organischen Chemie. Bei der Kondensation wird eine Atomgruppe im Molekül durch eine andere ersetzt. Folglich kann die Kondensation der Substitution zugeordnet werden. Der tatsächliche Reaktionsverlauf ist komplizierter, als es in der Gleichung erfaßt ist. Die Zuordnung der Kondensation zur Substitution ist jedoch gerechtfertigt, wenn nur die Reaktionsgleichung zur Veresterung betrachtet wird. ⑤

▶ **Eine Alkansäure und ein Alkanol reagieren miteinander unter Bildung eines Esters und Wasser. Die Bildung eines Esters ist eine Kondensationsreaktion.**

Die Veresterung ist eine umkehrbare Reaktion und verläuft unvollständig. Die an der Reaktion beteiligten Stoffe Alkansäure und Alkanol sowie Ester und Wasser liegen gleichzeitig vor. Die Bildung und der Zerfall eines Esters führen zu einem chemischen Gleichgewicht. Das Gleichgewicht hat sich eingestellt, wenn in der Zeit die gleiche Anzahl von Estermolekülen gebildet wird und wieder zerfällt. Die Einstellzeit für ein Estergleichgewicht ist im Normzustand sehr lang. Ein Erhöhen der Temperatur bei Veresterungen wirkt sich auf die Reaktionsgeschwindigkeit und somit auch auf die Einstellzeit des chemischen Gleichgewichts günstig aus. ① ②

Der Zusatz eines Katalysators zum System der reagierenden Stoffe hat ebenfalls Einfluß auf die Reaktionsgeschwindigkeit. Fügt man den Ausgangsstoffen Alkansäure und Alkanol geringe Mengen einer anorganischen Säure (Salz- oder Schwefelsäure) hinzu, so wird die Einstellung des chemischen Gleichgewichts katalytisch beschleunigt.

Die Lage des Estergleichgewichts kann durch Veränderung der Reaktionsbedingung Konzentration verschoben werden. Wird das Konzentrationsverhältnis der reagierenden Stoffe verändert, verschiebt sich die Lage des chemischen Gleichgewichts. Ein ständiges Entfernen der an der Reaktion beteiligten Verbindungen Ester oder Wasser durch Destillation beeinflußt beispielsweise das Estergleichgewicht zugunsten der Hinreaktion.

Die Umkehrung der Veresterung, der Zerfall eines Esters, wird als **Hydrolyse** bezeichnet. Die Hydrolyse ist ebenfalls eine Substitution; bei ihr ist ein Ausgangsstoff Wasser. Die in Estermolekülen bei der Veresterung entstandenen Atombindungen werden bei der Hydrolyse durch Einwirken von Wassermolekülen gelöst. Der Ester zerfällt in die Ausgangsstoffe Alkansäure und Alkanol.

Die Reaktionsgeschwindigkeiten der Hydrolyse und der Veresterung sind im chemischen Gleichgewicht gleich (Abb. 37).

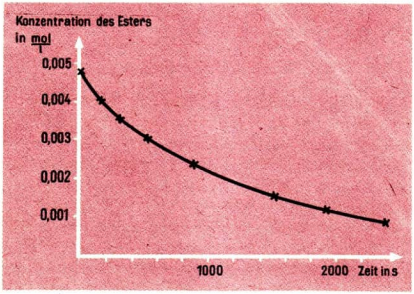


Abb. 37 Hydrolyse von Äthansäureäthylester

Eine Verschiebung der Lage des chemischen Gleichgewichts zugunsten der Hydrolyse (Rückreaktion) ist ebenfalls durch das Verändern des Konzentrationsverhältnisses der reagierenden Stoffe zu erreichen. Eine Zugabe von Wasser oder verdünnter Natriumhydroxidlösung zum System der reagierenden Stoffe fördert die Hydrolyse des Esters. ③ ④ ⑤

① Erläutern Sie den Zusammenhang von Bildung und Zerfall eines Esters!

② Erläutern Sie den Einfluß der Temperatur auf die Reaktionsgeschwindigkeit mittels kinetischer Vorstellungen!

③ Erläutern Sie Möglichkeiten zur Beeinflussung der Lage des Estergleichgewichts!

④ Vergleichen Sie das chemische Gleichgewicht der Methanolsynthese mit dem der Bildung und des Zerfalls eines Esters bezüglich der reagierenden Stoffe und der Reaktionsbedingungen!

⑤ Erläutern Sie den Einfluß von Konzentrationsänderungen der an der Reaktion teilnehmenden Stoffe auf das chemische Gleichgewicht bei der Bildung und dem Zerfall eines Esters!

⑥ Vergleichen Sie die Reaktion von Äthansäure mit Kaliumhydroxid und die Reaktion von Äthansäure mit Äthanol miteinander!

Die Bildung eines Esters (Veresterung) und der Zerfall eines Esters (Hydrolyse) führen zu einem chemischen Gleichgewicht. Temperaturerhöhung und Zugabe eines Katalysators verkürzen die Einstellzeit des chemischen Gleichgewichts.

Wird die Reaktionsgleichung für die Veresterung in Summenformeln geschrieben, ist eine Übereinstimmung mit der Reaktionsgleichung der Neutralisation zu vermuten. Die Neutralisation einer Säure mit einer Base ist jedoch eine Ionenreaktion. Darin besteht ein Unterschied zur Veresterung. Aus einem Wasserstoff-Ion der Säure und einem Hydroxid-Ion der Base bilden sich bei der Neutralisation undissoziierte Wassermoleküle und die Ionen des Salzes. Bei der Veresterung wird ein Wasserstoffatom aus dem Alkanolmolekül und eine Hydroxylgruppe aus dem Molekül der Alkansäure abgespalten. Dabei entstehen Wasser- und Estermoleküle, die nur Atombindungen aufweisen. ⑥

Einige Ester

Die bei der Reaktion niedrigmolekularer Alkansäuren und niedrigmolekularer Alkanole gebildeten Ester sind mit Wasser nichtmischbare Flüssigkeiten. Sie scheiden sich auf dem Wasser ab. Diese Ester besitzen einen angenehmen, fruchtartigen Geruch und werden zum Beispiel als Aromen für Getränke und zur Herstellung von Lösungsmitteln und Lacken verwendet.
Die Ester höhermolekularer Alkansäuren und höhermolekularer Alkanole werden als **Wachse** bezeichnet. So ist ein Ester der Hexadekansäure Hauptbestandteil des Bienenwachses. Wachse dienen zur Herstellung von Polituren, Kerzen und Schmierstoffen.
Bei der Veresterung höhermolekularer organischer Säuren mit Glyzerin, einem Alkohol mit drei Hydroxylgruppen im Molekül, entstehen **Fette** (↗ S. 75). Fette sind Ester mit großer physiologischer Bedeutung.
Die Esterbildung ist nicht auf die Reaktion von Alkansäuren mit Alkanolen beschränkt. Auch bei der Reaktion anorganischer Säuren mit Alkanolen entstehen Ester. Besonders wichtig sind die **Ester der Phosphorsäure.** Große biologische Bedeutung haben die Phosphorsäureester Adenosindi- und Adenosintriphosphat, abgekürzt ADP und ATP.

Diese beiden Verbindungen werden in allen lebenden Zellen gefunden und stehen im Organismus im Gleichgewicht miteinander. Sie treten als Zwischenverbindungen bei den energieliefernden Abbauprozessen und bei den energieverbrauchenden Aufbauprozessen im lebenden Organismus auf. Sie spielen eine hervorragende Rolle bei den energetischen Verhältnissen jedes Lebewesens, bei der Muskeltätigkeit und bei Vorgängen im Nervensystem. ①

Andere Phosphorsäureester zählen zu den gefährlichsten **chemischen Kampfstoffen**. In den Laboratorien des I.G. Farben-Konzerns wurden im faschistischen Deutschland zum Beispiel derartige Kampfstoffe mit der Bezeichnung Sarin, Soman und Tabun entwickelt. Vergiftungen mit diesen Kampfstoffen führen zu schweren Schädigungen des Nervensystems, zur Störung der Herztätigkeit und der Atmung. Diese Phosphorsäureester können schon in geringen Mengen zum Tode führen. Der mißbräuchliche Einsatz dieser organischen Verbindungen als Kampfstoffe und damit zur Vernichtung von Menschen ist völkerrechtswidrig und scharf zu verurteilen.

Chemische Kampfstoffe gehören wie die atomaren und biologischen Waffen zu den Massenvernichtungswaffen. Ihre Anwendung bei der Kriegführung ist schon seit der Jahrhundertwende als Verbrechen an der Menschheit durch internationale Übereinkünfte (Haager Konventionen 1899 und 1907, Genfer Protokoll 1925) mehrfach verboten worden, besonders wegen der Gefährdung und bewußten Vernichtung der Zivilbevölkerung. Vergangenheit und Gegenwart zeigen Beispiele für die Mißachtung des geltenden Völkerrechts bei der Kriegführung imperialistischer Staaten. ②

Der Kampf um die Erhaltung des Weltfriedens und für das Verbot aller Massenvernichtungswaffen wird besonders von den sozialistischen Staaten geführt. Solange jedoch nicht von allen Ländern allseitige umfassende Abrüstungsmaßnahmen getroffen werden, ist es erforderlich, die Armeen sozialistischer Staaten, unter ihnen unsere Nationale Volksarmee, auch mit Schutzeinrichtungen gegen chemische Kampfstoffe auszurüsten.

Phosphorsäureester zeigen bei der Bekämpfung des Schädlingsbefalls von Nutzpflanzen ebenfalls ihre Wirkung auf Organismen. Wertvolle landwirtschaftliche Produkte werden der Volkswirtschaft durch den Einsatz dieser Verbindungen als Insektizide erhalten.

Wiederholung und Übung 21

Alkanole, Alkanale und Alkansäuren als Sauerstoffderivate der Alkane

Die Moleküle der Sauerstoffderivate der Alkane bestehen aus Alkylen und jeweils verschiedenen sauerstoffhaltigen funktionellen Gruppen. Alkanole, Alkanale und Alkansäuren können durch chemische Reaktionen ineinander umgewandelt werden.

Alkanol ⇄ Alkanal ⟶ Alkansäure

Eine Übereinstimmung der funktionellen Gruppen in den Molekülen der Sauerstoffderivate einer homologen Reihe bedingten ähnliche chemische Eigenschaften dieser Verbindungen. Mit zunehmender Molekülgröße beeinflußt jedoch das Alkyl die Eigen-

① Wiederholen Sie Ihre Kenntnisse aus dem Biologieunterricht über die biologische Bedeutung von ADP und ATP!

② Zeigen Sie an Beispielen imperialistischer Kriege, bei denen chemische Kampfstoffe zur Vernichtung von Menschen eingesetzt wurden, den unmenschlichen Charakter dieser Gesellschaftsordnung!

schaften dieser Verbindungen, so daß auch bei Stoffen aus verschiedenen homologen Reihen Ähnlichkeiten in den chemischen Eigenschaften auftreten.

1. Entwickeln Sie eine Übersicht über die homologen Reihen der Alkane und ihrer Sauerstoffderivate! Stellen Sie jeweils an den ersten fünf Gliedern der homologen Reihen Gemeinsamkeiten und Unterschiede in der Molekülstruktur fest!
2. Kennzeichnen Sie das Wesen einer homologen Reihe! (↗ „Chemie in Übersichten", S. 93)
3. Benennen Sie folgende Verbindungen, beziehungsweise entwickeln Sie deren Formeln: HCHO; Propanol; C_2H_5COOH; Äthansäure; C_4H_9OH; $HCOOCH_3$; KOH; Butanal! Ordnen Sie diese Verbindungen, sofern möglich, homologen Reihen zu!
4. Entwickeln Sie die Strukturformeln für Alkanole, Alkanale und Alkansäuren mit 3 ··· 5 Kohlenstoffatomen im Molekül!
5. Erläutern Sie die Reaktionen, die es gestatten, Alkanole, Alkanale und Alkansäuren ineinander umzuwandeln!
6. a) Geben Sie die Reaktionsgleichungen für die Umwandlungen von Propanol, Propanal und Propansäure ineinander an!
   b) Bestimmen Sie den Reaktionstyp für jede unter a) angegebene Reaktion!
7. a) Erläutern Sie Möglichkeiten, Äthan, Äthen, Äthin, Äthanol, Äthanal und Äthansäure ineinander umzuwandeln!
   b) Geben Sie zu jeder Reaktion den Reaktionstyp an!
8. a) Erläutern Sie die Bildung der Äthansäure aus Äthen und aus Äthanol an Hand der Reaktionsgleichungen!
   b) Vergleichen Sie die Möglichkeiten der Äthansäureherstellung und die technische Durchführung der Verfahren hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit!
9. Ermitteln Sie die Masse an Äthansäure, die theoretisch aus 33 600 l Äthen hergestellt werden könnte!

Chemisches Gleichgewicht und Katalyse bei ausgewählten anorganisch- und organisch-chemischen Reaktionen

Viele chemische Reaktionen in Labor und Technik führen zu einem chemischen Gleichgewicht. Diese Reaktionen verlaufen nicht vollständig. Durch Wahl geeigneter Reaktionsbedingungen wird die Lage eines chemischen Gleichgewichts beeinflußt. So kann zum Beispiel die Ausbeute an gewünschten Produkten bei einer Reaktion durch Verschiebung der Lage des chemischen Gleichgewichts erhöht werden. Besonders bei chemisch-technischen Verfahren spielt die Wahl der vom ökonomischen Standpunkt aus günstigsten Reaktionsbedingungen für einen Prozeß eine große Rolle. Für chemisch-

technische Reaktionen ist neben der Lage des chemischen Gleichgewichts auch dessen Einstellzeit wichtig. Durch geeignete Katalysatoren kann die Reaktionsgeschwindigkeit und damit die Einstellzeit des chemischen Gleichgewichts beeinflußt werden.

10. Erläutern Sie die Merkmale eines chemischen Gleichgewichts am Beispiel der Bildung und des Zerfalls von a) Jodwasserstoff und b) Butansäureäthylester!
11. Erläutern Sie, was unter der Einstellung eines chemischen Gleichgewichts und der Verschiebung der Lage des Gleichgewichts zu verstehen ist!
12. Erklären Sie die Druck- und Temperaturabhängigkeit der Lage des chemischen Gleichgewichts am Beispiel
    a) der Hydrierung und Dehydrierung eines Kohlenwasserstoffes (die Hydrierung ist eine exotherme Reaktion),
    b) der Methanolsynthese

    $CO + 2\,H_2 \rightleftarrows CH_3OH; \qquad Q = -21{,}7$ kcal,

    c) der Reduktion von Kohlendioxid durch Kohlenstoff

    $CO_2 + C \rightleftarrows 2\,CO; \qquad Q = +41{,}2$ kcal!

    (Der feste Kohlenstoff nimmt so ein geringes Volumen ein, daß er in die Betrachtung der Volumenverhältnisse zur Erklärung der Druckabhängigkeit nicht einbezogen wird.)
13. Erläutern Sie die Einwirkung eines Katalysators auf das chemische Gleichgewicht!
14. Nennen Sie je zwei katalytische Reaktionen aus der anorganischen und organischen Chemie!

Chemische Bindung bei anorganischen und organischen Verbindungen

In organischen Verbindungen treten wie in anorganischen Verbindungen die gleichen Arten der chemischen Bindung auf. Bei vielen organischen Stoffen besteht zwischen den verbundenen Atomen Atombindung oder Atombindung mit teilweisem Ionencharakter. Die Verbindungen sind deshalb meist aus Molekülen aufgebaut. Manche organische Stoffe sind durch Ionenbeziehung gekennzeichnet. Solche Stoffe sind im festen Aggregatzustand aus Ionenkristallen aufgebaut.

15. Erläutern Sie das Wesen der Arten der chemischen Bindung an je einem Beispiel anorganischer Verbindungen! (↗ „Chemie in Übersichten", S. 35 · · · 38)
16. Beschreiben Sie die Bindungsverhältnisse zwischen den einzelnen Atomen in den organischen Verbindungen Methan, Methanol, Methanal und Methansäure!
17. Erläutern Sie Möglichkeiten der Atombindung zwischen Kohlenstoffatomen!
18. Welche Bindungsart kennzeichnet die Bindung des Wasserstoffatoms in der Karboxylgruppe der Alkansäuremoleküle? Welche Eigenschaft der Alkansäuren folgt aus dieser Bindung?
19. Geben Sie eine Erklärung für den festen Aggregatzustand von reiner Äthansäure (Eisessig) bei einer Temperatur unterhalb von 16 °C!
20. Vergleichen Sie die Bindungsverhältnisse im Natriumchlorid und im Natriumazetat!

Einige organische Verbindungen mit mehreren funktionellen Gruppen

Neben den Sauerstoffderivaten der Kohlenwasserstoffe mit *einer* funktionellen Gruppe im Molekül gibt es Derivate der Kohlenwasserstoffe mit *mehreren* funktionellen Gruppen im Molekül. Einige dieser Verbindungen entstehen bei der Spaltung von Naturstoffen wie Fetten, Kohlenhydraten oder Eiweißen. Im folgenden werden einige dieser Naturstoffe und ihre Spaltprodukte sowie deren Reaktionen behandelt. Damit werden Prozesse, die beim Stoffwechsel des Menschen und der Tiere ablaufen, aus der Sicht der Chemie erklärt. Es wird deutlich, daß die Lebensvorgänge materiell bedingt sind.

Glyzerin 22

Glyzerin $CH_2(OH)—CH(OH)—CH_2OH$ kann als Sauerstoffderivat des Propans mit drei gleichen funktionellen Gruppen im Molekül aufgefaßt werden. An jedes der drei Kohlenstoffatome ist eine Hydroxylgruppe gebunden. Glyzerin gehört zu den Alkoholen.

Der systematische Name des Glyzerins ist **Propantriol-(1.2.3).** Er kennzeichnet die Struktur des Moleküls. Der Name der Grundverbindung Propan zeigt das Vorliegen einer Kohlenstoffkette mit drei Kohlenstoffatomen an. Die Endung **ol** weist auf das Vorhandensein von Hydroxylgruppen hin. Die Silbe **tri** (drei) gibt die Anzahl der Hydroxylgruppen an. Die nachgestellten arabischen Ziffern **1, 2** und **3** kennzeichnen die Stellung der drei Hydroxylgruppen am 1., 2. und 3. Kohlenstoffatom.

Glyzerin ist eine farblose, ölige Flüssigkeit. Mit Wasser ist es unbegrenzt mischbar.

Da Glyzerin ein Alkohol ist, kann es mit Säuren reagieren. Die Reaktionsprodukte sind Ester. Dabei kann ein Glyzerinmolekül auf Grund der Anwesenheit von drei Hydroxylgruppen mit drei Karbonsäuremolekülen reagieren, die jeweils eine Karboxylgruppe im Molekül enthalten. Abbildung 38, Seite 76, zeigt das Molekülmodell eines Alkansäureesters des Glyzerins, wobei nur eine Säure an der Esterbildung beteiligt ist. Es ist aber auch möglich, daß ein Molekül des Glyzerins mit drei verschiedenen Karbonsäuremolekülen reagiert. Durch unterschiedliche Anordnung der Molekülreste der Karbonsäuren im Estermolekül können verschiedene Ester entstehen.

Die Ester des Glyzerins mit Karbonsäuren sind biologisch wichtig. Sie sind am Aufbau der Fette beteiligt.

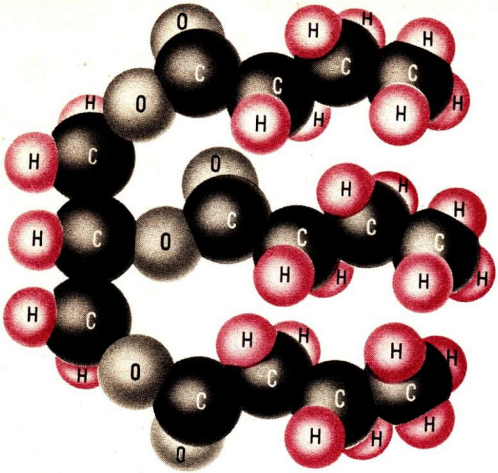


Abb. 38 Molekülmodell des Esters aus Butansäure und Glyzerin ① ② ③ ④ ⑤

Glyzerin ist ein Alkohol mit drei Hydroxylgruppen im Molekül. Es kann gleichzeitig mit drei verschiedenen Karbonsäuren verestert werden.

Fette 23

30

Proben verschiedener Fette und Speiseöle werden in Tetrachlormethan gelöst. Die Lösungen werden mit Bromwasser versetzt und geschüttelt (↗ Anhang, ▼ 3, S. 109). ⑥

Die natürlichen Fette sind Gemische von Estern des Glyzerins mit verschiedenen Karbonsäuren. Einige Alkansäuren, wie Butansäure (Buttersäure) C_3H_7COOH, Hexadekansäure (Palmitinsäure) $CH_3—(CH_2)_{14}—COOH$ und Oktadekansäure (Stearinsäure) $CH_3—(CH_2)_{16}—COOH$, sind besonders häufig am Aufbau der Fette beteiligt. In einigen Fetten ist neben diesen gesättigten Karbonsäuren, den Alkansäuren, auch Oktadekensäure (Ölsäure) mit Glyzerin verestert. Diese Säure enthält eine Doppelbindung im Molekül. Ihre Summenformel ist $C_{17}H_{33}COOH$. Sie hat die vereinfachte Strukturformel $CH_3—(CH_2)_7—CH=CH—(CH_2)_7—COOH$. Oktadekensäure gehört zu den **Alkensäuren**. ⑦

Alkensäuren sind ungesättigte Karbonsäuren.

① Erläutern Sie das Wesen der Esterbildung an einem beliebigen Beispiel!

② Erklären Sie am Beispiel der Esterbildung den Einfluß einer Konzentrationsänderung auf die Lage des chemischen Gleichgewichts!

③ Entwickeln Sie die vereinfachte Strukturformel für den Butansäureester des Glyzerins!

④ Berechnen Sie die relative Molekülmasse des Hexadekansäureesters des Glyzerins!

⑤ Begründen Sie die Zuordnung der Veresterung zur Kondensation und damit zur Substitution!

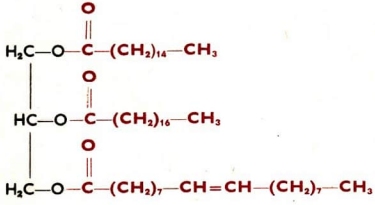
⑥ Wird Speiseöl mit Bromwasser geschüttelt, dann tritt eine Entfärbung des Bromwassers ein.
a) Erklären Sie diese Erscheinung!
b) Vergleichen Sie das Ergebnis Ihrer Überlegung mit den Ausführungen auf Seite 77!

⑦ Wie lassen sich ungesättigte Verbindungen nachweisen? (↗ „Chemie in Übersichten", S. 130)

⑧ a) Erklären Sie die Begriffe fette Öle und Mineralöle!
b) Welcher chemische Unterschied besteht zwischen fetten Ölen und Mineralölen?

⑨ a) Begründen Sie, weshalb einige Fette bei 20 °C fest, andere dagegen flüssig sind!
b) Nennen Sie jeweils Beispiele!

Der Ester mit der folgenden Formel ist Beispiel für ein Fett. Hier ist Glyzerin mit Hexadekansäure, Oktadekansäure und Oktadekensäure verestert.



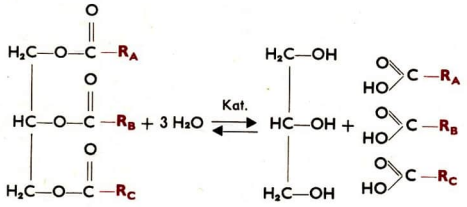
Fette sind Gemische von Estern des Glyzerins mit mittleren und höheren Karbonsäuren (vor allem Alkan- und Alkensäuren).

Fette sind in Wasser nicht löslich. Sie lösen sich jedoch gut in einigen organischen Lösungsmitteln wie Tetrachlormethan, Methanol und Benzol (Experiment 30).
Fette können nach ihrem Aggregatzustand bei Zimmertemperatur (20 °C) in feste und flüssige Fette eingeteilt werden. Die flüssigen Fette werden auch als **fette Öle** bezeichnet. Sie unterscheiden sich von den **Mineralölen**, die Erdöldestillationsprodukte sind. Fette Öle sind Gemische von Estern des Glyzerins; Mineralöle hingegen sind Gemische von Kohlenwasserstoffen. ⑧ ⑨
Feste Fette sind überwiegend Alkansäureester des Glyzerins. In fetten Ölen hingegen ist ein erheblicher Anteil des Glyzerins durch Alkensäuren verestert (Experiment 30). Zwischen Zusammensetzung und Aggregatzustand der Fette bei Zimmertemperatur

besteht ein Zusammenhang. Je größer der Anteil an Alkansäureestern ist, desto höher liegt die Schmelztemperatur des betreffenden Fettes.

▶ **Die Zusammensetzung der Fette bestimmt deren Schmelztemperatur.**

Durch Hydrolyse können Fette in Glyzerin und Karbonsäuren gespalten werden. Dieser Prozeß wird als **Fettspaltung** bezeichnet. ① ②

■ 

In den Formeln symbolisieren R_A, R_B und R_C unterschiedliche Atomgruppen, wobei das Symbol R nicht nur für Alkyle, sondern auch für ungesättigte Kohlenwasserstoffreste stehen kann.

Fettspaltung und -aufbau stellen Reaktionen dar, die zu einem chemischen Gleichgewicht führen. Die Lage des chemischen Gleichgewichts kann durch einen Überschuß an Wasser weitgehend zugunsten der Fettspaltung verschoben werden. ③

Tierische und pflanzliche Fette sind ein wichtiger Bestandteil der menschlichen und tierischen Ernährung. Mit der Nahrung aufgenommene Fette werden durch Enzyme in Glyzerin und Karbonsäuren gespalten. Dabei bilden die Enzyme mit den Spaltprodukten Zwischenverbindungen. Die Karbonsäuren werden unter Mitwirkung des Esters ATP (Adenosintriphosphat) abgebaut und zu körpereigenen Karbonsäuren wieder aufgebaut, die mit Glyzerin zu körpereigenem Fett verestert werden. Die ablaufenden Prozesse sind Biokatalysen. Sie sind von den gleichen Bedingungen abhängig wie chemische Reaktionen in der nichtlebenden Natur. Die Erforschung dieser komplizierten Prozesse ist ein Beispiel, wie die Natur durch den Menschen erkannt werden kann. ④

▶ **Fettspaltung durch Hydrolyse und Fettaufbau durch Kondensation sind Reaktionen, die zu einem chemischen Gleichgewicht führen. Bei der Fettverdauung verlaufen sie biokatalytisch.**

Glukose (Traubenzucker) 24

31 ▼ **Vorsicht!** Glukoselösung wird mit Fehlingscher Lösung versetzt und unter Schütteln zum Sieden erhitzt. ⑤

32 ▼ Glukoselösung wird mit fuchsinschwefliger Säure versetzt.

① Worin besteht das Wesen der Hydrolyse?

② Erläutern Sie den Vorgang der Fettspaltung am Beispiel des gemischten Esters des Glyzerins, dessen Formel auf Seite 78 angegeben ist!

③ Erörtern Sie am Beispiel der Fettspaltung den Einfluß von Konzentrationsänderungen auf die Lage des chemischen Gleichgewichts!

④ Inwiefern handelt es sich bei der Fettverdauung um biokatalytische Prozesse?

⑤ Bei der Reaktion von Glukoselösung mit Fehlingscher Lösung treten die gleichen Erscheinungen wie bei der Reaktion von Alkanalen mit Fehlingscher Lösung auf. Inwiefern handelt es sich dabei um eine Reaktion mit Elektronenübergang?

⑥ Begründen Sie aus der Zusammensetzung der Glukose deren Zugehörigkeit zu den Kohlenhydraten!

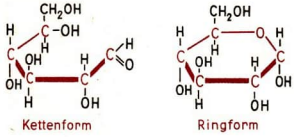
⑦ a) Geben Sie an, welche funktionellen Gruppen im Glukosemolekül vorhanden sind!
b) Welche chemischen Reaktionen der Glukose können Sie auf Grund der genannten funktionellen Gruppen vermuten?

Glukose (Traubenzucker) $C_6H_{12}O_6$ ist ein **Kohlenhydrat**. Ihre Zusammensetzung entspricht der allgemeinen Summenformel der Kohlenhydrate, die mit $C_n(H_2O)_m$ angegeben wird. Kohlenhydrate sind organische Verbindungen, bei denen Wasserstoff und Sauerstoff im Atomzahlverhältnis 2 : 1 enthalten sind.
Die Glukose gehört zu den **Monosacchariden** (Einfachzuckern) und damit zu den einfachsten Kohlenhydraten. Neben den Monosacchariden gibt es zusammengesetzte Kohlenhydrate. Bei der hydrolytischen Spaltung der zusammengesetzten Kohlenhydrate werden Monosaccharide gebildet. Diese lassen sich nicht durch Hydrolyse in noch niedrigermolekulare Kohlenhydrate spalten. ⑥

▶ **Monosaccharide sind Zucker, die durch Hydrolyse nicht weiter abgebaut werden können.**

Glukosemoleküle enthalten mehrere funktionelle Gruppen. Die vereinfachte Strukturformel der Glukose ist $CH_2OH—CHOH—CHOH—CHOH—CHOH—CHO$.
Die sechs Kohlenstoffatome bilden hierbei eine Kette. Jedes Kohlenstoffatom ist Bestandteil oder Träger einer funktionellen Gruppe. So ist das Kohlenstoffatom am Ende der Kette Bestandteil der Aldehydgruppe. An die fünf übrigen Kohlenstoffatome ist jeweils eine Hydroxylgruppe gebunden.
Die funktionellen Gruppen bestimmen die chemischen Eigenschaften der Glukose. So können Glukosemoleküle auf Grund der Anwesenheit von Hydroxylgruppen verestert werden. Die Aldehydgruppe im Molekül hingegen bewirkt die Reaktion von Glukose mit Fehlingscher Lösung (Experiment 31). ⑦
In wäßriger Lösung liegt nur ein Teil der Glukosemoleküle in Kettenform mit reaktionsfähiger Aldehydgruppe vor. Die Mehrzahl der Moleküle ist ringförmig. Durch Reaktion an der Aldehydgruppe und an einer Hydroxylgruppe desselben Moleküls erfolgt Ringschluß. Dabei entstehen Sechsringe, die aus fünf Kohlenstoffatomen und einem Sauer-

stoffatom gebildet werden. Durch die Beteiligung des Sauerstoffs an der Ringbildung und durch das Fehlen des aromatischen Zustandes unterscheiden sich die Sechsringe im Glukosemolekül vom Benzolring. ① ② ③



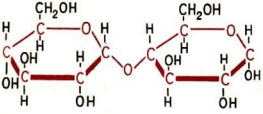
Zwischen kettenförmigen und ringförmigen Glukosemolekülen besteht ein Gleichgewicht, das stark nach der Seite der ringförmigen Moleküle verschoben ist. Da nur wenig kettenförmige Moleküle vorliegen, reagiert Glukose mit fuchsinschwefliger Säure nicht (Experiment 32).

Glukose ist eine weiße, kristalline, in Wasser lösliche Verbindung. Sie ist biologisch wichtig und kommt in Früchten sowie beim Stoffwechsel im menschlichen und tierischen Blut (Blutzucker) vor. Glukose schmeckt weniger süß als Rohrzucker. Sie kann zu Äthanol vergoren werden (↗ S. 48). ④

Glukose ist ein biologisch wichtiges Monosaccharid. Glukosemoleküle können Kettenform oder Ringform haben. Sie lassen sich nicht durch Hydrolyse in einfachere Kohlenhydratmoleküle spalten. Nur die kettenförmigen Glukosemoleküle reagieren auf Grund der vorhandenen Aldehydgruppe mit Fehlingscher Lösung.

Maltose (Malzzucker) und Saccharose (Rohrzucker) 25

Maltose (Malzzucker) $C_{12}H_{22}O_{11}$ ist ebenfalls ein Kohlenhydrat. Sie gehört zu den **Disacchariden** und damit zu den zusammengesetzten Zuckern. Disaccharidmoleküle sind aus zwei Molekülresten von Monosacchariden aufgebaut. Maltosemoleküle bestehen aus zwei Glukosemolekülresten.



Durch Hydrolyse lassen sie sich in zwei Glukosemoleküle aufspalten. Die Hydrolyse verläuft in der Natur biokatalytisch unter Mitwirkung von Enzymen. ⑤ ⑥

$$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \xrightleftharpoons{\text{Enzym}} 2\,C_6H_{12}O_6$$

Disaccharid — Monosaccharid

① Berechnen Sie die relative Molekülmasse der Glukose!

② Zeigen Sie an Beispielen, daß aus den chemischen Eigenschaften eines Stoffes auf dessen Molekülstruktur geschlossen werden kann!

③ Erörtern Sie mit Hilfe Ihrer Kenntnisse aus dem Biologieunterricht die biologische Bedeutung der Glukose als Assimilationsprodukt beziehungsweise als Nährstoff!

④ Geben Sie die chemische Gleichung für die Vergärung von Glukose an!

⑤ Inwiefern ist es vertretbar, Maltose als Kondensationsprodukt zu bezeichnen?
Vergleichen Sie dazu die Formeln zweier einzelner Glukosemoleküle mit der Formel eines Maltosemoleküls!

⑥ a) Worin besteht das Wesen der Hydrolyse?
b) Formulieren Sie die chemische Gleichung für die Hydrolyse von Maltose!

⑦ Erklären Sie das Auftreten von Maltose in Kartoffelkeimen! Beachten Sie dabei die Mitteilung über andere Vorkommen!

⑧ Begründen Sie die Zuordnung von Maltose und Saccharose zu den Disacchariden!

⑨ Erläutern Sie die biologische Bedeutung der Saccharose!

Die Hydrolyse ist im lebenden Organismus von den gleichen Reaktionsbedingungen abhängig wie in der nichtlebenden Natur. Maltose ist in Malzextrakt, in Kartoffelkeimen und als Spaltprodukt der Stärke im Speisebrei enthalten. ⑦

Saccharose (Rohrzucker) $C_{12}H_{22}O_{11}$ ist ein Disaccharid, dessen Moleküle durch Hydrolyse in zwei Monosaccharidmoleküle gespalten werden können. Im Unterschied zur Maltose handelt es sich dabei um die Moleküle von zwei verschiedenen Monosacchariden, der Glukose und der Fruktose. ⑧

Saccharose ist eine weiße, kristalline, süß schmeckende Verbindung. Sie ist in Früchten, vor allem aber im Zuckerrohr und in Zuckerrüben enthalten. Saccharose ist der übliche „Zucker", der aus Zuckerrüben oder Zuckerrohr industriell gewonnen wird. ⑨

▶ **Maltose und Saccharose sind Disaccharide. Disaccharide sind Zucker, deren Moleküle durch Hydrolyse in zwei Monosaccharidmoleküle gespalten werden können. Die Spaltprodukte der Maltosemoleküle sind Glukosemoleküle.**

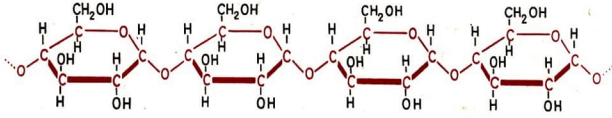
Stärke und Zellulose 26

33 ▼ **Vorsicht!** Stärkelösung wird mit Fehlingscher Lösung versetzt und unter Schütteln bis zum Sieden erhitzt.

34 ▼ Stärkelösung und Kartoffelscheiben werden mit Jodlösung geprüft!

35 ▼ **Vorsicht!** Stärkelösung wird mit Salzsäure versetzt und zum Sieden erhitzt. Die Salzsäure wird anschließend durch Natriumhydroxidlösung neutralisiert. Die entstandene Lösung wird mit Fehlingscher Lösung geprüft (↗ Anhang, ▼ 4, S. 110).

Stärke $(C_6H_{10}O_5)_n$ **ist ein Polysaccharid.** Polysaccharide sind Verbindungen, deren Moleküle aus mehr als zehn Monosaccharidmolekülresten aufgebaut sind. Stärkemoleküle sind aus vielen Glukosemolekülresten aufgebaut.



Die relative Molekülmasse der Stärke liegt bei 50000. Sie kann nicht genau angegeben werden. Stärkemoleküle sind natürliche Makromoleküle. Stärke ist wie viele makromolekulare Stoffe kein einheitlicher Stoff. Sie ist ein Gemisch von Makromolekülen gleichartiger Struktur, aber unterschiedlicher Größe, das als Ganzes reagiert. ① ②

▶ **Polysaccharide sind makromolekulare Stoffe, deren Moleküle durch Hydrolyse in Monosaccharidmoleküle gespalten werden können.**

Da die ringförmigen Glukosemolekülreste miteinander verknüpft sind und keine freien Aldehydgruppen auftreten können, reagiert Stärke nicht mit Fehlingscher Lösung (Experiment 33).

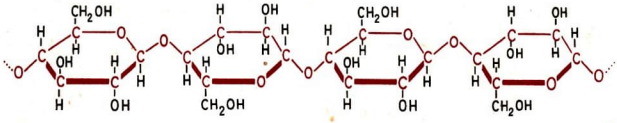
Stärke ist ein Stoffwechselprodukt der Pflanzen. Sie wird biokatalytisch aus Glukosemolekülen aufgebaut und in Speicherorganen wie Früchten und Knollen eingelagert. Sie kann dort auf Grund ihrer Farbreaktion mit Jod nachgewiesen werden. Jodlösung ergibt mit Stärke eine intensive Blaufärbung (Experiment 34). ③

Unter Einwirkung von Säuren oder Enzymen läßt sich Stärke durch Hydrolyse spalten (Experiment 35). Der Abbau verläuft über Maltose bis zur Glukose. Dabei wirken Wasserstoff-Ionen und Enzyme katalytisch. Abbau und Aufbau von Stärke sind wichtige biochemische Prozesse im Stoffwechsel des Menschen, der Tiere und der Pflanzen. Auch die Erforschung dieser komplizierten Prozesse beweist die Erkennbarkeit der Welt durch den Menschen und die Gültigkeit allgemeiner Gesetzmäßigkeiten in verschiedenen Bereichen der Natur. ④ ⑤ ⑥

Stärke hat technische Bedeutung als Ausgangsstoff für die Herstellung von Glukose (Traubenzucker) sowie für die Vergärung zu Äthanol. Dazu wird Stärke hydrolytisch abgebaut. ⑦ ⑧

Zellulose $(C_6H_{10}O_5)_n$ **ist** ebenfalls ein Polysaccharid, dessen Moleküle aus Glukosemolekülresten aufgebaut sind. Sie unterscheidet sich jedoch von der Stärke in der Molekülstruktur.

Zellulose ist ein Stoffwechselprodukt der Pflanzen und einiger Tiere. Sie dient als



① Schätzen Sie ab, wieviel Glukosemolekülreste am Aufbau eines Stärkemoleküls beteiligt sind!

② a) Begründen Sie den süßen Geschmack erfrorener Kartoffeln! b) Wieso ist es möglich, den süßen Geschmack erfrorener Kartoffeln durch ausreichendes Wässern weitgehend zu beseitigen?

③ Begründen Sie, warum Stärke nicht mit Fehlingscher Lösung reagiert!

④ Erläutern Sie den Prozeß der Hydrolyse am Beispiel des Stärkeabbaus!

⑤ Erläutern Sie den chemischen Prozeß der Stärkeverdauung!

⑥ Begründen Sie die Zuordnung der Hydrolyse zur Substitution!

⑦ Erläutern Sie die chemischen Reaktionen, die bei der Herstellung von Äthanol aus Stärke ablaufen!

⑧ Erläutern Sie die Begriffe Monosaccharid, Disaccharid und Polysaccharid!

⑨ Nennen Sie Beispiele für den biologischen Zelluloseabbau!

Gerüstsubstanz. Wie die Stärke kann auch Zellulose chemisch oder biochemisch zu Glukose abgebaut werden. ⑨

▶ **Stärke und Zellulose sind biologisch wichtige Polysaccharide. Sie sind Gemische makromolekularer Verbindungen, deren Moleküle katalytisch durch Hydrolyse in viele Glukosemoleküle aufgespalten werden können. Sie unterscheiden sich voneinander in der Molekülstruktur.**

Aminosäuren 27

Aminosäuren sind Karbonsäuren mit zwei verschiedenen funktionellen Gruppen im Molekül, der Karboxylgruppe —COOH und der **Aminogruppe —NH_2**. Das Stickstoffatom der Aminogruppe ist durch Einfachbindungen mit zwei Wasserstoffatomen verbunden. Viele Aminosäuren können als Substitutionsprodukte von Alkansäuren aufgefaßt werden, in deren Molekülen ein Wasserstoffatom des Kohlenwasserstoffrestes durch eine Aminogruppe ersetzt ist. Im folgenden werden nur Aminosäuren betrachtet, bei denen die Aminogruppe an das Kohlenstoffatom gebunden ist, das der Karboxylgruppe benachbart ist (Abb. 39).

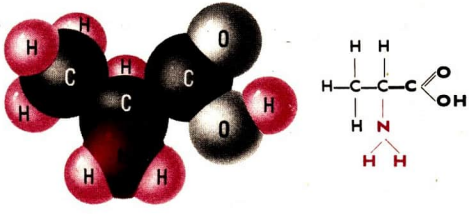


Abb. 39
Molekülmodell und Strukturformel von Alanin

Diese Aminosäuren werden als 2-Aminosäuren oder α-Aminosäuren bezeichnet. Sie sind als Bausteine der Eiweiße von besonderer Bedeutung. ①
Die systematischen Namen der Aminosäuren kennzeichnen die Struktur der Moleküle. Häufiger werden aber Trivialnamen benutzt.



Glykokoll (2-Aminoäthansäure) Alanin (2-Aminopropansäure)

2-Aminosäuren sind biologisch wichtige organische Verbindungen mit zwei verschiedenen funktionellen Gruppen im Molekül, der Karboxylgruppe —COOH und der Aminogruppe —NH_2. Sie sind am Aufbau der Eiweiße beteiligt.

Auf Grund der im Molekül vorhandenen Karboxylgruppe zeigen 2-Aminosäuren ähnliche chemische Reaktionen mit Hydroxiden und Alkanolen wie die Karbonsäuren. Sie können neutralisiert oder verestert werden. ②
Molekülreste der 2-Aminosäuren sind Bestandteile von **Dipeptiden** (Abb. 40).

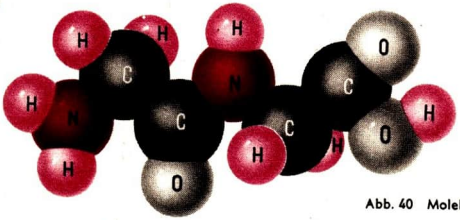
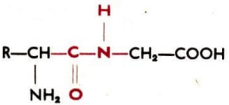
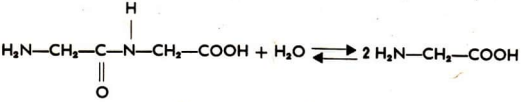


Abb. 40 Molekülmodell eines Dipeptids



Durch Hydrolyse werden Dipeptidmoleküle zu jeweils zwei 2-Aminosäuremolekülen abgebaut.



Dipeptid Glykokoll

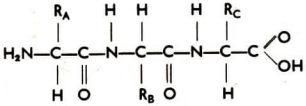
① a) Stellen Sie die Ihnen bekannten funktionellen Gruppen zusammen!
b) Geben Sie an, bei welchen Stoffklassen diese Gruppen auftreten!

② Welche Reaktionen der Karbonsäuren sind auf das Vorhandensein der Karboxylgruppen zurückzuführen?

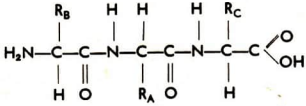
③ Erläutern Sie am Beispiel der Peptidspaltung die Begriffe Hydrolyse, Kondensation und chemisches Gleichgewicht!

④ Ermitteln Sie, wieviel Kombinationsmöglichkeiten bestehen, wenn zwei verschiedene 2-Aminosäuren zur Verfügung stehen und jeweils drei Molekülreste zu einem Peptidmolekül verknüpft sind!

Nach Anzahl der 2-Aminosäuremolekülreste, die am Aufbau des Peptidmoleküls beteiligt sind, unterscheidet man die **Dipeptide** von den **Polypeptiden**. Es gibt Polypeptide, deren Moleküle über 100 2-Aminosäuremolekülreste enthalten. Dabei werden auch Molekülreste von verschiedenen 2-Aminosäuren miteinander verknüpft. Diese können unterschiedlich angeordnet sein, wodurch Stoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften gebildet werden. ③ ④



oder



Für alle Peptide ist die **Peptidbindung** kennzeichnend. Das ist die Atomgruppierung **—CO—NH—**.

Peptide sind organische Verbindungen, deren Moleküle durch Hydrolyse in 2-Aminosäuremoleküle gespalten werden können. Die Atomgruppierung —CO—NH— wird als Peptidbindung bezeichnet.

Eiweiße

36 **Vorsicht!** Festes Eiweiß (Horn) wird mit Natriumhydroxidlösung versetzt und erhitzt. Die entweichenden Gase werden auf ihren Geruch und mit feuchtem rotem Lackmuspapier geprüft.

37 Eiweißlösung wird zum Sieden erhitzt.

38 a) Eiweißlösung wird mit verdünnter Salpetersäure versetzt.
b) Eiweißlösung wird mit konzentrierter Salpetersäure versetzt.

Eiweiße sind aus Polypeptiden aufgebaut. Das gilt vor allem für die **Proteine**, die einfachen Eiweiße. Sie gehören zu den natürlichen makromolekularen Stoffen. Auf Grund des Aufbaus der Eiweiße aus 2-Aminosäuren enthalten sie als wichtiges Element Stickstoff. Dieser kann nachgewiesen werden, indem Ammoniak NH_3 aus Eiweiß freigesetzt wird. Ammoniak wird mit feuchtem Lackmuspapier nachgewiesen, da die Lösung von Ammoniak in Wasser basisch reagiert (Experiment 36). ①
Durch Hydrolyse unter katalytischem Einfluß von Wasserstoff-Ionen oder Enzymen können Proteine in 2-Aminosäuren aufgespalten werden. Obwohl jedes Lebewesen spezifisches körpereigenes Eiweiß besitzt, werden beim Abbau der Eiweiße im wesentlichen die gleichen (etwa 20) 2-Aminosäuren gefunden. Mathematisch läßt sich allerdings nachweisen, daß bei einer unterschiedlichen Anordnung von 20 verschiedenen 2-Aminosäuren in Polypeptidmolekülen, die aus 150 2-Aminosäuremolekülresten aufgebaut sind, 20^{150} Kombinationsmöglichkeiten bestehen. So sind auch die Vielfalt der Eiweiße und die Existenz von körperspezifischem Eiweiß der Organismen erklärlich. ② ③
Besondere Verdienste bei der Erforschung der Struktur der Eiweiße erwarben sich in den Anfängen der Eiweißforschung *Emil Fischer* (Abb. 41) und *Nikolai D. Selinski* (Abb. 42).

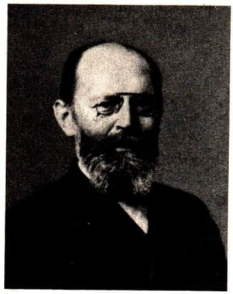


Abb. 41 *Emil Fischer* (1852 bis 1919)

Besondere Verdienste erwarb sich *Emil Fischer* bei der Strukturaufklärung von Naturstoffen. Er erschloß damit zahlreiche Arbeitsgebiete im Grenzbereich der Wissenschaften Chemie und Biologie. 1902 erhielt er für seine Arbeit den Nobelpreis für Chemie. *Emil Fischers* wissenschaftliche Tätigkeit ist eng verknüpft mit der Entwicklung des Kapitalismus und der Chemie in Deutschland. So kamen ihm die zunehmende Konzentration der chemischen Industrie und die Förderung der chemischen Forschung durch die Industrie zugute. Umgekehrt diente er mit seinen Forschungsergebnissen der chemischen Industrie. Trotzdem zog er es vor, Hochschullehrer zu bleiben und sich nicht als Leiter eines wissenschaftlichen Industrielabors anwerben zu lassen, um seine wissenschaftliche Freiheit aufrechtzuerhalten. Seine Freiheit konnte er trotzdem nicht sichern. Als Fabrikantensohn, in seinem Denken und Handeln mit dem Monopolkapital verbunden, unterstützte er 1914 die Ziele des deutschen Imperialismus. Erst später änderte er seine Auffassung und vertrat pazifistische Auffassungen. Der Revolution von 1918 stand er verständnislos gegenüber.

① Erläutern Sie das Wesen der Peptidbindung und ihrer Ausbildung!

② Erläutern Sie die Hydrolyse eines Polypeptids!

③ Begründen Sie die Vielfalt der in der Natur vorkommenden Eiweiße!

④ Nennen Sie Beispiele für das ständige Voranschreiten der menschlichen Erkenntnis auf dem Gebiete der Chemie!

⑤ a) Begründen Sie die Wirksamkeit des „Kochens" zum Zwecke des Sterilisierens!
b) Erörtern Sie den schädigenden Einfluß von Äthanol auf den menschlichen Körper!

⑥ Begründen Sie die Gelbfärbung der Haut bei Berührung mit konzentrierter Salpetersäure!

⑦ Erklären Sie den Prozeß der Eiweißverdauung als biokatalytische Reaktion!

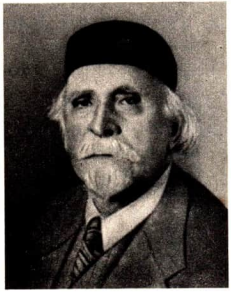


Abb. 42 *Nikolai Dimitrijewitsch Selinski*
(1861 bis 1953)

N. D. Selinskis wissenschaftliche Tätigkeit zeichnete sich durch außerordentliche Vielseitigkeit aus. Er hatte entscheidenden Einfluß auf die Entwicklung der Wissenschaft Chemie in der Sowjetunion.
Er erlebte den aufsteigenden Kapitalismus in Rußland sowie die Entwicklung des Sozialismus in der Sowjetunion. Die besondere Entwicklung der Erdölchemie bedingte zunächst die Konzentration der wissenschaftlichen Arbeit *Selinskis* auf diesen Bereich. Dabei arbeitete er vor allem auf dem Gebiet der zyklischen Verbindungen. Als Hochschullehrer unterstützte er 1904 und 1905 revolutionäre Strömungen im zaristischen Rußland. Er ergriff Partei für den gesellschaftlichen Fortschritt. Nach dem Sieg der Großen Sozialistischen Oktoberrevolution stellte er sich voll auf die Seite der jungen Sowjetmacht. Er unterstützte und bestimmte mit die Entwicklung der Chemie in der Sowjetunion.

Emil Fischer (1852 bis 1919) trug durch experimentelle Untersuchungen von Naturstoffen maßgeblich zur Strukturaufklärung der Eiweiße bei. So wies er durch Hydrolyse von Eiweißen nach, daß an deren Aufbau 2-Aminosäuren beteiligt sind. Er begnügte sich jedoch nicht mit der Analyse, sondern stellte auch Peptide synthetisch dar. *Nikolai D. Selinski* (1861 bis 1935), der sich mit der Untersuchung ringförmiger organischer Verbindungen beschäftigte, stellte fest, daß bei Eiweißen auch ringförmige Strukturen vorliegen können. Beide Wissenschaftler trugen damit zur Erkenntnis der Natur und der in ihr ablaufenden Prozesse bei. Sie leisteten entscheidende Beiträge zum Nachweis der Abhängigkeit des Verlaufs der Lebensvorgänge von materiellen Bedingungen.
Die Untersuchung der Eiweiße beschäftigte in der Vergangenheit und Gegenwart viele Chemiker und Biologen. Trotzdem ist die Erforschung der Eiweiße noch nicht abgeschlossen. In neuerer Zeit gilt das Streben der Wissenschaftler vor allem der Eiweißsynthese, insbesondere von lebensfähigem Eiweiß, um weiter zum Wesen der Lebensvorgänge vorzudringen. Dabei sind bereits große Erfolge sowohl bei der Analyse als

auch bei der Synthese von Eiweißen erzielt worden. Bisher mußten allerdings zur Synthese Enzyme lebender Zellen verwendet werden. Doch auch auf diesem Gebiet der Eiweißforschung wird die menschliche Erkenntnis weiter voranschreiten und zur weiteren Aufklärung von Lebensvorgängen beitragen. ④ (↗ S. 87)

Eiweiße sind makromolekulare Verbindungen. Sie setzen sich aus Polypeptiden zusammen. Durch Hydrolyse können sie in 2-Aminosäuren gespalten werden. Polypeptide können aus 2-Aminosäuren synthetisch dargestellt werden.

Eiweiß gerinnt beim Erhitzen und durch Zusatz von verdünnten Säuren oder Äthanol (Experiment 37 und 38a). Die Eiweißgerinnung läßt sich nicht rückgängig machen. Dadurch ist es möglich, Krankheits- und Fäulniserreger durch Hitzeeinwirkung abzutöten. Aber auch höhere Lebewesen können durch große Wärme getötet werden. Die Eiweißgerinnung unter Einwirkung von Äthanol ist einer der schädigenden Einflüsse des Äthanols auf den menschlichen Körper bei Alkoholmißbrauch (↗ S. 49). ⑤ (↗ S. 87) Bei der Reaktion mit konzentrierter Salpetersäure, der **Xanthoprotein-Reaktion**, wird Eiweiß intensiv gelb gefärbt (Experiment 38b). Diese Reaktion dient zum Nachweis von Eiweiß. ⑥ ⑦ (↗ S. 87)
Eiweiße sind neben Fetten und Kohlenhydraten wichtige Grundnährstoffe des Menschen und der Tiere. Da jedes Lebewesen spezifisches körpereigenes Eiweiß aufbauen muß, werden mit der Nahrung aufgenommene Eiweiße abgebaut und im Körper zu körpereigenem Eiweiß aufgebaut. Dabei wirken Enzyme als Biokatalysatoren, indem sie mit den Spaltprodukten der Eiweiße Zwischenverbindungen bilden. Die ablaufenden Vorgänge sind Hydrolysen und Kondensationsreaktionen und damit Substitutionen.

Wiederholung und Übung 29

1. Stellen Sie alle Ihnen bekannten funktionellen Gruppen zusammen!
2. a) Stellen Sie alle Ihnen bekannten Reaktionen zusammen, an denen Stoffe mit ihren funktionellen Gruppen beteiligt sind!
   b) Ordnen Sie die unter a) genannten Reaktionen dem jeweiligen Typ organisch-chemischer Reaktionen zu!
3. Erläutern Sie an einem Beispiel zur Kondensation und zur Hydrolyse das chemische Gleichgewicht!
4. Begründen Sie, daß es sich bei Stoffwechselvorgängen um biokatalytische Prozesse handelt!
5. Berechnen Sie, wieviel Kilogramm Glyzerin durch Spaltung von 50 kg des Oktadekansäureesters des Glyzerins erhalten werden können!
6. a) Nennen Sie Möglichkeiten zur Bildung von Makromolekülen!
   b) Vergleichen Sie diese Reaktionen miteinander hinsichtlich des Reaktionstyps!
7. a) Erläutern Sie den Begriff Hydrolyse!
   b) Wenden Sie ihn auf den Abbau von Fetten, Kohlenhydraten und Eiweißen bei Verdauungsvorgängen an!

Plaste, Elaste und Chemiefaserstoffe

Plaste, Elaste und Chemiefaserstoffe sind meist **synthetisch hergestellte makromolekulare Stoffe**. Ständig werden neue Stoffe dieser Art entwickelt, ihre Eigenschaften verbessert und neue Einsatzgebiete für diese Stoffe erschlossen. Für die verschiedenartigsten Zweige der Volkswirtschaft sind sie unentbehrlich. Als Werkstoffe verdrängen die **Plaste** die metallischen und anderen natürlichen Werkstoffe. Mit geringer Dichte, hoher mechanischer Festigkeit, guter Korrosionsbeständigkeit und Formbarkeit besitzen Plaste ausgezeichnete Werkstoffeigenschaften. Als **Elaste** werden Werkstoffe bezeichnet, die gummielastische Eigenschaften zeigen. **Chemiefaserstoffe** treten an die Stelle natürlicher Faserstoffe, wie Wolle und Baumwolle, auf Grund ihrer hervorragenden Gebrauchseigenschaften.

Plaste, Elaste und Chemiefaserstoffe werden aus Stoffen mit einfach gebauten Molekülen synthetisch hergestellt. Die chemischen Reaktionen **Polykondensation** und **Polymerisation** führen zur Bildung dieser makromolekularen Stoffe. Die wichtigsten Ausgangsstoffe für die Herstellung von Plasten, Elasten und Chemiefaserstoffen sind Produkte aus Kohle, Erdöl und Erdgas.

Die Stellung der chemischen Industrie eines Staates im Weltmaßstab wird heute durch die Herstellung von makromolekularen Stoffen mit entschieden. Die Deutsche Demokratische Republik nimmt mit ihrer Erzeugung von Plasten, Elasten und Chemiefaserstoffen einen Platz unter den führenden Industriestaaten der Welt ein.

▶ **Plaste, Elaste und Chemiefaserstoffe sind meist synthetisch hergestellte makromolekulare Stoffe. Plaste zeichnen sich durch geringe Dichte, gute Korrosionsbeständigkeit und Formbarkeit aus.**

Polyamide - Polykondensation 30

39 ▼ Farblose Polyamidschnitzel werden in einem Reagenzglas vorsichtig erhitzt. Der Stoff darf sich beim Erhitzen nicht verfärben. Mit Hilfe eines Glasstabes werden lange Fäden aus der Schmelze gezogen.

Eine Reaktion zur synthetischen Herstellung von makromolekularen Stoffen aus einfach gebauten, niedrigmolekularen Verbindungen ist die **Polykondensation**. Bei der Kon-

densation vereinigen sich jeweils zwei Moleküle der reagierenden Stoffe unter Abspaltung eines einfach gebauten dritten Moleküls. ① ②

■ Bei der Esterbildung entsteht aus jeweils einem Molekül einer Alkansäure und eines Alkanols unter Abspaltung eines Wassermoleküls ein Estermolekül. ③

Enthalten die reagierenden Verbindungen in ihren Molekülen zwei oder mehrere funktionelle Gruppen, so kann eine Kondensation an verschiedenen reaktionsfähigen Stellen der Moleküle ablaufen. Dabei kommt es zu einer stufenweisen Verknüpfung einer großen Anzahl von einzelnen Molekülen. An den Verbindungsstellen wird jeweils ein einfach gebautes Molekül abgespalten, häufig ein Wassermolekül. Im Ergebnis dieser Reaktion entstehen Makromoleküle. Diese chemische Reaktion wird als **Polykondensation** bezeichnet. Wie bei der Kondensation stellt sich bei der Polykondensation ein chemisches Gleichgewicht ein, dessen Lage von den Reaktionsbedingungen Konzentration der reagierenden Stoffe, Temperatur und Druck stark abhängig ist. Die Polykondensation gehört ebenfalls zu den Substitutionsreaktionen.

▶ **Die Polykondensation ist eine chemische Reaktion, bei der sich eine Vielzahl von Molekülen unter Abspaltung einfach gebauter Moleküle vereinigt. Sie ist eine stufenweise fortlaufende Kondensation, in deren Ergebnis Makromoleküle entstehen. Die Polykondensation wird dem Reaktionstyp Substitution zugeordnet.**

Bei der Kondensation von Molekülen mit einer Karboxylgruppe —COOH und solchen, die eine Aminogruppe —NH_2 als funktionelle Gruppe aufweisen, bildet sich im Kondensationsprodukt eine Peptidbindung —CO—NH—. Das Zustandekommen von Peptidbindungen ist das Verknüpfungsprinzip bei Polypeptiden, den Bestandteilen der Eiweiße. Das natürliche Bauprinzip der Eiweißbestandteile läßt sich ähnlich durch Polykondensation von Stoffen nachbilden, die nicht in der Natur vorkommen. Eine Voraussetzung für diese Polykondensation ist die Anwesenheit der erforderlichen funktionellen Gruppen in den Molekülen der Ausgangsstoffe. Die Grundbausteine für das Polykondensationsprodukt müssen an mindestens zwei Stellen im Molekül reaktionsfähig sein, da eine fortlaufende Kondensation stattfinden soll.
Mit der Herstellung der **Polyamide** ist es dem Menschen gelungen, makromolekulare Stoffe synthetisch zu erzeugen, die in ihrer Struktur den in der Natur vorkommenden Polypeptiden stark ähneln. Als Polyamide wird eine Gruppe synthetischer makromolekularer Stoffe bezeichnet, in deren Molekülen eine immer wiederkehrende Peptidbindung auftritt. Als Ausgangsstoff für ihre Herstellung kann die ringförmige Verbindung **ε-Aminokaprolaktam** verwendet werden. In einer Reaktion mit Wasser wird zunächst die ringförmige Struktur dieser Moleküle in eine kettenförmige umgewandelt.



Bei dieser Reaktion entsteht eine Aminosäure mit sechs Kohlenstoffatomen, die **ε-Aminokapronsäure**. Die Moleküle dieser Verbindung enthalten die für die Ausbildung einer Peptidbindung erforderlichen funktionellen Gruppen. Die zwei funktionellen

① Nennen Sie ein Beispiel für eine Kondensation! Erläutern Sie an diesem Beispiel das Wesen der Kondensation!

② Ordnen Sie die Kondensation einem Reaktionstyp der organischen Chemie zu!

③ Erläutern Sie, welche Veränderungen an den Karboxylgruppen von Alkansäuremolekülen bei der Reaktion mit Alkanolmolekülen auftreten!

④ Erläutern Sie die Herstellung von Polyamiden als Polykondensation!

Gruppen im Molekül der ε-Aminokapronsäure ermöglichen eine Polykondensation. Durch stufenweise fortlaufende Kondensation zwischen diesen Aminosäuremolekülen entsteht unter Abspaltung von Wassermolekülen ein makromolekularer Stoff mit dem folgenden chemischen Aufbau:

...—NH—$(CH_2)_5$—CO—NH—$(CH_2)_5$—CO—NH—$(CH_2)_5$—CO—...

Im Ergebnis der Polykondensation entstehen aus 100 ··· 150 Einzelmolekülen linear aufgebaute Polyamidmoleküle, die parallel zueinander angeordnet sind (Abb. 43). ④

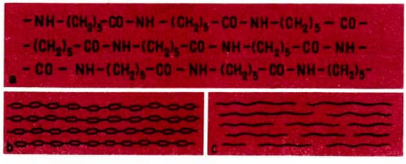


Abb. 43
Struktur eines Polyamids
a) Makromoleküle sind linear aufgebaut und parallel zueinander angeordnet.
b) und c) Die Makromoleküle sind fadenförmig geordnet (schematische Darstellung).

Durch Polykondensation von ε-Aminokapronsäure entstehen Polyamide. ε-Aminokapronsäure enthält zwei funktionelle Gruppen im Molekül, eine Karboxyl- und eine Aminogruppe. Das ringförmige ε-Aminokaprolaktam dient zur Herstellung dieser Verbindung.

Polyamide haben als Plaste und Chemiefaserstoffe Bedeutung erreicht. Die Polyamide sind farblose, sehr feste Stoffe von geringer Dichte. Beim Erwärmen werden sie weich und sind dann leicht formbar (Experiment 39). Auf Grund ihrer mechanischen Festigkeit und guten Korrosionsbeständigkeit werden sie zur Herstellung von Formteilen in der Technik, wie Zahnräder, Lager und Gehäuse, zu unzerbrechlichen Gebrauchsgegenständen und Verpackungsmaterial verwendet.
Das größte Anwendungsgebiet für Polyamide ist jedoch die Herstellung von Chemiefaserstoffen. Die Polyamide eignen sich auf Grund ihrer fadenförmigen Struktur zur Verarbeitung zu Chemiefaserstoffen. Die Möglichkeit, Chemiefaserstoffe aus Polyamiden herzustellen, war bei diesen makromolekularen Stoffen besonders naheliegend. Mit ihrer Eiweißstruktur sind sie den natürlichen Faserstoffen, zum Beispiel der Naturseide, sehr ähnlich. Die hervorragende Zerreiß- und Scheuerfestigkeit der synthetisch hergestellten Faserstoffe übertrifft die der Naturfaserstoffe. Die Textilindustrie erzeugt

hochwertige Bekleidung aus den in der Deutschen Demokratischen Republik als **Dederon** und **Nylon** bekannten Polyamidfaserstoffen. Auch im technischen Bereich werden die Polyamidfaserstoffe vor allem wegen ihrer großen Festigkeit zur Herstellung von Förderbändern, Filtertüchern, Seilen, Netzen und als Einlagegewebe für Reifen vielseitig verwendet. Im VEB Leuna-Werke „Walter Ulbricht", Werk II, wird der Ausgangsstoff für die Polyamidproduktion, das ε-Aminokaprolaktam, großtechnisch hergestellt. Der größte Teil des ε-Aminokaprolaktams wird in den Chemiefaserwerken Wilhelm-Pieck-Stadt Guben und Rudolstadt des VEB Chemiefaserkombinat Schwarza „Wilhelm Pieck" weiterverarbeitet (Abb. 44). ①

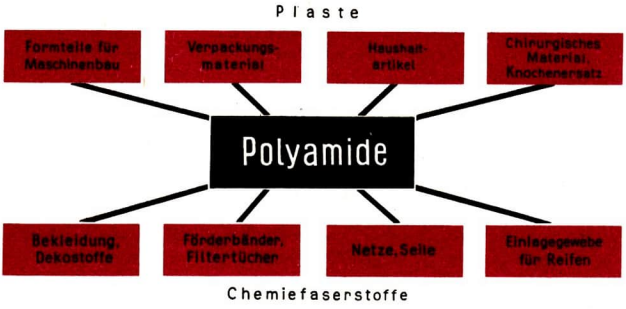


Abb. 44 Verwendungsmöglichkeiten für Polyamide

Polyamide werden zur Herstellung von Chemiefaserstoffen, technischen Formteilen und Gebrauchsgegenständen verwendet.

Phenoplaste 31

40

Vorsicht! In ein Reagenzglas wird zu wenig Phenol etwas 40%ige Methanallösung gegeben. Nach Erwärmen werden dem Reaktionsgemisch wenige Tropfen Natriumhydroxidlösung zugesetzt. Nach weiterem Erwärmen wird die entstehende Flüssigkeit mit wenigen Tropfen Salzsäure versetzt.

Eine weitere Gruppe von Plasten, die durch Polykondensation hergestellt wird, sind die **Phenoplaste**. Ausgangsstoffe für die Phenoplastherstellung sind Methanal und Phenol. Auch andere ringförmige, dem Phenol ähnliche Verbindungen mit Hydroxylgruppen im Molekül können bei der Polykondensation an Stelle des Phenols eingesetzt werden. ② ③

Bei der Bildung von Phenoplasten reagieren zunächst zwei Phenolmoleküle mit einem Methanalmolekül unter Abspaltung eines Wassermoleküls.

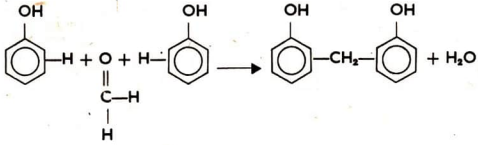
① Versuchen Sie zu begründen, weshalb Polyamide durch Säuren angegriffen werden können!

② Ordnen Sie die Ausgangsstoffe zur Phenoplastherstellung den Stoffklassen der organischen Chemie zu!

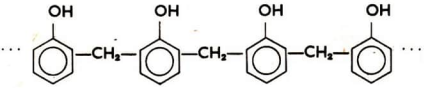
③ Erläutern Sie eine Möglichkeit zur Herstellung von Methanal!

④ Vergleichen Sie den Bau der Phenoplastmoleküle mit dem der Polyamidmoleküle!

⑤ Erläutern Sie die Phenoplastherstellung als Polykondensation!



Dieses Zwischenprodukt reagiert mit weiterem Phenol und Methanal.



Beim Phenol reagiert nicht die funktionelle Gruppe. Im Phenolmolekül sind verschiedene Wasserstoffatome besonders reaktionsfähig.



An diesen Stellen treten Verknüpfungen auf, so daß die Phenoplastmoleküle schließlich räumliche, netzartige Gebilde darstellen (Abb. 45) (Experiment 40). ④
Die Polykondensation von Phenol und Methanal verläuft sehr langsam. Die Zugabe eines Katalysators verkürzt die Einstellzeit des chemischen Gleichgewichts. ⑤

Durch Polykondensation von Phenol und Methanal entstehen Phenoplaste.

Bei der technischen Herstellung der Phenoplaste wählt man die Reaktionsbedingungen so, daß die Polykondensation auf einer Zwischenstufe, in der sich harzartige Produkte gebildet haben, stehenbleibt. Diese Phenolharze können in der Wärme geformt und anschließend durch Erhitzen zu einem Plast von hoher Festigkeit ausgehärtet werden. Die Form dieses festen Phenoplastes ist durch Wärmebehandlung nicht mehr zu beeinflussen. Der Zusatz von verschiedenen Füllstoffen (z. B. Holzmehl, Gesteinsmehl, Textilfasern, Glasfasern) und Farbstoffen zu den Phenolharzen erweitert die Anwendungsgebiete dieser Werkstoffe. Phenoplaste sind Stoffe von geringer Dichte, guter

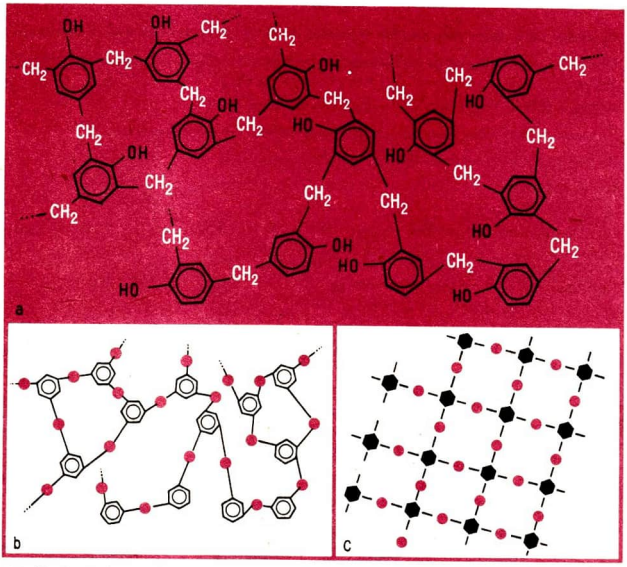


Abb. 45 Struktur eines Phenoplasts
a) Makromoleküle sind durch Polykondensation von Phenol und Methanal entstanden.
b) und c) Die Makromoleküle sind räumlich vernetzt (schematische Darstellung).

Korrosionsbeständigkeit und schlechtem Wärme- und elektrischem Leitvermögen. ① Diese Polykondensationsprodukte werden vor allem für technische Formteile, Karosserieteile, Elektroinstallationsmaterial, Leime und Haushaltartikel verwendet.
Phenoplaste werden in unserer Republik hauptsächlich im VEB Leuna-Werke „Walter Ulbricht", im VEB Plasta Kunstharz- und Preßmassefabrik Espenhain und im VEB Kunstharz- und Preßmassefabrik Erkner hergestellt.

Phenoplaste sind Werkstoffe mit geringer Dichte, guter mechanischer Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Sie haben schlechtes Wärme- und elektrisches Leitvermögen und finden vor allem in der Elektroindustrie Verwendung.

① Stellen Sie Beziehungen zwischen den Eigenschaften der Phenoplaste und ihren Verwendungszwecken her!

② Vergleichen Sie ein Amin und eine Aminosäure mit der gleichen Anzahl von Kohlenstoffatomen im Molekül bezüglich ihrer Strukturen miteinander!

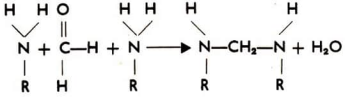
Aminoplaste

32

41

Vorsicht! In einem Reagenzglas wird Harnstoff mit Methanallösung versetzt. Nach Erwärmen werden wenige Tropfen konzentrierter Salzsäure zugegeben.

Aminoplaste sind makromolekulare Stoffe, die in ihrer Struktur und in ihren Eigenschaften den Phenoplasten sehr ähnlich sind. Sie entstehen bei der Polykondensation von Methanal und Aminen.
Amine sind Verbindungen, die Aminogruppen —NH_2 und einen Kohlenwasserstoffrest R im Molekül enthalten. ②
Die Aminmoleküle kondensieren mit Methanalmolekülen.



Durch Polykondensation werden weitere Moleküle angelagert.

In der Technik werden zur Herstellung von Aminoplasten verschiedene organische Verbindungen mit Aminogruppen im Molekül eingesetzt. Die unterschiedliche Molekülstruktur der Ausgangsstoffe wirkt sich auf die Eigenschaften des Polykondensationsproduktes aus. Aminoplaste werden deshalb recht vielseitig verwendet.

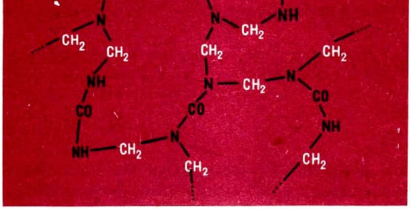


Abb. 46 Struktur eines Aminoplasts

Harnstoff ist eine organische Verbindung mit zwei Aminogruppen im Molekül.



Die aus Harnstoff und Methanal hergestellten Aminoplaste sind keine linearen Moleküle, sondern haben eine ähnliche, räumlich vernetzte Struktur wie die Phenoplaste (Abb. 46) (Experiment 41). Die Aminoplaste sind farblose oder helle Stoffe mit geringer Dichte, guter mechanischer Festigkeit und Chemikalienbeständigkeit. Sie sind als Isolatoren verwendbar. Wie die Phenoplaste sind sie nach dem Aushärten in der Wärme nicht mehr formbar. Aminoplaste werden auf Grund der genannten Eigenschaften in der Elektroindustrie, als Isolierungsmaterial in der Kältetechnik und in der Bauindustrie, zur Herstellung von technischen Teilen und Gebrauchsgegenständen verwendet. ①②

▶ **Durch Polykondensation von Aminen oder Harnstoff und Methanal entstehen Aminoplaste. In ihrer Struktur und ihren Eigenschaften zeigen sie Ähnlichkeiten mit den Phenoplasten.**

Polyakrylnitril - Polymerisation 33

42 ▼ **Vorsicht!** Akrylnitril wird in einem Reagenzglas mit wenig verdünnter Schwefelsäure versetzt. Nach kräftigem Schütteln des verschlossenen Reagenzglases werden der Lösung Katalysatoren zugefügt.

Eine weitere chemische Reaktion zur Herstellung von makromolekularen Stoffen ist die **Polymerisation**. Sie wird dem Reaktionstyp Addition zugeordnet. Aus einfach gebauten Molekülen ungesättigter Verbindungen bilden sich durch Polymerisation Makromoleküle, ohne daß dabei Moleküle von Nebenprodukten entstehen. Das Vorliegen einer Mehrfachbindung in den Molekülen der Grundverbindung ist eine Voraussetzung für Polymerisationen.

Polyäthylen, Polyvinylchlorid und **Polystyrol** sind als Polymerisationsprodukte bereits bekannt (Tab. 9).

Polyakrylnitril ist ein makromolekularer Stoff, der ebenfalls durch Polymerisation einfach gebauter Moleküle ungesättigter Verbindungen entsteht.

Zur Herstellung von Polyakrylnitril wird die Grundverbindung Akrylnitril benötigt. Akrylnitril kann aus Äthin durch Addition von Zyanwasserstoff H—CN hergestellt werden. Das Akrylnitril weist eine Doppelbindung im Molekül auf und ist damit zur Polymerisation fähig (Experiment 42). ③



Akrylnitril Polyakrylnitril

Bei der Reaktion entsteht weißes, in einigen organischen Lösungsmitteln gut lösliches, festes Polyakrylnitril. Dieser makromolekulare Stoff wird auf Grund der fadenförmigen

① Stellen Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen Aminoplasten und Phenoplasten bezüglich der Struktur und der Eigenschaften fest!

② Meladur und Sprelacart sind in der Deutschen Demokratischen Republik gebräuchliche Handelsnamen für Aminoplaste. Geben Sie Beispiele für die Verwendung dieser Plaste an!

③ Vergleichen Sie die Polymerisation von Akrylnitril mit einer Ihnen bereits bekannten Polymerisation!

④ Wiederholen Sie Ihre Kenntnisse über Eigenschaften und Reaktionen des Äthens!

⑤ Entwickeln Sie die Reaktionsgleichungen zur Herstellung von Polymerisationsprodukten aus Äthen!

⑥ Erläutern Sie die Herstellung der Ausgangsstoffe Äthen beziehungsweise Äthin für die Herstellung von Polymerisationsprodukten!

⑦ Bei der Erdölverarbeitung fällt unter anderem Propen an. Stellen Sie Vermutungen über dessen Weiterverarbeitung an!

Tabelle 9 Einige Polymerisationsprodukte

Name des Polymerisationsproduktes	Formel und Name der Grundverbindung	molekularer Aufbau des Polymerisationsproduktes	einige Eigenschaften
Polyäthylen	$CH_2 = CH_2$ Äthen	$[-CH_2-CH_2-]_n$	Plast mit hoher mechanischer Festigkeit; sehr chemikalienbeständig; in der Wärme formbar
Polyvinylchlorid	$CH_2 = CH$ | Cl Vinylchlorid	$[-CH_2-CH-]_n$ | Cl	sehr chemikalienbeständiger Plast; guter elektrischer Isolator; hitzeempfindlich, in der Wärme formbar
Polystyrol	$CH_2 = CH$  Styrol	$[-CH_2-CH-]_n$ 	glasklarer Plast mit guter Festigkeit; hitzeempfindlich, in der Wärme formbar

④ ⑤ ⑥ ⑦

Struktur seiner Moleküle vorrangig zur Herstellung von Chemiefaserstoffen verwendet. Die Polyakrylnitrilfaserstoffe zeigen hohe Zerreißfestigkeit, Formbeständigkeit und weitere gute Gebrauchseigenschaften, wie sie für die Herstellung hochwertiger Textilien genutzt werden. In der Deutschen Demokratischen Republik tragen Chemiefaserstoffe, die einen hohen Polyakrylnitrilanteil haben, den Handelsnamen **Wolpryla**.

Die Erzeugung dieses hochwertigen Faserstoffes aus Polyakrylnitril nimmt einen führenden Platz unter den in unserer Republik produzierten Chemiefaserstoffen ein. ① ②

Die Deutsche Demokratische Republik steht mit der Produktion an Chemiefaserstoffen je Kopf der Bevölkerung an vorderer Stelle in der Welt. Vor nicht geringer Zeit wurden vorrangig Chemiefaserstoffe durch Umwandlung von Naturstoffen wie Zellulose hergestellt. Heute wächst die Produktion der ausschließlich auf synthetischem Wege hergestellten Chemiefaserstoffe stark an. Die Verwendung von Chemiefaserstoffen zur Herstellung von Bekleidungsgegenständen zeigt, wie sich der Mensch immer mehr von der Natur unabhängig macht, natürliche Stoffe auf synthetischem Wege herstellt und auch Stoffe produziert, die in ihren Eigenschaften die Naturstoffe übertreffen.

Im Kombinat VEB Chemische Werke Buna, Schkopau, wird Akrylnitril auf Äthinbasis erzeugt. Mit dem Errichten einer modernen Anlage zur Akrylnitrilherstellung im VEB Petrolchemisches Kombinat Schwedt wird die Produktion dieser Faserstoffe einen weiteren Aufschwung nehmen und damit ein Beispiel für die Leistungsfähigkeit unserer chemischen Industrie liefern. Im VEB Petrolchemisches Kombinat Schwedt geht man bei der Akrylnitrilherstellung vom petrolchemischen Rohstoff Propen aus. Das Akrylnitril wird zu Chemiefaserstoffen vorrangig im VEB Chemiefaserkombinat Schwarza „Wilhelm Pieck", Chemiefaserwerk „Friedrich Engels" Premnitz weiterverarbeitet.

▶ **Durch Polymerisation von Akrylnitril entsteht Polyakrylnitril. Es wird zur Herstellung von hochwertigen Chemiefaserstoffen verwendet.**

Synthetischer Kautschuk 34

Synthetischer Kautschuk ist ein weiteres wichtiges Polymerisationsprodukt. Dieser synthetisch hergestellte makromolekulare Stoff ähnelt in seiner Struktur und in seinen Eigenschaften einem makromolekularen Naturstoff, dem **Kautschuk**. Der aus tropischen Pflanzen gewonnene natürliche Kautschuk erlangte zu Beginn dieses Jahrhunderts industrielle Bedeutung als Rohstoff für die Gummiindustrie.

Um sich von den Importen an Naturkautschuk unabhängig zu machen, wurden im imperialistischen Deutschland die Forschungsarbeiten zur Synthetisierung von Kautschuk aus einheimischen Rohstoffen besonders intensiv betrieben. Im Jahre 1937 wurde in den Buna-Werken erstmalig synthetischer Kautschuk großtechnisch hergestellt. Der Bau der Buna-Werke stand in engem Zusammenhang mit der unmittelbaren Vorbereitung des zweiten Weltkrieges durch das faschistische Deutschland. Ein großer Teil der Produktion von **Buna-Kautschuk** wurde zur Herstellung von Gummi benötigt, der von der kriegswichtigen Kraftfahrzeugindustrie und dem Flugzeugbau gebraucht wurde. Die Gründung weiterer Produktionsbetriebe für synthetischen Kautschuk in Leverkusen, Ludwigshafen und Auschwitz-Monowitz zeigt, wie der I.G. Farben-Konzern wesentliche Voraussetzungen für die faschistische Kriegführung schuf.

Zur synthetischen Herstellung des Kautschuks erwies sich **Butadien-(1.3)**

$$CH_2=CH-CH=CH_2$$

① Unterscheiden Sie Dederon und Wolpryla bezüglich ihrer chemischen Zusammensetzung!

② Erläutern Sie besondere Anweisungen beim Gebrauch von Chemiefaserstoffen aus deren Eigenschaften!

③ a) Erläutern Sie, welches Strukturmerkmal des Butadien-(1.3) die chemischen Reaktionen dieser Verbindung beeinflußt!
b) Entwickeln Sie eine Reaktionsgleichung für die Addition von Brom mit Butadien-(1.3)!

④ Stellen Sie Anwendungsgebiete für Gummi in Form einer Übersicht zusammen!

als ein geeigneter Ausgangsstoff. Butadien-(1.3) ist ein Kohlenwasserstoff mit zwei Doppelbindungen im Molekül. Die Doppelbindungen befähigen diese Verbindung zur Addition und damit zur Polymerisation. Bei der Addition bleibt eine Doppelbindung im Molekül erhalten. Die bei der Polymerisation des Butadien-(1.3) entstehenden Makromoleküle enthalten also noch Doppelbindungen. ③ ④

$$n\ CH_2=CH-CH=CH_2 \longrightarrow [-CH_2-CH=CH-CH_2-]_n$$

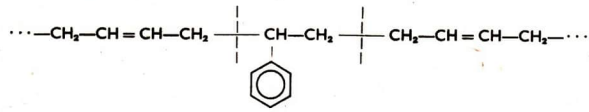
Butadien-(1.3) — Polybutadien

Mit dieser Struktur ähnelt das **Polybutadien** dem Naturkautschuk. Als Rohstoffe zur Herstellung des Ausgangsstoffes Butadien-(1.3) werden in der Technik Kohle oder Erdöl verwendet. Früher wurde ausschließlich Äthin zur Butadienerzeugung benutzt. Jetzt gelingt es hingegen auch, diesen Ausgangsstoff aus gesättigten Kohlenwasserstoffen durch Dehydrierung herzustellen. Diese gesättigten Kohlenwasserstoffe sind Produkte der Erdöldestillation. Auch die chemisch-technischen Verfahren zur Herstellung von Buna-Kautschuk werden aus Gründen der Wirtschaftlichkeit allmählich auf petrolchemische Synthesen umgestellt.
Der synthetische Kautschuk weist nach dem Polymerisationsprozeß noch ungenügende Eigenschaften auf und kann noch nicht technisch verwendet werden. Er ist anfangs wie der Naturkautschuk elastisch, verliert jedoch die Elastizität verhältnismäßig rasch und wird spröde. Der größte Teil des Synthesekautschuks wird zu **Gummi** weiterverarbeitet. Die Eigenschaften, die ein Schlauch- oder Reifengummi haben muß, bekommt der Synthesekautschuk erst bei der Verarbeitung. Bei der Vulkanisation wird Buna-Kautschuk zusammen mit Schwefel und Füllstoffen (Holzmehl, Gesteinsmehl, Gasruß) erhitzt, um seine Werkstoffeigenschaften zu verbessern. Auf Grund seiner elastischen Eigenschaften wird der synthetische Kautschuk zu den **Elasten** gerechnet.

▶ **Durch Polymerisation von Butadien-(1.3) entsteht synthetischer Kautschuk. Synthesekautschuk gehört zu den Elasten, einer Gruppe von makromolekularen Stoffen mit gummielastischen Eigenschaften. Er wird zu Gummi verarbeitet.**

Die Bedeutung der nur aus Butadienmolekülen entstandenen Polymerisationsprodukte ist inzwischen stark zurückgegangen. Die gegenwärtig hergestellten Buna-Produkte sind häufig **Mischpolymerisate**. Zwei verschiedenartige ungesättigte Verbindungen,

Butadien-(1.3) und Styrol, reagieren miteinander. Bei der Polymerisation entstehen Makromoleküle, die in verschiedener Anordnung Styrol- und Butadienmoleküle enthalten. Dieses Produkt wird **Buna S** genannt.



Das entstandene Produkt weicht von der Struktur des ursprünglichen natürlichen Vorbildes, des Naturkautschuks, stark ab. Es besitzt aber Eigenschaften, wie hohe Elastizität sowie Abnutzungs- und Zerreißfestigkeit, die diesen Elast zu einem wertvollen Rohstoff der Gummiindustrie machen. Dieses Beispiel zeigt wiederum, wie es dem Menschen mit fortschreitender Erkenntnis gelingt, Naturstoffe synthetisch herzustellen.

In der Deutschen Demokratischen Republik wird im Kombinat VEB Chemische Werke Buna, Schkopau, heute noch als Hauptprodukt Buna-Kautschuk hergestellt. Unter den Bedingungen der Arbeiter-und-Bauern-Macht wurde aus dem ehemaligen Betrieb des I.G. Farben-Konzerns ein sozialistischer Großbetrieb. Nach der Überwindung der Kriegsschäden und der Beendigung des Wiederaufbaues wurden in den Werken planmäßig Ausrüstungen modernisiert und neue Technologien eingeführt. Inzwischen konnte die Produktion vom Jahre 1950 durch die hervorragenden Leistungen der Werktätigen dieses Großbetriebes nahezu verdreifacht werden. Der zweitgrößte Chemiebetrieb unserer Republik trägt ferner auch mit der Erzeugung verschiedener Plaste, Lösungsmittel und Weichmacher dazu bei, den vorderen Platz unserer chemischen Industrie im Weltmaßstab zu festigen.

Wiederholung und Übung 35

1. Kennzeichnen Sie das Wesen der Reaktionen, die zu makromolekularen Stoffen führen!
2. Ordnen Sie die Polykondensation und die Polymerisation den Reaktionstypen der organischen Chemie zu!
3. Erarbeiten Sie sich eine Übersicht über technisch bedeutsame makromolekulare Stoffe und ihre Herstellung aus einfachen Grundverbindungen!
4. Nennen Sie Beispiele für in der Wärme formbare und nicht formbare Plaste!
5. Stellen Sie Einsatzgebiete für synthetische makromolekulare Stoffe zusammen!
6. Der durchsichtige, als organisches Glas bezeichnete Plast Piacryl wird aus Methakrylsäuremethylester $CH_2=C(CH_3)-COOCH_3$ hergestellt.

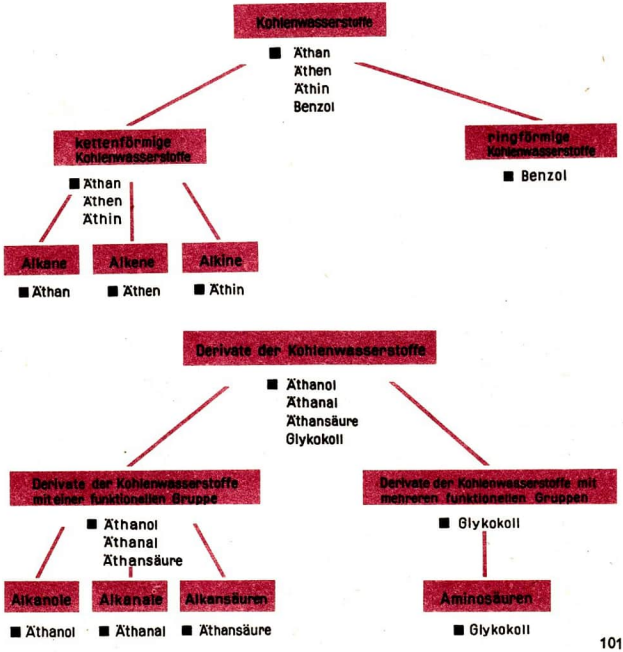
   Äußern Sie Vermutungen über die Struktur dieses makromolekularen Stoffes! Welche Reaktion führt zu seiner Herstellung?

Systematisierung

Organische Verbindungen 36

Einteilung organischer Verbindungen

Organische Verbindungen sind Kohlenstoffverbindungen. Die Kohlenwasserstoffe sind die einfachsten organischen Verbindungen. Von ihnen leiten sich weitere Stoffklassen als Derivate der Kohlenwasserstoffe ab. ① (↗ S. 103)



Zusammenhang zwischen der Struktur der Moleküle und den chemischen Reaktionen organischer Verbindungen

Einteilung und Benennung organischer Verbindungen erfolgen in erster Linie nach deren Strukturmerkmalen. Als Strukturmerkmale gelten Bindungsverhältnisse und funktionelle Gruppen im Molekül sowie die Länge der Kohlenstoffkette bei kettenförmigen Kohlenwasserstoffen und ihren Derivaten ② ③.
Die Molekülstruktur organischer Verbindungen bestimmt weitgehend deren chemische Eigenschaften. Zwischen den Strukturmerkmalen der Stoffe und deren Reaktionen besteht ein enger Zusammenhang (Tab. 10). Daneben entscheiden die Reaktionsbedingungen darüber, welche Reaktion abläuft. ④ ⑤ ⑥ ⑦

Tabelle 10 Strukturmerkmale und mögliche Reaktionen organischer Verbindungen

Strukturmerkmal	mögliche Reaktion	■
C—C	**Substitution**	Reaktion von Methan mit Chlor Reaktion von Monochlormethan mit Kaliumhydroxid
	Eliminierung	Zerfall von Äthan in Äthen und Wasserstoff (Dehydrierung) Zerfall von Äthanol in Äthen und Wasser (Wasserabspaltung)
C=C; C≡C	**Substitution** **Addition**	Reaktion von Äthin mit Wasserstoff (Hydrierung) Reaktion von Äthen mit Brom Reaktion von Äthin mit Chlorwasserstoff Zusammenlagerung von Äthen (Polymerisation)
	**Substitution** **Addition**	Reaktion von Benzol mit Brom Reaktion von Benzol mit Wasserstoff (Hydrierung)
—OH	**Substitution**	Reaktion von Äthanol mit Natrium Reaktion von Äthanol mit Äthansäure (Veresterung/Kondensation)
	Eliminierung	Zerfall von Äthanol in Äthen und Wasser (Wasserabspaltung) Umwandlung von Äthanol in Äthanal (Dehydrierung)
—CHO	**Addition**	Reaktion von Äthanal mit Wasserstoff (Hydrierung) Reaktion von Äthanal mit Sauerstoff (Oxydation) Reaktion von Äthanal mit Fehlingscher Lösung
—COOH	**Substitution**	Reaktion von Äthansäure mit Äthanol (Veresterung/Kondensation)
—NH_2	**Substitution**	Zusammenlagerung von ε-Aminokapronsäure (Polykondensation)

① Ordnen Sie die folgenden Stoffe nach Kohlenwasserstoffen, organischen Verbindungen mit einer funktionellen Gruppe und organischen Verbindungen mit mehreren funktionellen Gruppen im Molekül: Propanal, Propen, Glyzerin, Glukose, Butadien, Phenol, Oktadekansäure, Benzol!

② Nennen Sie die verschiedenen Möglichkeiten der Bindung zwischen Kohlenstoffatomen in Molekülen organischer Verbindungen! Erläutern Sie das Wesen dieser Bindungen!

③ Stellen Sie die Ihnen bekannten funktionellen Gruppen zusammen! Geben Sie an, bei welchen Stoffklassen sie auftreten!

④ Erörtern Sie die Möglichkeiten, Äthan, Äthen und Äthin ineinander umzuwandeln!

⑤ Erläutern Sie das Wesen der Hydrierung und Dehydrierung
a) als Addition beziehungsweise Eliminierung und
b) als chemisches Gleichgewicht!

⑥ Äthanol wird über Äthanal in Äthansäure umgewandelt.
a) Welche qualitativen und welche quantitativen Veränderungen treten auf?
b) Welche Möglichkeiten kennen Sie, um die auftretenden Veränderungen nachzuweisen?

⑦ Legen Sie dar, welche Reaktionen zwischen Verbindungen mit verschiedenen funktionellen Gruppen möglich sind!

⑧ Erläutern Sie am Beispiel einer organisch-chemischen Reaktion Temperatur, Druck und Konzentration als Reaktionsbedingungen!

Die chemische Reaktion in der organischen Chemie 37

Teilchenmäßige und energetische Betrachtung der chemischen Reaktion

Für die chemische Reaktion im organischen Bereich der Chemie gelten ebenso wie im anorganischen Bereich die gleichen Gesetzmäßigkeiten. Jede Stoffumwandlung ist von den **Reaktionsbedingungen** *Temperatur*, *Druck* und *Konzentration* abhängig. Diese Zustandsgrößen bestimmen die augenblickliche Beschaffenheit jedes chemischen Systems. Organisch-chemische Reaktionen können bei ganz unterschiedlichen Reaktionsbedingungen ablaufen.

Die physiologischen Prozesse verlaufen im menschlichen Körper im allgemeinen bei 37 °C und 1 at. Hingegen wird die chemisch-technische Reaktion der Methanolsynthese bei 380 °C und 200 at durchgeführt. ⑧

Der **Reaktionsverlauf** ist durch folgende *Voraussetzungen* gekennzeichnet:
- das Vorhandensein von Teilchen der Ausgangsstoffe,
- die ungeordnete Bewegung der Teilchen,
- das wirksame Zusammenstoßen der Teilchen,
- das Vorhandensein eines Mindestbetrages an innerer Energie der reagierenden Stoffe.

Auch bei organisch-chemischen Reaktionen lassen sich *Aktivierung* und *Umsetzung* als Abschnitte des Reaktionsverlaufes unterscheiden.

Die Stoffumwandlung ist sowohl mit Veränderungen von Art und Anordnung der Teilchen als auch mit Änderungen des Energieinhaltes des chemischen Systems verbunden. Wichtige Merkmale jeder chemischen Reaktion sind die *Aktivierungsenergie* und die *Reaktionswärme*. Organisch-chemische Reaktionen verlaufen exotherm oder endotherm.

Bildung von Methanol aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff, biologische Oxydation von Kohlenhydraten (Dissimilation, Atmung) und alkoholische Gärung von Glukose sind exotherme Reaktionen. Dagegen verlaufen Zerfall von Methanol, Bildung von Kohlenhydraten durch Fotosynthese (Assimilation) und Wasserabspaltung aus Alkanolen endotherm.

Die Veränderung der Teilchenanordnung und die Energieverhältnisse während des Reaktionsverlaufes bei der Bildung von Methanol aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff sind in Abbildung 47 schematisch dargestellt.
Das Fortschreiten des Reaktionsverlaufes ist gekennzeichnet durch die *Reaktionsgeschwindigkeit*. Auch im organischen Bereich der Chemie gibt es langsam und schnell verlaufende chemische Reaktionen.

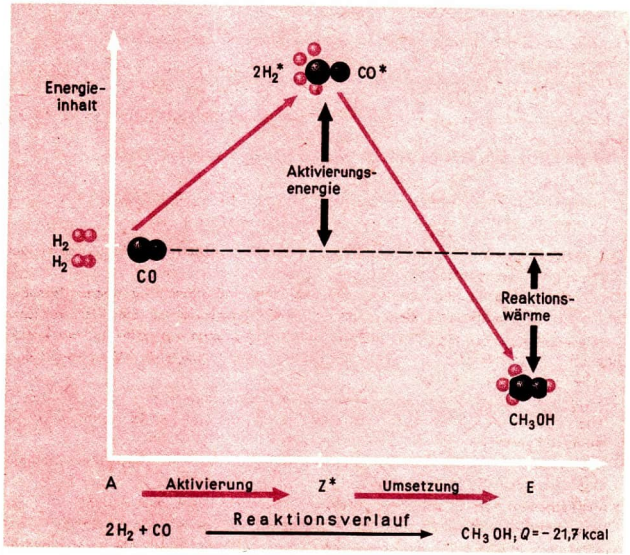


Abb. 47 Methanolsynthese als Änderung der Teilchenanordnung und energetische Veränderung des Systems

① a) Erklären Sie die Begriffe Aktivierungsenergie und Reaktionswärme!
b) Erläutern Sie den Begriff Reaktionsgeschwindigkeit!
c) Begründen Sie die Zusammenhänge zwischen Reaktionsgeschwindigkeit und Konzentration sowie zwischen Reaktionsgeschwindigkeit und Temperatur!

② a) Leiten Sie auf Grund des Prinzips von Le Chatelier die für die Gewinnung einer höchstmöglichen Ausbeute an Methanol günstigen Reaktionsbedingungen ab!
b) Begründen Sie die Bedingungen, unter denen die Methanolsynthese in der Technik durchgeführt wird!

③ Erklären Sie den Einfluß der Veränderungen von Temperatur, Druck und Konzentration auf das chemische Gleichgewicht $A + B \longrightarrow C$; $Q = -n$ kcal!

④ Ordnen Sie folgende chemische Reaktionen den drei Reaktionstypen der organischen Chemie zu: a) Hydrierung, b) Dehydrierung, c) Wasseranlagerung an ungesättigten Verbindungen, d) Wasserabspaltung aus Alkanol, e) Kondensation, f) Veresterung, g) Hydrolyse, h) Polymerisation!

⑤ Stellen Sie technisch wichtige organisch-chemische Reaktionen unter dem Gesichtspunkt der organisch-chemischen Reaktionstypen zusammen!

⑥ Nennen Sie Eigenschaften des Äthens, des wichtigen Ausgangsstoffes für petrolchemische Synthesen!

⑦ Beschreiben Sie die technische Herstellung von Äthin aus Kohle und Kalkstein!

⑧ Zeigen Sie an ökonomischen Betrachtungen, daß der Einsatz von Äthen zur Herstellung organisch-chemischer Produkte gegenüber dem von Äthin von entscheidendem Vorteil ist!

⑨ Erläutern Sie, worauf die Vielzahl organischer Reaktionsprodukte zurückzuführen ist, die aus Äthen oder Äthin hergestellt werden können!

Unter den Bedingungen des Normzustandes verläuft die Addition von Brom an Äthen wesentlich schneller als die Addition von Wasserstoff (Hydrierung).

Die Reaktionsgeschwindigkeit ist abhängig von der Konzentration der reagierenden Stoffe und der Temperatur. ①

Organisch-chemische Reaktionen sind umkehrbar und führen im abgeschlossenen Volumen zur **Einstellung des chemischen Gleichgewichts**. Die *Gleichgewichtsbedingung* $v_{Hin} = v_{Rück}$ sagt aus, daß die Geschwindigkeiten von Hin- und Rückreaktion im chemischen Gleichgewicht dem Betrage nach gleich sind. *Merkmale* des chemischen Gleichgewichts sind:

- Ausgangsstoffe und Reaktionsprodukte liegen gleichzeitig vor.
- Alle reagierenden Stoffe setzen sich unvollständig um und sind in bestimmten Konzentrationen vorhanden.
- Die Konzentrationen der reagierenden Stoffe bleiben im Gleichgewicht unverändert.
- Das chemische Gleichgewicht ist von beiden Seiten einstellbar.

Katalysatoren beeinflussen die Einstellzeit des chemischen Gleichgewichts. Dadurch können beispielsweise viele biologische Prozesse bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen ablaufen sowie organisch-chemische Synthesen im großtechnischen Maßstab wirtschaftlich durchgeführt werden.

Die Lage des chemischen Gleichgewichts kann durch Veränderung der Reaktions-

bedingungen verschoben werden. Die Abhängigkeit der Gleichgewichtslage von Temperatur, Druck und Konzentration ist durch die Gesetzmäßigkeit des **Prinzips von Le Chatelier** erfaßt (↗ „Chemie in Übersichten", S. 52). ② ③

Organisch-chemische Reaktionstypen

Alle Reaktionen im Bereich der organischen Chemie lassen sich drei Typen zuordnen (Tab. 11). ④ ⑤

Tabelle 11 Typen organisch-chemischer Reaktionen

Reaktionstypen	Merkmale	■
Eliminierung	Abspaltung mehrerer Atome oder Atomgruppen aus einem Molekül	$C_2H_5OH \longrightarrow C_2H_4 + H_2O$
Addition	Zusammenlagerung von zwei oder mehreren Molekülen zu *einem* neuen Molekül auf Grund von Mehrfachbindungen	$CH_2{=}CH_2 + Br_2 \longrightarrow BrH_2C{-}CH_2Br$
Substitution	Ersatz von gebundenen Atomen oder Atomgruppen durch andere Atome oder Atomgruppen	$CH_4 + Cl_2 \longrightarrow CH_3Cl + HCl$

Herstellung organischer Verbindungen aus Kohle und Erdöl

38

Die wichtigsten Rohstoffe der chemischen Industrie zur Herstellung volkswirtschaftlich bedeutsamer organischer Verbindungen sind Kohle und Erdöl sowie Erdgas. Aus diesen Rohstoffen werden durch chemisch-technische Verarbeitung niedrigmolekulare Kohlenwasserstoffe in großen Anteilen gewonnen. Der für **petrolchemische Synthesen** besonders wichtige Kohlenwasserstoff Äthen wird in der Deutschen Demokratischen Republik sowohl aus Kohle als auch aus Erdöl erzeugt, wobei der Anteil des Erdöls an der Äthenherstellung wächst. Die chemisch-technischen Verfahren zur Herstellung von Äthen aus Erdöl oder Erdgas sind bedeutend einfacher und mit geringerem Energieaufwand verbunden als der Weg der Kohlenchemie, der über viele Zwischenprodukte führt. ⑥ ⑦ ⑧ (↗ S. 105)

Die Zentren der Erdölverarbeitung in unserer Republik sind der VEB Petrolchemisches Kombinat Schwedt, der VEB Leuna-Werke „Walter Ulbricht" und der VEB Erdölverarbeitungskombinat „Otto Grotewohl" Böhlen, die mit modernsten Anlagen zur Herstellung und Verarbeitung von Petrolchemikalien ausgerüstet sind. Aus Äthen als eine der wichtigsten Petrolchemikalien wird eine Vielzahl organischer Produkte, vor allem auch synthetische makromolekulare Stoffe, erzeugt. ⑨ (↗ S. 105)

Schülerexperimente

Modellexperiment zum chemischen Gleichgewicht

Aufgabe

1 ▼ Verteilen Sie Wasser auf zwei Meßgefäße durch gleichzeitiges und gegenseitiges Übertragen mittels Stechheber, bis sich in beiden Meßgefäßen die Wassermenge nicht mehr verändert!

Vorbetrachtung

1. Erläutern Sie, was Sie unter einem Modell verstehen!
2. Was ist ein System?
3. Erklären Sie den Begriff umkehrbare Reaktion!

Geräte und Chemikalien

2 Meßzylinder (10 ml) oder 2 Reagenzgläser mit Fettstiftgraduierung
2 Glasrohre (20 cm lang, Durchmesser 5 mm und 8 mm)
Stativ mit 2 Muffen und 2 Klemmen oder Reagenzglasgestell

Arbeitsanweisung

1. Die Meßgefäße sind standsicher zu befestigen! Das Meßgefäß I wird mit 10 ml (≙ 10 g) angefärbten Wassers gefüllt, das Meßgefäß II bleibt anfangs leer (↗ Abb. 11, S. 26)!
2. Beginnen Sie das Meßprotokoll mit der Anlage einer Tabelle über die Wasserverteilung im Modellexperiment entsprechend dem Muster:

Anzahl der Übertragungsoperationen	Wassermassen in g (1 g ≙ 1 ml)	
	Meßgefäß I	Meßgefäß II
0	10,0	0,0
1		
.		
.		
.		
t		

3. Tauchen Sie Glasrohr 1 (größerer Durchmesser) in das Meßgefäß I und Glasrohr 2 in das Meßgefäß II jeweils bis zum Boden ein!
4. Verschließen Sie beide Glasrohre mit den Zeigefingern! Nehmen Sie sie aus den Meßgefäßen heraus, und überführen Sie *gleichzeitig* Glasrohr 1 in Meßgefäß II und Glasrohr 2 in Meßgefäß I! Lassen Sie durch Wegnahme der Finger beide Rohre leerlaufen! Halten Sie dabei die Rohre an den oberen Rand der Meßgefäße!
5. Lesen Sie den Wasserstand in den Meßgefäßen I und II ab, und tragen Sie ihn in das Meßprotokoll ein!
6. Tauchen Sie die beiden *leeren* Glasrohre wieder in die Ausgangsgefäße bis zum Boden ein: Glasrohr 1 *leer* zurück in Meßgefäß I, Glasrohr 2 *leer* zurück in Meßgefäß II!
7. Verschließen Sie die Glasrohre wieder mit den Fingern, nehmen Sie die Rohre aus den Meßgefäßen, und überführen Sie das Wasser in das jeweils andere Meßgefäß, indem Sie das Wasser auslaufen lassen! Beachten Sie, daß das Wasser mit Glasrohr 1 nur von Meßgefäß I nach Meßgefäß II und mit Glasrohr 2 nur von Meßgefäß II nach Meßgefäß I transportiert wird und nicht umgekehrt!
8. Nach *jeder* Übertragungsoperation ist in beiden Meßgefäßen der Wasserstand abzulesen und im Meßprotokoll zu vermerken!
9. Wiederholen Sie die Übertragungsoperationen so lange, bis sich in beiden Meßgefäßen der Wasserstand nicht mehr ändert! Ist nach weiterem dreimaligem Heberwechsel keine Änderung des Wasserstandes mehr eingetreten, wird das Experiment beendet.
10. Zeichnen Sie ein Kurvendiagramm über den funktionalen Zusammenhang zwischen Wasservolumen (-massen) und Anzahl der Übertragungsoperationen! Tragen Sie auf der Abszisse in gleichen Abständen die Nummern der Übertragungsoperationen und auf der Ordinate die abgelesenen Volumen in den Meßgefäßen I und II auf! Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit Abbildung 11, Seite 26!
11. Erläutern Sie die Beziehungen zwischen Modell und System $H_2 + J_2 \rightleftarrows 2\,HJ$! Verwenden Sie dazu Abbildung 11, Seite 26!

Reaktionen der Alkanale

Aufgabe

2

a) Prüfen Sie die Eigenschaften eines Alkanals gegenüber Fehlingscher Lösung!
b) Prüfen Sie die Eigenschaften eines Alkanals gegenüber ammoniakalischer Silbernitratlösung!

Geräte und Chemikalien

Reagenzgläser
Reagenzglashalter
Reagenzglasständer
Halbmikro-Tropfer
Brenner

Methanal- oder Äthanallösung
a) Fehlingsche Lösung (I und II)
b) frisch bereitete ammoniakalische Silbernitratlösung

Arbeitsanweisung

1. a) Mischen Sie Fehlingsche Lösung I mit Fehlingscher Lösung II im Verhältnis 1:1, sofern Ihnen nicht das Gemisch zur Verfügung steht!
   b) Versetzen Sie Silbernitratlösung mit Ammoniaklösung, bis sich der entstehende Niederschlag wieder auflöst, sofern Ihnen keine frisch bereitete Lösung zur Verfügung steht. **Vorsicht!** Keine alte Lösung verwenden. Sie kann explosive Verbindungen enthalten!
2. Setzen Sie zu der auf Alkanal zu prüfenden Lösung etwa das vierfache Volumen an
   a) Fehlingscher Lösung oder b) ammoniakalischer Silbernitratlösung zu!
3. Erhitzen Sie das Lösungsgemisch vorsichtig unter ständigem Schütteln bis zum Sieden! **Vorsicht!** Siedeverzug!
4. Lassen Sie den Reagenzglasinhalt abkühlen! Beobachten Sie die Erscheinungen!
5. a) Fehlingsche Lösung enthält Kupfer(II)-Ionen. Der rote Niederschlag enthält Kupfer(I)-Ionen. Entwickeln Sie eine chemische Gleichung für die Umwandlung von Kupfer(II)-Ionen in Kupfer(I)-Ionen!
   Inwiefern liegt eine Reaktion mit Elektronenübertragung vor?
   b) Ammoniakalische Silbernitratlösung enthält Silber-Ionen. Der schwarze Niederschlag oder der glänzende Belag am Reagenzglas ist Silber. Entwickeln Sie eine chemische Gleichung für die Umwandlung von Silber-Ionen in elementares Silber! Inwiefern liegt eine Reaktion mit Elektronenübergang vor?
6. Formulieren Sie einen Schlußsatz zu den Eigenschaften der Alkanallösung gegenüber
   a) Fehlingscher Lösung oder b) ammoniakalischer Silbernitratlösung!

Nachweis der Mehrfachbindungen in fetten Ölen

Aufgabe

3 ▼ Weisen Sie nach, daß in den Molekülen von fetten Ölen mehr Mehrfachbindungen vorliegen als in Molekülen der festen Fette!

Vorbetrachtung

1. Wie können Mehrfachbindungen zwischen Kohlenstoffatomen nachgewiesen werden? Welche Reaktion findet beim Nachweis von Mehrfachbindungen statt?
2. Welcher Zusammenhang besteht zwischen Struktur und Aggregatzustand der Fette?
3. Woran läßt sich erkennen, daß fette Öle mehr Mehrfachbindungen im Molekül enthalten als feste Fette?

Geräte und Chemikalien

3 Reagenzgläser	Tetrachlormethan
Reagenzglasständer	Bromwasser (gesättigt)
Meßzylinder (10 ml)	Schweineschmalz
Halbmikro-Tropfer	Rapsöl, Leinöl

Arbeitsanweisung

1. Geben Sie in das erste Reagenzglas 3 Tropfen Leinöl, in das zweite 3 Tropfen Rapsöl und in das dritte eine entsprechende Masse an Schweineschmalz!
2. Lösen Sie die Fette in je 3 ml Tetrachlormethan!
3. Geben Sie aus dem Meßzylinder jeweils tropfenweise Bromwasser zu den Fettlösungen, bis eine leichte Braunfärbung bleibt! Stellen Sie fest, wieviel Bromwasser Sie jeweils gebraucht haben!
4. Vergleichen Sie den Verbrauch an Bromwasser für die drei Teilexperimente, und ziehen Sie daraus einen entsprechenden Schluß!

Stärkeabbau

Aufgabe

4 ▼ Weisen Sie nach, daß Stärkemoleküle aus Glukosemolekülresten aufgebaut sind!

Vorbetrachtung

1. Wie können Stärkemoleküle in ihre Bausteine gespalten werden?
2. Welche chemische Reaktion läuft bei der Stärkespaltung ab?
3. Durch welche Reaktion kann Glukose von Stärke unterschieden werden?

Geräte und Chemikalien

2 Reagenzgläser	Stärkelösung
Halbmikro-Tropfer	verdünnte Salzsäure
Reagenzglashalter	verdünnte Natriumhydroxidlösung
Reagenzglasständer	Lackmuspapier (rot)
Brenner	Fehlingsche Lösung (I und II)

Arbeitsanweisung

1. Versetzen Sie in einem großen Reagenzglas etwa 4 ml Stärkelösung mit 6 Tropfen Salzsäure!
2. Erhitzen Sie das Gemisch, und lassen Sie es 4 ··· 5 min über kleiner Flamme sieden!
3. Versetzen Sie die Lösung mit 1 ml Natriumhydroxidlösung! Prüfen Sie die Reaktion der Lösung mit Lackmuspapier!
4. Geben Sie zu der Lösung 4 ml Fehlingsche Lösung!
5. **Vorsicht!** Erhitzen Sie das Gemisch unter Schütteln bis zum Sieden!
6. Deuten Sie die Beobachtungen!

Register

Akrylnitril 96
Aktivierung 13
Aktivierungsenergie 12
Aldehyde 53
Aldehydgruppe 53
Alkanale 52 ··· 57
Alkanole 39 ··· 44
Alkansäuren 59 ··· 62
—, höhermolekulare 67
Alkensäuren 76
Alkohole 40
Ameisensäure ↗ Methansäure
Amine 95
Aminogruppe 83
ε-Aminokaprolaktam 90
ε-Aminokapronsäure 90
Aminoplaste 95, 96
Aminosäuren 83 ··· 85
Äthanal 58, 59
Äthanol 47 ··· 50
Äthansäure 64 ··· 67
Ausgangsstoffe 9
Azetaldehyd ↗ Äthanal
Azetate 66

Biokatalyse 34
Buna 98
Butadien-(1.3) 99

Chemiefaserstoffe 89

Dederon 92
Dipeptide 84
Disaccharide 80
Druck 7

Einstellzeit 24
Eiweiße 86 ··· 88
Elaste 80, 99
Energie, Aktivierungs- 12
—, innere 10
—, Mindest- 11
Essiggärung 65
Essigsäure ↗ Äthansäure
Ester 68 ··· 72

Fette 71, 76
fette Öle 77
Fettspaltung 78
Fischer, E. 80
Formaldehyd ↗ Methanal
Formiate 64
funktionelle Gruppen 39

Gesetzmäßigkeiten, statistische 11
Gleichgewicht, chemisches 21 ··· 30
—, Einstellung 24
—, Lage 24
Gleichgewichtslage, Verschiebung 27 ··· 30
Glukose 79
Glyzerin 75
Gummi 99

Harnstoff 96
Hexadekansäure 67
Hinreaktion 21

Hydrolyse 70
Hydroxylgruppe 39

Kampfstoffe, chemische 72
Karbonsäuren 60
Karboxylgruppe 60
Katalysatoren 31 ··· 36
Katalyse 30 ··· 36
—, negative 32
—, positive 31
—, Verlauf 34
Kautschuk 98 ··· 100
kinetische Theorie 10
Kohlenhydrat 79
Kondensation 69
Kontakte 34
Konzentration 8

Maltose 80
Malzzucker ↗ Maltose
Methanal 57, 58
Methanol 44 ··· 47
Methansäure 63, 64
Mischpolymerisate 99
Modell 25
Monosaccharide 79

Nylon 92

Oktadekansäure 67
Oktadekensäure 76
Ölsäure ↗ Oktadekensäure

Palmitinsäure ↗ Hexadekansäure
Peptidbindung 85
Phenol 50
Phenoplaste 92 ··· 95
Plaste 89
Polyakrylnitril 96
Polyamide 90
Polybutadien 99
Polykondensation 89, 93, 95
Polymerisation 96
Polypeptide 85
Polysaccharide 82
Prinzip von *Le Chatelier* 28
Propantriol-(1.2.3) ↗ Glyzerin
Proteine 86

Reaktion, endotherme 14
—, exotherme 14
—, umkehrbare 21
—, Voraussetzungen 9
Reaktionsbedingungen 7 ··· 9
—, Druck 7
—, Konzentration 8
—, Temperatur 7
Reaktionsgeschwindigkeit 17 ··· 20
—, Abhängigkeit 19, 20
Reaktionsprodukte 9
Reaktionsverlauf 9 ··· 16
Reaktionswärme 14
Rohrzucker 80, 81
Rückreaktion 21

Saccharose 80, 81
Sauerstoffderivate 39
Seifen 68
Selinski, N. D. 86
Stärke 82
Stearinsäure ↗ Oktadekansäure
System 9

Temperatur 7
Traubenzucker ↗ Glukose

Umsetzung 13

Veresterung 69

Wachse 71
Wolpryla 97

Xanthoproteinreaktion 88

Zellulose 82

1 Methan
2 Methanol
3 Methanal
4 Methansäure
5 Kohlendioxid
6 Dipeptid
7 Äthansäuremethylester
8 Glykokoll





1



2



3



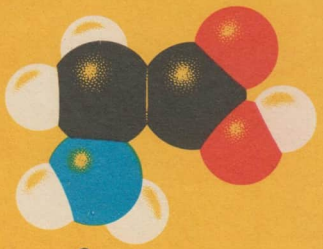
4



5



7



8

03 09 01-1 2,25