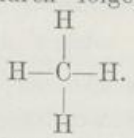
Teil I.
Die stereoisomeren Kohlenstoffverbindungen.

Erstes Kapitel.
Theoretische Grundlagen der Betrachtungen.

a) Ueber die möglichen räumlichen Lagerungsverhältnisse in Molekülen MR_4.

Die strukturchemische Betrachtung der Kohlenstoffverbindungen ermöglicht es, eine außerordentlich große Zahl von Isomerieerscheinungen auf einheitlicher Grundlage zu erklären. Aber für gewisse, recht auffällige Isomerien kann sie doch keine geeignete Vorstellung bieten, und zwar ist die Zahl der Verbindungen, die strukturell in gleicher Weise zu formulieren sind, aber dennoch bestimmte Unterschiede in den Eigenschaften zeigen, eine große, und sie wird, infolge der emsigen Forschung auf organischem Gebiete, täglich größer. Es mögen zur vorläufigen Orientierung, welcher Art die Isomeren sind, die in Betracht kommen, folgende Beispiele Erwähnung finden: die Weinsäuren, die Inosite, die Hexahydroterephtalsäuren, die Fumar- und Maleïnsäure u. s. w. Die Strukturformeln aller dieser isomeren Verbindungen kann man durch bestimmte räumliche Interpretationen, die sich aus einer einheitlichen Grundanschauung ableiten lassen, in eine bestimmte Anzahl räumlicher Variationen auflösen, die als Konfigurationsformeln bezeichnet werden; diese sind geeignet von der Ursache der durch Strukturformeln nicht mehr erklärbaren Isomerieerscheinungen ein Bild zu geben. Mit der Begründung dieser Konfigurationsformeln wollen wir uns im folgenden beschäftigen; es wird dafür zunächst wichtig sein, mit der leitenden Hypothese, die der räumlichen Betrachtungsweise zu Grunde liegt, vertraut zu werden. Die chemischen Tatsachen haben dazu geführt, die Konstitution des Methans strukturchemisch durch folgende Formel wiederzugeben:



Diese Formel ist in strukturchemischem Sinne vollkommen eindeutig, dagegen läßt sie für die räumliche Ausgestaltung verschiedene Möglichkeiten zu. Man wird sich somit die Frage vorlegen dürfen, welche Stellungen die vier Wasserstoffatome in Bezug auf das Kohlenstoffatom, mit dem sie verbunden sind, räumlich einnehmen werden. Die in dieser Weise formulierte Frage ist ein Spezialfall eines allgemeinen Problems, das sich mit der Beantwortung der Frage befaßt, in welcher Weise die Radikale R in Verbindungen, die der eindeutigen Konstitutionsformel

entsprechen, räumlich gruppiert sind. Zum richtigen Verständnis ist die Frage noch in dem Sinne zu präzisieren, daß die Ausdrucksweise: „ein Atom oder ein Radikal befindet sich in einer bestimmten Stellung", dahin zu interpretieren ist, daß die mittlere Gleichgewichtslage seines

Schwerpunktes in dieser Stellung angenommen werden kann, und daß die Atombewegungen als periodische, um diese Mittelstellung erfolgende, aufzufassen sind.

Es gibt zwei prinzipiell verschiedene Möglichkeiten für die Gruppierung von vier mit einem Zentrumatom verbundenen, aber unter sich unabhängigen Atomen; sie können entweder alle vier in einer Ebene liegen, oder es können sich nur je drei in derselben Ebene befinden. Für die erste Möglichkeit lassen sich zwei Variationen voraussehen: entweder befindet sich das Zentrumatom in derselben Ebene (Fig. 1) mit den vier mit ihm verbundenen Atomen, oder es liegt außerhalb dieser Ebene (Fig. 2). Für die zweite Möglichkeit erhält man ebenfalls zwei Variationen, nämlich: 1) eine räumlich symmetrische und 2) eine räumlich unsymmetrische Anordnung, welche letztere (unregelmäßiges Tetraëder) wir hier zunächst außer Betracht lassen werden. Die räumlich symmetrische Anordnung läßt sich auch dahin definieren, daß die betreffenden Atome regulär tetraëdrisch angeordnet sind, d. h. daß sie die Ecken eines regulären Tetraëders (Fig. 3) bilden, in dessen Zentrum sich das vierwertige Atom befindet, mit dem sie verbunden sind. Die soeben charakterisierten Möglichkeiten der räumlichen Anordnung werden durch folgende Figuren dargestellt:

Fig. 1.

Fig. 2.

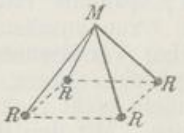
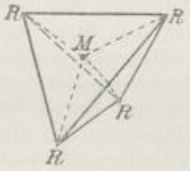


Fig. 3.



Diese räumlichen Auflösungen der strukturellen Formel MR_4 wollen wir „Konfigurationen" nennen. Die Entscheidung, welcher Konfiguration eine Verbindung von der allgemeinen Formel MR_4 entspricht, muß sich durch Untersuchung der Isomerieerscheinungen bei ihren Derivaten, z. B. bei solchen der Formel $M\begin{smallmatrix}X_2\\R_2\end{smallmatrix}$ entscheiden lassen. Aus der ersten und aus der zweiten Konfiguration lassen sich für Verbindungen $M\begin{smallmatrix}R_2\\X_2\end{smallmatrix}$ je zwei Lagerungsmöglichkeiten (Fig. 4 u. 5, Fig. 6 u. 7) ableiten, die als Isomerie in Erscheinung treten müssen, hingegen ergibt die dritte Konfiguration (Fig. 8) bei solchen Disubstitutionsprodukten keine räumlich verschiedene Lagerungen:

Fig. 4.

Fig. 6.

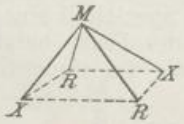


Fig. 8.

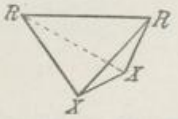
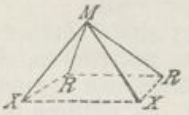


Fig. 5.

Fig. 7.



Für Moleküle M a b c d lassen sich, bei ebener Anordnung der vier mit dem Zentrumatom verbundenen Gruppen, 3 Isomere erwarten, die in folgenden Symbolen ihren Ausdruck finden:

```
   a          a          a
   |          |          |
b—M—c,     b—M—d,     c—M—d
   |          |          |
   d          e          b
```

Aus der Tetraëderformel ergeben sich dagegen für Substitutionsprodukte von der Formel: M a b c d, zwei Konfigurationsmöglichkeiten, welche sich verhalten wie Bild und Spiegelbild, die nicht deckbar sind:

Fig. 9.

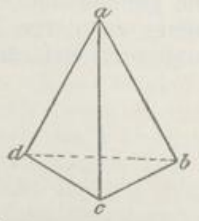
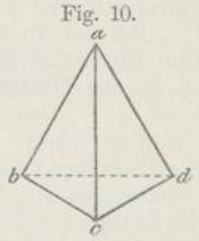


Fig. 10.



Ein derart gebautes Atomsystem M a b c d, aus einem Zentrumatom und vier verschiedenen, tetraëdrisch angeordneten Radikalen bestehend, welches, wie die Figuren zeigen, in zwei Formen auftreten kann, wollen wir „asymmetrisches Tetraëdersystem“ nennen. Je nach der Natur des Zentrumatoms und je nach dem Grad der Verschiedenheit der mit ihm verbundenen Radikale werden sich spezielle Fälle solcher asymmetrischer Tetraëdersysteme unterscheiden lassen, und dementsprechend werden verschiedene Arten von Isomerien bestehen können. Dies ist in der Tat der Fall, und die bezüglichen Isomerien zeigen, wie wir später sehen werden, in ihrem Wesen so mannigfaltige Variationen, daß man, ohne die theoretische Grundlage, oft kaum an eine nähere Beziehung zwischen ihnen gedacht hätte.

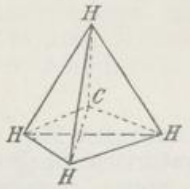
b) Vergleich der aus den verschiedenen Raumformeln abgeleiteten Folgerungen mit den an Kohlenstoffverbindungen beobachteten Isomerieerscheinungen.

(Konfigurationsformel des Methans.)

Während bei den Verbindungen des Platins $Pt\,{}^{(NH_3)_2}_{X_2}$ Isomerien aufgefunden worden sind, die den aus einer der beiden ersten Konfigurationen (Fig. 1 u. 2) abzuleitenden Raummöglichkeiten entsprechen, ist bei den Kohlenstoffverbindungen $C{}^{R_2}_{X_2}$ bis jetzt keine Andeutung für die Existenz solcher Isomerien vorhanden. Auch andere Folgerungen, die sich bei ebener Anordnung der vier mit dem Zentrumatom verbundenen Gruppen ergeben, finden bei den Kohlenstoffderivaten keine Bestätigung. Da alle oben erörterten, in der Kohlenstoffchemie nicht bestätigten Folgerungen verschwinden, wenn man die regulär-tetraëdrische Konfiguration annimmt, so ist der Schluß zu ziehen, daß die tatsächlichen Isomerieverhältnisse der Kohlenstoffverbindungen viel mehr denjenigen entsprechen, die bei tetraëdrischer Verteilung der Gruppen um das Kohlenstoffatom vorauszusehen sind, und hieraus

ist zu folgern, daß für die Kohlenstoffverbindungen die tetraëdrische Lagerung die wahrscheinlichste ist. Diese Auffassung wird durch folgende Betrachtungen unterstützt, welche zeigen, daß bestimmte andere Tatsachen mit den Folgerungen aus der Tetraëderformel übereinstimmen. Eine der bekanntesten Isomeriearten, die auf ein „asymmetrisches Tetraëdersystem“ zurückgeführt werden kann, liegt in der schon bei sehr einfachen Kohlenstoffverbindungen der Formel C a b c d auftretenden optischen Isomerie vor. Es ist das Verdienst von VAN'T HOFF und LE BEL, gezeigt zu haben, daß diese Isomerien, die für die Kohlenstoffverbindungen außerordentlich charakteristisch sind, durch Zurückführung auf ein asymmetrisches Kohlenstoff-Tetraëdersystem eine einfache Erklärung finden können. Sie stellten infolgedessen die Hypothese auf: „Die vier an das Kohlenstoffatom gebundenen Atome sind um dasselbe in der Stellung der Ecken eines regulären Tetraëders gelagert, d. h. das Methan hat folgende Konfigurationsformel“:

Fig. 11.



Die Annahme, daß die Wasserstoffatome im Methan regulär-tetraëdrisch angeordnet seien, stützt sich somit auf zwei verschiedene experimentelle Grundlagen, nämlich: 1) auf die Abwesenheit von strukturell nicht erklärbaren Isomerien bei Verbindungen der allgemeinen Formel $M^{R_2}_{X_2}$, resp. auch auf das Nichtauftreten der bei ebener Formulierung zu erwartenden Isomerien bei Verbindungen C a b c d; 2) auf die Existenz von zwei isomeren Formen von besonderer Art bei Verbindungen C a b c d. Die von VAN'T HOFF und LE BEL aufgestellte Hypothese führt, wenn sie auf höhere Substitutionsprodukte des Methans angewendet wird, nicht nur bei Verbindungen C a b c d, sondern auch bei anderen Kohlenstoffverbindungen, wie z. B. bei solchen mit mehreren Kohlenstoffatomen oder bei ringförmig konstituierten und bei ungesättigten, zu zahlreichen neuen theoretischen Folgerungen, deren Prüfung an den Tatsachen uns zeigen wird, daß die gemachte Annahme durch das Experiment in noch weitgehenderem Maße bestätigt wird.

c) Vorstellungen über die Ursache der tetraëdrischen Lagerung.

Nehmen wir die Hypothese von der tetraëdrischen Lagerung an, so werden wir uns auch die Frage stellen, welcher Ursache die tetraëdrische Lagerung der mit dem Kohlenstoffatom verbundenen Radikale zuzuschreiben ist. VAN'T HOFF und LE BEL haben diesbezüglich verschiedene Ansichten geäußert, die in kurzen Zügen folgendermaßen charakterisiert werden können.

1) Erklärung von VAN'T HOFF.

VAN'T HOFF, der Entwickelung folgend, welche den Begriff der Valenzzahl zu einer Summe von Einzelkräften (Valenzeinheiten) ausge-

staltete, erblickte die Ursache der tetraëdrischen Gruppierung der Atome in einer tetraëdrischen Anordnung der Valenzeinheiten des Kohlenstoffatoms. Dies wurde in dem Satze ausgedrückt: Die vier Affinitäten des Kohlenstoffatoms sind gegen die Ecken eines Tetraëders gerichtet, dessen Zentrum von dem Kohlenstoff selbst eingenommen wird. Die VAN'T HOFFsche Annahme führt, wie AUWERS[1]) hervorgehoben hat, zu folgenden Konsequenzen. Nach der gegebenen Definition erscheint das Kohlenstoffatom als ein materieller Punkt, von dem, symmetrisch angeordnet, nach vier Richtungen des Raumes, vier Kräfte ausgehen. Diese punktartige Natur des Kohlenstoffatoms führt jedoch für die doppelte Bindung zweier Kohlenstoffatome zu folgendem Schema:

wonach zwei Paare von Kräften zwischen zwei Punkten, statt in der Richtung der die beiden Punkte verbindenden Geraden zu wirken, sich unter einem Winkel im Raume schneiden. Es würden also hiernach, wie schon LOSSEN[2]) bemerkt hat, nicht nur die Atome, sondern auch die Valenzen der Atome eine Lage im Raume haben. Eine Wirkungsweise von Kräften in der eben angegebenen Weise ist aber nicht denkbar und die Annahme, daß die beiden Kräfte sich zu einer Resultierenden summieren, führt bei ungesättigten Verbindungen (Aethylenkörpern) zu Konsequenzen, die nicht mehr vereinbar sind mit den Tatsachen.

Man wird infolgedessen gezwungen, die Atome mit endlicher Ausdehnung anzunehmen und die Frage zu prüfen, inwiefern die räumliche Gestaltung der Atome u. s. w. die tetraëdrische Verteilung der Valenzen bedingt. Es erscheint aber dann die Annahme tetraëdrischer Verteilungen der Valenzen nicht mehr als Erklärung für die Ursache der tetraëdrischen Anordnung der Atome um das Kohlenstoffatom, sondern vielmehr als ein anderer Ausdruck für dieselbe Frage, denn es wird nun zu beantworten sein, welchen Eigenschaften des Kohlenstoffatoms es zuzuschreiben ist, daß die vier Valenzeinheiten desselben in den relativen Ecken eines Tetraëders zur Wirkung kommen. Hierauf eine Antwort zu finden, ist sehr oft versucht worden und zwar in den meisten Fällen auf Grund von Hypothesen über die Gestalt des Kohlenstoffatoms.

2) Hypothesen über die Gestalt des Kohlenstoffatoms.

Der erste, der in engem Anschluß an die Valenzlehre Vorstellungen über die Gestalt des Kohlenstoffatoms entwickelte, war WUNDERLICH. Nach seinen Ausführungen ist das Atom ein mit Masse angefülller endlicher Raum, an dem besondere Stellen zu unterscheiden sind, Bindestellen, die die Vereinigung der Atome vermitteln. Die Form der Atome und ihrer Bindestellen ist unbekannt, aber die gegenseitige Lage der Bindestellen, resp. der sogenannten Bindeschwerpunkte, bestimmbar. Die Zahl der vorhandenen Bindestellen entspricht der Wertigkeit. Im Kohlenstoffatom befinden sich die Bindeschwerpunkte in den Ecken eines Tetraëders. Als Form des Kohlenstoffatoms würde neben vielen anderen z. B. eine homogene Kugel genügen, von der vier gleich große Segmente abgeschnitten wären, so daß jede der

1) Die Entwickelung der Stereochemie, p. 23.
2) Ann. **204**, 336 (1880); Berl. Ber. **20**, 3306 (1887).

vier entstehenden Kreisflächen zu den drei anderen gleiche Lage hätte und eine Bindestelle repräsentierte. Zwei mit einer Fläche aneinander gelegte coupierte Kugeln würden die einfache Bindung darstellen. AUWERS[1]) hat die Konsequenzen aus diesen Vorstellungen in Bezug auf die Bindefestigkeit der Valenzen rechnerisch verfolgt.

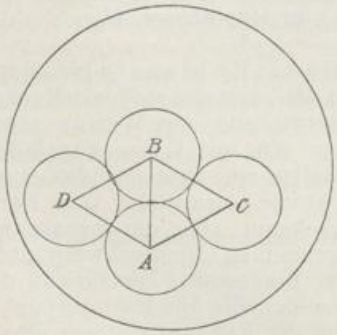
Die Annahme verschiedener Teile eines Atoms verliert nach J. WISLICENUS von ihrer Gewagtheit, wenn man die Elementaratome aus mehreren Urelementaratomen zusammengesetzt denkt. Er hat die Hypothese aufgestellt, daß das Kohlenstoffatom einem regulären Tetraëder vielleicht sehr ähnlich sei und daß möglicherweise die Ursachen jener Wirkungen, welche in den Affinitätseinheiten zur tatsächlichen Erscheinung kommen, sich in den Ecken eines tetraëdrischen Gebildes konzentrieren.

Noch zahlreiche andere Variationen über die Gestalt des Kohlenstoffatoms resp. über die für die Auffassung der Gestalt des Kohlenstoffatoms maßgebende Bedeutung der ein Tetraëder zusammensetzenden Elementarteile sind seitdem entwickelt worden, z. B. von SACHSE[2]), von KNORR[3]), von ERLENMEYER jun.[4]) und anderen. In Bezug auf die Zerlegung des Kohlenstoffatoms in vier kugelförmige Valenzkörper nach KNORR mag darauf hingewiesen werden, daß die Uebertragung der Vorstellung auf Elemente mit wechselnder Valenz zu kaum annehmbaren Konsequenzen führt. Wir verzichten hier auf die Wiedergabe der verschiedenen Hypothesen über die Gestalt des Kohlenstoffatoms, weil sie in unseren späteren Betrachtungen keine Rolle spielen werden.

3) Erklärung von LE BEL[5]).

Im Gegensatz zu den bis jetzt charakterisierten Erklärungsversuchen für die tetraëdrische Verteilung der Radikale, die das Hauptgewicht auf die Gestalt des Kohlenstoffatoms legen, verwendet LE BEL zur Erklärung nur allgemeine mechanische Grundlagen, die kurz angedeutet werden mögen. Die gegenseitige Annäherung der Atome muß bei einer bestimmten Entfernung zu Ende kommen, und zwar können wir annehmen, daß dies geschieht, wenn sich zwischen den Atomen bei weiterer Annäherung abstoßende Kräfte geltend machen. Die Fläche, auf der diese abstoßenden Kräfte zur Wirkung kommen, können wir als Oberfläche einer Repulsivsphäre betrachten, die wir bei den Atomen von Kugelgestalt annehmen können.

Fig. 12.



Die vier Atome, welche sich mit dem Kohlenstoffatom vereinigen, werden sich demselben so weit nähern, bis sich die Attraktions- und Repulsivkräfte Gleichgewicht halten. Aehnliche anziehende und abstoßende Wirkungen werden auch zwischen den vier Atomen, die an das Kohlenstoffatom gekettet sind,

1) Die Entwickelung der Stereochemie, p. 31 ff.
2) Berl. Ber. **21**, 2530 (1888).
3) Ann. **279**, 202 (1894).
4) Ann. **316**, 61 (1900).
5) Bull. Soc. chim., 1892.

zur Geltung kommen, d. h. dieselben werden sich durch ihre Repulsivsphären in bestimmter Entfernung halten.

Nehmen wir nun an, daß diese Repulsivsphären der Atome so groß seien, daß die Entfernung ihrer Zentren ein Dreieck A B C ergeben, welches gleich sei der Fläche eines der Atomsphäre des Kohlenstoffes eingeschriebenen Tetraëders, so ergibt sich die tetraëdrische Anordnung als Endgleichgewichtslage des Atomsystems.

Diese von Le Bel entwickelte Vorstellung besticht durch ihre Einfachheit und bietet den großen Vorteil, keine Hypothesen über die Natur der Valenzen, die Gestalt der Atome u. s. w. zu gebrauchen; sie ist infolge ihrer freieren Auffassung der Verhältnisse den vorher entwickelten Vorstellungen bestimmt überlegen.

4) Erklärung von A. Werner.

Eine Mittelstellung zwischen den oben charakterisierten, entgegengesetzte Standpunkte repräsentierenden Erklärungsarten nimmt eine Auffassung ein, die A. Werner entwickelt hat. Dieselbe kann folgendermaßen wiedergegeben werden.

Das Atom wird als ein bestimmter Raumteil einheitlicher Materie, der Einfachheit halber kugelförmig gedacht und bezüglich der Affinität folgende einfache Annahme als Basis der Entwickelungen verwendet: Die Affinität ist eine vom Zentrum des Atoms gleichmäßig nach allen Teilen seiner Kugeloberfläche wirkende anziehende Kraft.

Aus dieser Auffassung der Affinität folgt notwendig, daß gesonderte Valenzeinheiten nicht bestehen. Die Valenz bedeutet ein von Valenzeinheiten unabhängiges, empirisch gefundenes Zahlenverhältnis [1]), in welchem sich die Atome miteinander verbinden und welches nicht von einem Atom allein, sondern von der Natur sämtlicher Elementaratome, die sich zum Molekül vereinigen, abhängig ist.

Die Tatsachen lehren uns, daß das Kohlenstoffatom mit vier anderen Atomen direkt verbunden sein kann.

Zur Bindung jedes der vier fremdartigen Atome wird ein bestimmter Affinitätsbetrag des Kohlenstoffatoms verwendet werden. Derselbe ist, wenn wir auch diese Atome kugelförmig annehmen, auf einem bestimmten kreisförmigen Teil der Kugeloberfläche (Projektionsfläche) des Kohlenstoffatoms verteilt, welcher, der Einfachheit halber, als Bindefläche bezeichnet werden kann.

Stellt man sich nun vor, daß die Summe der Durchmesser der vier Bindeflächen größer sei als der Umfang des Kohlenstoffatoms, so werden die vier an das Kohlenstoffatom gebundenen Atome in der größten Ringebene des Kohlenstoffatoms keinen Platz finden. Hierdurch werden sie, wenn eine möglichst vollkommene Absättigung der Affinität stattfinden soll, d. h. wenn vier Bindeflächen sich gegenseitig nicht teilweise decken sollen, räumliche Stellungen einnehmen müssen: diejenige räumliche Lage, die den größten Raum bietet und infolgedessen die Endgleichgewichtslage sein wird, ist die reguläre Tatraëderlage. Zusammengefaßt nimmt die Erklärung folgende Form an: Wenn die mit dem Kohlenstoffatom verbundenen Atome in der größten Ringebene desselben keinen Platz finden, so werden sie sich räumlich anordnen müssen, wodurch sich die Tetraëderlage ergibt.

---

1) Dem Einwurf, daß durch die Annahme von Valenzeinheiten die Zahlenverhältnisse, in welchen die Atome sich miteinander verbinden, erklärt werden, ist entgegenzuhalten, daß eine derartige Vorstellung keine Erklärung, sondern nur eine Umschreibung dieser Erscheinung bedeutet.

Welche Erklärung man vorzieht, kommt für die weitere Entwickelung der stereochemischen Probleme zunächst nicht in Betracht; wir können deshalb im folgenden, auch ohne Berücksichtigung der für die Ursache der tetraëdrischen Lagerung möglichen Anschauungen, diese tetraëdrische Lagerung als Grundlage für unsere stereochemischen Betrachtungen verwenden.

Zweites Kapitel.

Die optisch-aktiven Kohlenstoffverbindungen mit asymmetrischen Kohlenstoffatomen.

A. Das asymmetrische Kohlenstoffatom.

1. Allgemeine Charakteristik der optisch-aktiven Verbindungen.

Eine merkwürdige Eigenschaft, durch die sich gewisse Kohlenstoffverbindungen auszeichnen und für die in den Strukturformeln keine Erklärung gefunden werden kann, ist die Wirkung, die sie auf einen polarisierten Lichtstrahl ausüben und die sich in der Weise zeigt, daß sie dessen Polarisationsebene um einen bestimmten Winkel zu drehen vermögen. Man bezeichnet solche Substanzen als optisch-aktive. Die soeben hervorgehobene Eigenschaft gewisser Substanzen, die Ebene des polarisierten Lichtstrahls zu drehen, war schon lange bekannt, bevor sie auf dem Gebiete der Kohlenstoffchemie zur Entwickelung raumchemischer Betrachtungen führte. Sie wurde zuerst von Biot am Quarz beobachtet. Es stellte sich jedoch bald heraus, daß man zwei verschiedene Klassen optisch-aktiver Substanzen unterscheiden muß. Die einen zeigen die beschriebene Eigenschaft nur in kristallisiertem Zustande und verlieren dieselbe durch Zerstörung der Kristallgestalt, während die anderen sie auch in flüssigem oder gelöstem, ja sogar in gasförmigem Zustande beibehalten. Der Unterschied, den die beiden Gruppen optisch-aktiver Verbindungen in Bezug auf Aktivität zeigen, kann durch folgende Tatsachen illustriert werden.

Quarz, in Alkali gelöst und durch Säuren als amorphe Kieselsäure gefällt, zeigt kein optisches Drehungsvermögen mehr. Das in festem Zustande aktive Natriumchlorat verliert seine Aktivität beim Auflösen in Wasser, und in gleicher Weise verhalten sich Natriumbromat, Ammoniumlithiumsulfat und andere Salze [1]).

Dagegen sind die Verbindungen der zweiten Klasse auch in flüssigem Zustande optisch-aktiv. Limonen, Pinen, Kampfer und zahlreiche andere Substanzen zeigen in flüssigem und gelöstem Zustande Drehungsvermögen, Pinen sogar in Gasform.

Bei den Verbindungen der ersten Art erscheint die Eigenschaft somit als eine Folge der Kristallstruktur, während sie bei den letzteren auf intramolekulare Ursachen zurückzuführen ist, denn in gelöstem und gasförmigem Zustande sind die betreffenden Verbindungen monomolekular.

Zu der zweiten Klasse der soeben charakterisierten optisch-aktiven Substanzen gehört die große Mehrzahl der auf die Polarisationsebene

---

1) Siehe Landolt, Das optische Drehungsvermögen, p. 9.